Josip Slisko

Física 1

El GIMNASIO de la MENTE

Competencias para la vida

2ª edición

PEARSON

BACHILLERATO GENERAL

Física 1

El GIMNASIO de la MENTE

Competencias para la vida

La fotografía de la portada presenta a los Voladores de Papantla, uno de los más famosos espectáculos turísticos de México. Los estudiantes exploran la física relacionada con esa celebración de la cultura prehispánica en la actividad de aprendizaje "El movimiento circular de los Voladores de Papantla" en la página 184.

Física 1

El GIMNASIO de la MENTE

Competencias para la vida

Segunda edición

Josip Slisko

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Revisión técnica

Dr. Raúl Brito Orta

Prentice Hall

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

**Física 1. El gimnasio de la mente,
competencias para la vida.**

SLISKO, JOSIP

Segunda edición

Pearson Educación, México, 2010

ISBN: 978-607-32-0101-8

Área: Ciencias

Formato: 21 × 27 cm Páginas: 320

Editor: Enrique Quintanar Duarte
e-mail: enrique.quintanar@pearson.com
Editor de desarrollo: Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción: Gustavo Rivas Romero

SEGUNDA EDICIÓN VERSIÓN IMPRESA, 2010
PRIMERA EDICIÓN E-BOOK, 2010

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031

ISBN LIBRO IMPRESO: 978-607-32-0101-8
ISBN E-BOOK: 978-607-32-0102-5
ISBN E-CHAPTER: 978-607-32-0103-2

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 13 12 11 10

Prentice Hall
es una marca de

PEARSON

www.pearsoneducacion.net **ISBN: 978-607-32-0101-8**

Dedicatoria

Dedico este libro a las personas más queridas:

A mi madre Ljubica y mi padre Andrija, quienes me dieron la vida e hicieron un gran sacrificio para proporcionarme una educación de calidad.

A mi esposa Jesenka y mi hijo Javor, quienes dan sentido a mi vida y la llenan de alegría.

Contenido

Acerca del autor

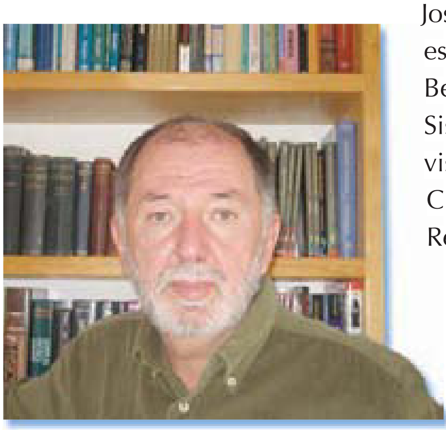


Foto Jesenka Slisko

Josip Slisko, originario de Bosnia y Herzegovina y doctor en ciencias filosóficas, es profesor–investigador de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (desde 1991) y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (desde 1994). Fue profesor e investigador visitante y conferencista invitado en Alemania, Argentina, Bosnia y Herzegovina, Croacia, Cuba, Eslovenia, España, Estados Unidos, Finlandia, Italia, Polonia y Reino Unido.

El campo de investigación de Josip Slisko está constituido por las dificultades que enfrentan los estudiantes al "hacer física" o al tratar de aprender física leyendo un libro de texto, y la ayuda que les puede brindar la enseñanza para superarlas. Algunas preguntas a las que busca respuestas científicas son: ¿De qué manera elaboran los estudiantes sus esquemas explicativos y predictivos sobre los fenómenos físicos? ¿Qué estrategias usan los estudiantes al resolver problemas con errores intencionales? ¿Reconocen los estudiantes las incoherencias y errores en un texto sobre física? ¿Cuáles son las estrategias didácticas que promueven el aprendizaje significativo y la superación de los esquemas superficiales?

Últimamente está comprometido con el desafío de usar los temas de física para diseñar múltiples situaciones de aprendizaje en que se promueve sistemáticamente "la gestión personal de aprendizaje", es decir, la competencia crucial para el exitoso trabajo profesional en la economía basada en el conocimiento. El proyecto educativo *Física. El gimnasio de la mente*, de Pearson Educación, es una oportunidad excelente para explorar ese camino en la enseñanza de la física.

Josip Slisko es autor de dos libros de texto de física para secundaria, titulados *Física. El encanto de pensar*, publicados por Pearson Educación, y es autor o coautor de un centenar de artículos en revistas nacionales e internacionales.

Fue el consultor pedagógico para la octava edición del libro de texto *Conceptual Physics* de Paul G. Hewitt. Coordinó el equipo que realizó la versión española de la *Videoencyclopedia of Physics Demonstrations* que contiene 600 demostraciones de física en 25 DVD. Fue el coordinador estatal del proyecto "La ciencia en tu escuela" de la Academia Mexicana de Ciencias y la Secretaría de Educación Pública del estado de Puebla, cuyo objetivo era capacitar a los maestros, tanto en el contenido como en las estrategias didácticas, para que pudieran impartir una mejor enseñanza de las ciencias y las matemáticas en los niveles de primaria y secundaria.

Josip Slisko es miembro del Foro Consultivo Internacional de la revista *Physics Education* y del Consejo Editorial de la revista *Latin American Journal of Physics Education*. Es el presidente del comité organizador del Taller Internacional "Nuevas Tendencias en la Enseñanza de la Física", que se lleva a cabo cada último fin de semana en mayo (desde el 1993); los ponentes invitados suelen ser los más destacados expertos en la enseñanza de la física (http://www.fcfm.buap.mx/eventos/taller).

Está felizmente casado con Jesenka Slisko con quien tiene un hijo, Javor. En el tiempo libre, junto con su esposa, escucha música, hojea revistas sobre casas de campo y libros de gastronomía (y disfruta las recetas más llamativas). A la familia Slisko le encanta viajar, tanto por México como por el extranjero, para conocer nuevos paisajes, personas interesantes y diferentes estilos de vida. Su lema favorito es: Si el mundo es un libro, quien no viaja siempre está en la primera página.

Prólogo

Para los estudiantes

En la actualidad, las habilidades de pensamiento científico no son únicamente herramientas indispensables para el trabajo exitoso de los científicos, sino que tales habilidades también se vuelven necesarias como parte de las competencias genéricas, no tan sólo de los profesionistas sino de todos los ciudadanos de las sociedades modernas. La economía basada en el conocimiento y la democracia participativa no pueden funcionar bien ni perfeccionarse continuamente sin trabajadores y ciudadanos capaces de pensar creativa y críticamente sobre los problemas que enfrentan.

En el año 2000, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) comenzó a realizar el proyecto Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes, mejor conocido como PISA (por las siglas de *Program for International Student Assessment*). El título del proyecto es muy llamativo: Conocimiento y Habilidades para la Vida y en él se evalúan los conocimientos y las habilidades de los jóvenes de 15 años en cuanto a lectura, matemáticas y ciencias, las cuales les serán necesarias para enfrentar los retos de la vida moderna.

Lo esencial en las habilidades científicas que se evalúan en el proyecto PISA es la capacidad de usar los conceptos y los procesos de pensamiento científico en diversos contextos (el trabajo, la comunidad, el tiempo libre), con propósitos diferentes de los que se aprendieron en la escuela. Se sostiene que es necesario que los estudiantes de 15 años de edad sean capaces de:

- Reconocer si una pregunta puede tener una respuesta científica o no.
- Identificar la evidencia necesaria en una investigación científica.
- Obtener y evaluar conclusiones con criterios científicos.
- Comunicar conclusiones científicas.
- Demostrar entendimiento de conceptos, leyes y teorías científicos.

En el año 2003, aparte de las habilidades lectoras, matemáticas y científicas, se evaluaron explícitamente las habilidades para la resolución de problemas. El tipo de problemas fueron:

- Toma de decisiones.
- Análisis y diseño de sistemas.
- Detección de fallas.

Aunque este tipo de problemas son muy frecuentes en el trabajo profesional y en la vida personal, casi no existen en la práctica escolar.

Los resultados de los estudiantes mexicanos, según los cuatros reportes PISA (2000, 2003 y 2006) no son satisfactorios. En consecuencia, lo que no se logró en la secundaria hay que buscar recuperarlo en el bachillerato. El nuevo Plan de Estudio de Bachillerato General, enfocado en las competencias genéricas y disciplinarias, es una respuesta institucional a esa responsabilidad social.

El curso *Física 1. El gimnasio de la mente* brinda a los estudiantes de bachillerato la oportunidad de conocer, practicar y perfeccionar las competencias que serán indispensables para tener éxito en la futura vida profesional y personal.

Hay muchos argumentos para sostener que el éxito en esa vida futura depende críticamente de:

1. La capacidad de analizar, razonar y comunicar ideas propias de manera efectiva.
2. La preparación y la disposición de continuar aprendiendo a lo largo de la vida.

Dicho de otra manera, el estudiante debe ser capaz de fortalecer, cada vez más, sus competencias genéricas y disciplinarias, mejorando así su *gestión personal de aprendizaje*.

En esa gestión, el aprendizaje tiene que ser autorregulado, desde el planteamiento de objetivos y metas, hasta la reflexión sobre lo aprendido.

En el mercado de libros para autoformación hay muchos títulos que ofrecen ejercicios para ejercitar el cerebro ("gimnasia cerebral"). Si puedo usar la analogía con la computadora, diría que este tipo de libros trata de mantener "el hardware" (el cerebro) en forma. En cambio, mi libro pretende que los estudiantes, gracias a sus propios esfuerzos, desarrollen "el software" (la mente) en la dirección que requiere el desarrollo de las competencias genéricas y disciplinarias.

Es cierto que los rompecabezas con letras y números ayudan a "activar" el cerebro y ofrecen una diversión intelectual en los ratos libres. Sin embargo, con esas actividades las personas no pueden perfeccionar las habilidades de pensamiento científico ni, mucho menos, volverse expertas en el aprendizaje autorregulado. Para ese fin, se necesitan problemas estructuralmente similares a aquellos que los científicos resolvían o resuelven en su práctica auténtica, como son, por ejemplo, los problemas de descripción, explicación o predicción de fenómenos científicos.

Si después de terminar el curso *Física 1. El gimnasio de la mente*, los estudiantes sienten que son más hábiles en el manejo de sus ideas y sus razonamientos, que saben más acerca de qué son y cómo funcionan el mundo material, la física y el aprendizaje de la física, qué papel juega la tecnología en la sociedad y qué impactos tiene en el medio ambiente, los esfuerzos invertidos al escribir este libro se premiarán de la manera más generosa posible.

Para los maestros

Este libro es el resultado de mi interpretación personal del nuevo Plan de Estudios del Bachillerato General, que está enfocado en las competencias genéricas y disciplinarias.

Aunque he intentado seguir las ideas curriculares de manera fiel, tuve que tomar, con toda la responsabilidad, varias decisiones difíciles al introducir algunos cambios, cuando los detalles del currículum estaban en desacuerdo ya fuera con el espíritu del enfoque basado en competencias o con la lógica de la física.

La presencia de todo tipo de errores y la ausencia de algunos elementos importantes indican que el nuevo currículum, en el caso de la asignatura *Física 1*, se hizo de manera apresurada, dejando varios elementos inconclusos. Es claro que esa situación no favorece la calidad de la implementación y que la principal tarea de los maestros y de los autores de libros de texto es interpretar pedagógicamente el currículum, para que el desarrollo adecuado de las competencias sea posible en las aulas.

En lo que sigue, voy a presentar mis razones por los cambios que a mí me parecían necesarios y que están presentes en el libro de texto *Física 1. El gimnasio de la mente*.

1. Los títulos de bloques y temas

Los bloques del curso se introducen de la siguiente manera:

> "Bloque 1 Relaciona el conocimiento científico y las magnitudes físicas como herramientas básicas para entender los fenómenos naturales.
> Bloque 2 Identifica las diferencias entre los distintos tipos de movimientos.
> Bloque 3 Comprende la utilidad práctica de las leyes del movimiento de Isaac Newton.
> Bloque 4 Relaciona el trabajo con la energía."

Esta forma, aunque no es la más idónea, se puede aceptar cuando se trata de narrar brevemente sobre el contenido de cada bloque.

Sin embargo, desde mi punto de vista, no es posible usar, por ejemplo, la frase "Identifica las diferencias entre los distintos tipos de movimientos" como el título del bloque 2. Por ello, el bloque 2 en mi libro tiene el título tradicional, que es mucho más informativo: "Movimiento en una y dos dimensiones".

Se hicieron cambios similares en el título de cada bloque y en varios temas.

Con mucho orgullo destaco que este libro de texto es el único que tiene un tema completo dedicado a las competencias y su importancia en el mundo actual. Por cierto, el Plan de Estudios no contempla ese tema.

Estoy más que seguro de que es indispensable que los estudiantes mismos tendrán una oportunidad de saber qué está detrás de todo este discurso actual sobre competencias. Si los alumnos no están convencidos de que su futuro depende del dominio de las competencias, todos los esfuerzos de los maestros y de las escuelas por promoverlas quizá resulten infructuosos. Solamente los estudiantes convencidos en la importancia de las competencias tendrán las ganas de conocerlas de cerca e integrarlas dentro de sus metas personales de aprendizaje.

2. Las competencias y su clasificación

En el Plan de Estudios se habla de muchas competencias y se corre un peligro real de perder de vista que la finalidad esencial del campo de ciencias experimentales es que:

> "el estudiante conozca y aplique los métodos y procedimientos de las ciencias experimentales para la resolución de problemas cotidianos y la compresión racional de su entorno, mediante procesos de razonamiento, argumentación y estructuración de ideas que conlleven el despliegue de distintos conocimientos, habilidades, actitudes y valores, en la resolución de problemas que trasciendan el ámbito escolar."

En el currículum no se demuestra de qué manera de esta finalidad bien concisa surgen explícitamente tantas competencias disciplinarias y genéricas.

Aparte de los cambios necesarios en sus formulaciones, para poner cierto orden en el universo de las competencias, consideré necesario dividir éstas en grupos.

Para las competencias disciplinarias, los tres grupos son:

1. Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente.
2. Formular y resolver problemas científicos.
3. Aplicar la ciencia en la vida cotidiana.

Las competencias genéricas se dividieron en:

1. Dominar los medios de la comunicación científica.
2. Dominar los elementos básicos del pensamiento científico.
3. Evaluar información de manera crítica.
4. Autorregular el propio aprendizaje.
5. Saber aprender y trabajar en equipo.

Creo que estas divisiones permiten ver, con más claridad, en qué consiste el enfoque basado en competencias en la asignatura de la física.

3. Las competencias y su implementación en el aula

Mientras el Plan de Estudios es abundante en el número de competencias, causando cierto "caos curricular", es completamente mudo cuando se trata de definirlas y ejemplificarlas. Al escribir el libro de texto *Física 1. El gimnasio de la mente* hice un esfuerzo considerable por remediar tales deficiencias.

En primer lugar, todos los grupos de las competencias, tanto disciplinarias como genéricas, se complementaron con las definiciones y aclaraciones. Además, para cada grupo se proporcionaron ejemplos ilustrativos.

Las competencias no se quedaron únicamente en la parte introductoria, sino que se integraron de manera explícita en todas actividades para los estudiantes. Dicho de otro modo, en cada actividad se indica explícitamente cuáles son las competencias que se practican en ella.

También, los rubros expositivos, como son, por ejemplo, "Problema resuelto" o "Física en la vida cotidiana", se usan para ejemplificar las competencias importantes.

La parte de evaluación, llamada "Demostrar las competencias", cierra este ciclo de implementar las competencias de manera explícita, y está estructurada de manera que quede claro cuáles son las competencias que se evalúan.

Estoy muy consciente de que la verdadera batalla al implementar las competencias la libran las maestras y los maestros en las aulas, y que es allí donde mi libro de texto debe pasar su prueba de fuego decisiva.

Por ello, solicito que quienes decidieron usar este libro en tal batalla importante compartan conmigo todas sus "alegrías y penas pedagógicas". Estoy sinceramente interesado en conocer sus experiencias relacionadas, tanto las buenas, en que lo propuesto en el libro funcionó bien, como las malas, en que las actividades del libro fallaron completa o parcialmente. Agradezco de antemano su confianza y todo su apoyo, y prometo ayudarles con aclaraciones y consejos cuando surjan dudas con respecto a alguna parte del libro.

Deseando que ese prólogo sea el comienzo de nuestra colaboración que resultará en una edición mejorada de *Física 1. El gimnasio de la mente*, les deseo mucho éxito en la implementación del nuevo Plan de Estudios del Bachillerato General.

Josip Slisko
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
jslisko@fcfm.buap.mx

BLOQUE 1

El conocimiento científico y el entendimiento de los fenómenos físicos

Unidad de competencia

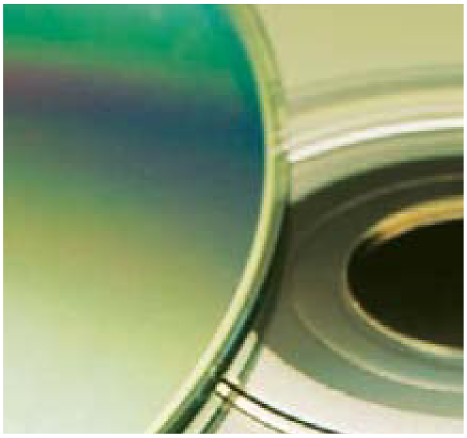
1. Utilizar los métodos necesarios, así como las magnitudes fundamentales derivadas, escalares y vectoriales que permiten comprender conceptos, teorías y leyes de la física, para explicar los fenómenos físicos que ocurren a nuestro alrededor.

Indicadores de desempeño

- ✔ Analizar e interpretar los conceptos de la física, y relacionarlos con los fenómenos que ocurren en la naturaleza.
- ✔ Comunicar de forma verbal y escrita información relativa a la aplicación del método científico, en la solución de problemas de cualquier índole.
- ✔ Expresar la diferencia entre magnitudes fundamentales y derivadas.
- ✔ Comprobar el uso adecuado de las diferentes magnitudes y su medición mediante diversos instrumentos de medición.
- ✔ Describir las características y aplicaciones de las cantidades vectoriales en nuestro entorno.
- ✔ Aplicar las funciones trigonométricas, así como los métodos gráfico y analítico en la solución de problemas en nuestro entorno.

Los temas del bloque

1. Competencias disciplinarias y genéricas
2. Describir, explicar y predecir los fenómenos físicos.
3. Las magnitudes físicas y su medición
4. Vectores



Conocimientos

- ✔ Identificar y comprender los prefijos usados en el sistema internacional (SI).
- ✔ Identificar los tipos de errores en las mediciones.
- ✔ Analizar la precisión en los instrumentos de medición.
- ✔ Identificar magnitudes escalares y vectoriales.
- ✔ Identificar las características de un vector.
- ✔ Reconocer las propiedades de un vector.

Habilidades

- ✔ Comprender los conceptos básicos de la física y utilizar las herramientas necesarias (método científico, sistemas de unidades y análisis de vectores), para explicar los fenómenos físicos.
- ✔ Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.
- ✔ Expresar de manera verbal y escrita las ideas relacionadas con el avance de la física.
- ✔ Calcular suma de vectores, usando los métodos gráfico (triángulo, paralelogramo, polígono) y analítico.
- ✔ Ilustrar los conceptos con ejemplos aplicados en la vida cotidiana.
- ✔ Identificar y diferenciar los diferentes tipos de magnitudes físicas.
- ✔ Reconocer prefijos y aplicarlos en la resolución de problemas.
- ✔ Explicar la importancia de la precisión de los instrumentos de medición.
- ✔ Diferenciar los tipos de errores en la medición y analizar las formas de reducirlos.

Actitudes y valores

- ✔ Mostrar disposición por involucrarse en actividades relacionadas con la asignatura.
- ✔ Presentar disposición al trabajo colaborativo con sus compañeros.
- ✔ Valorar la importancia del intercambio de opiniones respecto a conceptos y explicaciones sobre fenómenos naturales.
- ✔ Apreciar la importancia de la investigación científica en el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

Tema 1

Competencias disciplinarias y genéricas

Propósitos del tema 1

- Presentar argumentos a favor de la idea de que la vida moderna requiere del dominio eficaz de muchos conocimientos y habilidades.
- Definir y ejemplificar las competencias disciplinarias y genéricas que se deben adquirir o practicar en la asignatura de física.

1.1. La vida, el trabajo y la educación en un mundo cambiante

La globalización económica y la modernización tecnológica están creando un mundo que no tan sólo es más diverso e interdependiente sino que, también, es más incierto y amenazante. Nadie puede predecir con certeza cómo será la vida cotidiana y cuáles serán los trabajos y las profesiones que el mercado laboral demandará dentro de 20 o 30 años.

Lo que sí es posible predecir es que esos trabajos y profesiones dependerán, mucho más que ahora, de saberes y habilidades complejos en concordancia con una economía basada en la información y el conocimiento. Se sabe, además, que la mayoría de los puestos de trabajo actuales van a desaparecer y que aquellos que se mantengan sufrirán cambios profundos, y requerirán de mayores capacidad y preparación.

Figura 1.1. Un robot industrial reemplaza a muchos trabajadores manuales en la producción del vidrio.

Los puestos de trabajo que enfrentan un riesgo creciente de desaparición son los que implican labores manuales como las que se realizan en las fábricas productoras. Estos trabajos se están transfiriendo hacia países que disponen de mano de obra increíblemente barata, como China en la actualidad, o son realizados por todo tipo de robots industriales (**Figura 1.1**).

Sería un gran error pensar en que solamente las funciones manuales sencillas están amenazadas por los avances tecnológicos. El trabajo intelectual correría la misma suerte si su naturaleza es repetitiva, y permite que sea ejecutado por las computadoras de modo más rápido, más confiable y, por supuesto, más barato.

Para vivir bien y trabajar exitosamente en un mundo cambiante, ya no bastan los conocimientos y las habilidades básicos que se ejercen de forma rutinaria. Se requieren capacidades complejas que permitan movilizar –y a menudo perfeccionar– los conocimientos y las habilidades para resolver problemas reales en tiempo real. A continuación se presentan dos ejemplos sencillos de esta tendencia que, sin duda, conoces, muy bien.

En la actualidad, para comunicarse con otras personas no basta con saber utilizar con eficacia los teléfonos celulares y las computadoras portátiles, sino que se requiere también un manejo adecuado del lenguaje hablado y escrito, así como una gestión responsable del tiempo. ¡No es lo mismo un escrito escolar que un mensaje SMS o de los que se intercambian al *chatear*! Aunque en los dos últimos casos los mensajes quebrantan a menudo las diversas normas gramaticales y de redacción, revelan, no obstante, una creatividad asombrosa para resolver el problema real de la comunicación instantánea: decir más con menos letras.

Internet ofrece una cantidad impresionante de información fácilmente accesible. La otra cara de la moneda indica que hay buenos y malos proveedores de información digital. Para aprovechar la información, se necesitan conocimientos y habilidades que permitan distinguir, con seguridad y rapidez, la información verdadera de la falsa. A quienes no son capaces de distinguirlas, ese acceso sencillo a la información de Internet podría causarles más daños que beneficios.

Los acelerados cambios del mundo actual, que afectan de manera drástica tanto las vidas personales como las formas en que se ejercen las profesiones, han activado las alarmas en muchas instituciones académicas, pues hay muchas cuestiones preocupantes, que requieren respuestas prontas y acertadas, como son:

- Si la mayoría de los puestos de trabajo de los que vivirán los estudiantes actuales todavía no se inventan, ¿de qué manera es posible prepararlos para ese mundo desconocido?
- Si durante la vida laboral será muy probable cambiar varias veces de profesión, ¿qué sentido tendría preparar a los estudiantes para una sola profesión?
- ¿Cuáles son los conocimientos y las habilidades que deben dominar los estudiantes para enfrentar con éxito los retos personales y profesionales en un mundo cambiante?

Muchos pensadores que se han dedicado a reflexionar sobre estas y otras preguntas coinciden en que la educación en todos los niveles académicos debería cultivar la capacidad de los alumnos para analizar, razonar y comunicarse efectivamente conforme se presentan, interpretan y resuelven problemas de áreas diversas. Según ellos, la mayoría de los saberes y las habilidades tradicionales, que se han cultivado y premiado en las escuelas y universidades durante mucho tiempo, ya no sirven o sirven muy poco para tal propósito.

De esta severa crítica, surge una nueva visión de la educación que busca determinar y desarrollar las *competencias* relevantes para la vida y el trabajo.

La pregunta voladora

¿Qué criterios usas tú personalmente para decidir si cierta información encontrada en Internet, usando *Google* o cualquier otro buscador, es verdadera o falsa?

Definición

Una **competencia** es la integración de habilidades, conocimientos y actitudes con la finalidad de resolver exitosamente los problemas reales en un contexto determinado.

Entonces, ser competente no significa tan sólo poseer habilidades, conocimientos y actitudes sino, sobre todo, estar decidido y ser capaz de movilizar todos estos recursos para resolver con eficacia problemas concretos.

La búsqueda del conocimiento

Las competencias de mayor demanda en el entorno profesional

El Instituto de Ingeniería del Conocimiento (**figura 1.2**) es un centro de *investigación*, *desarrollo* e *innovación* ubicado en el campus de la Universidad Autónoma de Madrid, España. Fue creado en 1989 por la *Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería del Conocimiento* (ADIC), que es una entidad sin fines de lucro fundada gracias al patrocinio del Ministerio de Industria.

Figura 1.2. El Instituto de Ingeniería del Conocimiento.

Su principal objetivo es potenciar el desarrollo en tres grandes áreas: **1.** minería de datos y conocimiento, **2.** capital humano y **3.** redes sociales.

Navega por la página del Instituto (http://www.iic.uam.es) y busca la información que te permita contestar las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son, según la visión de ese Instituto, las competencias de mayor demanda en el entorno profesional?

- ¿Cuáles de esas competencias te gustaría desarrollar y dominar? Justifica tu respuesta.

Aunque parezca una exageración, varias de las competencias laborales más valoradas las podrás comenzar a construir, practicar y perfeccionar con este curso de física. Dicho de otro modo, lo que logres aprender y hacer no únicamente te va a servir para aprobar una asignatura, sino que te va a preparar también para que logres mayores éxito y satisfacción en tu vida tanto personal como profesional.

De hecho, el objetivo fundamental del curso *Física 1. El gimnasio de la mente* es ayudarte a dominar las competencias esenciales para que encuentres más fácilmente tu lugar y tu misión dentro de la sociedad del conocimiento. La habilidad en el uso de los conocimientos existentes y la creación oportuna de nuevos conocimientos forman parte de todas las profesiones emergentes y prósperas.

1.2. Las competencias disciplinarias

La importante competencia de uso y creación de conocimientos la podrás –y deberás– construir, practicar y perfeccionar en todas las asignaturas que estás cursando en el bachillerato. Sin embargo, la asignatura de física ofrece varios retos y experiencias que son especialmente útiles como "prueba de fuego" de tus habilidades para "trabajar" con las ideas, tanto con las propias como con las de los demás.

Cuándo se trata de las ideas que tengamos acerca de los fenómenos físicos, los experimentos nos permiten distinguir cuáles de ellas son aceptables, y cuáles se tienen que modificar o rechazar. No está de más destacar que las ideas aceptables sobre los fenómenos físicos son únicamente aquellas que no contradicen los resultados de los experimentos, tanto de los que ya se han realizado como de los que podrían realizarse. Las buenas ideas permiten generar predicciones exitosas sobre los resultados de experimentos futuros.

Junto con las otras asignaturas de ciencias experimentales, la asignatura de física debe ayudar a los estudiantes a construir varias competencias disciplinarias. Para que tengas una visión inicial y global de lo que se espera de ti al respecto, aquí se presentan, comentan y ejemplifican esas competencias, clasificadas por sus similitudes, en tres grupos.

El primer grupo de competencias se podría llamar *conocer la relación entre la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente*. Las competencias particulares que forman este grupo de competencias se presentan en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Competencias disciplinarias del grupo *conocer la relación entre la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente*.

- Conocer las relaciones entre la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente en contextos históricos y sociales específicos.
- Opinar, con argumentos y una postura ética, sobre la influencia de la ciencia y la tecnología en la vida cotidiana.
- Analizar las leyes generales que rigen el funcionamiento del medio físico, así como valorar las acciones humanas de riesgo e impacto ambiental.

Para que comprendas mejor el mundo donde vives es indispensable que sepas que hay una relación dinámica entre los conocimientos científicos, sus aplicaciones tecnológicas, y los cambios que los avances tecnológicos causan en la sociedad y en el medio ambiente.

A lo largo del curso *Física 1. El gimnasio de la mente*, tendrás varias oportunidades de leer sobre hechos y fenómenos, cuyo conocimiento es necesario para ejercer explícitamente el primer grupo de competencias. Sin embargo, ahora comenzarás a practicar una de estas competencias usando conocimientos y experiencias que ya tienes.

Actividad de discusión

La telefonía celular: ¿es para bien o para mal?

Propósito: Reflexionar individual y grupalmente sobre los aspectos positivos y negativos del uso extensivo de la telefonía celular.

Competencia a practicar: Opinar, con argumentos y postura ética, sobre la influencia de la ciencia y la tecnología en la vida cotidiana.

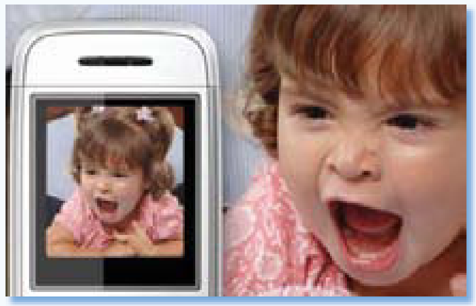


Figura 1.3. Jamás fue tan fácil tomar y compartir fotos con rapidez.

La telefonía celular no sólo ha cambiado significativamente la forma en que la gente se comunica sino, también, muchos otros aspectos de la vida. Uno de esos cambios tiene que ver con la manera de tomar y compartir fotografías (**Figura 1.3**).

1. En tu cuaderno haz una lista de los aspectos positivos y negativos del uso extensivo de los teléfonos celulares. Justifica bien la "calificación" que des a cada uno de los usos de la telefonía celulares, ya sea buena o mala. Al juntar todas las calificaciones, ¿aprobaste o reprobaste los teléfonos celulares?
2. Reúne a tu equipo de trabajo y comparen sus listas. Discutan las diferencias entre las calificaciones y traten de llegar a un consenso.
3. ¿Aprobaron o reprobaron los teléfonos celulares?
4. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

El segundo grupo de competencias disciplinarias tiene por objetivo que conozcas de cerca, y practiques detalladamente, casi todos los procedimientos que usan los científicos en sus labores de investigación. De forma breve, este grupo de competencias se podría llamar *formular y resolver problemas científicos*. Las competencias particulares que forman este grupo se presentan en la **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Competencias disciplinarias del grupo *formular y resolver problemas científicos*.

- Identificar y formular problemas y preguntas de carácter científico.
- Plantear hipótesis y desarrollar estrategias para resolver problemas y evaluar la solución.
- Obtener, registrar y sistematizar la información para resolver problemas y responder preguntas.
- Realizar experimentos pertinentes.
- Contrastar los resultados obtenidos en una investigación o experimento con hipótesis previas.
- Comunicar los resultados y las conclusiones.
- Valorar las preconcepciones personales o comunes sobre diversos fenómenos naturales a partir de evidencias científicas.

- Relacionar las expresiones simbólicas de un fenómeno de la naturaleza y los rasgos observables (a simple vista o mediante instrumentos o modelos científicos).
- Diseñar modelos y prototipos para resolver problemas, satisfacer necesidades, o demostrar conceptos y principios científicos.

La pregunta voladora

¿Cuántos granos hay en 1 kilogramo de frijol es una pregunta de carácter científico?

Todo el conocimiento científico surge como resultado tanto de responder preguntas científicas como de resolver problemas científicos. Una pregunta o un problema son de carácter científico si su respuesta o solución se encuentran mediante experimentación, o cuando la veracidad de una respuesta o de una solución encontrada teóricamente se puede determinar realizando un experimento.

De esta manera, tú también puedes practicar las habilidades del pensamiento científico sin que tengas que responder las preguntas o resolver los problemas que estén en la agenda de investigación de algún científico de verdad. La única cuestión que es indispensable es que tengas la disposición de someter a prueba experimental, tus ideas y razonamientos relacionados con alguna pregunta o algún problema, y de cambiar tus ideas y razonamientos si el experimento los contradice. Ahora hagamos una actividad en la que practicarás varias competencias que forman el pensamiento científico.

¡Hagamos física!

La carrera de los candados

Propósito: Averiguar conceptual y experimentalmente el comportamiento de dos péndulos de masas diferentes.

Competencias a practicar: Plantear una hipótesis, realizar un experimento pertinente, y valorar –a partir de evidencia científica– una preconcepción *personal sobre el péndulo.*

Material: Tres candados iguales, dos hilos largos, un palo de escoba, cinta adhesiva.

Una de las características del movimiento de un péndulo es el periodo, que es el tiempo que transcurre mientras el péndulo realiza una oscilación completa. El periodo del péndulo es una **variable dependiente**. ¿Cuáles serían algunas de las **variables independientes** que afectan el periodo? Esas variables son la longitud del péndulo y el ángulo que forma inicialmente el hilo del péndulo con la vertical.

Cuando aumenta la longitud del péndulo, y se mantienen iguales sus otras características, el periodo también aumenta. Asimismo, el periodo se incrementa cuando aumenta el ángulo inicial. Estos dos aumentos del periodo parecen razonables, pues en ambos casos el péndulo tiene que recorrer un camino más largo en cada oscilación. ¿Qué le pasaría al periodo si aumentamos el peso del péndulo y se mantienen fijas las otras variables, como la longitud y el ángulo inicial?

a) El periodo será menor.
b) El periodo será igual.
c) El periodo será mayor.

Justifica tu respuesta:

____

____

Discute con tu equipo cuál es la mejor respuesta y cuál su mejor justificación. Anota las conclusiones.

____

____

Figura 1.4. Los candados están listos para la "carrera".

1. Del palo de escoba, cuelguen el candado usando un hilo (con longitud aproximada de 1.5 metros).
2. Con cinta adhesiva, peguen dos candados (que van a formar un solo objeto) y cuélguenlos del palo de escoba, a unos 10 centímetros del punto donde se colgó el primer candado solo, usando un hilo de la misma longitud.
3. El integrante más alto del equipo tiene que levantar el palo de escoba lo más que pueda y mantenerlo en posición horizontal.
4. Otra persona debe sostener los candados (con los hilos completamente extendidos y paralelos) en posiciones tales que los hilos formen el mismo ángulo con la vertical (**Figura 1.4**).
5. Observen cuidadosamente lo que suceda cuando la persona suelte los candados.
6. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre el movimiento de dichos péndulos es cierta?

a) Los dos péndulos regresan a su posición inicial al mismo tiempo, lo cual quiere decir que el periodo de un péndulo no depende de su peso.

b) El péndulo más pesado (formado por dos candados) regresa primero a su posición inicial, lo cual quiere decir que el periodo del péndulo disminuye conforme su peso aumenta.

c) El péndulo ligero (un solo candado) regresa primero a su posición inicial, lo cual quiere decir que el periodo del péndulo aumenta conforme su peso se incrementa.

Si el comportamiento observado no concuerda con el comportamiento predicho, ¿cuál es la mejor suposición que puede hacerse sobre la influencia del peso en el periodo del péndulo?

7. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

El tercer grupo de competencias disciplinarias tiene como finalidad resaltar la amplia aplicabilidad de los conceptos y razonamientos científicos en nuestra vida cotidiana. Las competencias que forman este grupo se presentan en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3. Competencias disciplinarias del grupo *aplicar la ciencia en la vida cotidiana*.

- Explicitar los conceptos científicos en que se basan los procesos de solución de problemas cotidianos.
- Explicar el funcionamiento de máquinas y aparatos de uso común, a partir de conceptos científicos.

Física en la vida cotidiana

Abrir un frasco al cual se le pegó la tapa

Competencia a practicar: Explicitar los conceptos de física sobre los que se basa la solución de un problema cotidiano.

De cuando en cuando, la tapa de un frasco se queda pegada. Para resolver esta dificultad de la vida cotidiana, un consejo ya antiguo propone lo siguiente: Si la tapa metálica de un frasco de vidrio se queda pegada y no es posible abrir el frasco, pon agua muy caliente en un recipiente y sumerge en ella el frasco con la tapa hacia abajo (**Figura 1.5**).

Déjalo así unos minutos dentro del agua y, luego, con cuidado de no quemarte, procede a abrirlo.

Figura 1.5. Un frasco con tapa atascada sumergido en agua caliente.

1. Usando conceptos de física, explica detalladamente por qué es posible abrir el frasco de esta manera.

____

____

2. Compara tu explicación con las explicaciones de tus compañeros. Si hubo una mejor que la tuya, anótala y argumenta por qué fue mejor.

____

____

3. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

1.3. Las competencias genéricas

Para que puedas ejercer las competencias disciplinarias, debes dominar, también, varias *competencias genéricas*.

Definición

Una **competencia genérica** es la integración de habilidades, conocimientos y actitudes, que sirve como base para resolver exitosamente varios tipos de problemas reales en diferentes contextos.

Por eso, como verás a lo largo del curso, tales competencias genéricas te sirven no solamente para resolver problemas de física, química y biología sino que, además, son muy útiles fuera de la escuela.

La primera competencia genérica es *dominar los medios de la comunicación científica*. Esto quiere decir que debes ser capaz de "expresar ideas y conceptos mediante representaciones lingüísticas, matemáticas o gráficas". En otras palabras, es importante que sepas representar tus ideas y conceptos usando palabras, símbolos y fórmulas matemáticas, dibujos y diagramas. Esta competencia implica tres tipos de inteligencia: inteligencia verbal, inteligencia matemática e inteligencia visual.

La segunda competencia genérica es *dominar los elementos básicos del pensamiento científico*. Se trata de una competencia que exige mucho esfuerzo, pues consiste en varias habilidades:

La pregunta voladora

¿Cuáles rompecabezas te gustan más: los de palabras, los de símbolos y números o los de imágenes?

- Seguir instrucciones y procedimientos de manera reflexiva, comprendiendo cómo cada uno de los pasos contribuye al logro de un objetivo.
- Pensar crítica y creativamente al construir hipótesis, considerar evidencias y evaluar resultados.
- Ordenar información de acuerdo con categorías, jerarquías y relaciones.
- Construir y aplicar modelos matemáticos.
- Identificar los sistemas y principios medulares que subyacen a una serie de fenómenos.
- Utilizar las tecnologías de la información y la comunicación para procesar e interpretar información.

Es importante que sepas que el pensamiento *crítico* y el pensamiento *creativo* son habilidades indispensables para el éxito en las labores profesionales. Sin pensamiento creativo no puedes activar y, a menudo, extender tus conocimientos existentes para "crear" la primera solución de un problema. El pensamiento crítico te permite evaluar esa solución para decidir si es aceptable o debería modificarse.

Examinar críticamente tus propias ideas y tus propios razonamientos, aunque parezca algo que no es posible realizar, es una habilidad que debes y puedes construir, practicar y perfeccionar.

¡Hagamos física!

Las campanadas del Big Ben

Propósito: Predecir y medir la duración de 12 campanadas del Big Ben.

Competencias a practicar: Construir y aplicar modelos matemáticos; realizar dos mediciones pertinentes; y a partir de evidencia científica, valorar una preconcepción personal sobre la duración de las campanadas.

La Torre del Reloj de Westminster, popularmente llamada Big Ben (**Figura 1.6**), es uno de los más conocidos símbolos turísticos de la ciudad de Londres.

La torre, construida en 1859, tiene una altura de 96 m y está asentada sobre una base de 15 metros de lado. Los cuatro relojes de la torre están situados a 55 metros de altura. Cada hora, muchos turistas se reúnen en las cercanías para escuchar las campanadas del Big Ben.

Si a las **6 de la tarde** la duración del total de campanadas fuera de **20 segundos**, ¿cuánto debería durar el total de campanadas a las **12 del día**?

Figura 1.6. La famosa torre Big Ben de Londres.

1. Entre las respuestas de abajo, selecciona la respuesta que te parezca mejor y justifícala.

   a) 40 segundos *b*) entre 40 y 43 segundos
   c) 44 segundos *d*) más de 44 segundos

2. Comparte tu respuesta y justificación con las de tus compañeros, y traten de llegar a un consenso. ¿Cuáles son la respuesta y la justificación que obtuvieron el consenso?

3. Busquen en YouTube (http://www.youtube.com) los videos sobre las 6 y las 12 campanadas del Big Ben y determinen su duración. Dos posibles opciones son: http://www.youtube.com/watch?v=2jOl1OmDOSg&NR=1 http://www.youtube.com/watch?v=uw49fIRRIrk&feature=fvw

- Las 6 campanadas duran ________ segundos.
- Las 12 campanadas duran ________ segundos.
- ¿Coincide la relación entre estas duraciones con la relación que predijo tu equipo? ________ Si la respuesta es no, ¿a qué se debe la diferencia?

____

4. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

En la actividad anterior, los miembros de tu equipo determinaron personalmente la duración de las campanadas del Big Ben. En adelante, nadie te podrá "vender" el dato de que la duración de las 12 campanadas es de 30 o de 60 segundos.

Pero, ¿qué sucede cuando no tienes experiencias personales relacionadas con la información que se te presenta? ¿Debes creer todo lo que lees o escuchas? ¡Claro que no! Sobre todo cuando algunas partes de la información presentada se contradicen entre sí.

¡No creas todo lo que lees!

Los cuadrantes de los relojes del Big Ben

Propósito: Evaluar una información sobre los cuadrantes de los relojes de la torre Big Ben.

Competencia a practicar: Usar inteligencia visual y pensar críticamente.

Supón que te interesara saber el tamaño de los cuadrantes de los relojes del Big Ben (**Figura 1.7**).

Tal vez sea algo difícil que te dejen escalar hasta el cuadrante llevando una cinta métrica para que, una vez ahí arriba y sin temor por los 55 metros de altura, midas personalmente lo que te interesa. Entonces, no te queda otra opción que buscar la información deseada en Internet.

En la página http://www.towerclocks.org se indica que los cuadrantes de los relojes Big Ben tienen un diámetro de 700 cm y que la longitud de sus minuteros es de 426 cm.

Figura 1.7. Un cuadrante de reloj Big Ben.

1. ¿Por qué esta información no es creíble?

____

____

2. Compara tu respuesta con las respuestas de tus compañeros. Si no coinciden, anota las diferencias.

____

____

3. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

Lo que acabas de practicar es el fundamento de la tercera competencia genérica: *evaluar información de manera crítica*. Armado con el pensamiento crítico, debes ser capaz de:

- Elegir las fuentes de información más relevantes para un propósito específico y discriminar entre ellas de acuerdo con su relevancia y confiabilidad.
- Reconocer los prejuicios propios, modificar los puntos de vista propios al conocer nuevas evidencias, e integrar nuevos conocimientos y perspectivas al acervo con que se cuenta.

La cuarta competencia genérica es *autorregular el propio aprendizaje*. Esa competencia se define en el programa brevemente como "definir metas y dar seguimiento a los procesos propios de construcción de conocimientos". A pesar de esa reducida definición, se trata de la más importante de todas las competencias que debes practicar y dominar. De hecho, la competencia del aprendizaje autorregulado es un prerrequisito para llegar a adquirir todas demás competencias. Por eso, vale la pena precisarla más y dar una visión clara de lo que se espera de ti.

En primer lugar, el aprendizaje autorregulado requiere que te encargues y seas tú mismo el principal responsable de tu propio aprendizaje. Otras personas quizás ayuden mucho, pero tú eres el único en el mundo que sabe lo que ocurre en tu mente y en tu alma cuando lees un texto o resuelves un problema.

Para llevar a buen término el aprendizaje, debes saber que el aprendizaje autorregulado tiene cuatro fases que es recomendable realizar en cada tarea de aprendizaje o de solución de un problema. Esas fases se presentan en la **Tabla 1.4**.

Tabla 1.4. Las fases del aprendizaje autorregulado y las preguntas pertinentes.

Fases del aprendizaje autorregulado	Preguntas a responder
Comprensión de la tarea o del problema	¿Qué es lo que tengo que aprender? ¿Qué es lo que se pide precisamente en el problema? ¿Es un problema parecido a los que ya he resuelto o es un problema completamente nuevo? ¿Hay algo que no comprendo? ¿A qué se debe la falta de comprensión?
Planteamiento de las acciones o de la solución	¿Qué pasos pienso realizar para aprender lo que tengo que aprender? ¿Qué pasos pienso realizar para encontrar la solución? ¿Por qué estos pasos me permiten llegar a la solución? ¿Qué tengo que saber y hacer para realizar los pasos de mi plan? ¿Puedo, de antemano, decir algo sobre la solución?
Ejecución del plan	¿Realizo los pasos como lo había planteado? ¿Los pasos me están dando los resultados esperados?
Análisis del resultado del aprendizaje, o de la solución y la reflexión sobre lo aprendido	¿Tiene sentido la solución? ¿De qué manera verifico si, de veras, es la solución del problema que debía resolver? ¿El resultado del aprendizaje es lo que debía aprender? ¿Cometí algún error que jamás debería repetir? ¿Aprendí algo que me sirva para las actividades de aprendizaje futuras y para resolver problemas nuevos?

En el problema resuelto *calcular el área azul*, que se expondrá en seguida, se ejemplifican las fases del aprendizaje autorregulado. Se eligió un problema de matemáticas, porque muchos estudiantes sufren mucho con esta asignatura debido a que no dominan una estrategia de resolución de problemas.

Problema resuelto

Calcular el área azul

Competencias ejemplificadas: Autorregular el aprendizaje, usar modelos matemáticos y pensar creativamente.

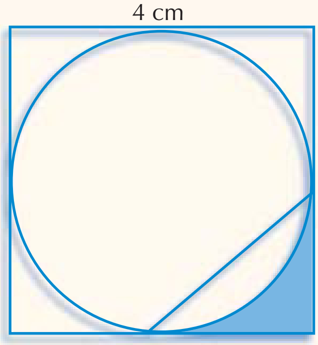


Figura 1.8. El cuadrado y su parte de color azul.

El problema: Calcular el área de la parte azul del cuadrado de la **Figura 1.8**.

Comprensión del problema: En la figura hay un cuadrado y un círculo inscrito. Se pide calcular una parte de la superficie del cuadrado que no se comparte con el círculo. Se trata de un problema similar a los que se resuelven en los cursos de geometría.

El plan de la solución: Primero hay que determinar qué parte de la superficie del cuadrado no se comparte con el círculo inscrito. Esa parte se obtiene si del área del cuadrado se resta el área del círculo. El área no compartida está formada por cuatro figuras de forma y tamaño iguales. Por ello, para obtener el área de la figura coloreada se deben realizar los siguientes pasos:

1. Encontrar el área del cuadrado.
2. Encontrar el área del círculo inscrito.
3. Encontrar la diferencia entre el área del cuadrado y el área del círculo, y
4. Dividir esta diferencia entre 4.

Este es el plan de resolución del problema.

Es muy importante que te des cuenta de que el planteamiento se basa en observaciones y consideraciones conceptuales. El plan no contiene ni debe contener fórmulas.

De esta manera, se separan claramente el razonamiento conceptual, y las fórmulas y operaciones matemáticas. ¿Qué fórmulas se tienen que saber y qué operaciones se deben ejecutar para llevar a cabo el plan de resolución?

La fórmula para el área del cuadrado ($S_{\text{cuadrado}} = a^2$).

- Calcular el área del cuadrado para $a = 4$ cm.
- La fórmula para el área del círculo ($S_{\text{círculo}} = \pi r^2$).
- Calcular el área del círculo para $r = 2$ cm.
- Calcular la diferencia entre las áreas calculadas del cuadrado y el círculo.
- Dividir tal diferencia entre 4.

¿Qué se puede decir sobre el valor del resultado antes de calcularlo?

Es evidente que el resultado tiene que ser mayor que cero y menor que el área total del cuadrado. También, debe ser menor que la mitad del área del cuadrado. ¿Es posible precisar aún un mejor el tope superior del resultado?

En la **Figura 1.8** se observa que el área de la parte azul debe ser menor que al área del triángulo rectángulo, cuya hipotenusa es de color rojo. Su base es de 2 cm y su altura es, también, de 2 cm.

Como el área de cada triángulo es igual a la mitad del producto de la base y la altura, el área de este triángulo es de 2 cm^2. De esta manera, se sabe con seguridad que el área de la parte azul debería ser menor que 2 cm^2.

¿Por qué es importante tener una idea acertada sobre los márgenes dentro de los cuales se espera obtener el resultado? Es importante porque permite detectar los errores que a menudo se cometen en los cálculos que llevan al resultado. Si el área de la parte azul resultara igual, por ejemplo, a 4 cm^2, se concluiría que se cometió, por lo menos, un error. En tal caso, se debería verificar la veracidad de cada fórmula usada y de cada operación matemática realizada.

Ejecución del plan: El primer paso consiste en calcular el área del cuadrado:

$$S_{\text{cuadrado}} = a^2 = (4\ \text{cm})^2 = 16\ \text{cm}^2$$

El segundo paso es calcular el área del círculo inscrito:

$$S_{\text{círculo}} = \pi r^2 = 3.14 \cdot (2\ \text{cm})^2 = 3.14 \cdot 4\ \text{cm}^2 = 12.56\ \text{cm}^2$$

El tercer paso consiste en restar el área del círculo del área del cuadrado:

$$S_{\text{diferencia}} = S_{\text{cuadrado}} - S_{\text{círculo}} = 16\ \text{cm}^2 - 12.56\ \text{cm}^2 = 3.44\ \text{cm}^2$$

El cuarto paso es dividir la diferencia entre las áreas entre 4 y obtener el área de la parte azul:

$$S_{\text{azul}} = \frac{S_{\text{diferencia}}}{4} = \frac{3.44\ \text{cm}^2}{4} = 0.86\ \text{cm}^2$$

Análisis del resultado y la reflexión: El resultado de aproximadamente 1 cm^2 es aceptable, lo cual se verifica comparando el área de la figura azul con el área de un cuadrado cuyo lado sea de 1 cm.

Es importante tener un plan de resolución claro, antes de comenzar a usar fórmulas y operaciones matemáticas. Un error muy frecuente, que cometen los estudiantes al resolver problemas matemáticos, es manipular ciegamente las fórmulas y operaciones.

Es recomendable tener una idea, lo más acertada posible, sobre los márgenes dentro de los cuales debería estar el resultado.

La mayoría de los estudiantes no tiene ni la más remota idea de los márgenes del resultado.

La realización de las fases del aprendizaje autorregulado depende de varios factores. Al usarlos adecuadamente, se beneficia el aprendizaje. Por el contrario, si falta alguno de los factores o su manejo es inadecuado, el aprendizaje se dificulta o se bloquea por completo. Los factores que influyen decisivamente en el aprendizaje son:

- tus conocimientos, habilidades y creencias;
- tu capacidad metacognitiva (de monitorear y controlar tu cognición);
- tu motivación y tus emociones;
- los elementos del entorno (dónde y con quién aprendes, qué herramientas materiales tienes disponibles o no).

Entonces, para que tu aprendizaje esté bien autorregulado debes:

1. movilizar adecuadamente tus conocimientos, habilidades y creencias;
2. seguir tus pensamientos, razonamientos y acciones y corregirlos cuando te trabes;
3. mantener la motivación y cultivar las emociones positivas hacia el aprendizaje;
4. optimizar el entorno donde aprendes.

Como ves, *aprender a aprender* no resulta una tarea sencilla. Al contrario, se trata de una actividad mental muy compleja, tal vez la más compleja de todas las actividades humanas. Sin embargo, es precisamente la competencia del aprendizaje autorregulado –que resulta del complicado proceso de aprender a aprender– lo que te garantiza que estés bien preparado para los retos de la vida y del trabajo en un mundo cambiante.

Si te interesa "agarrar el toro por los cuernos" y mejorar la autorregulación de tu aprendizaje, realiza entonces con constancia las actividades de este curso, pues éstas fueron diseñadas con la finalidad de promover y reforzar el aprendizaje autorregulado.

La quinta competencia genérica consiste en *saber aprender y trabajar en equipo* (**Figura 1.9**). El programa precisa esta competencia de la siguiente forma:

- Proponer la manera de solucionar un problema y desarrollar un proyecto en equipo, definiendo un curso de acción con pasos específicos.
- Aportar puntos de vista con apertura y considerar los puntos de vista de otras personas de manera reflexiva.
- Asumir una actitud constructiva, congruente con los conocimientos y habilidades con que se cuenta dentro del equipo de trabajo.

Figura 1.9. Es importante aprender a trabajar en equipo.

Las actividades grupales llamadas "¡Hagamos física!" sirven especialmente para construir, practicar y mejorar esta competencia. En ellas, junto con tres o cuatro compañeros, explorarás acontecimientos del mundo material y formularás las ideas que tengas sobre ellos, tratando de mejorarlas gracias a la discusión con tus compañeros.

Al realizar estas actividades, aprenderás que no todos tus compañeros piensan igual que tú. Cuando se discute la validez de las ideas, es importantísimo establecer que el criterio para juzgar si una idea es válida no es el número de personas que la comparten, sino lo lógico de la explicación del acontecimiento estudiado que esa idea ofrece.

La crítica de las ideas contribuye a que se eliminen sus debilidades y que se desarrollen aún más sus fortalezas. Cuando pasan esta *prueba de fuego*, las ideas se vuelven más convincentes y resulta más fácil aceptarlas. La ventaja de trabajar en grupo es que se aprovechan las diversas habilidades que tengan las personas del grupo. Algunos de los integrantes del grupo tendrán, tal vez, facilidad para generar nuevas ideas; mientras que otros serán buenos para percibir y criticar las debilidades de las ideas. No faltarán quienes sepan cómo mejorar las ideas. Sumando las habilidades de todos, se avanza más rápidamente en la exploración y la comprensión del mundo material.

Describir, explicar y predecir los fenómenos físicos

Como este es un curso de física escolar, sería conveniente que tuvieras una idea general de lo que es la física como ciencia.

Definición

La **física** es el estudio científico de los acontecimientos del mundo material.

El **mundo material** abarca todo lo que se puede percibir a través de los sentidos, o bien, con la ayuda de algún instrumento. Los primeros acontecimientos que los físicos antiguos estudiaron fueron aquellos que observaban en su entorno y que les llamaban la atención: desde los cuerpos en equilibrio o en movimiento, hasta los cuerpos que se hunden o flotan en el agua.

Los acontecimientos del mundo material que son el objeto de estudio de la física se llaman "fenómenos físicos".

Actividad de discusión

Botella flotante y huracán

Propósito: Discutir la diferencia entre la terminología de la física y la terminología del habla cotidiana.

Competencia a practicar: Dominar el lenguaje de la comunicación científica.

Según la terminología técnica de la física, tanto la flotación de una botella de plástico en el agua (**Figura 2.1**) como un huracán (**Figura 2.2**) son fenómenos físicos.

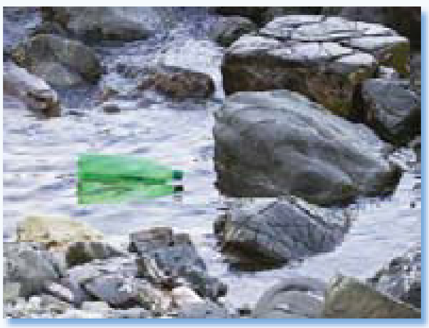


Figura 2.1. Una botella de plástico que flota en el agua.

Figura 2.2. Un huracán.

Propósitos del tema 2

- Definir y ejemplificar los procesos científicos de describir, explicar y predecir los fenómenos físicos.

La raíz de las palabras

Fenómeno

proviene del latín, *phaenomenon*, y ésta del griego, *phainómenon*, que significa "lo que se muestra o se ve". Usado en el lenguaje médico de la Grecia antigua con el significado de "cosas que se hacen evidentes", pasó al latín tardío con el sentido de "síntoma". Reapareció en francés en 1554 como *phénomène*. En la filosofía, se usa para referirse a toda manifestación, de orden material o espiritual, que se hace presente a la conciencia de un sujeto y aparece como objeto de su percepción. En el lenguaje científico, se aplica a cualquier manifestación de actividad que se produce en la naturaleza. A menudo se emplea para hablar de algo extraordinario y sorprendente.

Sin embargo, mucha gente diría que el huracán sí es un fenómeno y que la flotación de una botella no lo es.

1. Según tu opinión, ¿a qué se debe esta postura en cuanto a términos de las personas?

____

____

2. Reúne a tu equipo y compara tu opinión con las opiniones de los demás. Traten de llegar a un consenso. ¿Cuál es la opinión compartida?

____

____

3. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

El primer paso en el estudio científico de un **fenómeno físico** es su **descripción**.

Definición

La **descripción** de un fenómeno físico es el conocimiento contenido en las respuestas a las preguntas científicas "¿cómo ocurre?" y "¿en qué condiciones ocurre?" tal fenómeno.

La descripción puede ser cualitativa o, lo que es preferible en las ciencias exactas y naturales, cuantitativa. La descripción es cualitativa o verbal si se usan únicamente palabras. Cuando la descripción incluye números, entonces la descripción es cuantitativa o numérica.

La base de una descripción cualitativa es la observación cuidadosa de lo que acontece en el fenómeno; en tanto que la base de la descripción cuantitativa son las mediciones experimentales de las características seleccionadas del fenómeno estudiado.

La pregunta voladora

¿Qué tipo de descripción sería un video grabado de un fenómeno físico?

Cuando los físicos logran saber bien cómo y en qué condiciones ocurre un fenómeno físico, no se regalan unas vacaciones largas, considerando que ya no hay más cosas que saber. Al contrario, se vuelven muy curiosos intentando responder la pregunta *¿por qué el fenómeno ocurre tal como lo hace y no de otra manera?*

Las respuestas a ese tipo de preguntas científicas son las **explicaciones** de los fenómenos físicos.

Definición

La **explicación** de un fenómeno físico es el conocimiento científico necesario para responder la pregunta "¿por qué ese fenómeno físico, en las condiciones particulares, ocurre de la manera observada?".

Las definiciones de los procesos y productos científicos, es decir, las definiciones de lo que constituye la investigación científica y de lo que es el resultado de hacer ciencia, parecen tediosas si no se cuenta con experiencias propias relacionadas con preguntas y problemas de *tipo científico*. Una vez más, hay que señalar que estas preguntas no necesitan ser las preguntas que están en la agenda de investigación de los científicos de profesión.

En la siguiente actividad podrás experimentar qué significa describir y explicar un fenómeno físico.

¡Hagamos física!

Revelando la diferencia entre la Coca-Cola normal y la Coca-Cola *light*

Propósito: Explorar el comportamiento de las latas de Coca-Cola en el agua.

Competencias a practicar: Responder preguntas científicas (¿cómo ocurre?, ¿por qué ocurre?), realizar un experimento pertinente, valorar las preconcepciones sobre el comportamiento de las latas, comunicar los resultados y conclusiones, aprender en equipo, y autorregular el aprendizaje.

Figura 2.3. Dos latas de Coca-Cola que se sostienen bajo el agua.

Material inicial: Dos latas de Coca-Cola, una normal y otra *light*; un recipiente con agua.

Material adicional: Lo que resulte necesario para verificar la explicación propuesta.

Probablemente ya sabes que la Coca-Cola *light* contiene menos azúcar que la Coca-Cola normal. En condiciones normales, no sería posible percibir esa diferencia tan sólo con tus sentidos. Sin embargo, es posible "obligar" a las latas de Coca-Coca normal y *light* a que nos revelen que son diferentes en su comportamiento físico.

Para lograr lo anterior, hay que sumergirlas hasta el fondo en un recipiente con agua (**Figura 2.3.**) y dejarlas allí.

1. Consigan un recipiente grande con agua (puede ser una cubeta) y dos latas de Coca-Cola, una normal y otra *light*. Un miembro del equipo debe sumergirlas hasta el fondo y dejarlas ahí.
2. Describe detalladamente cómo se comportan las latas después de soltarlas bajo el agua.

____

____

3. Explica detalladamente por qué las dos latas se comportan de manera diferente.

____

____

4. Compara tu descripción y explicación con las de tus compañeros de equipo. Discutan las diferencias y traten de llegar a un consenso. ¿Cuál es la explicación consensuada?

____

____

5. ¿Con qué experimento podrían verificar esa explicación y qué resultado se debería obtener?

____

____

6. Traten de realizar el experimento. ¿El resultado es lo que predijeron basándose en su explicación?

7. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

La actividad anterior merece unos comentarios. El conocimiento que has obtenido sobre las latas de Coca-Cola en experiencias rutinarias, como abrirlas y beber el líquido, es escaso y muy limitado, y no te permite pensar cómo sería el comportamiento de las latas en situaciones fuera de lo "normal".

Además, cuando se sale de las situaciones rutinarias, muchas veces el comportamiento de las cosas comunes suele ser sorprendente. Cuando eso ocurre, como en el caso del asombroso comportamiento de las latas, es preciso buscar una explicación y pensar cómo se podría verificar su veracidad. Por ello, *para el aprendizaje de la física, una sorpresa vale más que mil rutinas*.

¿Por qué el comportamiento de las latas es sorprendente? Porque la mayoría de la gente piensa que en el agua las latas deberían comportarse de la misma manera. Las personas dirían que las latas parecen completamente iguales por fuera, a pesar de saber que los líquidos que contienen son diferentes.

Sin embargo, aunque sus volúmenes exteriores son iguales, sus masas son ligeramente diferentes. Esa diferencia no se puede notar con los sentidos, pero sí se constata usando una báscula de cocina.

Foto laboratorio

La diferencia medible entre las latas de Coca-Cola

Competencia a practicar: Obtener la información para responder una pregunta.

Usando una báscula de cocina, es posible medir la masa una lata de Coca-Cola *light* (**Figura 2.4a**) y la de una de Coca-Cola normal (**Figura 2.4b**). La báscula indica la masa medida en gramos.

Identifica las cantidades que la báscula indica en las dos fotografías y contesta las siguientes preguntas.

1. ¿Qué masa tiene la lata de Coca-Cola *light*? ____________ gramos.
2. ¿Qué masa tiene la lata de Coca-Cola normal? ____________ gramos.
3. ¿Por cuántos gramos la masa de la lata de Coca-Cola normal supera a la masa de la lata de Coca-Cola *light*? ____________ gramos.
4. ¿A qué se debe esta diferencia de masas?

Figura 2.4a. Coca-Cola *light* en la báscula de cocina.

Figura 2.4b. Coca-Cola normal en la báscula de cocina.

Cuando se tienen ciertas ideas sobre cómo se comportan las cosas, es posible predecir cómo deberían ser los fenómenos físicos futuros en que tales cosas intervendrán.

Definición

La **predicción** de un futuro fenómeno físico es el conocimiento necesario para responder la pregunta *¿cómo serán las características de tal fenómeno?*, basándose en las explicaciones de los fenómenos físicos relacionados.

Las predicciones científicas y su verificación mediante experimentos forman una parte esencial del desarrollo de la ciencia, en general, y de la física, en particular. Si no fuera posible predecir con precisión cómo se comportarán las cosas en situaciones nuevas, no sería posible construir aparatos nuevos que tengan un funcionamiento específico y la tecnología como tal no existiría.

De igual manera, para que aprendas física es necesario que propongas no solamente las explicaciones de los fenómenos observados sino, también las predicciones sobre las características de éstos que todavía no hayas observado.

Al intentar hacer una predicción sobre un fenómeno físico que desconoces, siempre utilizas ideas sobre el cómo y el porqué del comportamiento de las cosas que intervendrán en ese fenómeno. Dicho de otro modo, derivas los esquemas predictivos y los conectas con los esquemas explicativos que hayas construido sobre el mundo.

La tarea de proponer predicciones sobre las situaciones que no hayas observado con anterioridad es una oportunidad perfecta, para que conozcas qué tan aplicables son las ideas que tienes sobre el mundo que te rodea. Si tu predicción no se cumple, aparte de que estarás muy sorprendido, aprenderás que las ideas en que se basaba tu predicción no tenían aplicabilidad universal. Aunque quizá funcionaban bien para explicar experiencias anteriores, esas ideas fallaron en la nueva situación. Por ello, deberían revisarse y modificarse para que la nueva experiencia sea entendible.

Cuando ocurra la necesidad de revisar y modificar tus ideas existentes, ¡de ninguna manera debes sentirte frustrado! Al contrario, tienes que estar muy contento de que fuiste capaz de mejorar tus ideas, ampliando tus experiencias y utilizando razonamientos y procedimientos científicos. Lo que aprendes de esta manera, ¡jamás lo olvidarás!

¡Hagamos física!

Globos en un horno de microondas

Propósito: Explorar el comportamiento de globos dentro de un horno de microondas.

Competencias a practicar: Plantear una hipótesis, observar un fenómeno físico, explicar lo observado, valorar las preconcepciones personales sobre el calentamiento en un horno de microondas a partir de evidencias científicas, comunicar resultados y conclusiones, trabajar en equipo, autorregular el aprendizaje.

Figura 2.5. Los dos globos dentro del horno de microondas.

Material: Un horno de microondas, dos globos de colores diferentes, un poco de agua.

1. Introduzcan un poco de agua en uno de los globos.
2. Inflen un poco los dos globos, de modo que alcancen aproximadamente el mismo tamaño y puedan estar los dos juntos sobre la plataforma giratoria del horno.
3. Coloquen los globos en la plataforma del horno de microondas (**Figura 2.5**).
4. ¿Cómo crees que se verán los globos después de poner a funcionar el horno durante 20 segundos? Elige una de las siguientes posibles respuestas:

a) Los dos globos conservarán su tamaño original.
b) Los dos globos aumentarán de tamaño de manera similar y tendrán aproximadamente el mismo tamaño final.
c) El globo con agua aumentará mucho de tamaño y el globo sin agua conservará su tamaño original.
d) El globo sin agua aumentará más de tamaño que el globo con agua.

¿Por qué elegiste ésa y no alguna otra respuesta?

____

____

5. Después de que todos hayan elegido y justificado su respuesta, intenten llegar a una respuesta y a una justificación compartidas. ¿Cuáles son?

____

____

6. Cuando se tengan la predicción y la justificación compartidas sobre el comportamiento que tendrán los globos en el horno de microondas, cierren la puerta del horno y háganlo funcionar durante 20 segundos (tengan cuidado al colocar el tiempo en el contador). Abran la puerta y observen el tamaño de los globos.

¿Qué sucedió al tamaño del globo sin agua? ______________________.

¿Qué le pasó al tamaño del globo con agua? ______________________.

7. ¿Coincide el comportamiento observado de los globos con el comportamiento predicho (esperado)? __________

¿Por qué? ____

____

8. Si el comportamiento observado no coincide con el comportamiento predicho, ¿cómo se explicaría la diferencia?

____

____

9. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

Demostrar las competencias

Dominar elementos básicos del pensamiento científico

1. La afirmación "hay entes inobservables que influyen en los acontecimientos del mundo" no es una hipótesis científica.

a) verdadero *b*) falso

Justificación: ______________________________________

____

2. Hay verdades en la física que no necesitan una verificación experimental.

a) verdadero *b*) falso

Justificación: ______________________________________

____

3. Describir un fenómeno consiste en responder la pregunta "¿____________ ocurre el fenómeno?".

a) por qué *b*) cuándo

c) cómo *d*) dónde

4. La ____________ de un fenómeno es la respuesta a la pregunta "¿por qué ocurre el fenómeno?".

a) descripción *b*) predicción

c) explicación *d*) simulación

Pensar críticamente sobre las hipótesis

5. ¿De qué manera contundente sería posible demostrar la falsedad de las hipótesis presentadas abajo?

a) "Solamente algunas esferas huecas flotan en el agua."

b) "Todas las esferas huecas flotan en el agua."

c) "Solamente algunas esferas macizas se hunden en el agua."

d) "Todas las esferas macizas se hunden en el agua."

6. Hay muchas personas que explican las diferencias entre las estaciones de la siguiente manera. En el verano hace calor porque la Tierra está más cerca al Sol y en el invierno hace frío porque la Tierra se aleja del Sol.

a) ¿Qué hecho contradice esta explicación?

____

b) ¿Cuál es una mejor explicación de las diferencias entre las estaciones?

____

Explicar fenómenos físicos

7. Toma dos vasos: uno, ancho y bajo; y el otro, alto y estrecho. Llena parcialmente de agua el vaso bajo y fíjate en su nivel. Para que se destaque mejor el nivel, agrega al agua algo de color artificial como el que se usa en algunos alimentos (**Figura 2.6**). Al introducir en el vaso ancho el vaso alto boca-arriba, el nivel del agua sube (**Figura 2.7**). Aunque tal vez no lo creas, convéncete de que el nivel de agua también sube si el vaso alto se introduce boca abajo (**Figura 2.8**). ¿Puedes explicar por qué el nivel del agua aumenta en ambos casos?

Figura 2.6. El nivel de agua en el vaso ancho.

Figura 2.7. El aumento de nivel de agua en el vaso ancho.

Figura 2.8. El nivel aumenta, también, de esta manera.

8. Mi esposa Jesenka apaga la vela con dos de sus dedos que previamente humedece con saliva de su lengua. ¿Cómo es posible que sus dedos salgan ilesos del contacto con la llama de la vela?

Actividad de lectura y reflexión

Un matrimonio entre el escepticismo y el asombro

Competencia ejemplificada: Dominar elementos básicos del pensamiento científico.

Carl Edward Sagan (**Figura 2.9**), astrónomo estadounidense ya fallecido, fue tal vez el más grande divulgador de la ciencia del siglo XX. A través de sus libros, artículos y programas de televisión, luchó hasta sus últimos momentos para que la ciencia y el pensamiento científico estuvieran más presentes en la cultura general.

Uno de los objetivos de este curso de física es promover el enfoque acerca de la educación por la que abogaba Sagan. Lee cuidadosamente los párrafos que siguen, para que veas qué tanto cumplió con ese objetivo la primera unidad:

Figura 2.9. Carl E. Sagan (1934-1996).

> En el corazón de la ciencia hay un equilibrio esencial entre dos actitudes aparentemente contradictorias: una apertura a nuevas ideas, por muy extrañas y contrarias a la intuición que sean, y el examen más implacable de todas las ideas, viejas y nuevas. Así es como se distinguen las verdades profundas de las grandes tonterías. La empresa colectiva del pensamiento creativo y el pensamiento escéptico, unidos en la tarea, mantienen el tema en el buen camino...
>
> La mezcla juiciosa de esos dos modos de pensamiento es central para el éxito de la ciencia. Los buenos científicos hacen ambas cosas. Por su parte, hablando entre ellos, desmenuzan muchas ideas nuevas y las critican sistemáticamente. La mayoría de las ideas nunca llegan al mundo exterior. Sólo las que pasan una rigurosa filtración llegan al resto de la comunidad científica para ser sometidas a crítica...
>
> Nadie puede ser totalmente abierto o completamente escéptico. Todos debemos trazar la línea en alguna parte [...] Creo que la mayoría de los científicos dirían: "Es mejor ser demasiado escéptico que demasiado crédulo." Pero ninguno de los dos caminos es fácil. El escepticismo responsable, minucioso y riguroso requiere un hábito de pensamiento cuyo dominio exige práctica y preparación. La credulidad –creo que aquí es mejor la palabra "apertura mental" o "asombro"– tampoco llega fácilmente. Si realmente queremos estar abiertos a ideas antiintuitivas en física, organización social o cualquier otra cosa, debemos entenderlas. No tiene ningún valor estar abierto a una proposición que no entendemos.
>
> Tanto el escepticismo como el asombro son habilidades que requieren atención y práctica. Su armonioso matrimonio dentro de la mente de todo escolar debería ser un objetivo principal de la educación pública. Me encantaría ver una felicidad tal retratada en los medios de comunicación, especialmente la televisión: una comunidad de gente que aplicara realmente la mezcla de ambos casos –llenos de asombro, generosamente abiertos a toda idea sin rechazar nada si no es por una buena razón pero, al mismo tiempo, y como algo innato, exigiendo niveles estrictos de prueba– y aplicara los estándares al menos con tanto rigor hacia lo que les gusta como a lo que se sienten tentados a rechazar.

Carl Sagan, *El mundo y sus demonios. La ciencia como una luz en la oscuridad*. (SEP, México, 1998), pp. 330-332.

Aprendizaje autorregulado

1. ¿Eres crédulo o escéptico cuando escuchas lo que te dicen otras personas?
2. ¿En las actividades previas aceptaste una idea que inicialmente quisiste rechazar? Describe tal idea y los argumentos, tanto los iniciales, para rechazarla, como los posteriores, para aceptarla.
3. ¿El escepticismo ayuda en el aprendizaje de la física? Justifica tu respuesta.

Las magnitudes físicas y su medición

El mundo se divide en dos grandes partes. La primera está compuesta por aquellas cosas cuyas características se pueden medir. La segunda está formada por las emociones, los sentimientos, los gustos y las ideas, entes que, para bien o para mal, no se prestan a la medición.

La posibilidad de medir nos permite conocer mejor nuestro entorno y nos ayuda a evitar los errores que suelen cometerse cuando nuestros juicios, conclusiones o decisiones no se apoyan en mediciones o en información expresada numéricamente. Para la física, la precisión en el conocimiento de las propiedades de los cuerpos físicos y de los acontecimientos físicos es de extrema importancia porque, en última instancia, permite comparar diferentes ideas teóricas sobre el comportamiento del mundo.

Propósitos del tema 3

- Conocer las cantidades fundamentales y derivadas, así como sus unidades, en el Sistema Internacional de Unidades y en el sistema inglés de unidades.
- Conocer la precisión de los instrumentos y los tipos de errores en la medición.

3.1. Introducción

Los cuerpos físicos y los acontecimientos físicos de nuestro entorno tienen muchas propiedades, unas se pueden medir y otras no.

Actividad de discusión

¿Qué podemos medir en una manzana y qué no?

Propósito: Identificar las propiedades medibles y no medibles de una manzana.

Competencias a practicar: Aprender en equipo.

Forma tu equipo. Hagan una lista de las propiedades que caracterizan una manzana (**Figura 3.1**).

Figura 3.1. ¿Qué propiedades caracterizan una manzana?

1. ¿Cuáles propiedades de la manzana son más importantes y en qué situación?

2. ¿Cuáles propiedades se pueden medir y con qué aparato?

3. ¿Cuáles propiedades no se pueden medir y por qué la medición es imposible?

4. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

De aquí en adelante, de conformidad con la naturaleza de la física, nos interesarán solamente las propiedades de los cuerpos y fenómenos físicos que se pueden medir.

Definición

Una **cantidad física** es cualquier propiedad de un cuerpo físico o de un acontecimiento físico que se puede medir.

El conocimiento de las cantidades físicas de las cosas que nos rodean expresado en forma numérica, es decir, el conocimiento expresado con números que sean resultado de alguna medición, garantiza que evitemos los errores que se cometen cuando nuestro razonamiento se hace a partir de alguna impresión sensorial o, lo que es aún peor, de alguna estimación arbitraria. Veamos algunos ejemplos cotidianos que muestran la importancia de las mediciones en nuestras vidas.

Figura 3.2. Hay que respetar el tamaño de las cosas.

Antes de realizar la compra de un mueble o de una alfombra, es indispensable medir el espacio disponible o la superficie que se quiere cubrir. De no hacerlo así, podría ocurrir que la alfombra no alcance o que el mueble no quepa bien (**Figura 3.2**).

Antes de comprar la pintura para una fachada hay que saber las respuestas a las dos preguntas siguientes:

- ¿Cuál es la superficie de la fachada?
- ¿Cuál es el rendimiento de la pintura, es decir, cuántos metros cuadrados se pueden cubrir con un litro de pintura? (O, lo que es equivalente, ¿cuánta pintura se necesita para pintar un metro cuadrado?)

De lo contrario, si se compra la pintura sin tomar en cuenta las características mencionadas, podría ocurrir que falte o que sobre. Un consejo adicional: Es mejor buscar la información sobre el rendimiento de la pintura en las etiquetas de los botes de pintura o en las tiendas que la venden, que en los libros de texto de matemáticas.

Problema por resolver

Evaluación del rendimiento de una cubeta de pintura

Competencia a practicar: Pensar críticamente al evaluar el resultado.

Un libro de texto de matemáticas plantea un problema que se refiere a la cantidad de pintura necesaria para pintar la fachada de una casa (**Figura 3.3**).

En el texto del problema se dice que, para cubrir 8 m^2 de la fachada, se necesita una cubeta de pintura de 20 litros.

1. ¿Cuál es el rendimiento de esta cubeta de pintura o, en otras palabras, cuántos metros cuadrados se cubren con 1 litro de pintura?
   ________ m^2 por litro
2. Compara este rendimiento con los que tienen algunas pinturas de la empresa Comex.

Figura 3.3. Ellos pintan la fachada de una casa.

Pintura	Rendimiento
Vinílica Vinimex	10 a 12 m^2 por litro
Vinimex Real Fles	7 a 8 m^2 por litro
Vinimex Pro	9 a 10 m^2 por litro

3. El rendimiento que se supuso en el libro de texto de matemáticas
a) es aceptable *b*) no es aceptable.

4. Justifica tu decisión:

En los ejemplos anteriores, el conocimiento y la información expresados con números, por ser resultados de algún tipo de medición, son más confiables. Así, el conocimiento cuantitativo de las cosas nos permite vivir con menos sorpresas ingratas.

El patrón de medida y la medición como comparación

¿Cómo se mide la masa de un saco de azúcar? Se averigua cuántas pesas de 1 kg equilibrarían el saco en una balanza. La afirmación "la masa del saco es de 2 kg" implica que se necesitan 2 pesas de 1 kg para equilibrar el saco en la balanza (**Figura 3.4**). La masa del saco de azúcar es igual a la masa de dos pesas de 1 kg.

¿Cómo se mide la duración de un viaje en automóvil de la casa a la escuela? Se averigua cuántos "pasos" de 1 minuto realiza el minutero del reloj durante el recorrido. Decir que la duración del recorrido fue de 17 minutos significa que la manecilla realizó 17 "pasos" de un minuto durante el recorrido.

A pesar de que se trata de diferentes cantidades físicas (masa y duración temporal), ambas mediciones tienen algo en común. En cada una existe un cuerpo (pesa) o un fenómeno (movimiento del minutero), cuya característica específica sirve para determinar el valor de esa característica en otro cuerpo (saco) o fenómeno (viaje en auto).

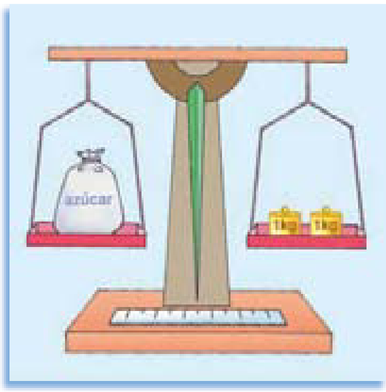


Figura 3.4. La masa del saco es igual a la masa de 2 pesas de 1 kg.

Definición

Un **patrón de medida** para una cantidad física es un cuerpo o un proceso, cuya característica particular sirve para expresar la cantidad física de otros cuerpos o procesos.

3.2. Cantidades fundamentales y derivadas

Las cantidades físicas se pueden dividir en dos grandes grupos:

- cantidades fundamentales
- cantidades derivadas

Definición

Una **cantidad fundamental** es aquella que no se puede definir y medir empleando otras cantidades más sencillas.

Las siguientes son cantidades fundamentales:

- longitud
- tiempo
- masa

Estas cantidades se usan, incluso, para hablar de algunas características básicas de la gente: altura, edad y masa. En el segundo curso de física vas a conocer otras cantidades fundamentales y las unidades que forman parte del Sistema Internacional de Unidades.

Aunque las cantidades fundamentales son importantes para obtener información básica, tomadas por separado no son suficientes para conocer todas las características de los objetos y acontecimientos del mundo. Por ejemplo, conocer la masa o la altura de un bebé no basta para saber si el bebé crece normalmente (**Figura 3.5**). El pediatra compara esas cantidades con las cantidades que corresponden a la edad del bebé (tiempo). En otras palabras, al pediatra le interesa saber si la tasa de aumento de la masa (el aumento de la masa del bebé dividida entre su edad expresada en meses) es la adecuada.

Figura 3.5. Un bebé sano tiene una masa y una altura conformes a su edad.

Evidentemente, la tasa de crecimiento no es una cantidad fundamental. Es una cantidad que se define y determina a partir de cantidades fundamentales que, en este caso, son la masa y el tiempo. La tasa de crecimiento y otras cantidades similares se llaman **cantidades derivadas**.

Definición

Una **cantidad derivada** es la que se define y se mide a partir de cantidades fundamentales.

Las operaciones matemáticas que se usan para construir cantidades derivadas son la multiplicación y la división. La necesidad de inventar una cantidad derivada surge cuando se consideran características que permiten una mejor descripción de los cuerpos y acontecimientos físicos. Además, las cantidades derivadas permiten, muchas veces, simplificar el proceso de medición. En el problema que sigue te toca inventar una cantidad derivada que sirva para caracterizar los alambres.

Problema por resolver

Determinar la longitud de un alambre usando una báscula

Competencias a practicar: Pensamiento creativo; construir y aplicar un modelo matemático.

Imagina que tienes que determinar la longitud de un alambre (**Figura 3.6**), pero que no se te permite ni extenderlo completamente ni usar la cinta métrica.

Lo que sí puedes usar es una báscula y un teléfono para consultar al fabricante del alambre. ¿Qué característica del alambre solicitarías al fabricante para poder determinar con la báscula la longitud del alambre?

Figura 3.6. ¿Es posible determinar la longitud usando sólo una báscula?

En los ejemplos anteriores, las cantidades derivadas se han construido combinando diferentes cantidades fundamentales (masa/tiempo, masa/longitud).

La longitud es la única cantidad fundamental que permite, combinándose consigo misma, obtener otras dos cantidades derivadas. Esas cantidades derivadas son el área y el volumen. Para que veas que es así, recuerda que el área *A* de un rectángulo cuyos lados son *a* y *b* es igual a:

$$A = a \cdot b$$

Así, para determinar el área de un rectángulo hay que

- medir las longitudes de sus dos lados y
- multiplicar los valores de esas dos longitudes para obtener el valor del área.

Aunque, en principio, es posible *medir* el área averiguando cuántas veces cabe en ella un área patrón (el cuadrado 1 m × 1 m), resulta más práctico *determinar* el área midiendo las longitudes de los lados.

Problema por resolver

El área del piso de un baño

Competencias a practicar: Usar modelos matemáticos, pensamiento creativo y pensamiento crítico.

Para cubrir el piso de un baño se usaron 63 losetas completas. Las losetas eran cuadradas de 30 centímetros por lado (**Figura 3.7**).

Se pusieron "al hueso" (sin espacio entre las losetas).

1. ¿Cuál es el área del baño en metros cuadrados?

2. Si el piso del baño tiene la forma de un rectángulo, ¿cuál es la longitud de sus lados?

3. Si las losetas tuvieran dimensiones de 45 cm × 45 cm, ¿cuántas losetas bastarían para cubrir el piso del baño?

Verter una determinada cantidad de líquido llega a ser un desafío interesante para el pensamiento creativo.

Sé la estrella de la fiesta

Medio vaso de agua

Competencia a practicar: Explicitar el concepto de volumen.

El problema que propondrás a tu grupo en una fiesta es el siguiente: ¿Cómo verter precisamente la mitad del líquido de un vaso *cilíndrico* completamente lleno de agua, sin usar ningún instrumento de medición?

Si no se conoce el truco, es casi imposible detener el flujo de agua en el preciso instante en que el agua restante ocupa exactamente la mitad del volumen del vaso. Esto se puede demostrar midiendo con una regla el nivel de agua que queda en el vaso. Si el vaso es cilíndrico, el nivel del agua debe ser igual a la mitad de la altura de la parte interior del vaso.

Pero, ¡tú sabrás cómo hacerlo! Deja que el agua salga lentamente y observa detenidamente el nivel del agua en el vaso. Cuando la superficie horizontal del agua divida el volumen del vaso en dos partes iguales, como en la **Figura 3.8**, el vaso estará medio lleno.

Figura 3.8. Medio vaso de agua.

3.3. Métodos directos e indirectos de medición

Si una vez mediste tu altura, esta "longitud" se comparó con una longitud calibrada que era la de una cinta métrica o un metro de sastre. Es decir, se contó cuántas veces cabe el patrón de medida (en tal caso "un centímetro") a lo largo de la longitud que se medía (tu altura). En este caso se trata de un ejemplo del método directo de medida o, en otras palabras, de una medición directa.

Definición

La **medición directa** es el resultado de la comparación directa de la cantidad que se pretende medir con el patrón de medida.

Figura 3.9. El altímetro proporciona la altura del avión basándose en la medición de la presión atmosférica alrededor del avión.

La medición indirecta

No siempre es práctico o posible hacer comparaciones directas. La altura a la que vuela un avión no se mide bajando una cinta métrica desde el avión hasta el suelo. Para conocer la altitud de vuelo, lo que se mide es la presión atmosférica en el lugar donde vuela el avión. Sabiendo cómo cambia la presión atmosférica con la altitud, es posible concluir a qué altura corresponde el valor medido de la presión (**Figura 3.9**). Aquí, se dice que se realiza una **medición indirecta** de la altura.

Definición

La **medición indirecta** de una cantidad física es la medición directa de otras cantidades físicas que tienen una relación matemática conocida con la cantidad cuyo valor se quiere determinar.

De hecho, en la física las mediciones indirectas se practican con más frecuencia que las mediciones directas. En seguida hablaremos de dos mediciones indirectas muy famosas. La primera es la determinación del tamaño de la Tierra; y la segunda, la medición indirecta de la distancia entre la Tierra y la Luna.

Aunque separadas en el tiempo por más de 20 siglos, ambas hazañas muestran la misma habilidad de la mente humana para resolver problemas cuya resolución parecía imposible.

Historia de la física

¿Qué tan grande es la Tierra?

Competencias ejemplificadas: Desarrollar la estrategia para resolver un problema, realizar un experimento pertinente, y obtener información para resolver un problema.

A primera vista, parece increíble que se puedan conectar de alguna manera la sombra de un obelisco y los pasos de los camellos con el tamaño de la Tierra. Pero, gracias al genial razonamiento de Eratóstenes al relacionar esas cuestiones "inconexas", los seres humanos supieron por vez primera el tamaño del planeta que habitan. Vale la pena conocer los detalles de ese razonamiento para apreciar todo lo que se puede concluir a partir de algunas observaciones sencillas.

El científico griego Eratóstenes (276 a. C.-194 a. C.) fue el segundo rector de la famosa Biblioteca de Alejandría establecida por Alejandro Magno. Gracias a información disponible en la Biblioteca, Eratóstenes sabía que el día 21 de junio, día del solsticio de verano en el hemisferio norte, al mediodía los rayos del Sol caían verticalmente sobre la ciudad de Siena (cerca de la actual ciudad egipcia de Asuán).

¿Cómo se sabía esto? En ese momento en Siena se podía ver la imagen del Sol en el fondo de un pozo muy profundo.

Sabiendo que, al mediodía del solsticio de verano, un obelisco vertical producía sombra en la ciudad de Alejandría, Eratóstenes concluyó correctamente que los rayos solares no caían verticalmente sobre esa ciudad (**Figura 3.10**).

¿Qué ángulo formaban los rayos solares con la dirección vertical?

Eratóstenes comparó la longitud de la sombra del obelisco con la longitud del obelisco, y encontró que el tamaño de la sombra era aproximadamente una octava parte del tamaño del obelisco (**Figura 3.11**). Usando sus conocimientos de trigonometría, encontró que el ángulo entre los rayos solares y la vertical en Alejandría era de 7.12º.

¿Qué tiene que ver este hecho con el tamaño de la Tierra?

Si la Tierra es una esfera, como Eratóstenes creía firmemente, entonces las verticales de diferentes lugares no coinciden. Los rayos solares paralelos que caen verticalmente en un lugar forman un ángulo con la vertical en otro (**Figura 3.12**).

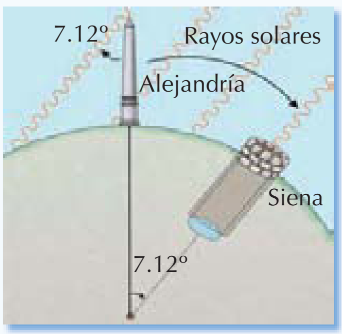


Figura 3.10. El pozo y el obelisco.

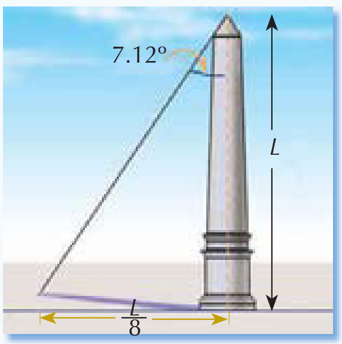


Figura 3.11. Obelisco y su sombra.

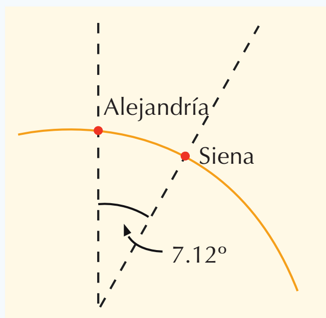


Figura 3.12. Verticales en Siena y Alejandría.

Cuanto más grande sea la diferencia de latitud, más grande será la diferencia entre los ángulos.

La distancia de Siena a Alejandría era conocida porque la ruta entre las dos ciudades era una vía que las caravanas de camellos recorrían muchas veces. Bastaba con multiplicar la rapidez diaria de los camellos por el número de días que duraba el viaje. Se hablaba de una distancia de unos 5,000 estadios. El estadio era la unidad griega de distancia. Si suponemos que la Tierra es redonda, el razonamiento de Eratóstenes quizá haya sido el siguiente:

Si al ángulo de 7.12º le corresponde una distancia de 5,000 estadios, a toda la circunferencia C, que comprende un ángulo de 360º, le correspondería una distancia

$$C = \frac{360^\circ}{7.12^\circ} \cdot 5{,}000 \cdot \text{estadios} = 50.6 \cdot 5{,}000 \cdot \text{estadios} = 253{,}000 \cdot \text{estadios}$$

Así pues, gracias a un razonamiento científico, a la vez sencillo y genial, Eratóstenes logró una gran hazaña. Fue capaz de estimar un valor particular para la circunferencia de la Tierra, aproximadamente 50 veces mayor que la distancia entre Siena y Alejandría.

Según documentos históricos, es probable que un estadio corresponda a 185 metros, o bien, a 0.185 kilómetros. Entonces, el resultado de Eratóstenes para la longitud de la circunferencia de la Tierra equivaldría a 46,800 km (253,000 estadios · 0.185 km/estadio = 46,805 km).

En comparación con 40,000 km, el valor aceptado en la actualidad, el resultado de Eratóstenes fue tan sólo 17% mayor. Tomando en cuenta que la distancia entre Siena y Alejandría se determinó usando un método muy impreciso, el resultado merece toda nuestra admiración.

Pensamiento creativo: ¿Qué otro artefacto y qué otra observación en Siena, en vez de aquella de un pozo profundo, hubiera podido dar, al mediodía, la misma información sobre la dirección vertical de los rayos del Sol?

La primera determinación de la distancia a la Luna la debemos al astrónomo griego Aristarco de Samos, quien aprovechó para eso la cuidadosa observación de la duración de un eclipse lunar. En el siglo II antes de Cristo, su método fue perfeccionado por Hiparco, quien obtuvo un valor no muy diferente del que actualmente se acepta. En el presente se considera que la distancia media entre los centros de la Tierra y la Luna es igual a 60 radios terrestres (alrededor de 385,000 kilómetros).

Durante la primera visita humana a la Luna, realizada el 21 de julio de 1969 por los astronautas del Apolo 11, Buzz Aldrin y Neil Armstrong, se hizo posible un avance fascinante en la determinación precisa de la distancia a la Luna.

Física y astronomía

La distancia entre la Tierra y la Luna

Competencia ejemplificada: Conocer la relación entre la ciencia y la tecnología.

En el primer alunizaje, el espacio disponible en el módulo lunar era muy reducido y fue posible llevar solamente dos instrumentos científicos: un sismómetro y un reflector especial (**Figura 3.13**).

Figura 3.13. El reflector, todavía cubierto, en la superficie lunar.

El sismómetro iba a proporcionar datos sobre los acontecimientos sísmicos en la Luna, lo cual permitiría estudiar la estructura interna de este satélite natural.

El reflector especial, colocado en el Mar de la Tranquilidad por los astronautas una hora antes de terminar su última caminata lunar, iba a ayudar a precisar considerablemente la medición de la distancia entre la Tierra y la Luna. El reflector, cuyas dimensiones eran de 46 cm × 46 cm, estaba cubierto por 100 prismas de silicio que tenían una propiedad extraordinaria. Cada rayo de luz láser reflejado por el reflector, sin importar su dirección de llegada, es reflejado en la misma dirección.

Con la finalidad de determinar la distancia, cada segundo se mandaban, desde el Observatorio McDonald, en Texas, 10 breves pulsos de luz láser (**Figura 3.14**) en dirección del Mar de la Tranquilidad, lugar en donde se colocó el reflector. Solamente una pequeñísima fracción del impulso enviado regresaba hasta los detectores del Observatorio.

Figura 3.14. La señal láser del Observatorio McDonald en Texas.

Midiendo con una extraordinaria precisión el tiempo entre la emisión del pulso y la detección de lo que regresaba de la Luna, se pudo determinar la distancia entre las superficies terrestre y lunar.

¿Cómo fue posible eso? Pues multiplicando el tiempo por la rapidez de la luz (299,792,458 m/s), a la cual se mueven también los pulsos de luz láser, se obtiene la distancia que recorre el pulso en el viaje de ida y vuelta.

¿Qué es lo que determina la precisión de esa medición indirecta de la distancia? Lo determina la precisión con que se mide el tiempo. Si el tiempo se mide con precisión de 10 billonésimas de segundo (una billonésima de segundo es ¡una millonésima parte de una millonésima!), el error en la distancia es la mitad de la distancia que en ese lapso recorre la luz. En un segundo, la luz recorre (aproximadamente) 300,000,000,000 milímetros, es decir, 0.3 billones de milímetros. En diez billonésimas de segundo, la luz recorre solamente 3 milímetros. De tal manera, la distancia entre la Tierra y la Luna se puede determinar con una precisión de 1.5 mm.

Esta precisión extraordinaria hizo posible varios logros científicos. Se detectaron "mareas" en la superficie de la Luna, cuya amplitud es de unos 10 centímetros. Este "sube y baja" del suelo lunar se debe a la atracción gravitacional que ejercen la Tierra y el Sol.

También se ha encontrado que la Luna se aleja de la Tierra 3.8 centímetros al año.

3.4. El sistema Internacional de Unidades

Determinar la cantidad de trigo cosechado o el área de un campo de cultivo eran problemas prácticos de cuya solución dependía el funcionamiento efectivo de las civilizaciones antiguas. Cada pueblo y cada civilización tenían un sistema de medidas propio que les servía para resolver tales problemas de manera satisfactoria. No cabe duda de que los egipcios disponían de algún procedimiento para medir longitudes, que les facilitó la tarea de construcción de las pirámides con la perfección geométrica que todavía nos impresiona (**Figura 3.15**).

Figura 3.15. La astucia para medir longitudes fue indispensable para la construcción de las pirámides.

Mientras los pueblos vivían relativamente aislados, las diferencias entre las unidades usadas no causaban muchos problemas y no se sentía la necesidad de crear unidades universales. Los problemas comenzaron con el desarrollo del comercio. Los comerciantes tenían que ser muy listos para no confundirse con las diversas unidades de medida que se usaban para medir la cantidad de una mercancía y para definir su precio.

Después del Renacimiento, una comunidad emergente comenzó a sufrir las consecuencias negativas de la diversidad de unidades: la comunidad de los científicos. ¿Cómo comparar los resultados de un mismo experimento realizado en dos países diferentes, si sus resultados no estaban expresados en las mismas unidades?

A diferencia de los comerciantes que aceptaron las diferencias como hecho consumado, los científicos trataron de resolver el problema, desarrollando lentamente la base para un sistema universal de unidades.

Los dos problemas por resolver eran:

1. Las relaciones entre las unidades para la misma cantidad eran arbitrarias (por ejemplo, un pie tenía 12 pulgadas, pero una yarda tenía 3 pies).
2. Las unidades mismas eran, también, arbitrarias y estaban relacionadas con características humanas (la pulgada y el pie, por ejemplo).

Las ideas que sirvieron para resolver el primer problema se deben al científico holandés Simon Stevin.

Grandes nombres de la física

Simon Stevin

Simon Stevin (1548-1620) (**Figura 3.16**) fue un físico y matemático de origen holandés. Hizo varias contribuciones importantes en estática e hidrostática.

Fue constructor de molinos y fortificaciones. También inventó un carruaje con velas que, cargado con 28 personas, se movía a una velocidad superior a la de un caballo a galope.

En 1585 publicó un libro de aritmética, titulado *De Thiende* (*Sobre Décimas*) (**Figura 3.17**), en el cual propuso sistemas decimales de medidas para diferentes actividades: reparto de tierras, industria textil, tamaño de recipientes para medir licores, cálculos astronómicos y denominación de las monedas).

Figura 3.16. Simon Stevin.

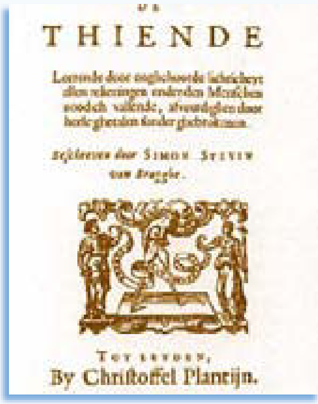


Figura 3.17. La portada del libro *Sobre Décimas* de Stevin.

La pregunta voladora

Si un pueblo imaginario acepta el sistema decimal y usa como unidad fundamental para la longitud el **kobe**, ¿cuáles serían las tres primeras unidades menores y las tres primeras mayores para la longitud?

Mientras que en los sistemas anteriores la relación entre las unidades menores y mayores era arbitraria, en el sistema decimal propuesto por Stevin la relación entre las unidades obedece una regla universal. Las unidades menores se obtienen *dividiendo* la unidad fundamental entre diez y sus múltiplos (cien, mil, diez mil,…); en tanto que las unidades mayores se obtienen *multiplicando* la unidad fundamental por diez y sus múltiplos (cien, mil, diez mil,…).

La posibilidad de solución del segundo problema, que permitiría deshacerse del origen humano de las unidades, fue propuesta en el año 1670 por el padre Gabriel Mouton (1618-1694), párroco de la iglesia de San Pablo, en Lyon (Francia). En sus ratos libres, se dedicaba a las matemáticas y la astronomía. A esta última dedicó el libro *Observaciones de los diámetros aparentes del Sol y la Luna*. Mouton propuso la primera unidad racional de longitud que estaba relacionada, no con las partes del cuerpo humano, sino con el tamaño de la Tierra: la longitud que corresponde a un minuto de la circunferencia terrestre. A esa unidad Mouton la llamó ***milla***.

Problema resuelto

¿Qué tan larga era la milla de Mouton?

Competencia ejemplificada: Usar modelos matemáticos.

¿Cuál sería el equivalente moderno de la milla de Mouton?

Solución: La circunferencia terrestre en el ecuador mide 40,000 kilómetros. Como esta longitud corresponde a 360 grados, a un grado le toca la longitud :

$$\frac{40{,}000 \text{ km}}{360 \text{ grados}} = 111.11 \frac{\text{km}}{\text{grado}}$$

Un grado tiene 60 minutos y, entonces, a un minuto le corresponde la longitud:

$$\frac{111.11 \dfrac{\text{km}}{\text{grado}}}{60 \dfrac{\text{minutos}}{\text{grado}}} = 1.852 \frac{\text{km}}{\text{minuto}}$$

Dar sentido al resultado: La milla de Mouton está todavía en uso, aunque se conoce con el nombre "milla marina". La vieja unidad de velocidad de los barcos era un ***nudo***. Un barco se movía a esa velocidad si recorría una milla marina en una hora.

Como muestra el ejemplo anterior, la milla de Mouton era demasiado grande para las mediciones cotidianas de longitud. Por ello, usando la idea de los sistemas decimales de Stevin, Mouton propuso unidades menores y mayores. Las unidades mayores eran las diez millas y las cien millas; mientras que las unidades menores eran la décima, la centésima y la milésima de milla. Esta última, llamada **virga**, es igual aproximadamente a 1.852 metros, y era comparable con la unidad llamada *toesa* (1.949 m) usada entonces.

Las ideas de Stevin y Mouton tuvieron que esperar un siglo para que alguien las retomara y las pusiera en práctica. Esto ocurrió a finales del siglo XVIII, en los turbulentos tiempos de la Revolución Francesa (**Figura 3.18**).

Figura 3.18. Un episodio de la Revolución Francesa.

Con todas sus variaciones, y por los abusos que cometían los señores feudales locales debido a la falta de controles en ellas, las viejas pesas y medidas se asociaban con el sistema odiado por el pueblo. El ambiente era proclive para la demanda generalizada de un nuevo sistema de unidades que fuese universal.

En el año de 1790, la Asamblea revolucionaria francesa encargó a la Academia de Ciencias estudiar diferentes posibilidades y proponer nuevas unidades. La comisión de distinguidos matemáticos no tenía dudas de que el sistema debía ser decimal. Lo que se discutía mucho era ¿de qué manera elegir una nueva unidad de longitud sin relacionarla con el hombre? Una posibilidad consistía en seguir la idea de Mouton y relacionar esa unidad con el tamaño de la Tierra. Otra era establecer la unidad como la longitud del péndulo cuyo periodo es un segundo.

El 19 de marzo de 1791 la comisión de la Academia anunció su decisión: la nueva unidad de longitud sería una diez millonésima parte de la distancia entre el polo y el ecuador, medida a lo largo del meridiano que pasa por Dunkerque y París, en Francia, y Barcelona, en España.

Para saber cuánto era un metro (en términos de la vieja unidad de longitud, *la toesa parisina*) se tenía que medir de la forma más precisa posible un buen tramo del meridiano, y extrapolar los datos para calcular su longitud completa. La tarea era ardua y los encargados de realizarla, Pierre Méchain y Jean Baptiste Delambre, necesitaron casi 6 años para llevarla a cabo (1792-1798).

Problema por resolver

Distancia entre Dunkerque y Barcelona

Competencia a practicar: Usar modelos matemáticos, realizar medición pertinente; pensamiento crítico.

Consulta un buen mapa de Francia que contenga también la parte norte de España, con la ciudad de Barcelona incluida.

1. Usa la escala del mapa para determinar la distancia directa entre Dunkerque y Barcelona.
2. La latitud de Dunkerque es N 50 grados y 57 minutos; y la de Barcelona, N 41 grados y 23 minutos. ¿Cuántos grados y minutos de diferencia hay entre los paralelos que pasan a través de Dunkerque y Barcelona?
3. Si a un grado le corresponde la longitud de un arco de meridiano de 111 km, ¿cuál debería ser la longitud del arco de meridiano comprendido entre Dunkerque y Barcelona?
4. Si esta longitud no coincide con la distancia que has determinado mediante la escala del mapa, ¿cómo explicarías la diferencia?

A la nueva unidad de longitud se le dio el nombre de *mètre*, derivado de la palabra griega *metron* que significa "medir". La unidad de masa se definió utilizando cierta cantidad de agua, que es una sustancia abundante y al alcance de todos. Esa unidad, denominada *kilogramo*, era la masa de un decímetro cúbico de agua a la temperatura de 4 °C.

Desde entonces, junto con la propagación de la idea de la igualdad social, la marcha triunfal del sistema métrico decimal es una de las más importantes consecuencias de la Revolución Francesa.

La base del sistema métrico decimal son las unidades de longitud (metro) (**Figura 3.19**), de tiempo (segundo) y de masa (kilogramo) (**Figura 3.20**).

Se necesitaron casi dos siglos para que la idea del sistema métrico decimal lograra plena aceptación internacional. En el año de 1960, la Conferencia General de Pesas y Medidas y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas acordaron la creación de un sistema internacional de unidades, conocido actualmente como el Sistema Internacional (SI).

Figura 3.19. El patrón de medida para la longitud.

Figura 3.20. El patrón de medida para la masa en el uso cotidiano.

Cantidades y unidades básicas

El Sistema Internacional considera actualmente siete cantidades básicas. Las primeras tres ya las conoces: *longitud*, *masa* y *tiempo*. Las otras cuatro son *temperatura termodinámica*, *intensidad de corriente eléctrica*, *intensidad luminosa* y *cantidad de sustancia*. Las unidades elegidas para tales cantidades y sus símbolos correspondientes se presentan en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Cantidades y unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades.

Cantidad	Unidad	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Intervalo de tiempo	Segundo	s
Intensidad de corriente eléctrica	Ampere	A
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	Mol	mol
Intensidad luminosa	Candela	cd

En el Sistema Internacional hay dos cantidades auxiliares que son el ángulo plano y el ángulo sólido. Sus unidades y símbolos se presentan en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2. Cantidades y unidades auxiliares del Sistema Internacional de Unidades.

Cantidad auxiliar	Unidad	Símbolo
Ángulo plano	Radián	rad
Ángulo sólido	Estereorradián	sr

Las definiciones actuales de las unidades básicas se presentan en el apéndice de esta obra. Si las observas te parecerán muy extrañas porque se usan muchos términos que quizá no conozcas. No obstante, esa apariencia extraña cambiará conforme tus conocimientos de física se enriquezcan.

3.5. Notación científica y prefijos

En la primera determinación de la circunferencia de la Tierra, el resultado del cálculo fue tan sólo 50 veces mayor que una distancia conocida y, en principio, se podría haber medido directamente.

En las mediciones científicas que se hacen en la actualidad, los valores medidos podrían ser mucho mayores o mucho menores que los valores que se miden directamente. El hombre, por su tamaño, es muy pequeño comparado con las estrellas y, a la vez, muy grande comparado con los átomos.

Sin embargo, el intervalo de dimensiones y distancias del mundo físico que el hombre ha determinado científicamente es impresionante.

Los valores de las cantidades físicas que se refieren al mundo de las estrellas son demasiado grandes, en comparación con los valores comunes en el mundo humano. Por ejemplo, la distancia promedio entre la Tierra y el Sol es de 150,000,000,000 metros, es decir, 150 mil millones de metros.

Por otro lado, el diámetro de un átomo de hidrógeno es aproximadamente 0.000,000,000,1 metros, es decir, sería necesario colocar 10 mil millones de átomos de hidrógeno, uno tras otro, para obtener una cadena atómica de longitud igual a un metro.

Como en la física es necesario hacer cálculos tanto con números muy grandes como con números muy pequeños, se ha buscado una notación práctica para expresar dichos números. La solución consiste en usar las potencias de diez. La forma de escribir los números que representan el resultado de una medición por medio de potencias de diez se llama **notación científica**.

Veamos algunos ejemplos:

$10 = 10^1$

$100 = 10 \times 10 = 10^2$

$1{,}000 = 10 \times 10 \times 10 = 10^3$

$10{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4$

$100{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^5$

$1{,}000{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^6$

$10{,}000{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^7$

$100{,}000{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^8$

$1{,}000{,}000{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^9$

$$0.01 = \frac{1}{100} = \frac{1}{10^2} = 10^{-2}$$

$$0.001 = \frac{1}{1{,}000} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3}$$

$$0.0001 = \frac{1}{10{,}000} = \frac{1}{10^4} = 10^{-4}$$

$$0.00001 = \frac{1}{100{,}000} = \frac{1}{10^5} = 10^{-5}$$

$$0.000001 = \frac{1}{1{,}000{,}000} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6}$$

$$0.0000001 = \frac{1}{10{,}000{,}000} = \frac{1}{10^7} = 10^{-7}$$

$$0.00000001 = \frac{1}{100{,}000{,}000} = \frac{1}{10^8} = 10^{-8}$$

$$0.000000001 = \frac{1}{1{,}000{,}000{,}000} = \frac{1}{10^9} = 10^{-9}$$

Definición

Un **exponente** es el número, positivo o negativo, que indica a qué potencia se eleva una base. En la notación científica, la base es el número diez.

Para las operaciones con potencias de 10, valen algunas reglas simples:

- Al multiplicar dos potencias de 10, el resultado es la potencia de 10 cuyo exponente sea igual a la suma de los exponentes. Por ejemplo:

$$10^3 \cdot 10^4 = 10^{(3+4)} = 10^7$$

$$10^{-5} \cdot 10^3 = 10^{(-5+3)} = 10^{-2}$$

- Al dividir dos potencias de 10, el resultado es la potencia de 10 cuyo exponente sea igual a la resta de los exponentes del numerador y del denominador. Por ejemplo:

$$\frac{10^7}{10^3} = 10^{(7-3)} = 10^4$$

$$\frac{10^{-3}}{10^{-8}} = 10^{-3-(-8)} = 10^{-3+8} = 10^5$$

Problema por resolver

Multiplicar y dividir potencias de 10

Usando las reglas mencionadas, encuentra:

a) $10^3 \cdot 10^{-3}$

b) $10^{-4} \cdot 10^6$

c) $10^{-3} \cdot 10^{-3}$

d) $\dfrac{10^3}{10^5}$

e) $\dfrac{10^{-2}}{10^2}$

f) $\dfrac{10^4}{10^{-4}}$

Problema resuelto

La distancia entre la Tierra y el Sol en la notación científica

Competencia ejemplificada: Dominar medios de comunicación científica.

Ya se ha dicho que la distancia entre la Tierra y el Sol es de 150 mil millones de metros. ¿Cómo se expresaría esta distancia en la notación científica?

Solución: Mil millones de metros, en la notación científica, se escribe como 10^9 metros. Entonces la distancia entre la Tierra y el Sol es $150 \cdot 10^9$ metros. Pero, el número 150 se puede, también, expresar en términos de potencias de 10: $150 = 1.5 \cdot 10^2$. Por ello, la distancia entre la Tierra y el Sol es:

$$1.5 \cdot 10^2 \cdot 10^9 \text{ m} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}.$$

Problema resuelto

El diámetro del átomo de hidrógeno en la notación científica

Competencia ejemplificada: Dominar medios de comunicación científica.

Ya se había dicho que sería necesario colocar 10 mil millones de átomos de hidrógeno, uno tras otro, para obtener una cadena atómica de longitud igual a un metro. En otras palabras, para obtener el diámetro de un átomo de hidrógeno se debe dividir un metro entre 10 mil millones. ¿Cómo se expresaría el diámetro del átomo de hidrógeno en la notación científica?

Solución: Si el metro se divide entre mil millones (10^9), el resultado es 10^{-9} m. Pero, el diámetro del átomo de hidrógeno es solamente una décima parte de tal longitud: $0.1 \bullet 10^{-9}$ m. Como en la notación científica se puede escribir que $0.1 = 10^{-1}$, se obtiene que el diámetro del átomo de hidrógeno es: $1 \bullet 10^{-1} \bullet 10^{-9}$ m $= 10^{-10}$ m.

Problema por resolver

La distancia entre la Tierra y la Luna en la notación científica

Competencia a practicar: Dominar medios de comunicación científica.

Cuando observas la Luna llena (**Figura 3.21**), la distancia entre su centro y el centro de la Tierra es de 385 millones de metros.

Expresa la distancia entre los centros de la Tierra y de la Luna en notación científica.

Figura 3.21. La Luna llena.

Problema por resolver

El diámetro del protón en la notación científica

Competencia a practicar: Dominar medios de comunicación científica.

Según la física actual, el protón está hecho de tres quarks (**Figura 3.22**).

Para formar una "cadena protónica" de 1 m de longitud, sería necesario colocar mil billones de protones uno tras otro. ¿Cuál es entonces, el diámetro de un protón?

Expresa el diámetro de un protón en la notación científica.

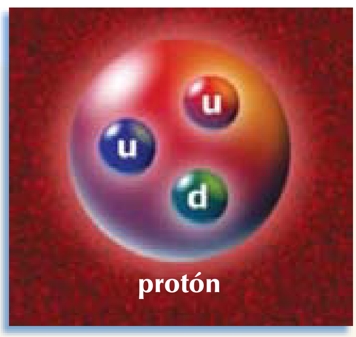


Figura 3.22. El esquema simplificado de un protón.

Para simplificar la expresión de resultados en la notación científica, existen diferentes prefijos en el Sistema Internacional que permiten a los científicos usar una "unidad natural" para algún dominio de la realidad. Por ejemplo, la mil millonésima parte del metro, 10^{-9} m, en el Sistema Internacional se llama "nanómetro" y su símbolo es "nm". El diámetro del átomo de hidrógeno se puede, entonces, expresar como 0.1 nm o una décima de nanómetro.

Mil millones de metros, 10^9 m, en el mismo sistema se llama "gigámetro" y su símbolo es Gm. La distancia entre la Tierra y el Sol es, entonces, 150 Gm o ciento cincuenta gigámetros.

Las diferentes potencias de diez que tienen nombre y símbolo especial en el Sistema Internacional se presentan en las **Tablas 3.3a** y **3.3b**.

Tabla 3.3a. Los prefijos para los múltiplos de diez en el Sistema Internacional de Unidades.

Potencia de 10	Prefijo	Símbolo	Ejemplo
10^{24}	Yotta	Y	Ym
10^{21}	Zetta	Z	Zm
10^{18}	Exa	E	Em
10^{15}	Peta	P	Pm
10^{12}	Tera	T	Tm
10^{9}	Giga	G	Gm
10^{6}	Mega	M	Mm
10^{3}	Kilo	k	km
10^{2}	Hecto	h	hm
10^{1}	Deca	da	dam

Tabla 3.3b. Los prefijos para los submúltiplos de diez en el Sistema Internacional de Unidades.

Potencia de 10	Prefijo	Símbolo	Ejemplo
10^{-1}	Deci	d	dm
10^{-2}	Centi	c	cm
10^{-3}	Mili	m	mm
10^{-6}	Micro	µ	µm
10^{-9}	Nano	n	nm
10^{-12}	Pico	p	pm
10^{-15}	Femto	f	fm
10^{-18}	Atto	a	am
10^{-21}	Zepto	z	zm
10^{-24}	Docto	y	ym

3.6. El sistema inglés de unidades

El sistema inglés de unidades era, en su época gloriosa, el sistema oficial en todas las partes del mundo dominadas e influidas por el Reino Unido, como la India, Australia, Canadá y lo que ahora es Estados Unidos de América. En todas estas naciones, incluido el Reino Unido y con excepción de Estados Unidos de América, actualmente es obligatorio el uso del Sistema Internacional.

Debido a la cercanía con Estados Unidos, donde el sistema inglés es todavía dominante, es recomendable conocer los aspectos básicos de sus unidades.

El sistema inglés, como todos los sistemas de pesas y medidas de Europa occidental, tiene su origen en el sistema romano. Por ejemplo, la milla romana era igual a mil "dobles pasos" de los soldados romanos. Este doble paso equivalía como a cinco pies, por lo que una milla romana era igual precisamente a 5,000 pies romanos. En unidades modernas, la milla romana es, aproximadamente, igual a 1,480 metros.

En el año 1593, la Reina Elizabeth I (**Figura 3.23**) decidió que la milla inglesa ("milla estatutaria") debía ser igual a 5,280 pies.

Figura 3.23. La Reina Elizabeth I determinó la longitud de la milla inglesa.

Unidades para longitud, área, volumen y masa

En el sistema inglés actual, las unidades para la longitud son las siguientes:

Pulgada = 2.54 cm
Pie = 12 pulgadas
Yarda = 3 pies = 36 pulgadas
Milla = 1,760 yardas = 5,280 pies

Las unidades de área y volumen son, respectivamente: pulgada cuadrada, pie cuadrado, yarda cuadrada y milla cuadrada; y pulgada cúbica, pie cúbico, yarda cúbica y milla cúbica.

Problema por resolver

Relación entre las unidades de área y volumen en el sistema inglés

Habilidad a practicar: Determinar la relación entre las unidades en el sistema inglés.

- ¿Cuántas pulgadas cuadradas tiene un pie cuadrado? ____________________
- ¿Cuántos pies cuadrados tiene una yarda cuadrada? ____________________
- ¿Cuántas pulgadas cúbicas tiene un pie cúbico? ____________________
- ¿Cuántos pies cúbicos tiene una yarda cúbica? ____________________

Para medir el volumen de los líquidos en el sistema inglés, se usa una unidad especial llamada "galón" (**Figura 3.24**). Un galón es igual a 3.785 litros.

Las unidades menores son una cuarta (*quart,* en inglés), un cuarto de galón, igual a 0.946 litros; y una pinta (*pint,* en inglés), un octavo de galón, igual a 0.473 litros.

Figura 3.24. Un galón de leche.

Problema por resolver

Beber un galón de leche

Competencia a practicar: Expresar un concepto mediante representación matemática.

Es común tomar en el desayuno dos decilitros de leche, un poquito menos que una media pinta. Existe una insensata competencia en los Estados Unidos de América, llamada "el desafío del galón" (*the gallon challenge*, en inglés), donde los participantes tienen que beber un galón de leche (**Figura 3.25**).

Figura 3.25. Bebiendo un galón de leche.

El problema principal para los competidores no está tanto en poder beber esa descomunal cantidad de leche (¡suficiente para casi 20 desayunos!). El desafío real consiste en aguantar, después de haberla tomado, una hora sin vomitar.

El récord actual lo tiene un competidor que tardó sólo 41.3 segundos para tomar el galón de leche. ¿Cuánta leche tuvo que tragar el competidor cada segundo?

Advertencia: No intentes, en ninguna circunstancia, practicar "el desafío del galón".

Figura 3.26. Los barriles de petróleo.

La pregunta voladora

¿Cuántos litros de crudo caben en un barril de petróleo?

En el sistema inglés existe, también, otra unidad de volumen. Se usa al hablar de la producción de petróleo crudo y de su precio en el mercado: el barril de petróleo (**Figura 3.26**).

El barril de petróleo es igual a 42 galones.

La unidad de masa en el sistema inglés es la *libra*. Equivale a 454 gramos, o bien, 0.454 kilogramos.

3.7. Transformación de unidades

Aunque el uso del Sistema Internacional es obligatorio en la mayoría de los países del mundo, en algunos su uso tan sólo se recomienda. Uno de esos países es Estados Unidos de América. El sistema de unidades que prevalece ahí es todavía el sistema inglés. Como los productos estadounidenses se venden en México y como nuestro país y el vecino del norte tienen también un importante flujo de personas, vale la pena que conozcas ese sistema.

En la **Tabla 3.4** se presentan las unidades de longitud del sistema inglés y sus valores en el Sistema Internacional.

Tabla 3.4. La relación entre las unidades del sistema inglés y las del SI.

Unidad en el sistema inglés	Valor equivalente en el SI
Pulgada	2.54 cm
Pie	30.48 cm = 0.3048 m
Yarda	91.44 cm = 0.9144 m
Milla	1609.344 m = 1.609 km

De los datos de esta tabla, se obtienen fácilmente los factores para la conversión de datos del sistema inglés al Sistema Internacional.

Problema por resolver

La diagonal de una pantalla en centímetros

Habilidad a practicar: Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.

Los fabricantes de pantallas para televisiones y computadoras especifican el tamaño de la pantalla dando la longitud de su diagonal en pulgadas. Por ejemplo, una pantalla de cristal líquido (LCD), producida por Panasonic (**Figura 3.27**), tiene una diagonal de 26 pulgadas.

¿Cuánto mide esa diagonal en centímetros?

Figura 3.27. Pantalla de 26 pulgadas.

¿Cuál sería el factor de transformación para expresar una longitud en pulgadas si se conoce en centímetros?

El factor de transformación sería:

$$\frac{\text{pulgadas}}{2.54\text{ cm}} = \frac{1}{2.54}\frac{\text{pulgadas}}{\text{cm}} = 0.3937\frac{\text{pulgadas}}{\text{cm}}$$

Problema por resolver

El diámetro de un disco compacto

Habilidad a practicar: Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.

El diámetro de los discos compactos (**Figura 3.28**) es de 12 centímetros.

¿Cuál es el diámetro en pulgadas?

Figura 3.28. Los discos compactos.

Problema por resolver

Factores de transformación

Habilidad a practicar: Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.

- ¿Cuál es el factor de transformación si se tiene que pasar de metros a pies?
- ¿De metros a yardas?
- ¿De kilómetros a millas?

SUGERENCIA: Consulta la tabla 3.4.

Física en la vida cotidiana

Estimación de la distancia al lugar en donde cayó el rayo

Competencia ejemplificada: Ilustrar los conceptos básicos de la física con ejemplos aplicados en la vida cotidiana.

Figura 3.29. Los rayos todavía atemorizan a muchas personas.

Los rayos (**Figura 3.29**) todavía atemorizan a mucha gente y por ello es interesante saber cómo estimar qué tan cerca o tan lejos caen durante una noche tormentosa.

¿Has notado que primero se ve la luz del rayo y después se escucha el sonido del trueno? Si se sabe el tiempo que tarda el sonido del trueno en llegar hasta donde tú estés, así como las velocidades de la luz y del sonido en el aire, hay una forma práctica de estimar la distancia a la que cayó el rayo.

Como la luz viaja a una velocidad de 300,000 km/s, se puede considerar que la luz prácticamente no necesita tiempo para llegar desde el lugar donde cayó el rayo hasta el lugar donde tú estés. En otras palabras, habría un error pequeñísimo al suponer que el rayo cayó en el preciso instante en que tú notaste su luz.

Si en ese momento pones a funcionar un cronómetro, podrás saber cuantos segundos tardará el sonido del trueno para llegar hasta ti. La rapidez del sonido en el aire es aproximadamente de 330 m/s, es decir, el sonido necesita unos 3 segundos para recorrer una distancia de un kilómetro.

Entonces, una vez que se conoce el tiempo transcurrido entre los momentos de llegada de la luz y del sonido, obtendrás la distancia aproximada en kilómetros, dividiendo ese tiempo entre 3. Por ejemplo, si ese tiempo es de 16 segundos, el rayo cayó en un lugar que está a una distancia de un poquito más de 5 kilómetros.

Pensamiento creativo: ¿Entre qué número entero deberías dividir el tiempo que tarda el sonido en llegar para conocer la distancia aproximada en millas?

Podría pensarse que las transformaciones de unidades son algo innecesario. Sin embargo, conocer los aspectos básicos de los diferentes sistemas de unidades, que están presentes en nuestra vida más de lo que quisiéramos, forma parte de una "conciencia numérica". Tal conciencia es importante para muchas profesiones. Un descuido en el manejo de unidades diferentes puede tener consecuencias desastrosas, como lo muestra la historia del *Mars Climate Orbiter*.

La búsqueda del conocimiento

La catástrofe del *Mars Climate Orbiter*

Capacidad a practicar: Obtener información para responder preguntas.

El 23 de septiembre de 1999, el *Mars Climate Orbiter* de la NASA (**Figura 3.30**), cuyo costo de construcción fue de 125 millones de dólares, equivocó desastrosamente su ruta.

En vez de quedarse a una altura de 150 kilómetros, la nave bajó hasta una altura de 60 kilómetros sobre la superficie marciana, penetrando así más de lo planeado en la atmósfera de Marte. Es probable que el *Orbiter* se haya quemado en la atmósfera o que haya chocado contra la superficie de Marte.

Busca en la Internet la información sobre la catástrofe del *Mars Climate Orbiter* y responde la siguiente pregunta:

¿Qué tipo de error fue la causa de la catástrofe?

____

____

Figura 3.30. El *Mars Climate Orbiter.*

Problema por resolver

La capacidad de un bidón

Habilidad a practicar: Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.

Según los datos del fabricante, el bidón de la **Figura 3.31** tiene una capacidad útil de 6 galones.

¿Cuántos litros de líquido caben en el bidón?

____

Figura 3.31. El bidón de 6 galones.

Problema por resolver

La capacidad del petrolero más grande del mundo

Habilidad a practicar: Realizar transformaciones de unidades de un sistema a otro.

El petrolero más grande del mundo, llamado *Jahre Viking* (**Figura 3.32**), puede transportar 4 millones de barriles de crudo.

¿Cuántos litros es eso? ________________

¿Cuántos metros cúbicos? ________________

Figura 3.32. El petrolero más grande del mundo.

3.8. La precisión de los instrumentos de medición

En la vida cotidiana las mediciones no suelen ser muy precisas porque, de hecho, no existe una necesidad importante de tal precisión. Al pagar un kilogramo de frijol, no nos importa si faltan unos cuantos gramos.

Tampoco se preocupa el vendedor si le pagamos el precio de un kilogramo y nos llevamos unos gramos más. Algo parecido vale también para la compra y venta de telas. Unos milímetros de más o de menos no son ni una gran pérdida ni una gran ganancia.

Claro, las posturas serían muy diferentes si se tratara de oro o de otra sustancia valiosa. En tal caso, un error de un gramo no sería visto con buenos ojos ni por el comprador ni por el vendedor. Por eso, no es "por un milagro" que la balanza que emplea un platero sea más precisa que la que se usa en la tienda de la esquina.

La importancia de la precisión es aún más grande en la ciencia. El avance del conocimiento científico depende enormemente de la calidad de las mediciones. Un ejemplo muy instructivo es la reciente historia del Telescopio Espacial *Hubble* (*Hubble Space Telescope*).

La búsqueda del conocimiento

La miopía inicial del "ojo celeste"

Capacidad a practicar: Obtener información para responder preguntas.

La calidad de las imágenes del Universo que se captan con los telescopios terrestres está limitada por la presencia de la atmósfera. La eliminación de esta influencia adversa, que por mucho tiempo parecía un sueño inalcanzable, podría lograrse si se dispone de un telescopio colocado fuera de la atmósfera, es decir, si se cuenta con un telescopio espacial. La realización de esta idea fue el propósito de uno de los más costosos proyectos científicos: el Telescopio Espacial Hubble (**Figura 3.33**).

Figura 3.33. El "ojo celeste" proporciona a los astrónomos una vista mejorada del Universo.

El telescopio recibió su nombre como reconocimiento al trabajo del astrónomo estadounidense Edwin Hubble, quien detectó la expansión del Universo. Aunque los astrónomos, con mucho cariño, para el telescopio usaban un nombre más coloquial: "ojo celeste" (*eye in the sky*).

El telescopio fue puesto en órbita por el transbordador espacial Discovery el día 25 de abril de 1990. Su espejo de 2.4 metros era el espejo más caro de todos los tiempos, ya que nunca antes se había construido un espejo con tanto cuidado.

Sin embargo, a pesar de tanto cuidado y de todas las mediciones realizadas durante su fabricación, el espejo tuvo un defecto inesperado.

Busca en la Internet la información sobre el telescopio espacial Hubble y responde las preguntas:

- ¿Por qué la imagen del Universo formada por el telescopio era borrosa y estaba lejos de tener la calidad esperada?
- ¿De qué manera se reparó el sistema óptico del telescopio?
- ¿Por qué el telescopio espacial Hubble es el instrumento astronómico más exitoso de todos los tiempos?

Sabiendo que el éxito de su trabajo depende de la calidad de las mediciones que realizan, los científicos siempre andan en busca de mediciones e instrumentos cada vez mejores.

Aunque te parezca extraño, el avance en las mediciones científicas se ha logrado aceptando que no existen mediciones sin incertidumbre. Así, los científicos saben que no es posible medir "el valor verdadero" de alguna cantidad, y que la única vía para avanzar consiste en tratar de reducir el tamaño de la incertidumbre que cada medición necesariamente lleva consigo.

Una manera de reducir el tamaño de la incertidumbre es construir instrumentos más precisos, es decir, instrumentos que sean capaces de realizar la comparación con una escala cuya división mínima sea cada vez más pequeña.

La importancia de la división mínima

El tamaño de la división mínima de los instrumentos determina su precisión. Si se cuenta con dos instrumentos con escalas, el instrumento cuya escala tenga la menor división mínima se considerará más preciso. Veamos un ejemplo concreto.

Problema resuelto

Precisión de las dos escalas de una regla escolar

Competencia ejemplificada: Expresar una idea mediante una representación matemática.

Las reglas escolares suelen tener dos escalas, una en centímetros y otra en pulgadas (**Figura 3.34**). ¿Cuál de las dos es más precisa?

Solución: La escala en centímetros tiene una división mínima de 1 milímetro. De 2 pulgadas en adelante, la escala en pulgadas tiene una división mínima igual a $^{1}/_{16}$ parte de una pulgada. Como una pulgada tiene 25.4 milímetros, $^{1}/_{16}$ de pulgada sería 25.4 mm/16 = 1.59 mm. En consecuencia, en este caso, la división mínima de la escala en centímetros es menor que la de la escala en pulgadas.

No obstante, para las dos primeras pulgadas de la regla, la división mínima es igual a $^{1}/_{32}$ parte de una pulgada, lo cual lleva a un valor de la división mínima de 25.4 mm/32 = 0.794 mm.

Entonces, en este último caso, la división mínima de la escala en pulgadas es menor que la de la escala en centímetros. Cuando sea posible usar esta parte de la escala en pulgadas, la longitud se determinará con mayor precisión que usando la escala en centímetros.

Figura 3.34. ¿Cuál escala tiene la menor división mínima?

¿Cómo reportar el resultado de una medición?

Al medir con una regla escolar la longitud de una pila R6 AA de 1.5 voltios (**Figura 3.35**), se obtuvo el resultado de 4.7 cm.

¿Este es el valor verdadero de la longitud de la pila? Aunque el resultado está expresado en milímetros, tal valor no se puede tomar como verdadero.

Se suele tomar como la **incertidumbre de una medición** la mitad de la división mínima del instrumento usado. Para la regla escolar utilizada, cuya división mínima es 0.1 cm = 1 mm, la incertidumbre es entonces de 0.05 cm = 0.5 mm. El resultado para la longitud de la pila se debe reportar como:

$$L = (4.7 \pm 0.05) \text{ cm}$$

Figura 3.35. Medición de la longitud de una pila.

Es decir, lo que se puede afirmar con certeza es que la longitud de la pila se encuentra entre 4.65 cm y 4.75 cm.

Foto laboratorio

La masa de la moneda de 5 pesos

Capacidad a practicar: Obtener información para responder preguntas.

La masa de una moneda de 5 pesos se midió con una báscula digital de cocina (**Figura 3.36**).

La báscula en cuestión indica la masa en gramos enteros. ¿Cómo reportarías el resultado de la medición de la masa de la moneda de 5 pesos si usaste esta balanza?

Figura 3.36. Una moneda de 5 pesos sobre una báscula.

Figura 3.37a. El libro como "instrumento auxiliar" en la medición de la altura de una persona.

3.9. Tipos de errores: ¿De dónde vienen las incertidumbres?

El primer tipo de incertidumbres está asociado con el grado de cuidado con que se efectúa la medición. Este es un tipo de *error casual* (o *error aleatorio*). Por ejemplo, para determinar la altura de una persona se suele emplear un libro colocado sobre la cabeza (**Figura 3.37a**), con la finalidad de "pasar" esa altura a la pared trazando una línea con un lápiz. Al medir la distancia entre el piso y la línea trazada en la pared, se obtiene la altura de la persona. La altura de la línea y la altura de la persona coinciden solamente si el libro, que se colocó sobre la cabeza, está en posición horizontal y perpendicular a la pared.

Para eliminar al máximo la incertidumbre causada por la posición del libro, sería mejor usar un nivel como instrumento auxiliar (**Figura 3.37b**).

En el caso de la medición de la longitud de la pila, la incertidumbre en el valor que se asigna a la longitud de la pila depende de qué tanto coincidan el cero de la regla y el borde de la pila. Pero, también, depende de

Figura 3.37b. El nivel como "instrumento auxiliar" en la medición de la altura de una persona.

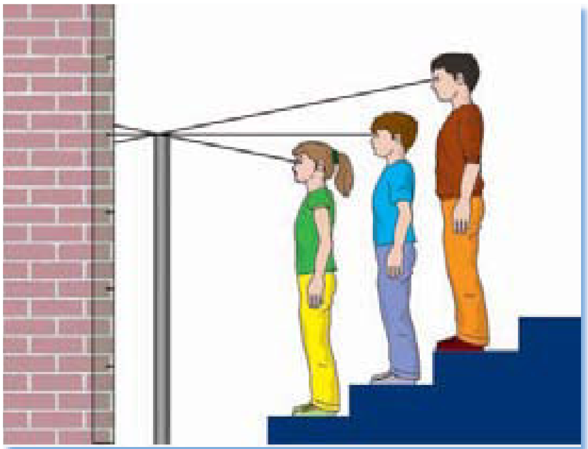


Figura 3.38. El error de paralaje.

cómo se hace para juzgar cuál línea milimétrica de la escala coincide con el otro borde de la pila.

Si la dirección de la mirada no es perpendicular a la escala, es decir, si hay un ángulo entre la dirección de la mirada y la dirección perpendicular a la escala (**Figura 3.38**), se comete lo que se llama el **error de paralaje**.

La influencia de los errores aleatorios en el valor de la cantidad que se mide se puede disminuir cuando muchas personas realizan más mediciones. Se supone que son iguales tanto la probabilidad de "errar" hacia valores mayores como la probabilidad de "errar" hacia valores menores, en comparación con el valor "verdadero".

Si se acepta la completa veracidad de esta suposición, se concluiría que el mejor valor para una serie de mediciones es el **valor medio**.

Definición

El **valor medio** es igual a la suma de los valores obtenidos, dividida entre el número de mediciones.

Si los valores obtenidos, al medir n veces una cantidad física x, son x_1, x_2, x_3,..., x_n, la expresión matemática para el valor medio es:

$$< x >= \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n}$$

Problema por resolver

Distancia de frenado de un Golf GT

Competencia a practicar: Dominar los medios de comunicación científica.

Figura 3.39. El Golf GT.

Una revista sobre automóviles reporta 10 valores para la distancia de frenado, medidos al hacer frenar completamente un Golf GT (**Figura 3.39**) que inicialmente viajaba a 100 km/h.

Los valores se presentan en la siguiente tabla.

Frenado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distancia de frenado	42.8	42.8	42.6	42.9	42.1	42.8	42.2	42.1	42.0	42.3

1. ¿Cuál es el valor promedio de la distancia de frenado?
2. Según los criterios establecidos, la calidad de los frenos se determina según el valor promedio de la distancia. Si el valor está entre 30 y 40 metros, la calidad es excelente. Si está entre 40 y 50 metros, la calidad es regular. Si está entre 50 y 60 metros, la calidad es deficiente.

Tomando en cuenta el valor promedio de la distancia de frenado, ¿cuál es la calidad de los frenos del Golf GT?

Existe toda una ciencia, la teoría de la probabilidad, que se dedica a estudiar cómo calcular el mejor resultado posible en una serie de mediciones, en las cuales las diferencias entre los resultados se deben a causas aleatorias, así como a determinar cuál es la incertidumbre relacionada. Usando la teoría de la probabilidad es posible determinar en qué resultados se puede confiar más y en cuáles menos. De esa manera se puede evitar que la incertidumbre debida a los errores casuales sea mucho mayor que la incertidumbre ocasionada por la división mínima del instrumento.

Otra fuente de incertidumbre, que no vamos a considerar detalladamente y cuya influencia en los resultados no se puede reducir haciendo un mayor número de mediciones, son los **errores sistemáticos**.

Definición

Un **error sistemático** es aquel causado por la mala calibración del instrumento de medición.

Si al medir la masa de algún cuerpo, los estudiantes no verifican que la balanza muestre cero cuando no haya nada sobre ella, todas las mediciones tendrán también un error sistemático.

La influencia de este tipo de error no se reduce haciendo más mediciones de forma más cuidadosa. La única manera de eliminar un error sistemático consiste en verificar la calibración del instrumento. En el caso de la balanza, hay que verificar por lo menos dos puntos. La balanza tiene que marcar cero si no hay nada encima de ella y marcar, por ejemplo, 1 kg si se coloca sobre ella una pesa patrón de 1 kg.

Claro, el valor que muestra la balanza debe estar dentro de los límites de su sensibilidad. Si se supone que la balanza debe detectar la masa de 1 miligramo, entonces, en los casos mencionados, la balanza no está bien calibrada si marca 0.003 g (al no tener nada encima) o 0.997 g (al colocar en ella un patrón de 1 kg).

En principio, todos los instrumentos de medición que se usen en la venta de diferentes sustancias a los consumidores deben pasar cada año una prueba de calibración.

Actividad de investigación

¿Las gasolinerías venden litros completos o incompletos?

Propósito: Averiguar qué piensan los conductores sobre la venta de litros incompletos.

Competencias a practicar: Obtener información para responder una pregunta, y comunicar los resultados y las conclusiones.

La compra de gasolina necesariamente requiere que la gasolina pase a través de las mangueras (**Figura 3.40**).

En el año 2009, la Procuraduría Federal del Consumidor (Profeco) inmovilizó 10,052 mangueras, de las cuales en casi el 40% se encontraron errores de repetibilidad; mientras que en el 6% el error era despachar litros incompletos.

Entrevista a 10 conductores de automóvil y averigua si creen que en su tanque entra realmente la cantidad de gasolina marcada y cobrada.

- ¿Qué argumentos dan quienes piensan que hay robo de gasolina?
- ¿Qué argumentos dan quienes piensan que no hay robo de gasolina?

Figura 3.40. La venta de gasolina en una estación de servicio.

Pensamiento creativo: ¿De qué manera se podría determinar si hay robo o no en la venta de gasolina?

Cuantificación de los errores en las mediciones

En una serie de mediciones, la mejor aproximación al valor verdadero de la cantidad medida la representa el valor medio. Conociendo el valor medio, es posible definir el **error absoluto** en cada medición particular.

Definición

El **error absoluto** en una medición de la serie es la diferencia entre el valor obtenido y el valor medio de esa serie.

Si el valor obtenido en la medición número "n" es x_n y el valor medio de la serie es $<x>$, entonces el error absoluto para tal medición EA_n es:

$$EA_n = x_n - <x>$$

El error absoluto no brinda información suficiente para juzgar el significado verdadero del error. Al medir la longitud, un error absoluto de 2 mm no es un gran error si el valor medio es 20,000 mm (20 m). Sin embargo, si el valor medio es 20 mm, entonces el error absoluto de 2 mm sería un error considerable.

Para remediar ese aspecto del error absoluto, se define el **error relativo**.

Definición

El **error relativo** de una medición de la serie es el cociente entre el error absoluto y el valor medio de esa serie.

Expresado simbólicamente, el error relativo ER_n para la medición número "n" es:

$$ER_n = \frac{EA_n}{<x>} = \frac{x_n - <x>}{<x>} = \frac{x_n}{<x>} - 1$$

Problema resuelto

La circunferencia de un balón de fútbol

Competencias ejemplificadas: Dominar medios de la comunicación científica, obtener información para responder preguntas.

Con el afán de saber si el balón de fútbol (**Figura 3.41**) con el que jugaban tenía las medidas reglamentarias, cuatro jóvenes decidieron determinar su tamaño.

Usando una cinta de sastre, cada uno de ellos midió la circunferencia del balón. Los resultados que obtuvieron fueron:

$$x_1 = 78.6 \text{ cm}, x_2 = 79.4 \text{ cm}, x_3 = 79.2 \text{ cm y } x_4 = 78.8 \text{ cm}.$$

1. ¿Cuál es el valor medio de esa serie de mediciones?
2. ¿Cuál fue el error absoluto de cada medición?
3. ¿Cuál fue el error relativo de cada medición?

Figura 3.41. Un balón de fútbol.

Solución:

1. El valor medio de esa serie de mediciones es:

$$<x> = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} = \frac{78.6 \text{ cm} + 79.4 \text{ cm} + 79.2 \text{ cm} + 78.8 \text{ cm}}{4} = \frac{316 \text{ cm}}{4} = 79 \text{ cm}$$

2. Los errores absolutos de cada medición fueron:

$EA_1 = x_1 - < x > = 78.6 \text{ cm} - 79 \text{ cm} = -0.4 \text{ cm}$

$EA_2 = x_2 - < x > = 79.4 \text{ cm} - 79 \text{ cm} = 0.4 \text{ cm}$

$EA_3 = x_3 - < x > = 79.2 \text{ cm} - 79 \text{ cm} = 0.2 \text{ cm}$

$EA_4 = x_4 - < x > = 78.8 \text{ cm} - 79 \text{ cm} = -0.2 \text{ cm}$

3. Los errores relativos de cada medición fueron:

$$ER_1 = \frac{EA_1}{< x >} = \frac{-0.4 \text{ cm}}{79 \text{ cm}} = -0.005 \qquad ER_2 = \frac{EA_2}{< x >} = \frac{0.4 \text{ cm}}{79 \text{ cm}} = 0.005$$

$$ER_3 = \frac{EA_3}{< x >} = \frac{0.2 \text{ cm}}{79 \text{ cm}} = -0.003 \qquad ER_4 = \frac{EA_4}{< x >} = \frac{-0.2 \text{ cm}}{79 \text{ cm}} = -0.003$$

Dar sentido a los resultados: Dos resultados son mayores que el valor medio, y los errores absolutos correspondientes son positivos. Dos resultados son menores que el valor medio y los errores absolutos correspondientes son negativos.

Actividad de seguimiento: Busca en la Internet la circunferencia reglamentaria de los balones de fútbol y responde la pregunta: ¿el balón con que jugaban los jóvenes tenía el tamaño reglamentario?

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. Define los conceptos *cantidad física*, *patrón de medida* y *medición*.

2. ¿Cuál es la diferencia entre medición directa y medición indirecta?

3. ¿Qué es lo que determina la precisión de un instrumento?

4. ¿Cuál es la diferencia entre un error casual y un error sistemático?

Desarrollo de estrategias para resolver un problema

6. ¿Sería posible medir el grosor de una hoja de papel usando una regla? Describe tu procedimiento. ¿Se trata de una medición directa o indirecta?

7. Imagina que estás en la prisión de un rey en la Antigüedad. Un día, el monarca te ofrece la libertad a cambio de que le enseñes cómo estimar rápidamente el número de granos que hay en una tonelada de trigo, es decir, sin tener que contarlos uno por uno. Naturalmente, el rey pone a tu disposición todo lo que consideres necesario para la estimación. ¿Qué le pedirías y cómo estimarías el número de granos? ¿Se trataría de una medición directa o indirecta

Ordenar información respetando categorías, jerarquías y relaciones

5. Completa el mapa de conceptos sobre las cantidades físicas y su medición (**Figura 3.42**).

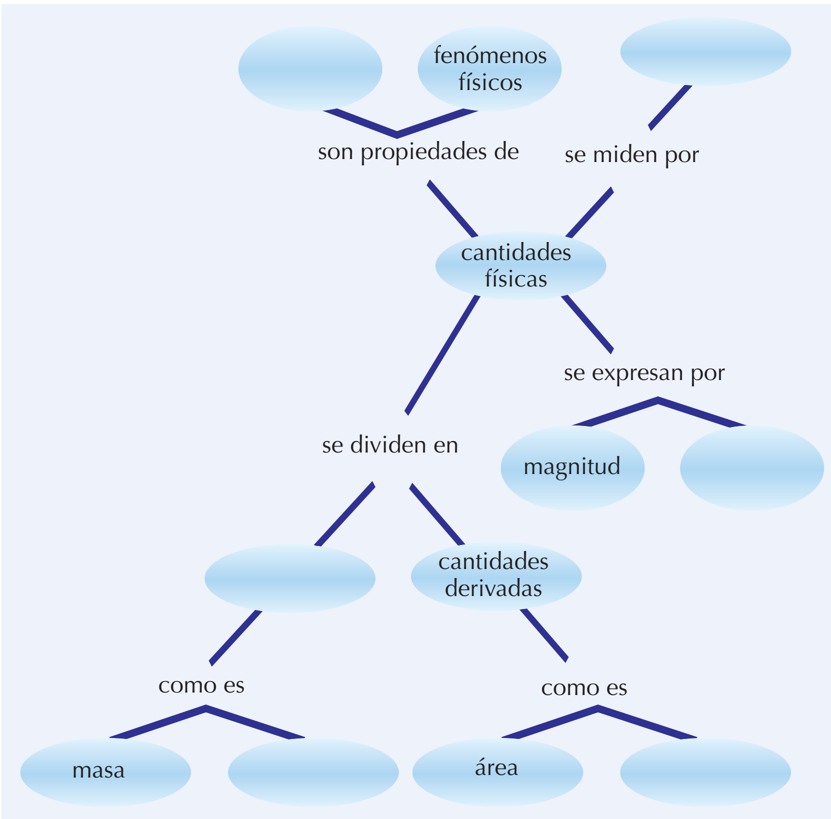


Figura 3.42. Mapa de conceptos sobre las cantidades físicas y su medición.

Obtener información para responder una pregunta

8. La bicicleta y el automóvil representados en el dibujo (**Figura 3.43**) han recorrido ambos 1 km. ¿Cuáles ruedas, las de la bici o las del auto, han realizado un número menor de vueltas en el recorrido? Describe tu razonamiento.

Figura 3.43. ¿Cuáles ruedas dan más vueltas?

Dominar la comunicación gráfica

9. Al medir cómo cambia la rapidez del sonido en el aire con el cambio de la temperatura del aire, se obtienen los siguientes pares de valores (−20 ºC, 318 m/s), (−10 ºC, 324 m/s), (0 ºC, 330 m/s), (10 ºC, 336 m/s), (20 ºC, 342 m/s) y (30 ºC, 348 m/s).

a) Presenta estos valores en una tabla.

b) Presenta estos valores en forma gráfica.

Transformar las unidades

10. Expresa tu altura en *a*) pulgadas, *b*) pies y *c*) yardas.

11. El piloto de un avión informa a los pasajeros que vuelan a 30,000 pies de altura. ¿A cuántos metros equivale esto?

12. El radio de la Tierra es de 6,370 km. ¿A cuántas millas equivale esto?

13. Un automóvil recorre 27 millas y gasta un galón de gasolina. ¿Cuántos litros de gasolina gasta para recorrer 100 kilómetros?

14. En México se consumen cada día alrededor de 800,000 barriles de gasolina. ¿Cuántos litros de gasolina es eso?

Aplicar la ciencia en la vida cotidiana

15. El nivel normal del colesterol es de 200 miligramos por decilitro de sangre. ¿Cuánto es esto en kilogramos por metro cúbico?

16. Probablemente sabes que el cuerpo humano constantemente reemplaza el material del que está formado. Por ejemplo, para posibilitar el cambio de piel cada hora se desprenden aproximadamente 600,000 pedazos de la piel vieja de un hombre adulto. En un año la masa total de los pedazos de piel desprendidos es de 1.5 libras. ¿Cuál es la masa de un pedazo de piel? ¿Cuál es la masa de piel desprendida durante 50 años de vida adulta?

17. En una persona normal, el corazón bombea 80 mililitros de sangre con cada latido. Estima la cantidad de sangre bombeada por el corazón a lo largo de una vida de duración típica.

Dominar la notación científica

18. Escribe en la notación científica los números:

0.00000478 = ______________________

334,000,000 = ______________________

0.000982 = ______________________

555,000,000,000 = ______________________

Construir modelos matemáticos simples

19. Estima la altura que tendría una columna elaborada con 1 millón de monedas de 1 peso.

20. Estima el volumen que ocuparían 10 toneladas de manzanas.

21. Estima el volumen de tu cuerpo, tomando en cuenta que básicamente está hecho de agua. La densidad del agua es de 1 kg/dm^3.

22. ¿Qué información sería suficiente para estimar qué tan delgada es la capa de pintura que cubre las paredes de tu sala?

Usar fórmulas matemáticas

23. La gran pirámide de Keops está hecha de 2,500,000 bloques de piedra. Se cree que cada uno de los bloques tiene, en promedio, una masa de 2.5 toneladas. Si el volumen total de la pirámide es de 2,353,000 metros cúbicos, ¿cuál es la densidad de la piedra de la que fueron cortados los bloques?

24. ¿Podrías levantar un prisma hecho de oro, cuya base sea de 1 dm × 0.5 dm y cuya longitud sea de 10 dm? La densidad del oro es, aproximadamente, de 20 kg/dm^3.

Pensamiento crítico

25. La densidad media de la Tierra es de 5,500 kg/m^3. Si la densidad del material que forma la corteza terrestre está entre 2,000 y 3,000 kg/m^3, ¿qué podrías decir sobre la densidad del material que forma la parte interior del globo terráqueo?

Reconocer y modificar los propios prejuicios

26. Un cuadrado de lado *a* tiene área de 16 cm^2. ¿Qué área tendría un cuadrado cuyo lado sea dos veces más grande, es decir, igual a 2*a*?

a) 32 cm^2 *b*) 48 cm^2

c) 64 cm^2 *d*) 80 cm^2

Verifica, dibujando los dos cuadrados, si tu selección fue la correcta.

27. Un cuadrado de lado *a* tiene una área de 36 cm^2. ¿Qué área tendría un cuadrado cuyo lado sea dos veces más pequeño, es decir, igual a *a*/2?

a) 9 cm^2 *b*) 12 cm^2

c) 15 cm^2 *d*) 18 cm^2

Verifica, dibujando los dos cuadrados, si tu selección fue la correcta.

Vectores

Las cantidades físicas se inventan para describir, explicar y predecir los fenómenos físicos. Al encontrar por primera vez cierta cantidad física, es importante fijarse en su definición y en cómo puede medirse o determinarse. Después, hay que darse cuenta de cuáles son las reglas matemáticas que se deben usar, cuando los razonamientos sobre lo que ocurre o pueda ocurrir en el mundo físico tengan que ver con esa cantidad física.

En algunos casos, las reglas matemáticas son sencillas y no es difícil reconocerlas y usarlas. Para verlo, considera lo que se debe hacer para resolver el siguiente problema: ¿Cuántas botellas de medio litro se pueden llenar con el agua contenida en una botella de un litro y medio?

Es claro que la respuesta se obtendría distribuyendo el agua de la botella de 1.5 litros entre las botellas de 0.5 litros. Encontraríamos que se llenarían precisamente tres botellas de 0.5 litros. Sin embargo, también es posible hallar la respuesta matemáticamente, sin realizar ninguna actividad manual, si "descubrimos" que para este caso el resultado de la distribución del agua es igual al resultado de la operación matemática de dividir 1.5 litros entre 0.5 litros:

$$\frac{1.5\,\text{litros}}{0.5\,\text{litros}} = 3$$

Este poder de las operaciones matemáticas, que nos permite ahorrarnos la ejecución de acciones sobre los cuerpos y fenómenos físicos al resolver problemas relacionados con cantidades físicas, hace que las matemáticas sean una herramienta indispensable para hacer física. Con las matemáticas es posible llevar a cabo razonamientos cuantitativos sobre las características medibles del mundo que nos rodea.

En este tema vas a aprender que para realizar razonamientos con ciertas cantidades físicas no bastan las sencillas reglas de las operaciones aritméticas que fueron suficientes para resolver el problema de los volúmenes de las botellas. Tales cantidades físicas "diferentes" se llaman "cantidades vectoriales".

Propósitos del tema 4

- Conocer las características de las cantidades escalares y vectoriales.
- Saber realizar las operaciones básicas con vectores, usando los métodos gráfico y analítico.
- Desarrollar actividades relacionadas con vectores en situaciones cotidianas.

4.1. Diferencia entre cantidades escalares y vectoriales

El volumen de las botellas del ejemplo anterior es una *cantidad escalar*.

Definición

Las **cantidades escalares** son las cantidades físicas determinadas completamente por un número y la unidad correspondiente.

En física la distancia, el tiempo y la masa son ejemplos de cantidades escalares.

Como ya se dijo, para razonar cuantitativamente con las cantidades escalares bastan las operaciones aritméticas: suma, resta, multiplicación y división. El ejemplo que sigue te dará la oportunidad de reconocer esta importante relación entre las cantidades físicas y las operaciones matemáticas, la cual nos permite realizar predicciones cuantitativas sobre los acontecimientos del mundo.

La pregunta voladora

¿La fuerza y la temperatura son cantidades escalares?

Problema por resolver

Canicas sobre una balanza electrónica

Competencias a practicar: Construir un modelo matemático, plantear hipótesis.

Figura 4.1. La balanza indica la masa total de las 10 canicas.

Sobre una balanza electrónica se encuentran 10 canicas (**Figura 4.1**). El número que aparece en la pantalla de la balanza corresponde con la masa total de las 10 canicas.

Indicando explícitamente las operaciones aritméticas usadas en tu razonamiento, responde las siguientes preguntas:

1. ¿Qué número debería aparecer en la pantalla, si junto a las 10 canicas se colocan otras 2?

---

2. ¿Qué número debería aparecer en la pantalla si, de las 10 canicas, se quitan 3?

Pensamiento crítico: ¿Qué se debe suponer sobre la masa de las canicas para que tu razonamiento sea válido? ¿Cómo verificarías que esa suposición es válida?

Lo más sorprendente y bello de la modelación matemática de los cambios en las cantidades físicas es que un mismo patrón de razonamiento matemático puede aplicarse en situaciones diferentes que, a primera vista, no tienen nada que ver entre sí. El siguiente problema sirve para ilustrar explícitamente este hecho importante.

Problema resuelto

El movimiento angular del minutero del reloj

Competencias ejemplificadas: Construir y aplicar un modelo matemático.

Figura 4.2. Reloj tradicional.

La manecilla grande o minutero de un reloj tradicional (**Figura 4.2**) gira, en 10 minutos, un ángulo de 60°.

1. ¿Cuál es el ángulo de giro del minutero en 12 minutos?
2. ¿Y cuál en 7 minutos?

Solución: Tratátandose de la manecilla de un reloj, se supone que su movimiento es bastante regular, es decir, que la manecilla gira ángulos iguales en intervalos de tiempo iguales.

De ser así, es fácil determinar el ángulo que la manecilla gira cada minuto. Para ello, hay que dividir el ángulo que corresponde a 10 minutos entre 10. Como ese ángulo es de 60°, entonces, el ángulo de giro de la manecilla en un minuto es de 6° (60°/10 = 6°).

1. Para encontrar el ángulo recorrido en 12 minutos se procede de dos maneras. Una es sumar al ángulo recorrido en 10 minutos, que es de 60°, el ángulo que se recorre en 2 minutos, que es de 12°. El resultado es 72°. El mismo resultado se obtiene multiplicando el número total de minutos, 12, por el ángulo que corresponde a un minuto, 6° (12 × 6° = 72°).

2. Para encontrar el ángulo recorrido en 7 minutos, se puede restar del ángulo recorrido en 10 minutos, que es de 60°, el ángulo que se recorre en 3 minutos que es de 18° (3 × 6°). El resultado es 42° (60° − 18° = 42°). Una forma alternativa de encontrar el mismo resultado consiste en multiplicar el número total de minutos, que son 7, por el ángulo que corresponde a un minuto que es, otra vez, de 6° (7 × 6° = 42°).

Pensamiento analógico: Compara el problema de la masa de las canicas con el del movimiento del minutero. ¿Qué característica del movimiento de la manecilla corresponde a la masa total de las canicas? ¿Qué cantidad física de las canicas corresponde al ángulo recorrido en un minuto? ¿A qué característica de las canicas corresponde el tiempo del movimiento de la manecilla?

Pensamiento creativo: ¿A qué otro acontecimiento en el mundo real se podría aplicar el mismo patrón de razonamiento matemático usado para resolver los problemas de las canicas y el movimiento de la manecilla del reloj?

Pensamiento crítico: ¿Qué suposición se debería hacer para aplicar el mismo patrón de razonamiento al cálculo de las distancias recorridas por un corredor de maratones en 12 y 7 minutos, si se conoce la distancia que recorre en 10 minutos? ¿Qué tan válida es esa suposición?

A diferencia de las cantidades escalares, hay cantidades físicas que no quedan plenamente determinadas si tan sólo se conocen su magnitud y su unidad. Esto significa que no es posible resolver completamente los problemas relacionados con esas cantidades. Veamos un problema que muestra la necesidad de inventar y definir cantidades físicas más complejas que las cantidades escalares.

Problema resuelto

La descripción incompleta del movimiento de un automovilista

Competencia ejemplificada: Evaluar información de manera crítica.

Con su vehículo, un automovilista recorre 5 km sobre una carretera recta. Se detiene un momento y después recorre otros 5 km.

1. ¿Cuál es la distancia total recorrida por el automovilista?
2. ¿A qué distancia del punto de partida se encuentra al final el automovilista?

Solución:

1. La distancia total que recorre el automovilista se obtiene sumando las dos distancias, la recorrida antes y la recorrida después de la parada:

$$\text{distancia total recorrida} = 5\text{ km} + 5\text{ km} = 10\text{ km}$$

2. Si después de la parada el automovilista se desplaza alejándose del punto de partida, la distancia al punto de partida será:

$$5\text{ km} + 5\text{ km} = 10\text{ km}$$

Sin embargo, si durante la parada el automovilista se da cuenta de que olvidó algo y se desplaza acercándose al punto de partida, la distancia al punto de partida será:

$$5\text{ km} - 5\text{ km} = 0\text{ km}$$

La distancia cero al punto de partida indica que el automovilista, al desplazarse así, regresaría a ese punto.

Entonces, con información incompleta sobre el movimiento del automovilista no se sabe a ciencia cierta en qué punto se encontraría éste después de los dos desplazamientos mencionados.

El ejemplo anterior muestra que el desplazamiento del automovilista con respecto al punto de partida no queda determinado si se conoce únicamente su magnitud (la distancia recorrida) y su dirección (la dirección de la carretera). También es necesario conocer el sentido del desplazamiento. El sentido del desplazamiento indica, en el caso particular de los dos desplazamientos considerados, si el automovilista se desplaza alejándose del punto de partida o acercándose hacia éste. De manera más general, el sentido del desplazamiento se expresa matemáticamente según la siguente regla:

1. Si el movimiento a lo largo de una dirección ocurre hacia un lado, el desplazamiento se considera positivo.
2. Si el movimiento ocurre hacia el lado opuesto, el desplazamiento se considera negativo.

Más adelante hablaremos de nuevo sobre la diferencia entre la distancia y el desplazamiento. Veamos ahora un problema que desafiará tu intuición.

Problema por resolver

Un caracol trepador

Competencias a practicar: Construir un modelo matemático, plantear hipótesis, reconocer y modificar un prejuicio.

Un caracol, empujado por un secreto motivo que nunca reveló a los demás, decidió un día trepar por un poste cuya altura era de 10 m. Durante el día, el caracol subía 3 metros (**Figura 4.3a**), pero durante la noche, mientras dormía, bajaba 2 metros (**Figura 4.3b**).

1. ¿Cuántas jornadas necesitó el caracol para llegar al punto más alto del poste?

   a) 7 jornadas   *b*) 8 jornadas   *c*) 9 jornadas   *d*) 10 jornadas

2. ¿Cuál era, en ese momento, el desplazamiento del caracol con respecto al pie del poste?

   a) 7 m   *b*) 8 m   *c*) 9 m   *d*) 10 m

3. ¿Cuál es la distancia total recorrida por el caracol, sin importar si algunas partes las recorrió despierto o dormido, hasta llegar al punto más alto del poste?

   a) 30 m   *b*) 34 m   *c*) 38 m   *d*) 42 m

4. Justifica cada una de tus respuestas anteriores.

___

___

5. ¿Qué aprendiste con esta actividad?

___

___

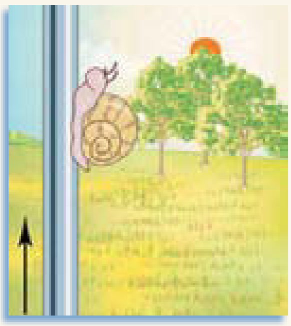


Figura 4.3a. El avance durante el día es de 3 m.

Figura 4.3b. El retroceso durante la noche es de 2 m.

A diferencia de la distancia recorrida, que es una cantidad escalar, el desplazamiento es una *cantidad vectorial*.

Definición

Una **cantidad vectorial** es una cantidad física que está completamente determinada por su magnitud, su dirección y su sentido.

La mayoría de las cantidades físicas relacionadas con la dirección y el sentido del movimiento, o con las interacciones entre los cuerpos, son cantidades vectoriales. Para el movimiento esas cantidades son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Para las interacciones entre los cuerpos esas cantidades son las fuerzas.

De todas esas cantidades físicas hablaremos con detalle en el segundo y tercer bloques del curso. En esta parte vamos a considerar solamente su carácter vectorial.

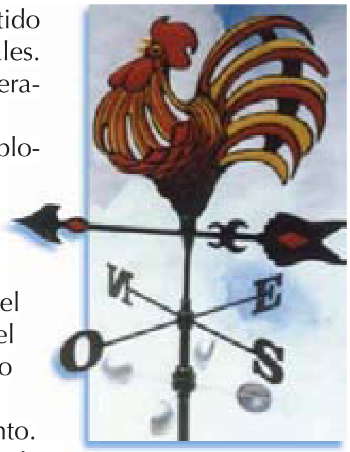


Figura 4.4. Las veletas sirven para indicar la dirección y el sentido del viento.

La descripción vectorial de los vientos

A modo de ejemplo, veamos las características vectoriales de la velocidad del viento que regularmente se mencionan en los informes del clima. La dirección y el sentido del viento se hacen visibles gracias a un instrumento muy antiguo llamado veleta (**Figura 4.4**).

La veleta de la **Figura 4.4** también sirve para determinar la rapidez del viento. Esto se hace contando las vueltas que dan los 4 hemisferios ubicados debajo de la parte de la veleta que indica los puntos cardinales (E, O, N y S).

La pregunta voladora

Según la **Figura 4.4**, ¿en qué dirección y sentido crees que sople el viento?

La búsqueda del conocimiento

La escala de Beaufort

Competencias a practicar: Utilizar tecnologías de la información, obtener información para responder preguntas.

Figura 4.5. Francis Beaufort (1774-1857).

En 1806 el almirante inglés Francis Beaufort (**Figura 4.5**) estableció su célebre escala para clasificar la "fuerza" de los vientos. Su escala tiene 12 grados (12 fuerzas), de los cuales el más alto está asignado a los huracanes. En el año de 1874, la escala fue adoptada por el Comité Meteorológico Internacional y se usa todavía en la navegación marítima y en los reportes meteorológicos.

Busca en Internet información sobre la escala de Beaufort y contesta las siguientes preguntas:

1. ¿En qué unidades se describe la fuerza de los vientos?
2. Desde el punto de vista de la física, ¿es correcta esa unidad?

Tomando en cuenta las descripciones de esa escala, ¿cuál fue la fuerza del viento más fuerte que has experimentado?

La rapidez, la dirección y el sentido de los vientos eran muy importantes para los navegantes antiguos. Sin conocerlos y aprovecharlos no hubiera sido posible atravesar exitosamente los mares y océanos en los barcos de vela. Eran precisamente de ese tipo de barcos las carabelas con que Cristóbal Colón cruzó el océano Atlántico y descubrió el Nuevo Mundo (**Figura 4.6**).

Figura 4.6. La carabela Santa María de Cristóbal Colón era movida por los vientos.

En la actualidad los barcos de vela ya no se usan mucho para el transporte marítimo. Sirven más bien como atracción turística para quienes sienten cierta nostalgia por los tiempos pasados.

Ese drástico cambio no eliminó, sin embargo, la necesidad de conocer detalladamente el comportamiento de los vientos (su rapidez, dirección y sentido) que soplan sobre tierra firme. Dicha información se resume por medio de las *rosas de los vientos*, que indican la rapidez, la dirección, el sentido y la frecuencia relativa de

Figura 4.7. Las características vectoriales de los vientos influyen muchísimo en la elección del lugar adecuado para colocar los generadores eólicos.

La raíz de las palabra

Vector

proviene del sustantivo latino *vector, vectoris* que significa "el que acarrea, el que conduce, el que transporta".

La pregunta voladora

¿Cuáles serían las longitudes de los segmentos orientados que se usarían para representar los vectores de fuerza de 15 newtons y de 42 newtons?

La pregunta voladora

¿Cuál sería la dirección del vector que representa la fuerza con la cual el bebé jala el cochecito?

La pregunta voladora

¿En cuál extremo del segmento vertical que represente al vector correspondiente a la fuerza que la Tierra ejerce sobre la pesa (*el peso de la pesa*) estaría el triángulo?

los vientos en algún lugar específico. Más adelante veremos un ejemplo de esta forma de representar las características de los vientos. Saber hacia dónde y a qué velocidad soplan los vientos es esencial para tomar decisiones sobre los lugares idóneos donde colocar generadores eólicos de corriente eléctrica (**Figura 4.7**).

Las cantidades vectoriales, como la velocidad de los vientos, se representan con entes matemáticos llamados "vectores".

4.2. Representación gráfica de un vector

Para indicar que una cantidad física es una cantidad vectorial, se coloca una flecha sobre la letra que simboliza esa cantidad o se imprime la letra en negritas. Por ejemplo, si se quiere enfatizar que cierta fuerza F es un vector se tiene que escribir como $\vec{F}$ (la letra F con una flecha arriba de ella) o como $\boldsymbol{F}$ (la letra F en negrita).

Aparte de los símbolos mencionados que indican que cierta cantidad es una cantidad vectorial, hay diferentes maneras de representar los vectores y cada una debe ser capaz de indicar, de modo preciso, las tres características básicas de los mismos:

- la magnitud
- la dirección y
- el sentido.

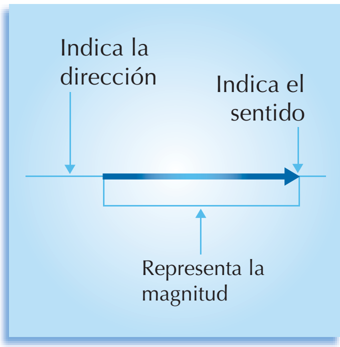


Figura 4.8. Representación gráfica de un vector.

La representación más común de un vector es la representación gráfica. En la representación gráfica, los vectores se representan mediante *segmentos orientados* (**Figura 4.8**).

a) La longitud del segmento representa la magnitud del vector.

Cuando se tienen que dibujar varios vectores de la misma naturaleza, hay que establecer una escala que exprese la relación constante entre la magnitud de los vectores y la longitud de los *segmentos orientados*. Por ejemplo, al dibujar varios vectores de fuerza, la escala puede ser "1 cm = 10 newtons". Entonces, el vector que corresponde a una fuerza de 30 newtons tendría una longitud de 3 cm; y el vector que corresponde a una fuerza de 50 newtons, una longitud de 5 cm.

b) La dirección de la recta, de la cual forma parte el segmento orientado, representa la dirección del vector.

Figura 4.9. Un bebé empuja un cochecito.

Esa dirección debe reflejar la dirección de la cantidad vectorial que se representa mediante el vector. Por ejemplo, el vector que corresponde a la fuerza con que un bebé empuja su cochecito debe tener una dirección horizontal, porque ésa es la dirección del empuje (**Figura 4.9**).

c) El triángulo (la punta de flecha), colocado en un extremo del segmento para convertirlo en un segmento orientado, indica el sentido del vector.

Figura 4.10. Una joven sostiene una pesa.

El vector correspondiente a la fuerza que ejerce una joven sobre una pesa para sostenerla se representa mediante un segmento vertical con el triángulo (la punta de flecha) en el extremo superior apuntando hacia arriba (**Figura 4.10**).

Problema por resolver

Direcciones y sentidos de los vientos

Competencia a practicar: Relacionar las expresiones simbólicas de un fenómeno de la naturaleza y sus características observables.

El dibujo en la **Figura 4.11** y otros similares se usaban en los mapas antiguos para indicar los diferentes rumbos que deberían seguir los barcos.

Los cartógrafos los elaboraban con un cuidado especial y solían tener una belleza visual considerable. En el dibujo en cuestión, el Norte se señala con una flor y el Este con una cruz.

La clasificación de los rumbos establecida en esos dibujos se utilizaba también para indicar la dirección y el sentido de los vientos y, por eso, se acuñó el nombre de *Rosa de los vientos*. El sentido de los vientos es el rumbo hacia el cual sopla el viento.

Figura 4.11. Una antigua Rosa de los vientos.

a) ¿Cuántos rumbos indica esta Rosa de los vientos?

b) ¿Cuál "pétalo" de esta Rosa representa un viento que sopla desde el Norte?

c) ¿Cuál "pétalo" representa un viento que sopla hacia el Oeste?

d) ¿Qué viento es representado por el séptimo "pétalo", contando en la dirección horaria con el "pétalo" del Norte incluido?

Problema resuelto

La rosa de vientos para un lugar imaginario

Competencia ejemplificada: Relacionar las expresiones simbólicas de un fenómeno de la naturaleza y sus características observables.

En un lugar imaginario, después de muchos años de mediciones meteorológicas, se encontró que los vientos tienen un comportamiento regular. Los datos sobre direcciones, sentidos y rapideces de los vientos lugareños se dan en la siguiente tabla:

Hacia dónde sopla el viento	Velocidad
Norte	30 m/s
Noreste	20 m/s
Este	10 m/s
Sureste	30 m/s
Sur	30 m/s
Suroeste	20 m/s
Oeste	30 m/s
Noroeste	10 m/s

Dibuja los vectores que representan las velocidades de los vientos en forma de una Rosa de los vientos.

Solución: Como se quiere obtener la Rosa de los vientos para este lugar, hay que dibujar todos los vectores con el mismo punto inicial. Usando una escala de "1 cm = 10 m/s", el vector que representa la velocidad del viento que sopla hacia el Norte, tendrá longitud de 3 cm, dirección vertical y sentido hacia arriba. La velocidad del viento que sopla hacia el Este estará representada por el vector de longitud igual a 1 cm, dirección horizontal y sentido hacia la derecha.

Al dibujar todos los vectores de las velocidades, se obtendrá la Rosa de los vientos, como la de la **Figura 4.12**.

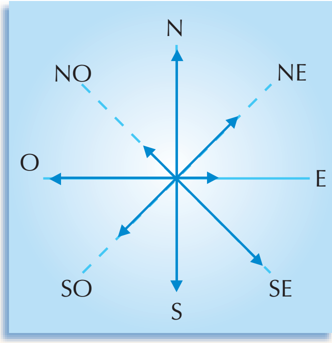


Figura 4.12. La Rosa de los vientos del lugar imaginario.

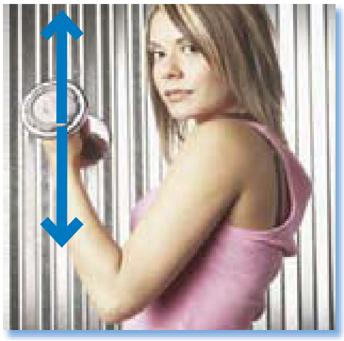


Figura 4.13. Una joven sostiene una pesa.

4.3. Clasificación de los sistemas de vectores

Aunque sería posible, de acuerdo con el propósito del análisis, fijar nuestra atención en una sola cantidad vectorial (por ejemplo, una velocidad o una fuerza), los acontecimientos y las situaciones físicas implican normalmente dos o más cantidades vectoriales.

Veamos otra vez la situación en que la joven sostiene una pesa (**Figura 4.13**).

El hecho de que la pesa esté en reposo implica que sobre la pesa hay dos acciones que se equilibran. Una es la acción de la joven dirigida hacia arriba y otra es la acción de la Tierra dirigida hacia abajo. Conceptualizamos estas dos acciones como "la fuerza de la joven" y "la fuerza de la Tierra". La última acción se conoce, también, como *el peso de la pesa*.

Los vectores que representan "la fuerza de la joven" y "la fuerza de la Tierra" forman un ***sistema de vectores***.

Definición

Un **sistema de vectores** es el conjunto de vectores que representan dos o más cantidades vectoriales, que describen un acontecimiento o una situación física.

Si los vectores de un sistema de vectores comparten la misma dirección o tienen direcciones paralelas se llaman ***vectores colineales***. Los vectores "la fuerza de la joven" y "la fuerza de la Tierra" de la **Figura 4.13** son dos vectores colineales.

Los vectores de desplazamiento y los vectores de las velocidades del movimiento de un automóvil sobre una carretera recta también son vectores colineales.

No está de más destacar que los vectores colineales no necesitan tener ni la misma magnitud ni el mismo sentido. Basta con que compartan una dirección o tengan direcciones paralelas.

Física en la vida real

Vectores colineales como parte de una señal de tránsito

Competencia a practicar: Opinar sobre el impacto de la tecnología en la vida cotidiana.

Dos vectores colineales son la parte central de la señal de tránsito que indica la doble circulación (**Figura 4.14**).

Esta señal se usa cuando una vialidad de un solo sentido cambia a un tramo de dos carriles donde se permite la circulación en los dos sentidos. La señal debe colocarse al inicio del tramo aludido.

Preguntas de seguimiento: ¿Qué problemas ocasiona el incremento del tránsito?

¿Cuáles de estos problemas se resuelven mediante las señales de tránsito?

Figura 4.14. La señal que indica la doble circulación.

Los vectores cuyas direcciones se cruzan en un punto común se llaman *vectores concurrentes*. Un ejemplo de un sistema de vectores concurrentes son los vectores que representan las fuerzas involucradas en el lanzamiento de una flecha (**Figura 4.15**).

Las fuerzas involucradas son las dos fuerzas que ejerce la cuerda tensada y la fuerza que ejerce la mano del arquero sobre la cuerda. Los vectores que representan esas fuerzas se dibujaron en la **Figura 4.16**. Sus direcciones se cruzan en el punto de la cuerda que hace contacto con la cola de la flecha.

Figura 4.15. Lanzamiento de una flecha.

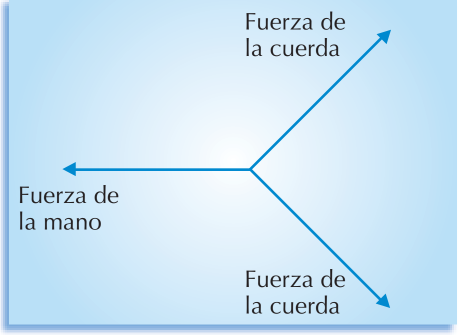


Figura 4.16. Los tres vectores concurrentes que representan las fuerzas involucradas en el lanzamiento de una flecha.

Problema por resolver

Fuerzas concurrentes en una piñata colgada

Competencias a practicar: Identificar el principio que subyace a un fenómeno cotidiano, aplicar modelos matemáticos.

Las piñatas son muy populares en todas las fiestas en México y en otros lugares del mundo donde viven mexicanos (**Figura 4.17**). Sus formas originales y sus colores alegres ponen de manifiesto la creatividad y el espíritu del pueblo mexicano.

Figura 4.17. Una piñata mexicana.

Para que una piñata cumpla con su propósito, además de los aspectos estético y cultural, también debe respetar las leyes de la física. Si la cuerda de la que cuelga no es suficientemente fuerte, la piñata podría caer antes de lo previsto y, en el peor de los casos, lastimar a alguien.

Describe y dibuja los vectores concurrentes que representen las fuerzas presentes en la situación de una piñata colgada. ¿En qué punto se cruzan las direcciones de esas fuerzas?

4.4. Operaciones matemáticas con vectores

Hasta el momento, nuestro objetivo era ver cómo se representan gráficamente los vectores y reconocer algunas de las situaciones cuya comprensión requiera usar cantidades vectoriales.

Para estudiar más de cerca estas y otras situaciones es necesario:

a) conocer las operaciones matemáticas que se pueden realizar con los vectores; y

b) apreciar las relaciones que deben satisfacer los vectores que describan los movimientos, y las situaciones de equilibrio.

Solamente así serás capaz de ejercitar tu capacidad de razonar sobre el mundo que te rodea usando cantidades vectoriales. En algunos casos sencillos, el *razonamiento vectorial* va a confirmar tus conocimientos intuitivos. Por ejemplo, cuando alguien maneja sobre una autopista recta a rapidez constante, el vector de la velocidad del automóvil también es constante.

Sin embargo, en algunos casos el *razonamiento vectorial* te dará conocimientos a los cuales no es posible llegar sin los vectores. Por ejemplo, ¿te gustaría saber de qué manera se tiene que colgar y levantar una piñata, para que disminuya la posibilidad de que la cuerda se rompa?

Suma de vectores: el caso de los desplazamientos

El problema de sumar vectores de manera general aparece naturalmente al buscar el desplazamiento total de un cuerpo cuando conocemos sus desplazamientos parciales.

Ya hemos visto que el desplazamiento es un concepto más complejo que la distancia, porque incluye explícitamente el sentido del movimiento –ya sea realizado o posible– y por ello se debe tratar como una cantidad vectorial.

Definición

El **vector de desplazamiento** es el vector de magnitud igual a la distancia entre el punto inicial y el punto final, dirección igual a la de la recta que conecta el punto inicial con el punto final, y sentido hacia el punto final.

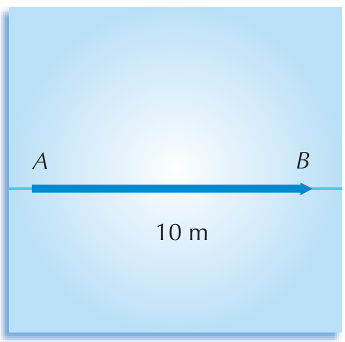


Figura 4.18. El desplazamiento de una persona entre los puntos *A* y *B*.

La pregunta voladora

Usando la definición del desplazamiento, ¿puedes justificar que el desplazamiento total debe ser cero?

Supongamos que una persona se desplaza 10 m, del punto *A* al punto *B* (**Figura 4.18**).

El vector de su desplazamiento, $\vec{d}_{\text{ida}}$, es el vector de magnitud igual a 10 m, dirección igual a la de la recta que conecta los puntos *A* y *B*, y sentido igual al sentido del movimiento, es decir, hacia el punto *B*.

Si la persona regresa al punto *A*, va a recorrer otra vez la distancia de 10 m, pero en sentido contrario. Por tanto, el vector de desplazamiento, para el regreso, será el vector opuesto al vector $\vec{d}_{\text{ida}}$, es decir, $\vec{d}_{\text{vuelta}} = -\vec{d}_{\text{ida}}$.

El desplazamiento total $\vec{D}$ de ida y vuelta es igual a la suma de esos desplazamientos:

$$\vec{D} = \vec{d}_{\text{ida}} + \vec{d}_{\text{vuelta}} = \vec{d}_{\text{ida}} + (-\vec{d}_{\text{ida}}) = \vec{d}_{\text{ida}} - \vec{d}_{\text{ida}} = 0$$

Aunque el ejemplo anterior quizá parezca muy artificial, en el mundo real, de hecho, hay muchos movimientos en que es normal regresar al punto inicial. Por ejemplo, en diversas carreras de natación, que se realizan en albercas olímpicas cuya longitud es de 50 metros, los nadadores deben regresar al punto inicial, realizando así un desplazamiento total igual a 0 metros, aunque hayan nadado distancias totales de 100 m, 200 m, o bien, 400 m.

Sin embargo, a veces ocurre que algún nadador, debido a un espasmo, debe detenerse antes y no termina la carrera. En tal caso, su desplazamiento total no es igual a cero. Veamos cómo se puede encontrar el vector del desplazamiento de tal nadador desafortunado.

Problema resuelto

Vector del desplazamiento de un nadador desafortunado

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En una competencia de 100 m estilo libre (**Figura 4.19**), un nadador afectado por un espasmo tuvo que detenerse, después de que había nadado solamente 20 m y de haber dado vuelta en el extremo de la piscina opuesto al del punto de salida.

1. ¿Cuál es la distancia total que nadó mientras participaba en la carrera?
2. ¿Cuántos metros le faltaron para terminar la carrera?
3. ¿Cuál era su vector de desplazamiento en el momento en que abandonó la carrera?

Figura 4.19. Una competencia de 100 m estilo libre.

Solución:

1. Como la alberca tiene una longitud de 50 m, ésta es la distancia que nadó hasta el momento en que dio vuelta. De regreso nadó tan sólo 20 m. La distancia total nadada es, entonces, igual a la suma de estas dos distancias: 50 m + 20 m = 70 m.
2. Como la distancia que debía nadar era de 100 m, le faltaron 30 m (100 m − 70 m = 30 m).
3. Los vectores de desplazamientos de ida, de vuelta y total están dibujados en la **Figura 4.20**.

El vector de desplazamiento total tiene magnitud de 30 m y sentido hacia el punto en que el nadador se detuvo.

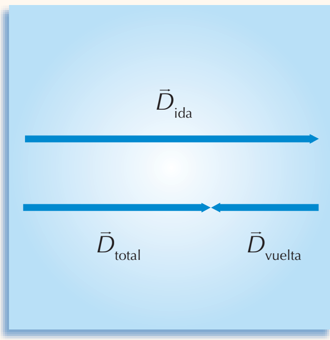


Figura 4.20. Los desplazamientos de ida, de vuelta y total del nadador desafortunado.

Si consideramos el vector del desplazamiento total como la suma vectorial de los vectores de los desplazamientos de ida y vuelta, ¿cuál sería el procedimiento gráfico para encontrarlo?

Se puede advertir lo siguiente:

1. La punta del vector de desplazamiento de ida coincide con la “cola” del vector de desplazamiento de vuelta.
2. La “cola” del vector del desplazamiento total coincide con la cola del desplazamiento de ida.
3. La punta del vector del desplazamiento total coincide con la punta del vector de desplazamiento de vuelta.

Como no todos los desplazamientos ocurren sobre una línea recta, en vez de desplazamientos de ida y de vuelta es más adecuado hablar simplemente del primer desplazamiento y el segundo desplazamiento. En tal caso, el procedimiento gráfico para sumar dos desplazamientos y encontrar el desplazamiento total será:

1. Se tiene que dibujar el vector del segundo desplazamiento, de tal manera que su "cola" coincida con la punta del vector del primer desplazamiento.
2. La suma de los vectores de esos dos desplazamientos, o el desplazamiento total, es el vector cuya "cola" coincide con la cola del vector del primer desplazamiento, y cuya punta toca la punta del vector del segundo desplazamiento.

Este procedimiento gráfico para sumar dos vectores se llama *método del polígono*.

Problema resuelto

El desplazamiento de un jugador de fútbol americano

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un jugador de fútbol americano (**Figura 4.21**) toma el balón y corre 6 metros hacia el norte. Para evitar el ataque de la defensa, cambia bruscamente de dirección y corre otros 6 metros hacia el este.

1. ¿Qué distancia total corrió el jugador?
2. ¿Cuál es el vector del desplazamiento total con respecto al punto donde el jugador tomó el balón?

Figura 4.21. Un jugador de fútbol americano que corre.

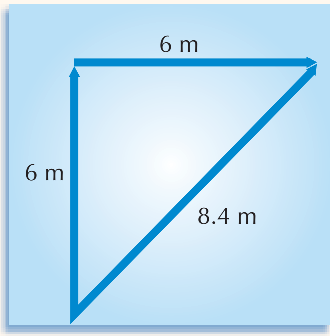


Figura 4.22. Los vectores de los desplazamientos del jugador.

Solución:

1. La distancia total que corrió el jugador es igual a la suma de las distancias recorridas en las dos carreras. Como ambas distancias son de 6 m, entonces la distancia total es 12 m.
2. Usando una escala de "1 cm = 2 m" , los vectores de los desplazamientos hacia el norte, hacia el este y total quedan como en la **Figura 4.22**.

Con una regla escolar se puede determinar que la longitud del vector de desplazamiento total es aproximadamente de 4.2 cm. Esa longitud, según la escala, corresponde a una distancia de 8.4 m. El ángulo que forma el vector de desplazamiento total con la dirección norte es de 45°.

Dar sentido al resultado: El jugador podría haber llegado al mismo punto, y haber realizado el mismo desplazamiento con respecto al punto en que tomó el balón, si hubiera corrido la distancia de 8.4 m en la dirección noreste. Como es bien sabido, esa dirección forma un ángulo de 45° con la dirección norte y también un ángulo de 45° con la dirección este.

El método del polígono se puede aplicar para sumar los vectores de desplazamiento de cualquier número de desplazamientos consecutivos.

Problema resuelto

El paseo de un beduino

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un beduino, de paseo con sus camellos por el desierto (**Figura 4.23**), hizo el siguiente recorrido:

1. 4 km hacia el este.
2. 2 km hacia el norte.
3. 2 km hacia el oeste.

a) ¿Qué distancia total ha recorrido?
b) ¿Cuál es su desplazamiento total con respecto al punto de partida?
c) ¿En qué dirección y qué distancia debe caminar para regresar al punto de partida?

Figura 4.23. Un beduino paseando con sus camellos.

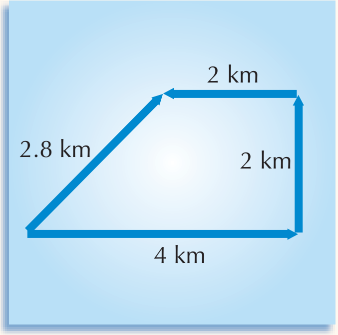


Figura 4.24. Los vectores de los desplazamientos del beduino.

Solución:

a) Sumando las distancias recorridas se obtiene que la distancia total recorrida es de 8 km.
b) Usando una escala de "1 cm = 1 km", los vectores de los 3 desplazamientos parciales y el vector del desplazamiento total quedan como en la **Figura 4.24**.

Con una regla escolar se puede determinar que la longitud del vector del desplazamiento total es de 2.8 cm. Esto quiere decir que la magnitud de ese vector es de 2.8 km. El ángulo que forma con la dirección norte es de 45°, lo cual coincide con la dirección noreste. Por ello, para regresar al punto de partida, el beduino debería caminar 2.8 km en la dirección suroeste.

Problema por resolver

Un velero que navega por un lago

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 4.25. Un velero sobre un lago.

Un velero (**Figura 4.25**) navega por un lago y realiza los siguientes desplazamientos:

1. 100 m hacia el oeste.
2. 200 m hacia el norte.
3. 300 m hacia el este.

a) ¿Cuál es la distancia total recorrida por el velero?
b) Encuentra, usando el método del polígono y una escala de "1 cm = 50 m", el desplazamiento total.
c) Usando una regla escolar, determina la magnitud del vector del desplazamiento total.
d) Con un compás, determina el ángulo que este vector forma con la dirección norte.

Problema por resolver

El desplazamiento de una patinadora

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

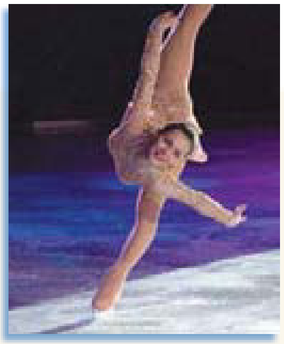


Figura 4.26. Una patinadora que se desplaza sobre el hielo.

Una patinadora (**Figura 4.26**) se desplaza primero 20 m hacia el norte. Después realiza un segundo desplazamiento y queda a una distancia de 40 m del punto de partida en la dirección noroeste. Encuentra, usando el método gráfico, el vector del segundo desplazamiento.

Suma de vectores: El caso de las fuerzas

El método del polígono sirve también para sumar los vectores de fuerza. Supón que tienes que sumar dos vectores de fuerza, $\vec{f}_1$ y $\vec{f}_2$, cuyas magnitudes, direcciones y sentidos se especifican en la **Figura 4.27a**.

Usando el método del polígono, ¿cómo se puede encontrar el vector resultante $\vec{F}$?

El vector $\vec{f}_2$ se tiene que mover hasta que su "cola" coincida con la punta del vector $\vec{f}_1$.

El vector resultante $\vec{F}$, igual a la suma de esos dos vectores, es el vector cuya "cola" coincide con la "cola" del vector $\vec{f}_1$ y cuya punta coincide con la punta del vector $\vec{f}_2$ (**Figura 4.27b**).

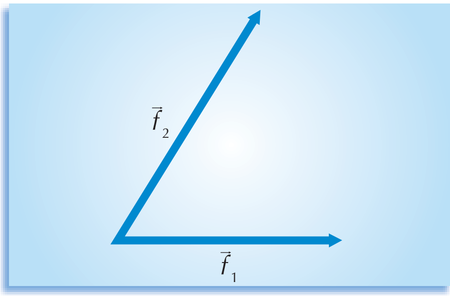


Figura 4.27a. Los vectores de fuerza cuya suma se debe encontrar.

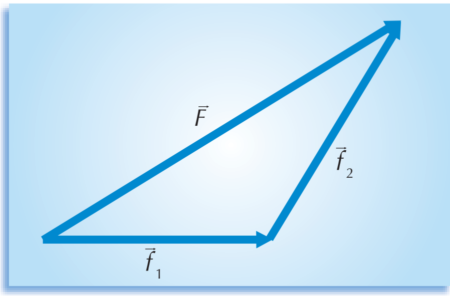


Figura 4.27b. Los vectores de fuerza cuya suma se debe encontrar.

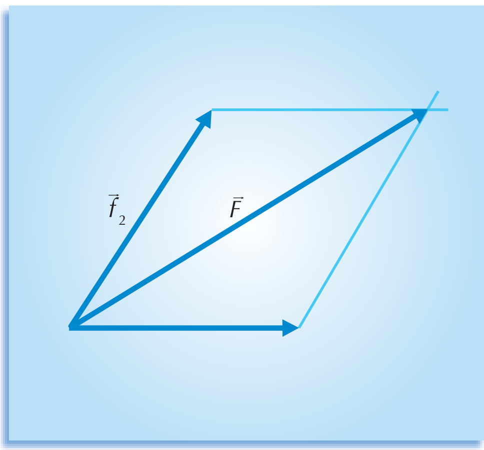


Figura 4.28. El método del paralelogramo.

Ya que comúnmente los vectores de fuerza que se deben sumar tienen el mismo punto de aplicación (donde coinciden sus "colas"), no es muy adecuado conceptualmente "mover" un vector para que su "cola" coincida con la punta del otro. Por ello, para sumar dos fuerzas $\vec{f}_1$ y $\vec{f}_2$ que comparten el mismo punto de aplicación se usa el *método del paralelogramo*:

1. A través de la punta del vector $\vec{f}_1$ se traza una recta paralela al vector $\vec{f}_2$.
2. A través de la punta del vector $\vec{f}_2$ se traza una recta paralela al vector $\vec{f}_1$.
3. El punto donde se cruzan estas dos rectas es la punta del vector resultante. La "cola" del vector resultante (o su punto de aplicación) coincide con las "colas" de los vectores que se tienen que sumar (**Figura 4.28**).

Problema resuelto

Suma de las fuerzas de dos remolcadores

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Los **remolcadores** son barcos pequeños que se utilizan para jalar o empujar otras embarcaciones, en muelles, puertos y mar abierto. También sirven para remolcar barcos averiados (**Figura 4.29**). A pesar de su tamaño pequeño, los remolcadores suelen ejercer fuerzas grandes.

Figura 4.29. Unos remolcadores tratan de liberar un barco varado.

Supón que dos remolcadores realizan maniobras para salvar un barco que, por descuido de su tripulación, entró en aguas de poca profundidad y quedó encallado. Uno de los remolcadores ejerce una fuerza horizontal de 10,000 newtons hacia el noreste; mientras que el otro ejerce una fuerza horizontal de 10,000 newtons hacia el noroeste. ¿Cuál es la fuerza total que ejercen los dos remolcadores sobre el barco?

Solución: Usando una escala de "1 cm = 2,500 newtons", los vectores de las fuerzas ejercidas por los remolcadores se dibujan como en la **Figura 4.30a**. La suma de las dos fuerzas se encuentra aplicando el método del paralelógramo (**Figura 4.30b**).

El vector de la fuerza total está dirigido hacia el norte y en el dibujo tiene una longitud de (aproximadamente) 5.6 cm. Según la escala usada, esa longitud corresponde a una fuerza de 14,000 newtons.

Dar sentido al resultado: Esa fuerza es menor que la fuerza de 20,000 newtons que ejercerían los remolcadores al jalar ambos en dirección norte.

Pensamiento crítico: ¿Por qué crees que no es práctico que los dos remolcadores apliquen sus fuerzas precisamente en la misma dirección, si sus cables están atados en el mismo punto del barco que jalan?

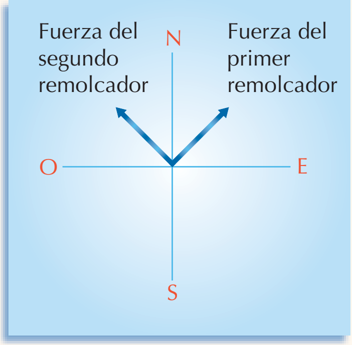


Figura 4.30a. Las fuerzas que ejercen los remolcadores sobre el barco.

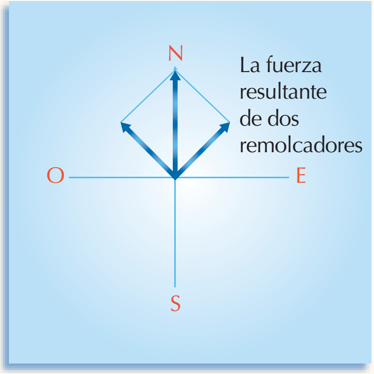


Figura 4.30b. La fuerza total ejercida por los remolcadores.

Problema por resolver

Las fuerzas sobre una pelota de béisbol en el aire

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Muchas veces, la emoción de los aficionados al popular juego de béisbol depende de los caprichosos vuelos de la pelota (**Figura 4.31**). Los lanzadores hacen todo lo posible para que el vuelo de la pelota favorezca a su equipo. Las fuerzas que determinan el comportamiento de la pelota son su peso, la resistencia del aire y la fuerza de des-viación causada por la rotación de la pelota. Mientras que el peso de la pelota siempre está dirigido verticalmente hacia abajo, la dirección de las otras dos fuerzas depende de la dirección de la velocidad.

Figura 4.31. Una pelota de béisbol.

Figura 4.32. Las fuerzas que en un momento dado actúan sobre la pelota de béisbol.

Supón que en un cierto momento del vuelo actúan sobre la pelota solamente dos fuerzas: el peso y la resistencia del aire (como se indica en la **Figura 4.32**). Usando el método del paralelogramo, encuentra la dirección y la magnitud de la fuerza total ejercida sobre la pelota en ese momento.

Suma de vectores: Cálculo de la magnitud y la dirección

Hasta el momento, para encontrar la suma de dos o más vectores hemos usado un método gráfico. Cuando se emplea este método es indispensable:

1. dibujar **cuidadosamente** los vectores a la misma escala; y
2. medir **cuidadosamente** sus longitudes y el ángulo que forman con cierta dirección.

¿Es posible conocer la magnitud y la dirección de un vector resultante, sin tener que hacer un dibujo muy cuidadoso de los vectores que se suman?

Para los vectores perpendiculares, cuyas direcciones forman un ángulo recto (90°), este problema se resuelve utilizando el teorema de Pitágoras y algunos conocimientos sencillos de trigonometría. Esta manera de encontrar las características del vector resultante se llama *método analítico*.

Claro que es muy recomendable saber usar bien ambos métodos, como complementarios. Por ejemplo, al obtener la resultante por el método gráfico, el método analítico serviría para verificar si el resultado obtenido es correcto. Como bien dijo el físico estadounidense Richard Feynman, Premio Nobel de Física: “Sabremos mucho más si resolvemos el mismo problema con dos métodos diferentes, que si resolvemos dos problemas diferentes con el mismo método.”

Veamos la aplicación del método analítico en un sencillo problema de desplazamiento.

Problema resuelto

El desplazamiento de un corredor

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

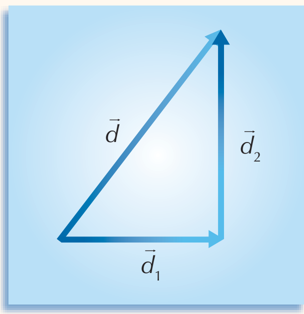


Figura 4.33. Los vectores de los desplazamientos del corredor.

En una pista rectangular, un corredor primero recorre $d_1 = 300$ m hacia el este, y después $d_2 = 400$ m hacia el norte.

1. ¿Cuál es la magnitud d del vector de desplazamiento total del corredor?
2. ¿Qué ángulo forma con la dirección este?

Solución: Los vectores de desplazamientos $\vec{d}_1$, $\vec{d}_2$ y $\vec{d}$ están dibujados en la **Figura 4.33**.

1. Como el ángulo entre las direcciones de los vectores $\vec{d}_1$ y $\vec{d}_2$ es un ángulo de 90°, para encontrar la hipotenusa d del triángulo en cuestión se recomienda aplicar el teorema de Pitágoras:

$$d^2 = d_1^2 + d_2^2$$

Al obtener la raíz cuadrada de ambos lados, se obtiene:

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} = \sqrt{(300\text{ m})^2 + (400\text{ m})^2} = \sqrt{90{,}000\text{ m}^2 + 160{,}000\text{ m}^2} = 500\text{ m}$$

Entonces, la magnitud del vector del desplazamiento total del corredor es de 500 m.

2. El seno del ángulo α que ese vector forma con la dirección este es:

$$\text{sen}\alpha = \frac{d_2}{d} = \frac{400\text{ m}}{500\text{ m}} = 0.8$$

El ángulo α es:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}\, 0.8 = 53.13°$$

Actividad de seguimiento: Usa el método gráfico y una escala de “1 cm = 50 m” para verificar los resultados obtenidos antes con el método analítico.

Problema resuelto

La fuerza resultante sobre un balón de fútbol

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En un momento dado, sobre un balón de fútbol actúan dos fuerzas. La fuerza $f_1 = 4$ N es el peso del balón y actúa verticalmente hacia abajo. La fuerza $f_2 = 2$ N es la fuerza de la resistencia del aire y actúa horizontalmente hacia la izquierda. Usa el método analítico para encontrar:

1. la magnitud F de la fuerza resultante sobre el balón, y
2. la dirección y el sentido de la fuerza resultante.

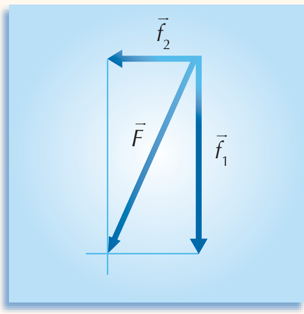


Figura 4.34. Los vectores de las fuerzas que actúan sobre el balón de fútbol.

Solución: Los vectores $\vec{f}_1, \vec{f}_2$ y $\vec{F}$ están dibujados en la **Figura 4.34**.

1. Aplicando el teorema de Pitágoras, se obtiene lo siguiente para la magnitud F de la fuerza resultante:

$$F = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} = \sqrt{(4\text{N})^2 + (2\text{N})^2} = \sqrt{16\text{N}^2 + 4\text{N}^2} = \sqrt{20\text{N}^2} = 4.47\text{N}$$

2. El seno del ángulo α que la fuerza resultante forma con la dirección vertical es:

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{f_2}{F} = \frac{2\text{N}}{4.47\text{N}} = 0.447$$

El ángulo α es:

$$\alpha = \operatorname{sen}^{-1} 0.447 = 26.55°$$

Suma de dos vectores que no son perpendiculares

Hasta ahora, hemos tratado solamente situaciones físicas donde los vectores considerados son perpendiculares. Sin embargo, hay muchas situaciones en que no se cumple dicha condición, es decir, que las direcciones de los vectores que queremos sumar no forman un ángulo recto. ¿Qué hay que hacer en tal caso?

El método gráfico para sumar vectores sigue siendo aplicable, sin importar qué ángulo formen los vectores. Como el teorema de Pitágoras es válido solamente para triángulos rectángulos, si queremos usar el método analítico debemos encontrar fórmulas más generales para los lados y ángulos de los triángulos. Tales fórmulas nos las proporcionan las leyes de los cosenos y los senos que quizá ya hayas estudiado en tus cursos de matemáticas. En cualquier caso, no está de más hacer un repaso de esos teoremas.

Conexión con las matemáticas

Las leyes de los cosenos y los senos

Competencia a practicar: Conocer y aplicar modelos matemáticos.

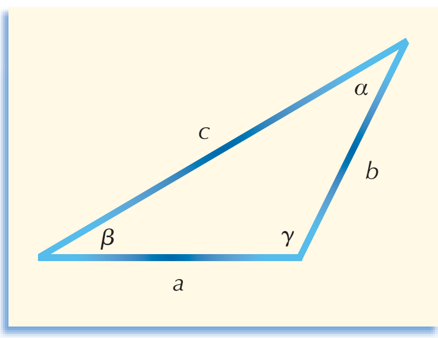


Figura 4.35. Los elementos de un triángulo arbitrario.

Sean a, b y c los lados de un triángulo cualquiera, y sean α, β y γ los ángulos opuestos, respectivamente a esos lados (**Figura 4.35**).

La ley de los cosenos afirma lo siguiente:

El cuadrado de un lado de un triángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados, menos el doble producto de estos dos lados y del coseno del ángulo que forman entre sí.

Simbólicamente, la ley de los cosenos se expresa como:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2\,ab\cos\gamma$$

Sacando la raíz cuadrada en ambos lados, se obtiene:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2\,ab\cos\gamma}$$

Tarea de aplicación: ¿Puedes demostrar que la ley de los cosenos se convierte en el teorema de Pitágoras cuando el ángulo γ entre los lados a y b es igual a 90°?

La ley de los senos afirma lo siguiente:

Para cualquier triángulo, el cociente de un lado y el seno de su ángulo opuesto es igual para todos los lados.

Simbólicamente, esta afirmación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{a}{\operatorname{sen}\alpha} = \frac{b}{\operatorname{sen}\beta} = \frac{c}{\operatorname{sen}\gamma}$$

Tarea de aplicación: ¿Cómo es la ley de los senos cuando γ es igual a 90°? ¿A qué son iguales senα y senβ en tal caso?

Veamos ahora cómo estos conocimientos de matemáticas nos permiten encontrar la suma de dos vectores que no sean perpendiculares.

Problema resuelto

El desplazamiento de una avioneta

Competencia ejemplificada: Aplicación de modelos matemáticos.

Los aviones y las avionetas no pueden cambiar bruscamente su dirección de vuelo en un ángulo de 90°, como sería el caso de cambiar, por ejemplo, de la dirección este a la dirección norte. En otras palabras, sus vectores de desplazamiento no pueden formar ángulos rectos entre sí.

Supongamos que una avioneta (**Figura 4.36**) vuela primero una distancia $d_1 = 5$ km hacia el este y después vuela una distancia $d_2 = 6$ km hacia el noreste.

1. ¿Qué ángulo forman entre sí los vectores $\vec{d}_1$ y $\vec{d}_2$?
2. ¿Cuál es la magnitud d del desplazamiento total de la avioneta?
3. ¿Qué ángulo forma el vector de desplazamiento total con la dirección este?

Solución: Los vectores $\vec{d}_1$, $\vec{d}_2$ y $\vec{d}$ están dibujados en la **Figura 4.37**.

1. Como la dirección noreste forma un ángulo de 45° con la dirección norte, el ángulo γ entre los vectores $\vec{d}_1$ y $\vec{d}_2$ es de 135°. No está por demás resaltar que este ángulo es el ángulo opuesto al lado d que corresponde al desplazamiento total (**Figura 4.37**).
2. La magnitud d del desplazamiento total se obtiene aplicando la ley de los cosenos:

Figura 4.36. El vuelo de una avioneta.

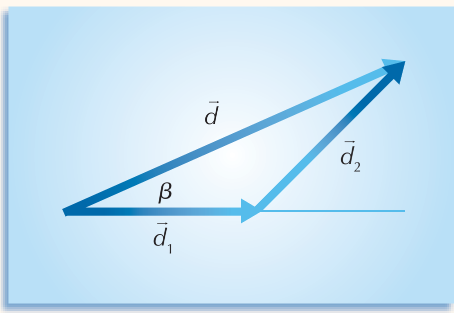


Figura 4.37. Los desplazamientos de la avioneta.

$$d=\sqrt{d_1^{\,2}+d_2^{\,2}-2d_1d_2\cos\gamma}=\sqrt{(5\text{ km})^2+(6\text{ km})^2-2(5\text{ km})(6\text{ km})\cos 135°}=$$

$$\sqrt{25\text{ km}^2+36\text{ km}^2-60\text{ km}^2\bullet(-0.707)}=\sqrt{103.42\text{ km}^2}=10.17\text{ km}$$

3. El seno del ángulo β que el desplazamiento total forma con la dirección este (**Figura 4.37**) se calcula usando la ley de los senos:

$$\frac{d_2}{\text{sen}\,\beta}=\frac{d}{\text{sen}135°}$$

De aquí se obtiene:

$$\text{sen}\,\beta=\text{sen}135°\bullet\frac{d_2}{d}=0.707\bullet\frac{6\text{ km}}{10.17\text{ km}}=0.417$$

El ángulo β es:

$$\beta=\text{sen}^{-1}0.417=24.6°$$

Competencia a practicar: Aplicación de modelos matemáticos.

Usando el método gráfico y una escala de "1 cm = 1 km", verifica los resultados obtenidos antes con el método analítico.

4.5. Descomposición rectangular de los vectores

En el análisis de algunas situaciones físicas resulta útil descomponer los vectores que intervienen. Descomponer un vector $\vec{A}$ significa encontrar dos vectores $\vec{A}_1$ y $\vec{A}_2$ cuya suma vectorial sea dicho vector $\vec{A}$ (**Figura 4.38**).

Si no se consideran restricciones, cualquier vector se puede descomponer de muchas maneras.

El hecho de que un vector sea el resultado de sumar diferentes pares de vectores se entendería mejor comparando con la propiedad análoga de los números. ¿De cuántas maneras se puede "descomponer" el número 10 en pares de números cuya suma sea 10? Si sus "componentes" deben ser números enteros y positivos, los pares de números enteros y positivos cuya suma sea igual a 10 son los siguientes:

(1,9), (2,8), (3,7), (4,6) y (5,5)

Si se impone la restricción de que "las componentes" de 10 deben ser únicamente números impares, entonces los posibles pares son:

(1,9), (3,7) y (5,5)

La restricción de que "las componentes" de 10 sean iguales llevaría a un solo par:

(5,5)

Resulta que en la mayoría de las situaciones físicas, la descomposición más adecuada es aquella que satisface la siguiente restricción:

- *Las componentes del vector forman un ángulo recto entre sí.*

Veamos la manera gráfica de hallar las componentes perpendiculares de un vector $\vec{A}$ del plano *x*-*y* que forma un ángulo α con el eje-*x* (**Figura 4.39**).

La punta de la componente $\vec{A}_x$ es el punto en que la línea paralela al eje-*y*, que parte de la punta

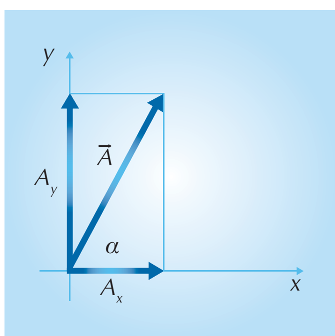


Figura 4.39. El vector $\vec{A}$ y sus componentes en el plano *x*-*y*.

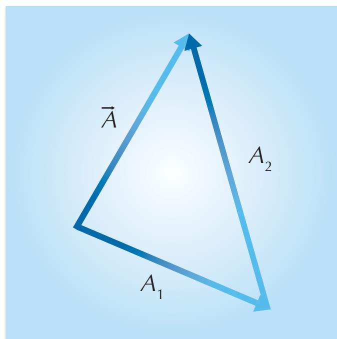


Figura 4.38. El vector $\vec{A}$ y sus componentes.

La pregunta voladora

¿Podrías demostrar que un mismo vector puede ser resultado de sumar diferentes pares de vectores?

La raíz de la palabra

Restricción
procede del verbo latino *restringere* que quiere decir limitar, *ceñir* o *cortar*.

del vector $\vec{A}$, cruza el eje-x. Asimismo, la punta de la componente $\vec{A}_y$ es el punto en que la línea paralela al eje-x, que parte de la punta del vector $\vec{A}$, cruza el eje-y.

Entre la magnitud del vector $\vec{A}$ y las de sus componentes rectangulares $\vec{A}_x$ y $\vec{A}_y$ valen las siguientes relaciones:

$$A = \sqrt{A_x^{\,2} + A_y^{\,2}}$$
$$A_x = A\cos\alpha$$
$$A_y = A\,\mathrm{sen}\,\alpha$$

La tangente del ángulo α está determinada por:

$$\tan\alpha = \frac{A_y}{A_x} = \frac{A\,\mathrm{sen}\alpha}{A\cos\alpha} = \tan\alpha$$

Problema por resolver

Velocidades en el lanzamiento de jabalina

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 4.40. El lanzamiento de jabalina.

En una competencia, una lanzadora de jabalina (**Figura 4.40**) arrojó ésta a una velocidad inicial que tenía la magnitud v = 25 m/s y formaba el ángulo α = 45° con la horizontal.

1. ¿Cuál era v_x, la magnitud de la componente horizontal de la velocidad inicial?
2. ¿Cuál era v_y, la magnitud de la componente vertical de la velocidad inicial?
3. Verifica que las componentes de la velocidad inicial que calculaste satisfacen la relación $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

4.6. Algunas aplicaciones adicionales de los vectores

Hasta el momento, todas las aplicaciones de la suma de vectores que hemos encontrado están relacionadas con desplazamientos y fuerzas. Otra cantidad vectorial de la física que tiene importantes aplicaciones en situaciones cotidianas es la velocidad. Veamos dos aplicaciones de la suma de vectores de velocidad.

Problema resuelto

La influencia del viento en el vuelo de un avión

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

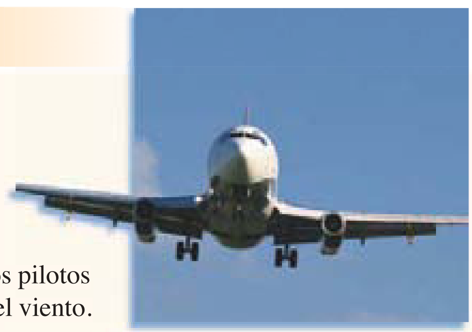


Figura 4.41. El vuelo de un avión es afectado por el viento.

Se sobreentiende que es más complicado pilotear un avión cuando hay vientos que cuando no los hay (**Figura 4.41**). Para mantener el rumbo deseado, los pilotos deben tomar en cuenta tanto la magnitud como la dirección de la velocidad del viento. Por ello, los instrumentos que determinan esas características del viento forman una parte indispensable de todos los aviones.

Supongamos que un avión mantiene la velocidad de crucero (con respecto al aire) de $v_1 = 500$ km/h hacia el norte, pero que sopla un viento fuerte cuya velocidad (con respecto al suelo) es $v_2 = 100$ km/h hacia el este.

1. ¿Cuál es la magnitud de la velocidad $\vec{v}$ del avión con respecto al suelo?
2. ¿Qué ángulo forma ese vector de velocidad con respecto a la dirección norte?

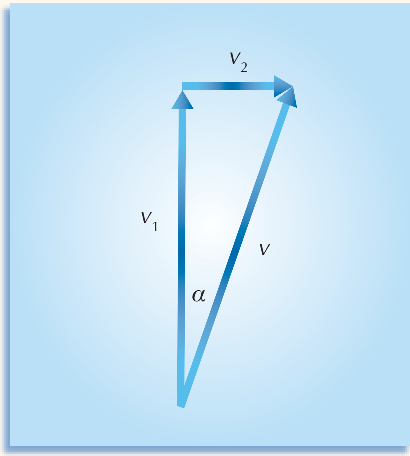


Figura 4.42. La suma de las velocidades del avión y del viento.

Solución: Como el avión es arrastrado por el viento, su velocidad $\vec{v}$ con respecto al suelo es igual a la suma vectorial de su velocidad con respecto al aire $\vec{v}_1$ y la velocidad del viento $\vec{v}_2$ (**Figura 4.42**).

1. Aplicando el teorema de Pitágoras, la magnitud de la velocidad v es:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{\left(500\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2 + \left(100\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2} =$$

$$\sqrt{250{,}000\frac{\text{km}^2}{\text{h}^2} + 10{,}000\frac{\text{km}^2}{\text{h}^2}} = \sqrt{260{,}000\frac{\text{km}^2}{\text{h}^2}} = 509.9\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

2. El seno del ángulo α que forma esta velocidad con la dirección norte (**Figura 4.42**) es:

$$\text{sen}\,\alpha = \frac{v_2}{v} = \frac{100\frac{\text{km}}{\text{h}}}{509.0\frac{\text{km}}{\text{h}}} = 0.196$$

El ángulo α es:

$$\alpha = \text{sen}^{-1} 0.196 = 11.3°$$

Dar sentido al resultado: Aunque la magnitud de la velocidad del viento es una quinta parte de la magnitud de la velocidad del avión en el aire quieto, el aumento de la velocidad del avión con respecto al suelo es 10 veces menor (pasa de 500 km/h a 510 km/h). Este sorprendente resultado se debe al hecho de que el viento sopla perpendicularmente a la dirección que el avión mantiene con respecto al aire.

La desviación del avión de unos 11° hacia el noreste, a primera vista, parecería pequeña si se considera que la rapidez del viento es muy grande. Sin embargo, después de una hora de vuelo en esas condiciones, el avión se desviaría 100 km de la dirección norte.

Pensamiento crítico:

1. ¿En qué dirección y a qué rapidez debería el piloto dirigir el avión para que, con el mismo viento lateral, la velocidad con respecto al suelo tenga dirección norte?
2. ¿Podría lograrlo si mantiene una rapidez de 500 km/h?

Así como el viento lateral afecta el vuelo del avión, la corriente del río afecta la navegación de las lanchas y los botes. Con eso, sin embargo, no termina la similitud entre estas dos situaciones que, a primera vista, no tienen mucho que ver entre sí.

La misma modelación matemática empleada para analizar el vuelo del avión con un viento lateral se puede utilizar para considerar hacia dónde se debe dirigir una lancha para cruzar el río de la manera deseada.

Problema resuelto

Cruzar un río en lancha

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Durante el verano, mucha gente disfruta los ríos navegando en lanchas de motor (**Figura 4.43**). Es relativamente fácil hacerlo, si la dirección de navegación coincide con la dirección de flujo del río. Sin embargo, la navegación se vuelve más complicada si se quiere cruzar el río y llegar a un punto determinado de la otra orilla. En tal caso, el navegante tiene que combinar la velocidad de la lancha y la velocidad del río de manera adecuada.

Figura 4.43. Una lancha de motor en un río.

Supongamos que la lancha se dirige hacia el norte a una rapidez (con respecto al agua) $v_1 = 6$ m/s y que el río fluye hacia el este a una rapidez $v_2 = 2$ m/s (con respecto a la orilla).

1. ¿Cuál sería la rapidez v de la lancha con respecto a la orilla?
2. ¿Cuál es el ángulo de desviación α con respecto a la dirección norte?
3. Si el río tiene una anchura de 90 m, ¿qué tiempo necesitará la lancha para cruzarlo?
4. ¿Cuál será la desviación hacia el este, cuando la lancha llegue a la otra orilla?

Solución: Los vectores de las velocidades incluidas en este problema se presentan en la **Figura 4.44**.

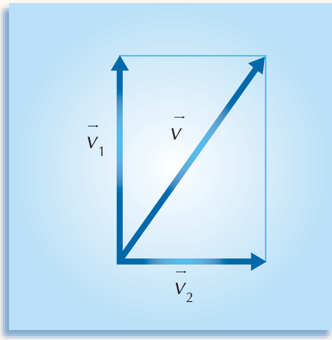


Figura 4.44. Los vectores de las velocidades incluidas en el problema.

1. La magnitud de la velocidad v con respecto a la orilla es:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{\left(6\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \left(2\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{36\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 4\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = \sqrt{40}\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 6.32\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2. El seno del ángulo α, que muestra la desviación angular con respecto a la dirección norte, es:

$$\text{sen}\alpha = \frac{v_2}{v} = \frac{2\frac{\text{m}}{\text{s}}}{6.32\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.316$$

El ángulo α es:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}0.316 = 18.42°$$

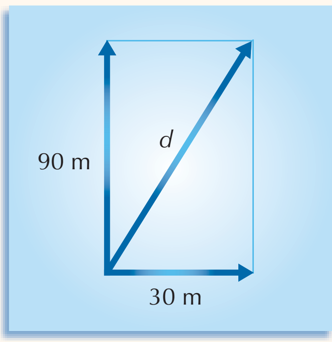


Figura 4.45. El vector del desplazamiento y sus componentes.

3. Como la rapidez de la lancha en la dirección norte es de 6 m/s, y el ancho del río es de 90 m, la lancha necesita 15 segundos para cruzar el río.
4. La velocidad de la lancha en la dirección este es igual a la velocidad del río. En 15 segundos, la desviación será de 30 m.

Dar sentido al resultado: Puesto que es arrastrada por el río, la lancha en realidad recorre una distancia d que es la hipotenusa de un triángulo rectángulo, cuyos catetos son 90 m (la anchura del río) y 30 m (la desviación a largo del río) (**Figura 4.45**).

Usando el teorema de Pitágoras, la magnitud del desplazamiento de la lancha es

$$d = \sqrt{(90\text{ m})^2 + (30\text{ m})^2} = \sqrt{8{,}100\text{ m}^2 + 900\text{ m}^2} = \sqrt{9{,}000\text{ m}} = 94.87\text{ m}$$

Si se desplaza a una rapidez de 6.32 m/s, la lancha recorre esa distancia en 15 segundos.

Equilibrante de un sistema de vectores

El razonamiento vectorial es indispensable para comprender la relación entre los vectores de fuerza en las situaciones de equilibrio.

Veamos un ejemplo sencillo que nos ayudará a reconocer las ideas básicas relacionadas con el equilibrio. Imaginemos una esfera pesada colgada del techo mediante un hilo (**Figura 4.46**).

¿Por qué la esfera está en reposo, si la Tierra la atrae hacia abajo? La respuesta la sabemos todos: El hilo tensado la jala hacia arriba. La fuerza que ejerce el hilo se denomina *fuerza de tensión*. Intuitivamente resulta claro que esas dos fuerzas se equilibran entre sí. En términos de vectores se afirma lo siguiente:

- *La suma de los vectores de las fuerzas de la Tierra y del hilo es igual a cero.*

Imaginemos que esa misma esfera pesada se cuelga del techo, de tal manera que el hilo no tenga la dirección vertical o, en otras palabras, que el hilo esté inclinado. Esto se logra usando un hilo adicional en dirección horizontal (**Figura 4.47**).

La fuerza de tensión del primer hilo tiene ahora que ser mayor pues, gracias a sus componentes, tiene que

a) equilibrar al peso de la esfera en la dirección vertical, como lo hacía antes, y
b) equilibrar la tensión del hilo horizontal (**Figura 4.48**).

La raíz de las palabras

Equilibrio

procede de la palabra latina *aequilibrium*, formada por *aequus*, *igual*, y *libra*, *balanza*.

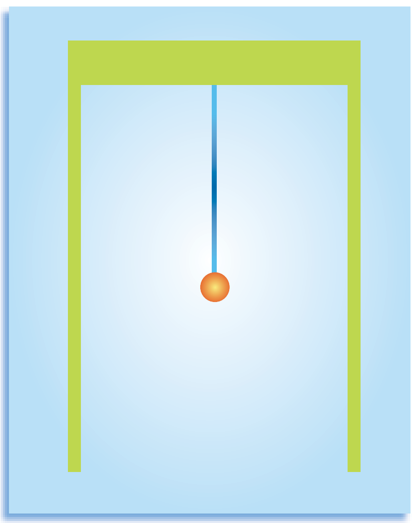


Figura 4.46. Una esfera pesada colgada del techo.

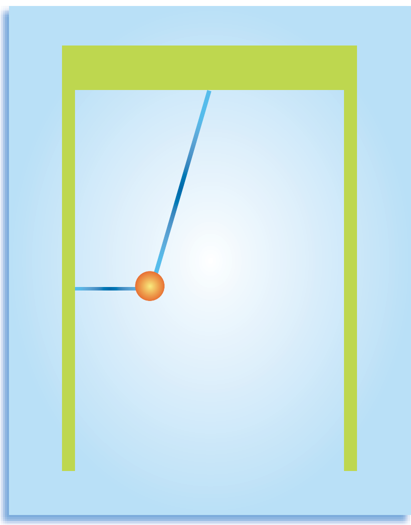


Figura 4.47. Una esfera pesada colgada del techo con un hilo inclinado.

Figura 4.48. Los vectores de fuerzas para una esfera pesada colgada del techo con un hilo inclinado.

La suma de todas las fuerzas participantes (el peso de la esfera, la tensión del hilo inclinado y la tensión del hilo horizontal) es igual a cero. Cada una de esas fuerzas equilibra la suma de las otras dos.

Definición

La **fuerza equilibrante** es la fuerza que equilibra a dos o más fuerzas.

La pregunta voladora

¿Cuál es la relación entre la fuerza resultante de dos fuerzas y la fuerza equilibrante de esas mismas fuerzas?

La naturaleza de la física

Los experimentos pensados

El experimento de la esfera colgada es un ejemplo de lo que en física se llama *experimento imaginado* o *experimento pensado*. Lo hemos realizado en nuestro "laboratorio mental", teniendo confianza en que es posible afirmar lo que debe pasar en la situación imaginada, apoyándonos tan sólo en las ideas que tenemos sobre ella.

Esa "confianza conceptual" caracteriza a todos los experimentos pensados. Sin embargo, algunos de ellos no se pueden convertir en "experimentos reales" por las dificultades técnicas que impiden su realización en el laboratorio.

El uso de experimentos pensados es muy común al hacer física. Con grandes virtudes los han empleado los físicos más famosos, como Galileo, Newton y Einstein. Más adelante en el curso veremos algunos de esos experimentos.

Actividad práctica

Equilibrar el peso de una pesa

Propósito: Averiguar el comportamiento de la fuerza que equilibra una pesa

Competencias a aplicar: Realizar un experimento pertinente, seguir instrucciones de manera reflexiva, tener aprendizaje autorregulado.

Material: Una pesa, dos dinamómetros, una argolla metálica, y un hilo o alambre.

En esta actividad se realizará una versión del "experimento pensado" de la esfera pesada colgada, para saber si son válidas las conclusiones a que llegamos mediante el análisis conceptual.

1. Ata, usando el hilo o el alambre, la pesa y la argolla. Con el dinamómetro, determina el peso de la pesa (y la argolla, para ser precisos). Este caso corresponde al de la esfera colgada del hilo vertical. La pesa juega el papel de la esfera y el dinamómetro juega el papel del hilo.
2. Jalando la argolla con el otro dinamómetro, inclina el primer dinamómetro. Verifica si ahora éste muestra mayor tensión, como se predijo al hacer el análisis conceptual.

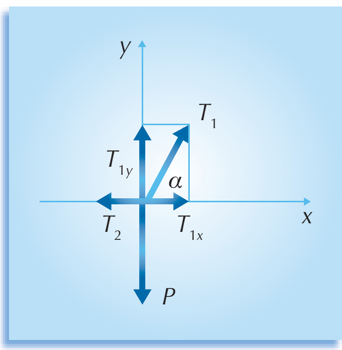


Figura 4.49. Los vectores de las fuerzas para una esfera pesada colgada del techo, con un hilo inclinado.

Después de comprender conceptualmente una situación, los físicos tratan de modelarla matemáticamente para efectuar predicciones cuantitativas sobre ella. En el caso de la esfera y los dos hilos, encontramos también este paso tan importante en la creación de los conocimientos de la física. Nuestro objetivo es relacionar, de manera precisa, las magnitudes y direcciones de todas las fuerzas participantes (**Figura 4.49**).

Si elegimos los ejes *x* y *y* en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, la tensión del hilo inclinado T_1 tiene componentes:

$$T_{1x} = T_1 \cos\alpha$$

$$T_{1y} = T_1 \operatorname{sen}\alpha$$

La tangente del ángulo α está dada por:

$$\tan\alpha = \frac{T_{1y}}{T_{1x}}$$

Se ve que la componente vertical equilibra el peso de la esfera ($T_{1y} = P$) y la componente horizontal equilibra la tensión de hilo horizontal ($T_{1x} = T_2$). Este modelo matemático nos permite responder, de manera precisa, todas las preguntas cuantitativas sobre magnitudes de las fuerzas e inclinación del hilo. Por ejemplo:

- ¿Cuál debería ser la inclinación del hilo para que la tensión del hilo horizontal sea igual al peso de la esfera: $T_2 = P$?

En esta situación, por ser $T_2 = T_{1x}$, debe valer también $T_{1x} = P$. Así, en esta situación específica, las magnitudes de ambas componentes de la tensión T_1 son iguales:

$$T_{1x} = T_{1y} = P.$$

En tal caso, la tangente del ángulo α es:

$$\tan\alpha = \frac{T_{1y}}{T_{1x}} = \frac{P}{P} = 1$$

Entonces, el ángulo de inclinación es α = 45°.

En este caso, ¿cuál es la magnitud de la tensión del hilo inclinado T_1? Aplicando el teorema de Pitágoras,

$$T_1 = \sqrt{T_{1x}^2 + T_{1y}^2} = \sqrt{P^2 + P^2} = \sqrt{2P^2} = \sqrt{2} \bullet P = 1.41P$$

Esta predicción teórica sobre las magnitudes de las tensiones en ambas cuerdas para el ángulo particular de 45°, derivada del modelo matemático elaborado, se puede verificar experimentalmente. Si nuestra comprensión conceptual es adecuada y la elaboración del modelo matemático se hizo de forma correcta, entonces las mediciones de las tensiones deberían dar los valores esperados. Te sugiero que, usando la pesa, la argolla y los dos dinamómetros de la actividad práctica anterior, realices la situación analizada y verifiques que se cumple la predicción ($T_1 = 1.41\ P$ y $T_2 = P$).

Problema resuelto

Equilibrar el peso de una piñata

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Una piñata cuyo peso es P está colgada de tal manera que el hilo que la sostiene tiene la forma que se indica en la **Figura 4.50**. Encuentra las tensiones en el hilo provocadas por el peso de la piñata.

Solución: Las magnitudes de ambas tensiones, T_1 y T_2, son iguales. También son iguales las magnitudes de sus componentes horizontales ($T_{1x} = T_{2x}$) y verticales ($T_{1y} = T_{2y}$). Las componentes horizontales se equilibran entre sí, por tener sentidos opuestos.

Entonces, el peso de la piñata P está equilibrado por la suma de las componentes verticales de las dos tensiones:

$$P = T_{1y} + T_{2y} = 2T_1 \operatorname{sen}\alpha$$

De aquí se obtiene la magnitud de la tensión expresada con el peso de la piñata:

$$T_1 = \frac{P}{2\operatorname{sen}\alpha} = \frac{P}{2\operatorname{sen}20°} = \frac{P}{2 \bullet 0.342} = 1.46P$$

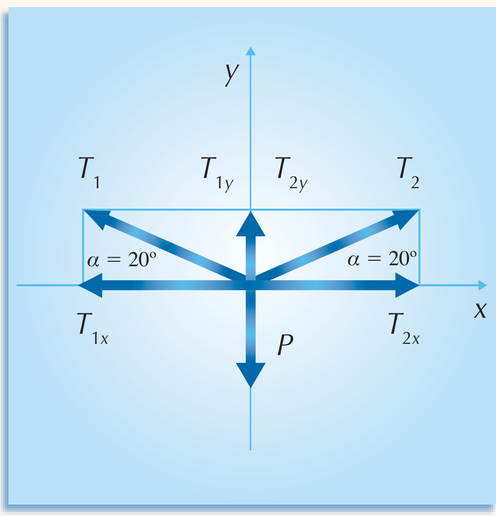


Figura 4.50. Las tensiones en el hilo provocadas por el peso de la piñata.

Dar sentido al resultado: La tensión en cada parte del hilo es casi 1.5 veces mayor que el peso de la piñata. Si el ángulo α se vuelve menor, al tensar más el hilo, la tensión se incrementa. Para α = 10°, la tensión en cada parte del hilo sería casi 3 veces mayor que el peso de la piñata, lo cual aumentaría la posibilidad de que se rompa el hilo.

Competencia a practicar: Aplicación de modelos matemáticos.

¿Para qué valor del ángulo α, la tensión en las dos partes del hilo tendría el valor mínimo? ¿Cuál sería ese valor?

Pensamiento crítico: ¿Es posible que el hilo sostenga la piñata si está perfectamente horizontal (α = 0°)?

El conocimiento adquirido en este problema te permitirá analizar críticamente el planteamiento de un problema de piñatas que se presenta a continuación.

¡No creas todo lo que lees!

¿Los muchachos pueden sostener la piñata?

Competencia a practicar: Pensar críticamente al evaluar resultados.

En cierto libro de texto se plantea la siguiente situación para una aplicación del método gráfico:

- Dos muchachos sostienen una piñata que pesa 196 kg. Las cuerdas forman un ángulo de 140°. La situación planteada está dibujada en la **Figura 4.51**.

1. ¿Es sensato hacer una piñata cuya masa sea de 196 kg?
2. El peso de esa piñata sería $P = 1{,}920$ newtons. Usando la fórmula del problema anterior, ¿qué tan grande es la fuerza que deberían ejercer los muchachos?
3. ¿Es posible que un muchacho común y corriente pueda ejercer esa fuerza?
4. ¿Cuál es la fuerza máxima que tú puedes ejercer? ¿Cómo lo sabes o cómo lo puedes determinar?
5. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

Figura 4.51. Los muchachos "sostienen" una piñata de 196 kg.

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. ¿Qué característica de un vector es un escalar?
2. ¿Cuándo dos vectores son colineales?
3. ¿Cuáles dos vectores son concurrentes?
4. ¿Pueden dos vectores colineales ser también concurrentes?
5. ¿Cuáles vectores pueden tener una suma igual a cero?

En los siguientes numerales coloca, dentro de los paréntesis que están junto la afirmación, la letra **F**, si consideras falsa la afirmación, o la letra **V**, si la consideras verdadera.

6. Los vectores coplanares no pueden ser perpendiculares. ( )
7. Un vector se puede descomponer en componentes de una sola manera. ( )
8. Un vector se puede descomponer en componentes perpendiculares de una sola manera. ( )
9. Los vectores perpendiculares no pueden tener suma igual a cero. ( )

Ordenar conceptos respetando jerarquías y relaciones

10. Haz una lista de los conceptos estudiados en el tema 4 y con esos conceptos elabora un mapa conceptual. Compara éste con los de tus compañero(a)s.

Dibujar y sumar vectores

11. Dibuja cada uno de los vectores de desplazamiento cuyas características vectoriales se presentan en la tabla. Usa la escala 1 cm = 1 m.

Vector de desplazamiento	Magnitud	Dirección	Sentido
$\vec{A}$	5 m	Este-oeste	Hacia el este
$\vec{B}$	6 m	Norte-sur	Hacia el norte
$\vec{C}$	3 m	Noreste-suroeste	Hacia el suroeste
$\vec{D}$	4 m	Noroeste-sureste	Hacia el noroeste

12. Dibuja cada uno de los desplazamientos combinados:

$(\vec{A}+\vec{B})$, $(\vec{A}+\vec{C})$, $(\vec{A}+\vec{D})$, $(\vec{B}+\vec{C})$ y $(\vec{B}+\vec{D})$

13. Para cada uno de los desplazamientos combinados, encuentra, usando el método del polígono, el vector de desplazamiento resultante.

Pensamiento crítico

14. ¿Es posible usar el método del paralelogramo para sumar dos vectores colineales? Si crees que esto es posible, menciona un ejemplo. Si crees que no es posible, da tus argumentos.

15. ¿Es posible que la magnitud de la suma de dos vectores sea menor que las magnitudes de ambos vectores? Si crees que esto es posible, menciona un ejemplo. Si crees que no es posible, da tus argumentos.

16. ¿Es posible que la suma de dos vectores, de magnitudes iguales, sea igual a esa magnitud? Si crees que esto es posible, menciona un ejemplo. Si crees que no es posible, da tus argumentos.

Usar modelos matemáticos para vectores

17. Un vector $\vec{A}$, del plano *x-y*, tiene una magnitud de 4 m y forma un ángulo de 60° con la dirección positiva del eje *y*. ¿Cuáles son las magnitudes de sus componentes A_x y A_y?

18. Un vector $\vec{A}$, del plano *x-y*, tiene componentes perpendiculares cuyas magnitudes son $A_x = 6$ m y $A_y = 8$ m. ¿Cuál es la magnitud del vector $\vec{A}$? ¿Qué ángulo forma con la dirección positiva del eje *x*?

19. Un avión vuela 300 km hacia el norte y después se mueve hacia el este una distancia desconocida. Finalmente, toma la dirección hacia su punto inicial, al cual llega después de recorrer 500 km. ¿Qué distancia recorrió el avión en la dirección este?

Dominar la representación gráfica de vectores variables

20. Mientras que las direcciones y los sentidos de los vectores de dos desplazamientos consecutivos $\vec{A}$ y $\vec{B}$ pueden variar, sus magnitudes son fijas: $A = 5$ m y $B = 3$ m. El vector de desplazamiento resultante $\vec{R}$ es igual a la suma vectorial de esos dos desplazamientos parciales: $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ Resulta claro que el vector $\vec{R}$ cambia sus características (magnitud, dirección y sentido) según cambien los vectores $\vec{A}$ y $\vec{B}$.

a) ¿Cuál es el máximo valor posible de la magnitud del vector $\vec{R}$?

Describe con palabras cuándo ocurre ese caso y haz un dibujo.

b) ¿Cuál es el mínimo valor posible de la magnitud del vector $\vec{R}$?

Describe con palabras cuándo ocurre ese caso y haz un dibujo.

c) ¿Cómo son los desplazamientos $\vec{A}$ y $\vec{B}$, si la magnitud del vector $\vec{R}$ es de 4 m? Describe con palabras cuándo ocurre ese caso y haz un dibujo.

d) ¿Cómo son los desplazamientos $\vec{A}$ y $\vec{B}$, si la magnitud del vector $\vec{R}$ es de 5 m?

Describe cuándo ocurre ese caso y haz un dibujo.

e) ¿Cómo son los desplazamientos $\vec{A}$ y $\vec{B}$, si la magnitud del vector $\vec{R}$ es de 3 m?

Describe cuándo ocurre ese caso y haz un dibujo.

BLOQUE 2

Movimientos en una y dos dimensiones

Unidad de competencia

1. Identificar las principales características de los diferentes tipos de movimiento en una y dos dimensiones, y establecer la diferencia entre cada uno de ellos.

Indicadores de desempeño

- ✔ Emplear los conceptos del bloque para formular explicaciones a fenómenos y problemas planteados en la asignatura.
- ✔ Graficar las ecuaciones que describen los movimientos de los cuerpos.
- ✔ Resolver problemas que involucran las ecuaciones que describen los diferentes tipos de movimiento.
- ✔ Desarrollar metodológicamente la aplicación de los movimientos en hechos de la vida cotidiana.

Los temas del bloque

5. Movimientos uniformes en una dimensión
6. Movimientos acelerados en una dimensión
7. Movimientos en dos dimensiones

Conocimientos

- ✔ Reconocer los conceptos relacionados con el movimiento (posición, tiempo, distancia, desplazamiento, movimiento, velocidad, rapidez, aceleración, sistema de referencia).
- ✔ Identificar las características del movimiento de los cuerpos en una dimensión (rectilíneo uniforme, rectilíneo uniformemente acelerado, caída libre, tiro vertical) y en dos dimensiones (tiro parabólico, movimiento circular uniforme, movimiento circular uniformemente acelerado).

Habilidades

- ✔ Explicar los conceptos y tipos de movimiento involucrados en el movimiento de los cuerpos.
- ✔ Representar el movimiento de los cuerpos a través de gráficos y modelos matemáticos.
- ✔ Explicar diversos movimientos de situaciones cotidianas utilizando conceptos de física.
- ✔ Explicar el proceso de solución de problemas planteados en la asignatura con claridad y empleando los conceptos de la física.

Actitudes y valores

- ✔ Mostrar disposición por involucrarse en actividades relacionadas con la asignatura.
- ✔ Presentar disposición al trabajo colaborativo con sus compañeros.
- ✔ Valorar la importancia del intercambio de opiniones respecto a conceptos y explicaciones sobre fenómenos naturales y cotidianos.
- ✔ Presentar disposición a escuchar propuestas de solución diferentes a la suya.
- ✔ Valorar la importancia de los modelos matemáticos en la descripción de movimiento de los cuerpos.

Tema 5

Movimientos uniformes en una dimensión

Propósitos del tema 5

- Mediante la observación, descripción e interpretación gráfica del movimiento en una dimensión, calcular, para algunos cuerpos, la velocidad que adquieren al cabo de cierto tiempo, así como el tiempo que tardan en llegar a su destino.

Cuando observas el mundo que te rodea, probablemente no resulta difícil para ti distinguir los cuerpos en reposo de los cuerpos en movimiento. A lo largo de tu vida, has ido aprendiendo en qué cosas debes fijarte para poder decir si algo se mueve o no. Por ejemplo, como a cualquier otra persona, te parece que los edificios y los árboles son inmóviles y que los automóviles se mueven. Al observar que un auto cambia de lugar con respecto a los edificios vecinos, no se te ocurre que, tal vez, sea el vehículo el que está detenido, y los edificios y la calle los que se mueven milagrosamente.

Los cineastas aprovechan precisamente esta forma natural de apreciar el movimiento para filmar de cerca los diálogos entre actores que deben ocurrir en un automóvil en “movimiento”. Primero filman los edificios y otras partes del entorno desde una camioneta en movimiento. Con respecto a la cámara móvil, la camioneta está en reposo y los edificios se mueven.

Figura 5.1. Simulación del movimiento.

Luego, el automóvil donde se realiza el diálogo se coloca, en reposo, frente a una pantalla gigante, sobre la cual se proyectan las imágenes del movimiento de los edificios que fueron grabadas por la cámara móvil. Lo que pasa en el automóvil detenido y lo que se está proyectando en la pantalla gigante se filma simultáneamente (**Figura 5.1**). Al ver el resultado de esto en el cine, nuestro cerebro interpreta lo que se está observando como algo que ocurrió en un auto en movimiento.

Si, creando una ilusión de movimiento, es posible engañar a nuestros sentidos y a nuestro cerebro, vale la pena reconsiderar cuidadosamente las ideas intuitivas que tenemos sobre el movimiento de los cuerpos.

5.1. Conceptos de posición y sistemas de referencia

La primera definición del movimiento que viene a la mente de la mayoría de las personas es que un cuerpo se mueve si cambia de lugar con respecto a otros cuerpos que están, supuestamente, en reposo. El problema de esta definición es que el término “lugar” no tiene un sentido preciso en el habla cotidiana. Evidentemente, conocer bien el lugar de un cuerpo es equivalente a ser capaz de responder con precisión la pregunta *¿dónde está ese cuerpo?*

Diferentes determinaciones del lugar de los cuerpos

En la vida cotidiana, a menudo no damos una respuesta precisa a la pregunta sobre el lugar de los cuerpos, sino que la vamos precisando poco a poco hasta lograr la precisión necesaria. En la actividad que sigue tendrás la oportunidad de apreciar las condiciones que dificultan o facilitan la descripción del lugar de un cuerpo, y verás que hay diferentes maneras de describir el lugar donde se encuentra éste.

Actividad de descripción

¿Dónde está la carta de la reina de corazones?

Propósito: Practicar la descripción verbal y visual del lugar de un cuerpo.

Competencia a practicar: Expresar el concepto de posición mediante una representación lingüística y una gráfica.

Figura 5.2. La carta de la reina de corazones, una situación difícil.

Material: Fotos de la actividad y cuaderno de física.

Parte 1. Imagina que eres un personaje de un cuento en el que un rey te mantiene en prisión. Un día en que el monarca está de buen humor, decide darte la oportunidad de recuperar la libertad. Aunque, para crear algo de suspenso, el rey impone como condición para tu liberación que un amigo tuyo, que vendrá a recogerte, debe realizar con éxito una tarea muy difícil. La tarea es la siguiente:

> Sobre una mesa habrá 13 cartas, puestas con la cara hacia abajo. Tu amigo debe elegir una de las cartas y levantarla. Si levanta la carta de la reina de corazones, quedarás libre. Si levanta cualquiera otra carta, permanecerá contigo en prisión.

Con el deseo de ayudarte, el consejero del rey te muestra una foto de la mesa con las cartas. Solamente la carta que te llevaría a la libertad está "cara arriba" (**Figura 5.2**). Te dice que puedes mirar la foto unos minutos y que después la va a retirar. Te promete, además, hacer llegar un mensaje tuyo a tu amigo. En efecto, el mensaje tiene que contener las indicaciones que ayuden a tu amigo a reconocer la carta deseada, la cual, en el momento de la prueba, no estará "cara arriba".

Tomando en cuenta las circunstancias, es importantísimo que tu descripción del lugar de la carta sea lo más precisa posible. Primero, observa la foto cuidadosamente. Después, en tu cuaderno de física haz lo siguiente:

1. Una descripción del lugar donde está la carta de la reina de corazones, usando solamente palabras.
2. Un dibujo esquemático de las cartas colocadas sobre la mesa e indica con un círculo la carta de la reina de corazones.

¿Cuáles son, según tu punto de vista, las ventajas y desventajas de

a) la descripción verbal (con palabras)?
b) la descripción visual (con un dibujo)?

¿Cuál de estas dos descripciones te dará más posibilidades de salir de la prisión?

Parte 2. Por desgracia, tu amigo no entendió bien el mensaje, levantó una carta errónea y también se quedó en prisión, en una celda vecina a la tuya. Sin embargo, la suerte no los abandonó por completo. La hija del rey, que sintió en su corazón unas extrañas vibraciones cuando vio a tu amigo (que era, por cierto, un joven muy atractivo), logró convencer a su padre de que les diera otra oportunidad. Además, simplificó la distribución de las cartas y te mostró la foto con la carta deseada puesta "cara arriba" (**Figura 5.3**). Sin embargo, a la hija del rey también le gustaba el suspenso e impuso como condición que, esta vez, la descripción del lugar de la carta no fuera visual (es decir, no había que usar dibujos), sino tan sólo verbal (es decir, usar solamente palabras).

Figura 5.3. La carta de la reina de corazones, una situación fácil.

Observa la foto y, en tu cuaderno, haz la descripción verbal del lugar de la carta. Esa descripción será entregada a tu amigo para que él pueda levantar la carta correcta. ¿Por qué esta vez hay más posibilidades de recuperar la libertad?

Determinación numérica del lugar en el tablero de ajedrez

Figura 5.4. El tablero de ajedrez vacío.

En la actividad anterior, habrás notado seguramente que el arreglo regular de las cartas te permitió hacer una descripción más precisa del lugar de la carta liberadora con respecto al de las demás cartas. La razón es que el arreglo ordenado de las cartas abrió la posibilidad de usar números para precisar la descripción. La carta ocupaba el **segundo lugar**, contando desde arriba, en la **tercera columna**, contando desde la derecha.

Combinando las palabras y los números de forma adecuada fue posible lograr una precisión similar a aquella de la descripción visual. La configuración ordenada de los lugares en que pueden colocarse las piezas en un tablero de ajedrez facilita la descripción de este antiguo y popular juego. La existencia de una descripción precisa y sencilla de los lugares que han ido ocupando las piezas de ambos jugadores permite describir el desarrollo de una partida.

Un tablero de ajedrez está dividido en 32 casillas claras y 32 casillas oscuras. Usando las letras a, b, c, d, e, f, g y h, y los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, es posible determinar precisamente el lugar de cada casilla en el tablero (**Figura 5.4**).

Como las casillas son los únicos lugares posibles y legítimos de las piezas, de tal manera se logra la precisión suficiente para describir sin fallas los lugares de todas las piezas en cualquier momento del juego.

Problema por resolver

Las casillas ocupadas por las piezas de ajedrez

Competencia a practicar: Explicitar el concepto de posición en una situación cotidiana.

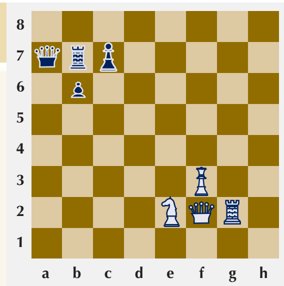


Figura 5.5. Un momento en un juego de ajedrez.

Para la situación de la **Figura 5.5**, hay que describir de la manera más corta posible los lugares que ocupan las piezas en el tablero. Usando los símbolos de la **Figura 5.5** para las casillas, el rey blanco ocupa la casilla “f2” y el rey negro la casilla “a7”. Determina las casillas ocupadas por las otras piezas.

Reina blanca ____________ Torre blanca ____________ Caballo blanco ____________

Torre negra ____________ Peón negro ____________ Alfil negro ____________

¿Es precisa la descripción del lugar de las piezas en el ajedrez?

Como una pieza puede ocupar, en un momento dado, solamente una casilla, la precisión en la descripción del lugar es de *hasta una casilla*. Desde el punto de vista del juego, todas las variaciones posibles de la ubicación de una pieza dentro de una misma casilla son equivalentes (**Figura 5.6**).

Figura 5.6. Posiciones equivalentes de una pieza de ajedrez.

Esto es similar al caso de las variaciones de la ubicación de un automóvil en la cochera. Es imposible estacionar cada vez el automóvil exactamente en el mismo lugar de la cochera. Las pequeñas variaciones de lugar (que pueden ser de una decena de centímetros) no se consideran importantes y a la pregunta *¿dónde está el automóvil?* respondemos, sin pensar mucho, "en la cochera". Para todos los propósitos prácticos, el lugar del automóvil está bien determinado.

El cuerpo de referencia y la posición de los cuerpos

Como se ha dicho anteriormente, el movimiento de un cuerpo es su cambio de lugar con respecto a algún otro cuerpo. En lo que sigue verás cómo un término vago, como "el lugar del cuerpo", tiene que ser precisado para que se convierta en un concepto científico conocido como "la posición del cuerpo". Para determinar la posición de un cuerpo se necesita otro cuerpo que se llama el **cuerpo de referencia**.

Definición

El **cuerpo de referencia** es el cuerpo que sirve para determinar el cambio de lugar del cuerpo cuyo movimiento se estudia.

En el habla cotidiana, el cuerpo de referencia se sobreentiende y no se especifica de manera explícita.

Un mismo movimiento se puede describir con respecto a diferentes cuerpos de referencia. Cuando un automóvil se mueve por la calle, cambia su lugar con respecto a la calle, a los árboles, a los autos estacionados; pero también con respecto a otros vehículos en movimiento. Cada uno de estos cuerpos puede elegirse, con el mismo derecho, como el cuerpo de referencia. Para describir el movimiento del automóvil es recomendable seleccionar el cuerpo de referencia, de tal manera que el cambio de lugar se pueda describir fácilmente.

Carácter relativo del movimiento

Es muy importante reconocer el carácter relativo del movimiento de los cuerpos. Pero, ¿qué quiere decir la frase "el movimiento es relativo"?

El estado de movimiento o de reposo de un cuerpo se puede definir con precisión, solamente si se indica cuál es el cuerpo de referencia.

Por ejemplo, un automóvil que se mueve con respecto a los árboles plantados al lado de la carretera, está en reposo con respecto a un auto que se mueva de la misma manera sobre la carretera. Cuando estás parado en el salón de clases, ¿te estás moviendo o realmente estás en reposo?

La respuesta depende del cuerpo de referencia que hayas elegido para determinar tu estado de movimiento o de reposo. Con respecto al salón de clases, sí estás en reposo, pero con respecto al Sol, no lo estás sino que, junto con la Tierra, te estás moviendo muy rápidamente.

Más adelante, aprenderás más sobre el movimiento de la Tierra, que es un movimiento que no notamos con nuestros sentidos. Los ejemplos anteriores muestran que si queremos ser precisos al hablar de movimiento, hay que declarar claramente con respecto a qué cuerpo de referencia se observa y se describe el movimiento.

La pregunta voladora

¿Puedes dar más ejemplos que muestren que el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo depende de la selección del cuerpo de referencia?

¿Existe un sistema de referencia absoluto?

En física es común llamar al cuerpo de referencia *el sistema de referencia*. Los sistemas de referencia sirven para hablar de manera precisa sobre el movimiento o el reposo de los cuerpos. La pregunta importante es: *¿existe un sistema de referencia que esté "verdaderamente" en reposo?*

Tal sistema de referencia, llamado el *sistema de referencia absoluto*, permitiría hablar de los *movimientos absolutos* de los cuerpos, al describir sus movimientos con respecto a tal sistema de referencia. Todos los demás sistemas de referencia serían, entonces, *sistemas de referencias relativos*, pues estarían moviéndose con respecto al sistema de referencia absoluto.

Durante mucho tiempo, se pensó que el sistema de referencia formado por las estrellas muy alejadas podría ser ese sistema de referencia absoluto.

Sin embargo, gracias a las observaciones astronómicas, se llegó a la conclusión de que en el Universo no existen ni las estrellas ni las galaxias en reposo absoluto. Por eso, tanto el reposo como el movimiento de los cuerpos, en su esencia, siempre son relativos a otros cuerpos.

Problema por resolver

La escalera eléctrica

Competencia a practicar: Explicitar un concepto científico en una situación cotidiana.

Figura 5.7. Detalle de la escalera eléctrica más grande del mundo.

La escalera eléctrica más grande del mundo se encuentra, desde el año de 1994, en la ciudad de Hong-Kong. La escalera está completamente cubierta (**Figura 5.7**), tiene una longitud de 800 m, facilita el movimiento de los peatones y conecta dos niveles del centro financiero que difieren 135 m en altura. El viaje dura alrededor de 20 minutos sin caminar.

La escalera es muy popular y transporta hasta 55,000 personas al día, entre quienes trabajan en la zona y los turistas.

- ¿Cómo debería caminar un individuo sobre la escalera para que el viaje completo dure tan sólo 10 minutos?

___

___

- ¿Cómo debería caminar alguien sobre la escalera para que no avance con respecto a sus alrededores?

___

___

Actividad de discusión

Agarrar con la mano una bala de fusil

Competencias a practicar: Pensar críticamente al evaluar una información; aprender y trabajar en equipo.

Figura 5.8. La bala de un arma de fuego vuela cerca de un avión.

Se cuenta que en la Primera Guerra Mundial un piloto en pleno vuelo notó un pequeño cuerpo que volaba cerca de su avión (**Figura 5.8**). Lo tomó con la mano y se sorprendió muchísimo al darse cuenta de que se trataba de una bala de fusil.

Forma tu grupo y traten de responder las preguntas

1. ¿Pudo ocurrir este evento, según las leyes de la física?

---

2. ¿Cuáles son los argumentos de quienes piensan que el evento pudo realmente ocurrir?

---

3. ¿Cuáles son los argumentos de quienes piensan que el evento no pudo ocurrir?

---

4. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

La posición del cuerpo como distancia entre dos puntos

Después de elegir el cuerpo de referencia, el problema por resolver es cómo determinar con suficiente precisión el lugar del cuerpo cuyo movimiento nos interesa. Imagina que estás en el patio de la escuela, y que tienes que producir y describir el movimiento de un balón de fútbol. ¿Cuál sería la manera más fácil de hacerlo?

El primer paso sería producir el movimiento que tuviera la trayectoria más simple posible. Como probablemente ya sabes, la trayectoria es el conjunto de lugares que un cuerpo fue ocupando durante su movimiento. La trayectoria más simple del balón sería una línea recta. Imagina que esa recta está pintada en el suelo del patio y que es perpendicular a la barda escolar (**Figura 5.9**).

Si eliges la barda como el cuerpo de referencia, el segundo paso sería determinar con precisión la posición del balón con respecto a la barda.

La mejor forma de hacerlo consiste en determinar su lugar en forma numérica, es decir, determinar el lugar del balón con respecto a la barda realizando una medición. Casi seguramente dirás que lo más adecuado sería medir la distancia entre el balón y la barda. Bien dicho, pero, ¿qué es la distancia entre dos cuerpos?

Como la distancia se puede determinar con precisión solamente si se trata de la distancia entre dos puntos, hay que elegir primero esos puntos, uno en el balón y otro en la barda. Es evidente que la selección de diferentes pares de puntos llevará a encontrar "distancias diferentes entre el balón y la barda" (**Figura 5.10**).

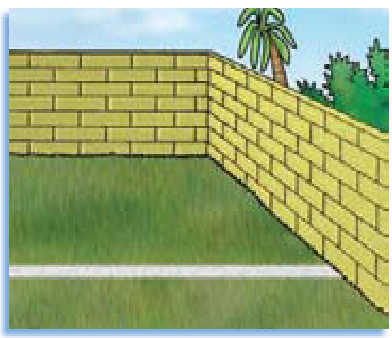


Figura 5.9. La trayectoria rectilínea de un movimiento.

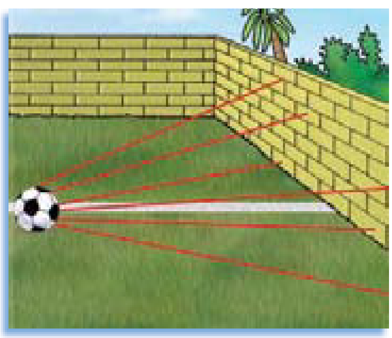


Figura 5.10. Distancias entre la pelota y la barda.

La pregunta voladora

¿Cuáles serían las ventajas y las desventajas, si uno eligiera el centro del balón como punto representativo de éste?

¿Cuál es la selección de puntos correcta?

Aquí se tiene que respetar un criterio práctico. Los puntos deben elegirse de tal manera que la medición de la distancia entre ellos sea lo más sencilla posible. Esto se cumple si las mediciones se realizan a lo largo de rectas perpendiculares a la pared (**Figura 5.11**).

¿Qué punto del balón es el más adecuado para determinar el lugar de éste? Entre todos los posibles, se distinguen tres puntos:

a) el punto del balón más cercano a la pared,
b) el punto del balón más alejado de la pared y
c) el punto de contacto entre el balón y el suelo (**Figura 5.12**).

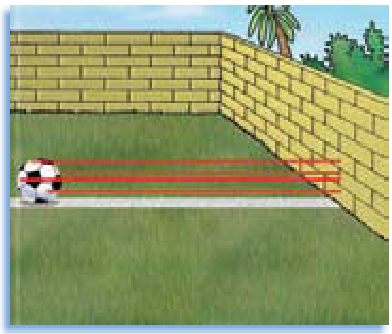


Figura 5.11. Las distancias entre el balón y la barda a lo largo de rectas perpendiculares.

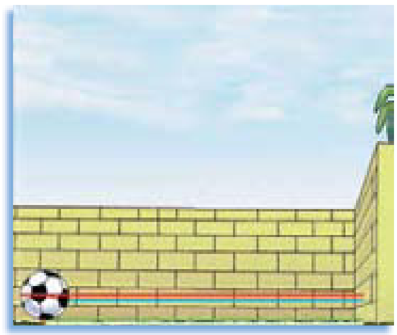


Figura 5.12. Los tres puntos del balón idóneos para determinar la distancia con respecto a la barda.

Una vez elegidos el punto que representa al balón, el punto que representa a la pared y el método de medición de la distancia entre ellos durante el movimiento, se tiene todo lo necesario para hablar de manera científica del “lugar del balón” con respecto a la pared.

Para diferenciarlo del vago término “lugar” usado en la vida cotidiana, ese concepto se llama “posición del balón” o, de forma más general, “posición del cuerpo”.

Definición

La **posición de un cuerpo** es la distancia entre el punto que representa al cuerpo y el punto que representa al cuerpo de referencia.

Esta definición es válida solamente cuando, para la determinación de la posición, es suficiente realizar una sola medición de distancia. Éste es el caso cuando el cuerpo se mueve, por ejemplo, en línea recta. En casos más complejos será necesario hacer dos mediciones de la distancia (para los movimientos en un plano) o, incluso, tres mediciones de la distancia.

Punto material

Es evidente que si, para determinar la posición del balón, se usa como punto representativo de ésta su punto más lejano a la pared, el resultado será diferente al que se obtendría si se usara el punto más cercano a la pared, o el punto de contacto del balón con el suelo. ¿En qué caso se hacen las diferencias entre los diversos resultados tan pequeñas, que sea posible despreciarlas?

Esto ocurre cuando la distancia entre el balón y la pared es mucho mayor que el tamaño del balón. En tal situación, el tamaño del balón ya no importaría y el movimiento del balón se podría representar como el movimiento de un "punto". Como este "punto" no es un punto matemático, sino que representa un cuerpo físico, se usa el término "punto material" o "partícula".

Definición

Punto material es el modelo matemático con que se representan los cuerpos físicos, cuando su tamaño es mucho menor que las distancias que intervienen en la situación que se estudia.

La raíz de las palabras

Modelo

proviene del italiano "modello" y éste a su vez del latín vulgar "modellus", y designa algo que sirve o debería servir como objeto de imitación, para hacerlo o reproducirlo. En las matemáticas y en las ciencias, se usa para referirse a una representación simplificada de un sistema, de un proceso.

Actividad de escalamiento

La posición de un automóvil en una carretera

Competencias a practicar: Dominar la representación gráfica y valorar una preconcepción personal.

Supón que, en una hoja de tamaño carta, debes representar la posición de un automóvil en una carretera recta de 10 km. Supón además que la longitud del auto es de 5 m.

1. Dibuja en la hoja una línea recta de 20 cm de longitud, e imagina que esa línea representa la carretera.
2. Dibuja sobre la línea recta un punto del menor tamaño que puedas, e imagina que ese punto representa el automóvil en la carretera.
3. ¿Cuál de las afirmaciones que siguen te parece intuitivamente correcta?

a) El tamaño del punto representa fielmente el tamaño del automóvil.
b) El tamaño del punto es muy grande como para representar fielmente el tamaño del automóvil.
c) El tamaño del punto es muy pequeño como para representar fielmente el tamaño del automóvil.

4. Después de haber respondido intuitivamente, haz un análisis más cuidadoso de los datos:

a) ¿Cuál es la longitud de la parte de la carretera representada por 1 cm en el dibujo?

___

b) ¿Cuántas longitudes del automóvil se podrían acomodar en esa longitud en la carretera?

___

c) ¿Cuántas longitudes del automóvil se deberían acomodar en 1 cm de la línea en el dibujo?

___

d) ¿Cuántas longitudes del automóvil se deberían acomodar en 1 mm de la línea en el dibujo?

___

e) Entonces, ¿qué parte de 1 mm le correspondería en el dibujo al tamaño del automóvil?

___

f) ¿Era correcta la respuesta intuitiva?

___

El movimiento como cambio de posición

Después de haber entendido el concepto de posición de un cuerpo, como la distancia entre el punto que representa al cuerpo y el punto de referencia, se puede avanzar en la descripción del movimiento. Ahora es posible hablar con precisión del movimiento de los cuerpos.

Figura 5.13. Un movimiento rectilíneo.

La pregunta voladora

¿Qué otros ejemplos del movimiento rectilíneo reconoces en tu entorno cotidiano?

Definición

El **movimiento** es el cambio de posición de un móvil con el transcurso del tiempo.

A diferencia del término anterior "lugar", el término "posición" tiene ahora un sentido preciso, ya que se define como la distancia entre el punto de referencia y el punto que representa al cuerpo móvil. Si el tamaño del cuerpo no es despreciable en comparación con las distancias relevantes, hay que elegir cuál es el punto del cuerpo que servirá para determinar la posición del cuerpo.

5.2. Conceptos de distancia, desplazamiento, rapidez y velocidad

Cuando un cuerpo se mueve, el punto que representa su posición describe una trayectoria.

Figura 5.14. Un movimiento curvilíneo.

La pregunta voladora

¿Qué otros ejemplos del movimiento curvilíneo reconoces en tu entorno cotidiano?

Definición

La **trayectoria** es la línea trazada por el punto que representa las posiciones del cuerpo durante el movimiento.

El primer paso en la descripción del movimiento de un cuerpo es la descripción de su trayectoria. Según la forma de la trayectoria, los movimientos de los cuerpos se dividen en movimientos rectilíneos y movimientos curvilíneos.

Cuando, durante el movimiento, el punto que representa al cuerpo traza una línea recta, el movimiento es rectilíneo. El movimiento de los corredores en una carrera de 100 metros planos (**Figura 5.13**) es, aproximadamente, un movimiento rectilíneo.

Cuando, durante el movimiento, el punto que representa al cuerpo traza una línea curva, el movimiento es curvilíneo. El movimiento de un esquiador en la prueba de descenso (**Figura 5.14**) es un ejemplo de movimiento curvilíneo.

Muchas veces, la trayectoria del cuerpo es combinada porque tiene tanto partes rectilíneas como partes curvilíneas. Un ejemplo de esto es la trayectoria de los automóviles en los cruces de carreteras (**Figura 5.15**), cuando cambian de un tramo recto a otro pasando por una parte circular.

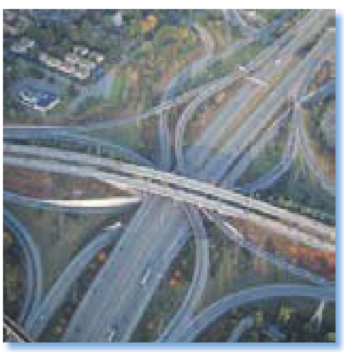


Figura 5.15. Un movimiento combinado.

¿Cómo describir el resultado del movimiento?

Desplazamiento

Como resultado del movimiento, la posición de un cuerpo con respecto al cuerpo de referencia cambia generalmente, pasando de una **posición inicial** a una **posición final**. Aquí, la posición inicial es la posición del cuerpo en el momento en que comenzó el movimiento; en tanto que la posición final es la posición del cuerpo al final del movimiento (o en el momento en que el observador pierde el interés en el movimiento).

Por ejemplo, en su posición inicial, una persona está a una distancia de 2 metros de un farol (**Figura 5.16**). Luego, moviéndose en línea recta, se aleja del farol y llega a su posición final, que está a una distancia de 10 metros del farol (**Figura 5.17**).

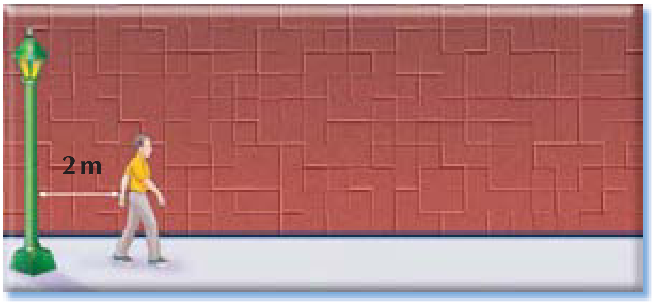


Figura 5.16. La posición inicial de la persona.

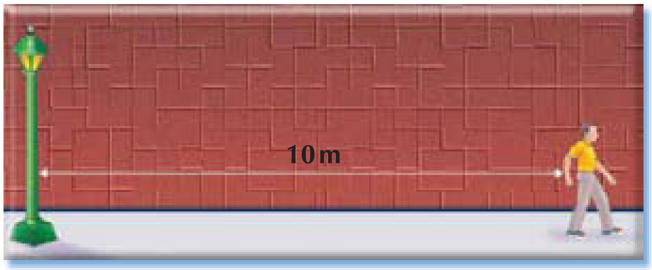


Figura 5.17. La posición final de la persona.

¿Cómo describir numéricamente el resultado del movimiento?

Evidentemente la persona aumentó su distancia con respecto al farol en 8 metros. Este resultado se obtiene restando de la posición final (10 metros) la posición inicial (2 metros). Esta distancia entre la posición final y la posición inicial se llama **desplazamiento**.

Definición

El **desplazamiento** de un cuerpo, para el movimiento en una dimensión, es la distancia entre su posición final y su posición inicial.

Si asignamos a la posición inicial el símbolo x_i y a la posición final el símbolo x_f, el desplazamiento Δx es:

$$\Delta x = x_f - x_i$$

Distancia recorrida

El desplazamiento de un cuerpo no siempre proporciona una buena descripción del movimiento. Considera, otra vez, una competencia de natación de 100 m.

El nadador sale de su posición inicial, nada 50 metros, da vuelta y nada otros 50 metros hasta su posición final. Como la posición final coincide con la posición inicial, $x_f = x_i$, el desplazamiento del nadador en la carrera es cero.

Una mejor descripción del movimiento en este caso nos la daría la longitud de la trayectoria o la **distancia recorrida**.

Definición

La **distancia recorrida** (o **camino recorrido**) es igual a la longitud de la trayectoria que va desde la posición inicial hasta la posición final.

En el caso de la carrera, la trayectoria consiste de dos tramos rectilíneos de 50 metros. Por eso la distancia recorrida es igual a 100 metros.

En el movimiento rectilíneo, si el cuerpo no cambia el sentido del movimiento, la distancia recorrida es igual al desplazamiento.

En los movimientos curvilíneos, la longitud de la trayectoria (distancia recorrida) es mayor que la distancia entre la posición final y la posición inicial (desplazamiento). Veamos un ejemplo.

Problema resuelto

Desplazamiento y distancia recorrida en un movimiento curvilíneo

Competencias ejemplificadas: Explicitar el concepto físico en un suceso cotidiano; aplicar modelos matemáticos.

En un carril circular de patinaje, cuyo radio es $R = 64$ metros, la patinadora comienza a moverse en el punto A y llega hasta el punto B, en donde cae (**Figura 5.18**). La trayectoria es un semicírculo. ¿Cuál es el desplazamiento? ¿Cuál es la distancia recorrida?

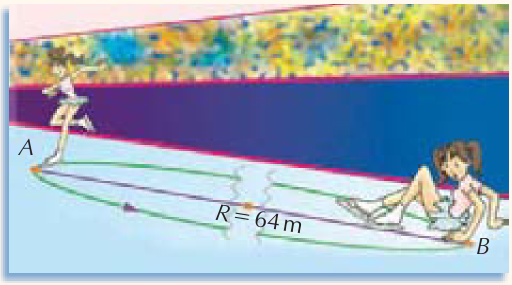


Figura 5.18. La trayectoria del patinador.

Solución: El desplazamiento es la distancia entre la posición inicial y la posición final.

Como la trayectoria es un semicírculo, la distancia entre los puntos A y B es igual al diámetro, es decir, es igual a $\Delta x = 2R = 2 \cdot 64 \text{ m} = 128 \text{ m}$.

La distancia recorrida es igual a la longitud de la trayectoria. Al ser la trayectoria un semicírculo, su longitud es igual a la mitad de la circunferencia del círculo completo, es decir, $d = \pi R = 3.14 \cdot 64 \text{ m} = 201 \text{ m}$.

Dar sentido al resultado: Como era de esperarse, el camino recorrido es mayor que el desplazamiento.

Descripción del movimiento en términos del tiempo

La posición inicial, la trayectoria y la posición final, aunque son importantes elementos del movimiento, dan solamente una descripción parcial del movimiento. La descripción completa del movimiento requiere un elemento adicional: el tiempo.

Cuando se acuerda una cita, de hecho, dos personas planean que dos movimientos de trayectorias diferentes tengan, en el momento acordado, posiciones finales muy cercanas. Por ello, no basta con determinar solamente el lugar, sino que también se debe fijar la hora del encuentro. Es igualmente malo para el encuentro que a la hora acordada las personas estén en diferentes lugares, como que pasen por el lugar acordado pero cada una a diferente hora.

Describir completamente el movimiento de un cuerpo es conocer cómo cambia su posición con el transcurso del tiempo. Dicho de otro modo, la descripción completa del movimiento implica conocer la posición del cuerpo en cada instante del tiempo.

Posición instantánea y su cambio

Conocer cómo cambia la posición de un cuerpo con el transcurso del tiempo significa ser capaz de determinar cuál es su posición en cada instante del tiempo.

Definición

La **posición instantánea** del cuerpo es la posición que ocupa el punto representativo del cuerpo en un instante determinado.

El instante temporal se determina de diferentes maneras, las cuales dependen del instante a partir del cual medimos el tiempo. Nuestro "cero de tiempo" puede ser el instante en que comienza el día o el instante en que comienza el movimiento.

Por ejemplo, un padre y su hijo deciden medir cuánto dura el movimiento de ida a la escuela. El padre usa el reloj del automóvil. En este caso, el cero del tiempo es el momento en que comienza el día. En el momento en que comienza el viaje son las 7:40 a.m. y en el momento en que termina son las 7:54 a.m. La duración del movimiento fue de 14 minutos.

Para determinar la duración del viaje, el hijo usa un cronómetro. Para éste el cero de tiempo es el momento en que comienza el viaje y el momento en que termina el viaje es aquel en que el cronómetro marca 14 minutos. Para el hijo, también, la duración del viaje fue de 14 minutos.

Notamos que el intervalo de tiempo transcurrido no depende de la selección del "cero de tiempo". Por eso, es muy común simplificar la descripción temporal y comenzar a medir el tiempo, es decir, activar el reloj, en el instante en que comienza el movimiento.

Actividad práctica

Moverse según diferentes "recetas" del movimiento

Propósito: Realizar diferentes tipos de movimiento descritos en términos de posiciones instantáneas y describirlos verbalmente; determinar el desplazamiento y la distancia recorrida.

Competencia a practicar: Seguir instrucciones y procedimientos de manera reflexiva.

Material: Cinta métrica, gis y cronómetro (o reloj con manecilla segundera).

1. Forma un equipo de cinco miembros. En el patio de la escuela, dibujen con el gis una línea recta de 10 metros de largo. Dividan la línea en diez partes iguales, marquen los puntos extremos con "0" y "10", y los otros nueve puntos con los números "1" a "9" (**Figura 5.19**). Todos los movimientos se realizarán sobre esta línea.

Figura 5.19. Las posibles posiciones sobre una recta.

2. Las "recetas" para realizar los movimientos se proporcionan abajo en forma de tablas y consisten en 6 posiciones instantáneas, comenzando con la posición inicial que corresponde al instante "cero segundos", y terminando con la posición final, que corresponde al instante "5 segundos". Para realizar un desplazamiento se tiene, en todos los casos, solamente un segundo.
3. Las "recetas" de los movimientos, que cada miembro del grupo tiene que realizar, son las siguientes:

Tabla 5.1. Movimiento 1.

Instante del tiempo (segundos)	Posición instantánea (metros)
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5

Tabla 5.2. Movimiento 2.

Instante del tiempo (segundos)	Posición instantánea (metros)
0	0
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10

Tabla 5.3. Movimiento 3.

Instante del tiempo (segundos)	Posición instantánea (metros)
0	3
1	3
2	4
3	4
4	6
5	6

Tabla 5.4. Movimiento 4.

Instante del tiempo (segundos)	Posición instantánea (metros)
0	5
1	6
2	8
3	6
4	4
5	5

Dos miembros controlan la realización del movimiento y un miembro controla el tiempo, anunciando en voz alta cada instante, comenzando con tres instantes de preparación que son "menos tres", "menos dos" y "menos uno".

Quien realiza el movimiento, en el instante "cero", tiene que estar en su posición inicial. En los instantes "uno", "dos", "tres", "cuatro" y "cinco", tiene que estar en las posiciones indicadas en la tabla que le toca.

4. Después de que todos realizan los cuatro movimientos, cada uno tiene que describir con palabras cada movimiento realizado, así como calcular el desplazamiento y la distancia recorrida.
5. Comparen y discutan las descripciones y los cálculos personales.

Descripción del movimiento mediante gráficas "posición-tiempo"

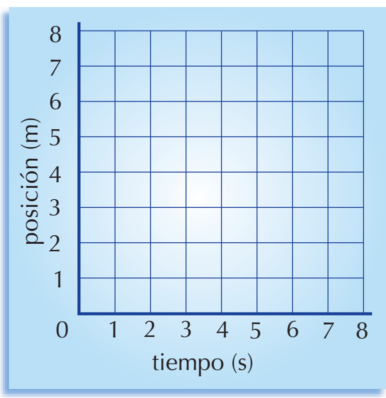


Figura 5.20. El plano *x-t*.

Para tener más opciones en la descripción de los movimientos, veamos una manera adicional de representarlos. Se trata de una representación gráfica del movimiento. Si la sabes "leer", esta descripción se vuelve muy informativa pues te permite ver de inmediato de qué tipo de movimiento rectilíneo se trata.

La representación gráfica se realiza en el plano *x-t*, donde *x* es la posición del cuerpo con respecto al punto de referencia y *t* es el instante medido a partir del "cero de tiempo" (**Figura 5.20**). Cada punto del plano representa una posición instantánea posible del cuerpo y un instante temporal posible.

Aunque puedes dibujar el plano *x-t* en el papel, se trata de un plano abstracto. ¿Por qué se trata de un plano abstracto? Porque en la realidad no existe un plano de tales características, es decir, uno en donde el eje de las abscisas sea el tiempo, y el eje de las ordenadas sea la distancia. El "área" de una "casilla" en tal plano tiene la unidad "metro-segundo". En los planos reales, el área se mide en metros cuadrados.

Si, por ejemplo, en el instante $t_1 = 3$ segundos el cuerpo ocupaba la posición $x_1 = 5$ metros, y en el instante $t_2 = 4$ segundos ocupaba la posición $x_2 = 7$ metros, la primera posición instantánea está representada en el plano $x-t$ por el punto "1" con las "coordenadas" (3 segundos, 4 metros), y la segunda por el punto "2" con las "coordenadas" (4 segundos, 7 metros) (**Figura 5.21**).

La línea que conecta los puntos "1" y "2" del plano *x-t* (**Figura 5.22**) representa un movimiento posible del cuerpo (cambio temporal de la posición) entre dos posiciones instantáneas donde la distancia aumenta gradualmente.

Los cuatro movimientos de la práctica anterior están representados como líneas del plano *x-t* en las figuras (**Figuras 5.23**, **5.24**, **5.25** y **5.26**).

Las reglas básicas para entender lo que "dicen" las gráficas posición-tiempo son las siguientes:

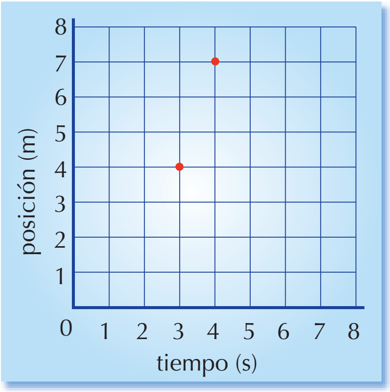


Figura 5.21. Posiciones instantáneas como puntos del plano *x-t*.

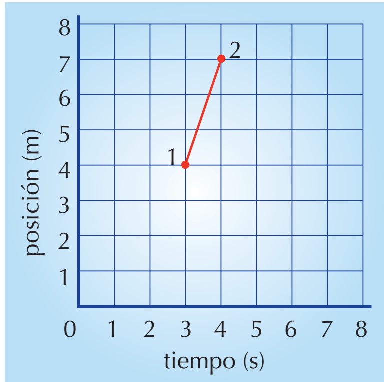


Figura 5.22. El movimiento entre dos posiciones como una línea del plano *x-t*.

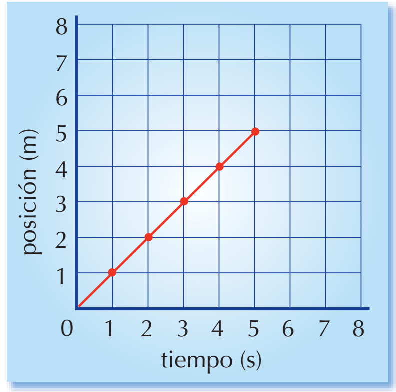


Figura 5.23. Gráfica del movimiento 1.

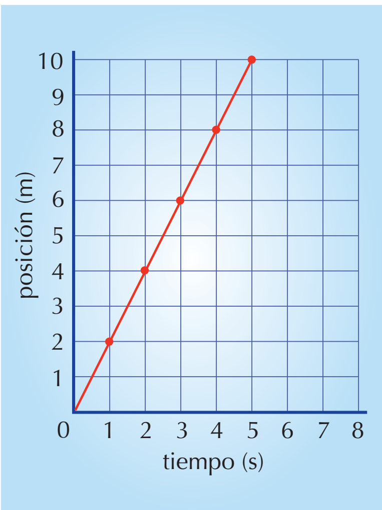


Figura 5.24. Gráfica del movimiento 2.

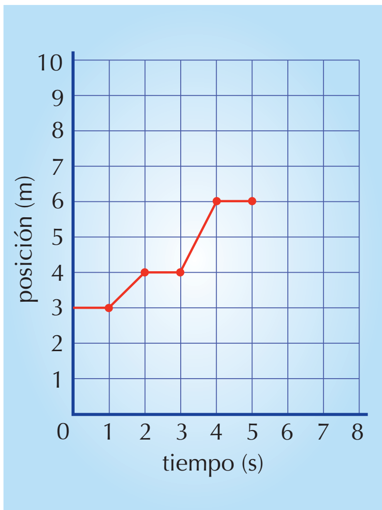


Figura 5.25. Gráfica del movimiento 3.

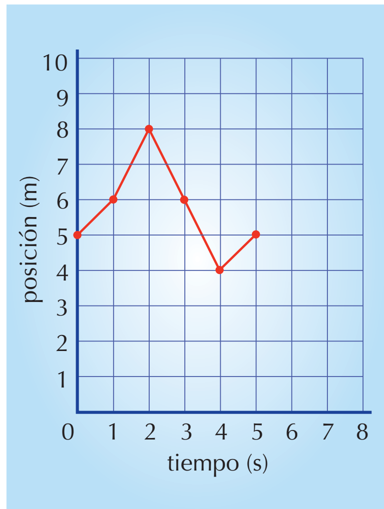


Figura 5.26. Gráfica del movimiento 4.

1. Si x aumenta con el tiempo, el cuerpo se aleja del punto de referencia.
2. Si x disminuye con el tiempo, el cuerpo se acerca al punto de referencia.
3. Si x no cambia con el tiempo, el cuerpo está en reposo, es decir, no cambia su posición con respecto al punto de referencia.

Abrir bien los ojos

Las líneas del plano posición-tiempo no son trayectorias

Competencia ejemplificada: Pensar críticamente sobre conceptos.

Hay que destacar que la línea recta que representa al movimiento en el plano *x-t* no es la trayectoria del cuerpo. En este caso especial, la trayectoria del cuerpo también es una línea recta, pero una línea recta trazada en un plano real (que en esta ocasión fue el patio de la escuela).

La otra línea recta pertenece a un plano abstracto, aquel cuyas dimensiones son una distancia espacial y un intervalo temporal. Es fácil notar que su "longitud" es mayor que la distancia recorrida.

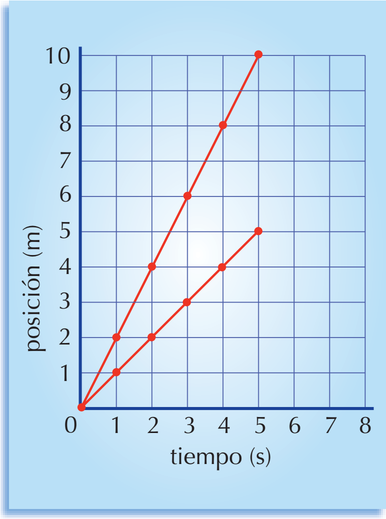


Figura 5.27. Gráficas de los movimientos 1 y 2 en el mismo plano *x-t*.

Figura 5.28. La señal de tráfico que indica la inclinación de la carretera.

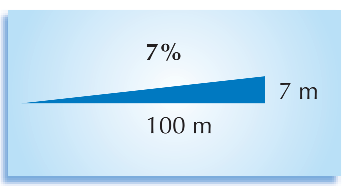


Figura 5.29. El significado de la inclinación.

Rapidez

"Inclinación" de las rectas del plano *x-t*

Dibujemos en el mismo plano *x-t* las dos rectas que representan los movimientos "1" y "2" de la actividad práctica "Moverse según diferentes 'recetas' de movimiento" (**Figura 5.27**). Aunque para ambos movimientos el tiempo transcurrido es de 5 segundos, las distancias recorridas en ese tiempo son diferentes.

En el movimiento "1" la distancia recorrida es de 5 metros; en tanto que en el movimiento "2" la distancia recorrida es de 10 metros. ¿A qué se debe esta diferencia entre las distancias recorridas? Se debe a que, según las "recetas" para la realización de los movimientos, en el movimiento "2" para recorrer 2 metros se tenía que usar 1 segundo; mientras que en el movimiento "1" se tenían que "gastar" dos segundos. Dicho de otra forma, en el movimiento "2" en un segundo se tuvo que avanzar 2 metros y, en el movimiento "1", en un segundo se tuvo que avanzar solamente 1 metro.

Esta diferencia en las instrucciones se refleja en las "inclinaciones" de las rectas que representan los dos movimientos. La recta que representa el movimiento "2" tiene mayor "inclinación" con respecto al eje *t*, que la recta que representa el movimiento "1". ¿Cómo definir cuantitativamente esta "inclinación"?

La inclinación de las carreteras se mide en porcentajes (**Figura 5.28**). Una inclinación igual a 7% quiere decir que la carretera se eleva 7 metros por cada 100 metros de distancia horizontal (**Figura 5.29**).

La "inclinación" de la recta en el plano *x-t* se define de manera análoga. Aquí, la "elevación" corresponde a la distancia recorrida y la "distancia horizontal" corresponde al tiempo transcurrido. El cociente entre la distancia recorrida y el tiempo transcurrido mide la "inclinación" de las rectas en el plano *x-t*. Para el movimiento "1", esa "inclinación" es de 5 m/5 s = 1 m/s; y para el movimiento "2" la "inclinación" es de 10 m/5 s = 2 m/s.

Definición y unidades de rapidez

Entonces, en el movimiento "1", la persona que ejecute el movimiento tiene que recorrer 1 metro en cada segundo; mientras que, en el movimiento "2", tiene que recorrer 2 metros en cada segundo. Evidentemente, la distancia recorrida en 1 segundo es una característica importante de los movimientos y se llama **rapidez**.

Definición

La **rapidez** de un cuerpo es igual a la distancia recorrida en la unidad de tiempo.

Si el cuerpo recorrió la distancia *d* en el tiempo *t*, medido en ciertas unidades (segundos, minutos, horas…), entonces la distancia recorrida en la unidad de tiempo se obtiene al dividir la distancia *d* entre el tiempo *t*:

$$v = \frac{d}{t}$$

Este cociente, que hemos indicado aquí con la letra *v*, es una cantidad física que difiere tanto de la distancia recorrida como del tiempo transcurrido. De hecho, expresa de manera breve cómo cambia la distancia recorrida con el tiempo.

La unidad de rapidez se obtiene como cociente entre la unidad de distancia y la unidad de tiempo:

$$[v] = \frac{[d]}{[t]} = \frac{1\ \text{m}}{1\ \text{s}} = 1\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de rapidez es 1 m/s.

En la vida cotidiana, en vez de expresar la rapidez en m/s, se expresa en otra unidad que es 1 km/h. Para que tengas una idea más precisa de la rapidez a que se mueven diferentes cuerpos, veamos la relación entre esas dos unidades de rapidez.

Problema resuelto

Expresar m/s en km/h

Competencia ejemplificada: Dominar los medios de la comunicación científica.

Si la rapidez de un cuerpo es 1 m/s, ¿cuánto será eso en km/h?

Solución: Si un cuerpo recorre 1 metro cada segundo, entonces en una hora, que son 3,600 segundos, recorrerá 3,600 m, o bien, 3.6 km. Por ello, se tiene la equivalencia:

$$1\frac{\text{m}}{\text{s}} = 3.6\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Sabiendo esto, es fácil transformar una rapidez dada en la unidad m/s a la unidad km/h. Por ejemplo, la rapidez de 10 m/s equivale a 10 × 3.6 km/h = 36 km/h.

Competencia a practicar: Dominar los medios de la comunicación científica.

Expresa en km/h, sin usar una calculadora y sin hacer cálculos en papel, las rapideces de 20 m/s y 5 m/s. Describe tu razonamiento.

Problema resuelto

Expresar km/h en m/s

Competencia ejemplificada: Dominar los medios de la comunicación científica.

Si la rapidez de un cuerpo es 1 km/h, ¿cuántos m/s serán eso?

Solución: Si un cuerpo tiene una rapidez de 1 km/h, su rapidez en metros por segundo se obtiene de la siguiente manera. Como 1 km es igual a 1,000 metros, y 1 hora a 3,600 segundos, se tiene:

$$\frac{1\text{ km}}{\text{h}} = \frac{1{,}000\text{ m}}{3{,}600\text{ s}} = 0.278\frac{\text{m}}{\text{s}} = 27.8\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Con este conocimiento, no es difícil transformar la rapidez en km/h a la rapidez en m/s. Por ejemplo, una rapidez de 10 km/h equivale a 10 × 0.278 m/s = 2.78 m/s.

Competencia a practicar: Dominar los medios de la comunicación científica.

Expresa en m/s, sin usar la calculadora y sin hacer cálculos en papel, la rapidez de 100 km/h. Describe tu razonamiento.

Actividad de cálculo

Transformar las unidades de rapidez

Propósito: Conocer valores equivalentes de la rapidez expresados en unidades de km/h y m/s.

Competencia a practicar: Dominar los medios de la comunicación científica.

Material: Calculadora de bolsillo.

Usando el factor de transformación que aparece en la expresión 1 m/s = 3.6 km/h, completa la siguiente tabla de equivalencias.

Rapidez en m/s	Rapidez en km/h
5	$5 \times 3.6 = 18$
10	
15	
20	
25	
30	
35	
40	

Usando el factor de transformación que aparece en 1 km/h = 0.278 m/s, completa la siguiente tabla de equivalencias.

Rapidez en km/h	Rapidez en m/s
20	$20 \times 0.278 = 5.56$
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	

Actividad de discusión

¿En los 100 metros planos cuál es la rapidez en km/h?

Competencias a practicar: Dominar los medios de la comunicación científica, aprender en equipo, aprendizaje autorregulado.

Forma tu grupo para discutir el siguiente problema:

Un buen atleta puede recorrer 100 metros planos en aproximadamente 10 segundos. Por tal razón, durante gran parte de la carrera, su rapidez es cercana a los 10 m/s. ¿Es correcto expresar tal rapidez, también, como 36 km/h?

¿Cuáles son los argumentos de quienes creen que solamente es correcto el valor de 10 m/s?

____

____

¿Cuáles son los argumentos de quienes consideran que también es correcto el valor de la rapidez de 36 km/h?

____

____

¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

Problema por resolver

La rapidez media de Asafa Powell

Competencia a practicar: Explicitar un concepto científico en sucesos cotidianos.

Figura 5.30. Asafa Powell rompió su récord.

El atleta jamaicano Asafa Powell (**Figura 5.30**) es una de las más grandes estrellas en la carrera de los 100 metros planos. En septiembre de 2007, en Rieti (Italia), logró el nuevo récord mundial con una marca de **9.74 segundos**. Así superó por 3 centésimas de segundo su propio récord anterior (Atenas, 2005).

1. ¿Cuál fue la rapidez media de Asafa Powell cuando corrió 100 m en 9.77 s?

2. ¿Cuál fue la rapidez media de Asafa Powell cuando corrió 100 m en 9.74 s?

3. Al disminuir el tiempo de carrera en 0.03 segundos, ¿cuánto aumentó la rapidez media?

4. Supón que en la carrera en que Asafa Powell hizo el tiempo de 9.74 segundos haya habido otro corredor que hizo 9.77 segundos. ¿Dónde estaría este corredor en el momento en que Powell cruzaba la línea final?

5.3. Movimiento rectilíneo uniforme

En el mundo real no es fácil realizar un movimiento de rapidez constante. Si tiras una pelota para que vaya rodando por el suelo, después de un rato ésta se detiene, lo cual significa que su rapidez disminuye hasta que se vuelve cero. La influencia del suelo y, en cierto grado, del aire es adversa para el movimiento de la pelota.

Sin embargo, los móviles que tienen un motor son capaces de mantener una rapidez constante, venciendo las influencias adversas. Por ejemplo, en una carretera recta, un automóvil puede moverse mucho tiempo a rapidez constante. Los aviones y los barcos, también, durante la mayor parte de su viaje, mantienen su rapidez de crucero.

Otro ejemplo de movimiento rectilíneo de rapidez constante es el movimiento de los individuos que van montados en las escaleras móviles de las estaciones del metro o de los supermercados (**Figura 5.31**). En la siguiente actividad vas a provocar un movimiento y tratarás de averiguar si se trata de un movimiento de rapidez constante.

Figura 5.31. Movimiento rectilíneo a rapidez constante.

Actividad práctica

Movimiento de una batería sobre una mesa

Propósito: Producir un movimiento y averiguar si éste ocurre a rapidez constante.

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente, y aprender en equipo.

Material: Regla, batería, cronómetro, monedas, hilo.

Junta a tu grupo de trabajo para realizar esta actividad. Sobre una mesa lisa, a partir del extremo de una regla inclinada, marca tres tramos de 30 centímetros (**Figura 5.32**).

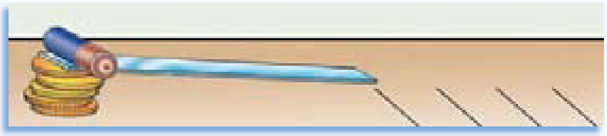


Figura 5.32. Arreglo para producir el movimiento de una pila. El dibujo no está a escala.

1. Desde cierta altura, deja rodar la batería sobre la regla inclinada.
2. Activa el cronómetro cuando la batería comience a moverse sobre la mesa y mide el tiempo que necesita para recorrer 30 cm. Efectúa tres veces la medición del tiempo y calcula el valor medio (sumando los tres tiempos y dividiendo tal suma entre 3).
3. Repite las mediciones del tiempo para los tramos de 60 cm y 90 cm.

La magnitud de la rapidez se obtiene al dividir la longitud del tramo entre el valor medio del tiempo correspondiente. Anota los valores en la tabla que sigue:

Tramo	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Valor medio del tiempo	Rapidez
0.30 cm					
0.60 cm					
0.90 cm					

4. ¿Se puede considerar el movimiento de la batería sobre la mesa como un movimiento de rapidez constante?
5. Describe detalladamente en tu cuaderno el razonamiento que respalda la respuesta a la que llegó tu grupo.

Rapidez media

Al viajar en automóvil por una carretera, seguramente habrás notado observando el tablero que, debido a diferentes causas, la rapidez del movimiento del auto cambia a menudo. Supongamos, por ejemplo, que la distancia recorrida en un viaje sea $d = 100$ km y que el tiempo transcurrido sea $t = 2$ h. Qué significado tiene el cociente

$$\frac{d}{t} = \frac{100\ \text{km}}{2\ \text{h}} = 50\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Este cociente, que se llama **rapidez media**, es la rapidez constante que debería mantener el vehículo para recorrer la misma distancia (100 km) en el mismo tiempo (2 h).

La rapidez media no coincide con las rapideces reales del móvil, como lo muestra el siguiente problema.

Problema resuelto

La rapidez media difiere de las rapideces reales

Competencia ejemplificada: Distinguir entre dos conceptos científicos cercanos pero diferentes.

Un automóvil viaja durante un tiempo $t_1 = 10$ minutos a rapidez $v_1 = 1$ km/min y durante un tiempo $t_2 = 20$ minutos a rapidez $v_2 = 0.7$ km/min. ¿Cuál es su rapidez media?

Solución: La distancia total recorrida en el viaje es igual a la suma de las distancias recorridas a diferentes rapideces. La distancia recorrida a rapidez v_1 es

$$d_1 = v_1 \cdot t_1 = 1\,\frac{\text{km}}{\text{min}} \cdot 10 \text{ min} = 10 \text{ km}$$

La distancia recorrida a rapidez v_2 es

$$d_2 = v_2 \cdot t_2 = 0.7\,\frac{\text{km}}{\text{min}} \cdot 20 \text{ min} = 14 \text{ km}$$

Entonces, la distancia total d recorrida en el viaje es:

$$d = d_1 + d_2 = 10 \text{ km} + 14 \text{ km} = 24 \text{ km}$$

La duración del viaje es igual a la suma de los tiempos transcurridos al realizar los movimientos a diferentes rapideces:

$$t = t_1 + t_2 = 10 \text{ min} + 20 \text{ min} = 30 \text{ min}$$

La rapidez media v_m es igual al cociente de la distancia recorrida d y el tiempo transcurrido t:

$$v_m = \frac{d}{t} = \frac{24 \text{ km}}{30 \text{ min}} = 0.8\,\frac{\text{km}}{\text{min}}$$

Dar sentido al resultado: Como observas la rapidez media no coincide con ninguna de las rapideces. Es menor que la rapidez de la primera parte del viaje $\left(1\,\frac{\text{km}}{\text{min}}\right)$ y mayor que la rapidez de la segunda parte del viaje $\left(0.7\,\frac{\text{km}}{\text{min}}\right)$.

Algunas personas creen que la rapidez media siempre se obtiene al sumar las rapideces y dividir el resultado entre 2. Por ello, es importante que notes que la rapidez media, en este caso, *no es igual* a la mitad de la suma de dos rapideces:

$$\frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{1\,\frac{\text{km}}{\text{min}} + 0.7\,\frac{\text{km}}{\text{min}}}{2} = \frac{1.7\,\frac{\text{km}}{\text{min}}}{2} = 0.85\,\frac{\text{km}}{\text{min}}$$

Pensamiento crítico: ¿En qué caso particular la rapidez media, calculada según su definición, sería igual a la mitad de la suma de dos rapideces?

Actividad de discusión

¿Para qué calcular la rapidez media?

Competencias a practicar: Explicitar un concepto físico en las situaciones cotidianas, aprender en equipo y comunicar conclusiones.

1. Junta a tu equipo para considerar la siguiente controversia. Algunas personas dicen: "Si la rapidez media difiere de las rapideces reales, no tiene caso calcularla." Otras personas argumentan: "Si el concepto de la rapidez media no fuera útil, no se hubiera inventado."
2. ¿En qué situaciones cotidianas y por qué es útil conocer el concepto de la rapidez media?

Combinar la distancia, el tiempo y la rapidez

La distancia recorrida, el tiempo transcurrido y la rapidez (sea constante o media) son las tres cantidades físicas que describen el movimiento. Su relación es sencilla en el caso del movimiento uniforme de los cuerpos (el movimiento a rapidez constante). En tal movimiento, en intervalos iguales de tiempo, el cuerpo recorre distancias de la misma longitud.

Por la definición de rapidez, los valores de la distancia recorrida, el tiempo transcurrido y la rapidez siempre satisfacen la misma relación matemática. Por eso, conociendo dos de las tres cantidades, es posible calcular la tercera. Veamos unos ejemplos.

Buscar la rapidez

Como vimos, si para un movimiento la distancia recorrida es d y el tiempo transcurrido es t, la rapidez v está definida como:

$$v = \frac{d}{t}$$

Si la rapidez cambia durante el movimiento, esta fórmula genera el valor de la rapidez media.

Problema por resolver

Rapidez media del Concorde

Competencia ejemplificada: Explicitar el concepto de la rapidez media en una situación cotidiana.

Figura 5.33. El Concorde, el avión de pasajeros más veloz que el sonido.

El avión Concorde (**Figura 5.33**), que hasta antes de su retiro era el avión de pasajeros más rápido, recorría en un tiempo t = 3 horas la distancia entre Londres y Nueva York d = 5,600 km.

1. ¿Cuál era su rapidez media en km/h y m/s?
2. ¿Cuántas veces es mayor esa rapidez que la rapidez del sonido (c = 340 m/s)?

Problema por resolver

El increíble viaje de las mariposas monarca

Competencia ejemplificada: Explicitar el concepto de la rapidez media en una situación cotidiana.

Figura 5.34. Una mariposa monarca.

Las mariposas monarca, que pertenecen a una de las especies animales más bellas (**Figura 5.34**), realizan una migración casi increíble. Para salvarse del frío de Canadá y de Estados Unidos, vuelan en otoño hacia México y otros países de Centroamérica.

Las mariposas que llegan a México vienen de la zona ubicada entre las Montañas Rocallosas y los Grandes Lagos, bajan por la Sierra Madre Oriental, entran al Altiplano por las montañas más bajas y llegan al Estado de México y Michoacán.

1. Usando un mapa que muestre los territorios de Estados Unidos y de México, encuentra la distancia aproximada que recorren las mariposas.
2. Si el viaje dura 60 días, ¿cuál es la rapidez media de las mariposas?

Pensamiento crítico: ¿Es posible expresar la rapidez media de las mariposas en km/h?

¡Hagamos física!

Las rapideces medias en las carreras de atletismo

Propósito: Predecir la relación entre las rapideces medias en tres carreras de atletismo (100 m, 200 m y 400 m) y comparar la predicción con los datos reales.

Competencia ejemplificada: Plantear hipótesis, valorar preconcepciones personales y aprender en equipo.

Figura 5.35. Una carrera de atletismo.

Las carreras atléticas de 100 m, 200 m y 400 m (**Figura 5.35**) generan mucha emoción entre los aficionados al atletismo, muchos de los cuales, a menudo, conocen todas las marcas mundiales.

Veamos ahora esas carreras desde el punto de vista de la rapidez media.

1. Según tu opinión, ¿cuál es la relación correcta entre las rapideces medias en las carreras de 100 m, 200 m y 400 m?

a) Todas las rapideces medias son iguales;
b) La rapidez media en 100 m es la mayor, y en 400 m, la menor.
c) La rapidez media en 200 m es la mayor, y en 100 m, la menor.
d) La rapidez media en 200 m es la mayor, y en 400 m, la menor.
e) La rapidez media en 400 m es la mayor, y en 100 m, la menor.

2. Describe, tan precisamente como te sea posible, el razonamiento que respalda tu selección:

____

____

3. ¿En qué difiere tu selección de la de los demás miembros de tu grupo?

____

____

Los actuales récords mundiales para las carreras de 100 m, 200 m y 400 m están dados en la siguiente tabla:

Carrera	Tiempo récord para mujeres	Tiempo récord para hombres
100 m	10.49 s	9.58 s (agosto 2009)
200 m	21.34 s	19.19 s (agosto 2009)
400 m	47.60 s	43.18 s (agosto 1999)

En la categoría de mujeres, la rapidez media en la carrera de 100 m es:

$$v_m = \frac{100\ \text{m}}{10.49\ \text{s}} = 9.53\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En la categoría de hombres, la rapidez media en la carrera de 100 m es:

$$v_m = \frac{100\ \text{m}}{9.58\ \text{s}} = 10.44\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4. Calcula las rapideces medias para las otras dos carreras y completa la siguiente tabla:

Carrera	Rapidez media para mujeres	Rapidez media para hombres
100 m	9.53 m/s	10.44 m/s
200 m		
400 m		

5. ¿Cuáles datos confirman tu predicción?

____

____

6. ¿Cuáles datos contradicen tu predicción?

____

____

7. ¿Cómo explicas esa contradicción?

____

____

Buscar la distancia recorrida

Despejando d de la fórmula para la rapidez, se obtiene:

$$d = v \cdot t$$

Esto quiere decir que, conociendo la rapidez v y el tiempo transcurrido t, es posible calcular la distancia recorrida d. La distancia recorrida está determinada por la rapidez y el tiempo de movimiento.

Problema resuelto

Un vuelo entre la Ciudad de México y Monterrey

Competencia ejemplificada: Explicitar los conceptos de física en una situación cotidiana y aplicar modelos matemáticos.

En enero de 2001 mi amiga Aída voló de la Ciudad de México a Monterrey. Según los datos proporcionados por la agencia de viajes, en su vuelo, el avión tipo *Boeing* 757 tenía la salida prevista para la 1:00 h y la llegada para las 2:20 h de la tarde. Al dividir la distancia recorrida entre el tiempo previsto para el vuelo, se obtiene una rapidez media de 5.54 millas/minuto.

1. ¿Cuál es la rapidez media de este vuelo en km/h y en m/s?
2. ¿Cuánto tiempo dura el vuelo?
3. ¿Qué distancia recorre el avión durante el vuelo?

Solución:

1. Como una milla es igual 1.609 km y un minuto es 1/60 parte de una hora, la rapidez media del avión es:

$$v_m = 5.54\,\frac{\text{millas}}{\text{min}} = 5.54\,\frac{1.609\text{ km}}{\frac{1}{60}\text{ h}} = (5.54 \cdot 1.609 \cdot 60)\,\frac{\text{km}}{\text{h}} = 534.8\,\frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 535\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Como 1 km/h equivale a 0.278 m/s, la velocidad media también es igual a:

$$v_m = 535\,\frac{\text{km}}{\text{h}} = 535 \cdot 0.278\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 148.7\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 150\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2. El tiempo de vuelo Δt se obtiene al restar la hora de salida de la hora de llegada, es decir Δt = 2 horas con 20 minutos − 1 hora = 1 hora con 20 minutos. Estos son 80 minutos.
3. La distancia recorrida en el vuelo se obtiene al multiplicar la velocidad media por el tiempo de vuelo:

$$d = v_m \cdot \Delta t = 5.54\,\frac{\text{millas}}{\text{min}} \cdot 80\text{ min} = 443\text{ millas} = 443\text{ millas} \cdot \frac{1.609\text{ km}}{\text{milla}} = 713\text{ km}$$

Competencia a practicar: Obtener la información para evaluar el resultado.

Usando un mapa de México, una regla escolar y una calculadora, verifica si es aceptable este valor de la distancia entre las ciudades de México y Monterrey.

Buscar el tiempo transcurrido

Despejando t de la fórmula para la rapidez, se obtiene:

$$t = \frac{d}{v}$$

Esta fórmula indica que, conociendo la distancia recorrida d y la rapidez v, es posible calcular el tiempo transcurrido t. El tiempo del movimiento está determinado por la distancia que se tiene que recorrer y la rapidez a que se mueve el cuerpo.

Problema resuelto

El tiempo de que dispone el portero en el tiro penal

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

El tiro penal es uno de los momentos más emocionantes de un partido de fútbol (**Figura 5.36**). El tiro penal se ejecuta desde una distancia de 11 m.

Si el jugador que ejecuta la pena máxima dispara el balón de manera que éste salga con una rapidez de 100 km/h, ¿cuánto tiempo tendrá el portero para detener el balón, antes de que éste entre en la portería?

Supón que el movimiento del balón se trata como si fuera un movimiento rectilíneo uniforme.

Solución: El tiempo de que dispone el portero es igual a:

$$t = \frac{d}{v}$$

donde d es la distancia recorrida por el balón y v es la rapidez del balón.

Figura 5.36. El tiro de penal en el fútbol.

Es evidente que el resultado dependerá de los valores que se asignen a la distancia recorrida y a la rapidez del balón.

1. Se puede suponer que el balón conserva su rapidez inicial de 100 km/h = 27.8 m/s y que la distancia recorrida es igual a 11 m. Con tales suposiciones, el tiempo disponible para el portero es:

$$t = \frac{11\,\text{m}}{27.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.396\ \text{s} \approx 0.4\,\text{s}$$

2. Si se supone que el tirador lanzó el balón hacia el punto de la línea de portería más alejado del portero, entonces la distancia recorrida será diferente:

$$d_1 = \sqrt{(11\,\text{m})^2 + (3.7\,\text{m})^2} = \sqrt{121\text{m}^2 + 13.69\,\text{m}^2} = 11.61\text{m}^2$$

Con la misma suposición sobre la rapidez del balón, el tiempo disponible será:

$$t_1 = \frac{11.61\text{m}}{27.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.418\ \text{s} \approx 0.42\ \text{s}$$

Dar sentido al resultado: La diferencia entre la situación en que el balón va directamente hacia el portero (favorable para éste) y la situación en que el balón va hacia el punto de la línea de portería más alejado del portero (favorable para el tirador) es, desde el punto de vista de la física, sorprendentemente pequeña. La distancia recorrida aumenta solamente 0.57 m, y el tiempo disponible 0.02 s.

Problema por resolver

La legendaria carrera de Maratón

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Según la leyenda griega, el soldado Fidípides (**Figura 5.37**) corrió, en el año 490 a. C. desde Maratón hasta Atenas para llevar la noticia de la victoria sobre los persas. Se cuenta que después de pronunciar "*Niké, Niké*" ("victoria, victoria"), cayó al suelo y murió.

Si la distancia entre esos dos lugares es de 42 km y suponiendo que pudo correr a una rapidez media de 14 km/h, ¿cuánto duró la legendaria carrera de Fidípides?

Figura 5.37. La escultura de Fidípides.

Problema por resolver

El tiempo para recorrer la cancha de tenis

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El jugador de tenis estadounidense Andy Roddick (**Figura 5.38**) es quien lanza la pelota en un servicio con la mayor rapidez: ¡246.2 km/h!

1. ¿Qué tanto es esa rapidez expresada en metros por segundo?
2. ¿Cuánto tarda la pelota, moviéndose a esa rapidez, en recorrer la longitud de la cancha de tenis (23.8 m)?

Pensamiento crítico: ¿Qué suposición importante tuviste qué hacer para calcular el tiempo? ¿Es aceptable esa suposición?

Figura 5.38. Andy Roddick.

Física y transporte

El aumento en la rapidez de los aviones a lo largo del tiempo

Competencia ejemplificada: Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad.

Figura 5.39. Los hermanos Wright.

El primer vuelo en un aparato más pesado que el aire fue realizado por los hermanos Orville y Wilbur Wright (**Figura 5.39**) el día 17 de diciembre de 1903 en Kill Devil Hills, Carolina del Norte (EU). El vuelo con el que comenzó la historia de la aviación moderna fue realizado por Orville y duró únicamente 12 segundos. En ese lapso la aeronave, llamada *Volador I* (*Flyer I*) (**Figura 5.40**) y propulsada por un motor de 12 CV, recorrió un poco más de 36 metros. La rapidez del primer vuelo no fue nada impresionante: ¡3 m/s!

Ese mismo día, Wilbur logró estar más tiempo en el aire, 59 segundos, y recorrer una distancia de 260 metros. La rapidez fue también mayor: 4.4 m/s. Como es evidente, la historia de los aviones comenzó con una rapidez modesta: 16 km/h.

Pero en menos de dos años, los hermanos Wright lograron mejorar considerablemente las características de sus vuelos. En octubre de 1905, con la aeronave *Volador III*, propulsada por un motor de 15 CV, lograron estar 38 minutos en el aire y recorrer 39 km. La rapidez fue ya mayor que 60 km/h.

En el año de 1927, Charles A. Lindberg (**Figura 5.41**) hizo el primer vuelo trasatlántico, entre Nueva York y París. Recorrió 5,810 kilómetros en 33.5 horas. La rapidez ya estuvo por arriba de 170 km/h.

En la actualidad, la rapidez de los grandes aviones de pasajeros, como el *Jumbo Jet 747-400* (**Figura 5.42**), es de 950 km/h, lo cual son casi 60 veces mayor que la que tenía el *Volador I* en 1903.

Pero esto no es todo. El avión supersónico *Concorde* pudo alcanzar una rapidez de 2,100 km/h. Esta aeronave es 130 veces más rápida que el primer avión en que volaron los hermanos Wright.

Sin embargo, la hazaña de los hermanos Wright sigue siendo uno de los eventos más importantes en la historia del hombre y marca la realización de un sueño muy antiguo: volar. Por eso fue un homenaje bien merecido el que el astronauta Neil Armstrong, el primer hombre que pisó el suelo de la Luna, en esa misión llevara consigo un pedazo de la seda de que estaban hechas las alas del *Volador I*.

Competencia a practicar: Opinar sobre el impacto de la ciencia y la tecnología en la vida cotidiana.

1. ¿Qué cambios positivos fueron generados por el incremento en la rapidez de los aviones?
2. ¿Qué cambios negativos fueron provocados por el aumento en la rapidez de los aviones?

Figura 5.40. *Volador I.*

Figura 5.41. Charles A. Lindberg.

Figura 5.42. Jumbo Jet 747-400.

Velocidad

¿Basta conocer la rapidez para conocer el movimiento?

La rapidez es el cociente entre el camino recorrido y el tiempo transcurrido, y está determinada por su magnitud y por la unidad de medida. Cuando se dice que la

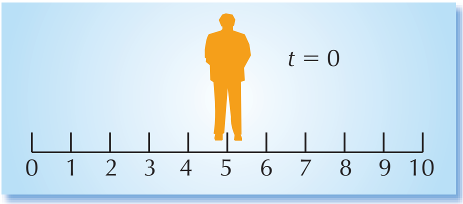


Figura 5.43. La posición inicial de la persona.

rapidez de un automóvil es de 30 m/s, el número "30" es la magnitud de la rapidez y "m/s" es la unidad de rapidez.

Supongamos que una persona se encuentra sobre la recta que fue dibujada en el patio de la escuela, para realizar la actividad de las "recetas" de movimiento. Su posición inicial es 5 m (**Figura 5.43**). Se va a mover a rapidez de 1 m/s durante 4 segundos. ¿Cuál será su posición final?

Esta pregunta no tiene una respuesta única, sino más bien dos respuestas. Si la persona se aleja del punto de referencia a la rapidez indicada, después de 4 segundos su posición final será 9 m (**Figura 5.44**). Si a la misma rapidez se acerca al punto de referencia, después de 4 segundos su posición final será 1 m (**Figura 5.45**).

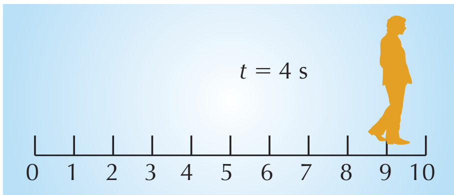


Figura 5.44. La posición final de la persona después del alejamiento.

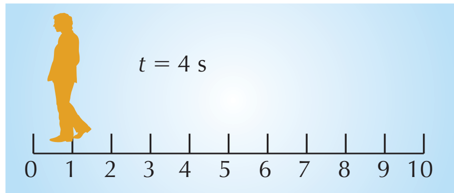


Figura 5.45. La posición final de la persona después del acercamiento.

Actividad de cálculo y de graficación

Diferentes movimientos a la misma rapidez

Propósito: Representar numérica y gráficamente dos movimientos a la misma rapidez y calcular la distancia recorrida y el desplazamiento.

Competencia ejemplificada: Dominar los medios de la comunicación científica.

Material: Cuaderno de física.

1. Dibuja en tu cuaderno de física dos tablas como ésta:

Instante del tiempo (s)	Posición instantánea (m)
0	5
1	
2	
3	
4	

Para los dos movimientos, que corresponden al alejamiento y al acercamiento, anota los números que corresponden a las posiciones instantáneas.

2. Representa estos dos movimientos mediante gráficas posición-tiempo en el plano *x*-*t*.
3. Para estos dos movimientos, encuentra la distancia recorrida y el desplazamiento.

Velocidad como rapidez con dirección y sentido

El ejemplo anterior muestra que la rapidez, definida como distancia recorrida en la unidad de tiempo, no describe completamente el movimiento. Esto se debe al hecho de que la distancia recorrida no es diferente en movimientos de diferente sentido. En ambos movimientos, la distancia recorrida fue de 4 metros.

La cantidad que fue diferente en los dos movimientos fue el desplazamiento. En el alejamiento, el desplazamiento fue positivo:

$$\Delta x_1 = x_{f1} - x_0 = 9 \text{ m} - 5 \text{ m} = +4 \text{ m}$$

mientras que en el acercamiento, el desplazamiento fue negativo;

$$\Delta x_2 = x_{f2} - x_0 = 1 \text{ m} - 5 \text{ m} = -4 \text{ m}$$

Si en la definición para rapidez en vez de distancia recorrida se hubiera usado el desplazamiento, se tendrían dos "rapideces" diferentes para los dos diferentes movimientos analizados arriba. En el primer caso, la "rapidez" sería +4 m/s y, en el segundo caso, la rapidez sería −4 m/s. Tal "rapidez" que, en este caso, toma en cuenta, para el ejemplo en consideración, si el cuerpo aumenta o disminuye su distancia con respecto al punto de referencia se llama **velocidad**.

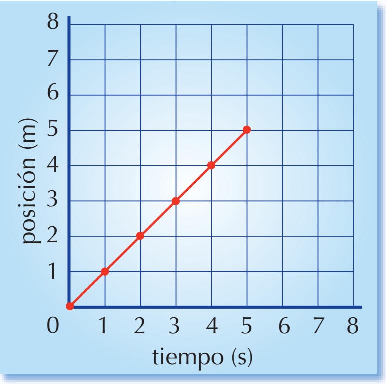


Figura 5.46. Velocidad y rapidez coinciden.

Definición

La **velocidad** del movimiento es igual al desplazamiento realizado en la unidad del tiempo.

En el movimiento rectilíneo, la velocidad es igual a la rapidez cuando el desplazamiento es igual a la distancia recorrida, es decir, cuando con el tiempo, en el ejemplo considerado, el cuerpo aumenta su distancia respecto al punto de referencia (**Figura 5.46**). La velocidad es igual a la rapidez con signo menos, cuando con el tiempo el cuerpo disminuye su distancia con respecto al punto de referencia (**Figura 5.47**). Esta relación es válida solamente si no hay "posiciones negativas", es decir, a la izquierda del punto de referencia.

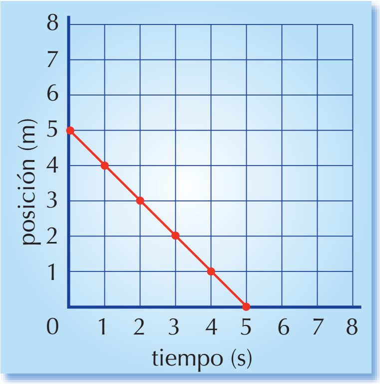


Figura 5.47. Velocidad y rapidez difieren.

Si se permiten las posiciones negativas, entonces la velocidad es igual a la rapidez cuando el cuerpo se mueve hacia la derecha, y a la rapidez con signo menos cuando el cuerpo se mueve hacia la izquierda.

El concepto de velocidad toma en cuenta la dirección y el sentido del movimiento, en tanto que el concepto de rapidez no depende de hacia donde se mueva el cuerpo. Hay que destacar que la dirección del movimiento coincide con la dirección de la trayectoria (en este caso, la dirección de la recta).

En un movimiento rectilíneo, la dirección de la velocidad coincide con la dirección de la trayectoria, y el sentido de la velocidad es igual al sentido del movimiento (**Figura 5.48**).

En un movimiento curvilíneo, la dirección de la velocidad en cada instante coincide con la dirección de la tangente a la trayectoria en el punto que representa la posición del cuerpo, y el sentido de la velocidad es igual al sentido del movimiento (**Figura 5.49**).

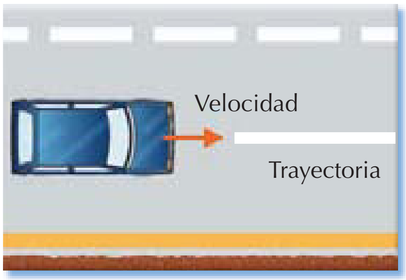


Figura 5.48. La dirección y el sentido de la velocidad en un movimiento rectilíneo.

Figura 5.49. La dirección y el sentido de la velocidad en un movimiento curvilíneo.

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. Define los conceptos *movimiento*, *desplazamiento*, *distancia recorrida*, *rapidez* y *velocidad*.
2. ¿Por qué se dice que el movimiento tiene carácter relativo?
3. ¿Es posible que la distancia recorrida sea mayor que el desplazamiento?
4. ¿Es posible que el desplazamiento sea mayor que la distancia recorrida?
5. ¿En qué caso la rapidez media es igual a la rapidez con que se mueve el cuerpo?
6. ¿Qué mide el odómetro de los automóviles, la distancia recorrida o el desplazamiento? ¿Qué muestra el velocímetro de los autos, la rapidez o la velocidad?

Pensamiento crítico

7. En el plano *x*-*t*, una línea recta paralela al eje del tiempo representa un cuerpo en reposo. ¿Cuáles serían las características del movimiento representado en el plano *x*-*t* por una línea recta paralela al eje posicional (**Figura 5.50**)? ¿Es posible que algún cuerpo del mundo real se mueva de esa manera? Si crees que sí, da un ejemplo. Si crees que no, menciona las razones para la imposibilidad.

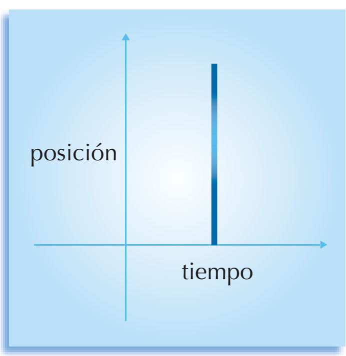


Figura 5.50. ¿Qué representa la línea paralela al eje del tiempo?

Pensamiento creativo

8. Imagina que un amigo tuyo y tú están sobre un puente cuya anchura es de 20 metros. Disponen de una pelota barata y un cronómetro. Describe el procedimiento que usarías para determinar la rapidez del río que fluye debajo del puente.
9. Dos corredores salen de un punto *A* a las 12:03, corren a rapidez constante y llegan a otro punto *B* a las 12:05. ¿Cómo es posible que un corredor haya tenido una rapidez de 7 m/s y el otro de 9 m/s? Dibuja una situación que apoye tu conclusión.

Obtener información para responder preguntas

10. Los tiempos que tardaron los atletas Carl Lewis y Leroy Burrel en recorrer diferentes tramos en la carrera de los 100 metros planos, llevada a cabo en el Campeonato Mundial de Atletismo en Tokio en 1991, están dados en la siguiente tabla:

El tramo	Tiempo empleado por Lewis	Tiempo empleado por Burrel
0 a 10 m	1.88 s	1.83 s
10 a 20 m	1.08 s	1.06 s
20 a 30 m	0.92 s	0.90 s
30 a 40 m	0.89 s	0.89 s
40 a 50 m	0.84 s	0.87 s
50 a 60 m	0.85 s	0.86 s
60 a 70 m	0.84 s	0.87 s
70 a 80 m	0.83 s	0.84 s
80 a 90 m	0.87 s	0.89 s
90 a 100 m	0.86 s	0.87 s

a) ¿Qué corredor ganó la carrera y con qué tiempo?

b) ¿Qué corredor tuvo el máximo valor de velocidad media? ¿Cuál fue y en qué tramo?

c) ¿Qué corredor tuvo el mínimo valor de velocidad media? ¿Cuál fue y en qué tramo?

11. Lee con cuidado la historia dibujada que viene abajo (**Figuras 5.51, 5.52** y **5.53**).

Figura 5.51. Un recorrido se interrumpe.

Figura 5.52. ¿Sigue o regresa a casa?

Figura 5.53. Un regreso con cansancio.

Tan sólo una de las cuatro gráficas tipo *x-t* ilustradas abajo (**Figuras 5.54, 5.55, 5.56** y **5.57**) describe correctamente cómo cambiaba la posición de la niña con respecto a su casa.

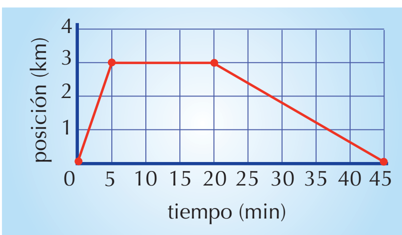


Figura 5.54. ¿Es ésta la descripción del recorrido de la niña?

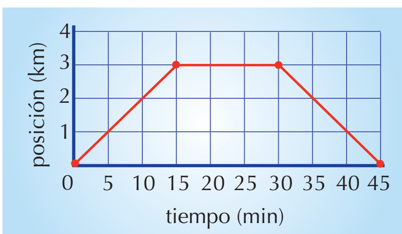


Figura 5.55. ¿Es ésta la descripción del recorrido de la niña?

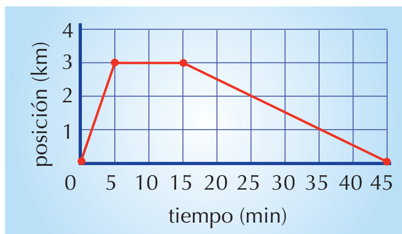


Figura 5.56. ¿Es ésta la descripción del recorrido de la niña?

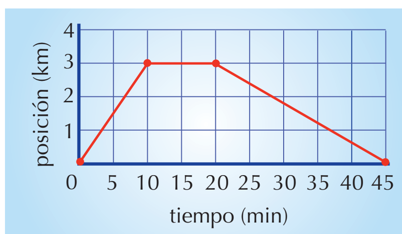


Figura 5.57. ¿Es ésta la descripción del recorrido de la niña?

a) Suponiendo que los acontecimientos de la historia ocurrieron sobre una calle recta que pasa cerca de la casa de la niña, ¿cuál es la gráfica correcta?

b) ¿Qué error contiene cada una de las gráficas que consideras incorrectas?

Construir modelos matemáticos sencillos

12. ¿Es posible que la rapidez media de tu crecimiento (desde el nacimiento hasta la fecha) sea de 1 cm/mes? ¿Y de 15 cm/año? La longitud de un recién nacido es aproximadamente igual a 50 cm. Obtén los datos necesarios y calcula cuánto creciste, en promedio, por mes y por año.

13. ¿Cuántas vueltas dan las ruedas de un automóvil común y corriente mientras el coche recorre 1 kilómetro? Mide el radio de alguna llanta y toma en cuenta que cuando las ruedas dan una vuelta, el auto recorre una distancia igual a la circunferencia de la llanta (aproximadamente igual a seis radios).

Aplicar modelos matemáticos

14. La Luna gira alrededor de la Tierra a largo de una trayectoria aproximadamente circular de radio R = 384,000 km. Al dar una vuelta, la Luna recorre la distancia igual a la circunferencia, es decir, la distancia recorrida es $d = 2\pi R = 6.28 \bullet R$.

a) ¿Qué distancia recorre la Luna durante una vuelta?

b) Si la Luna tarda t = 27.3 días en dar una vuelta, ¿a qué rapidez se mueve?

15. Los trenes modernos pueden recorrer una distancia de 1 km en 18 segundos.

a) ¿Cuál es su velocidad en km/h?

b) ¿Cuántos minutos necesitan esos trenes para recorrer una distancia de 50 km?

16. Al planear un viaje, el conductor decidió hacerlo a una velocidad media de 90 km/h. Debido al mal tiempo, ha recorrido la mitad del camino a una velocidad media de 50 km/h.

a) ¿Cuál debe ser la velocidad media en la segunda mitad del viaje para que logre su propósito?

b) ¿Es razonable esa velocidad?

Valorar preconcepciones personales

17. Moviéndose a rapidez v, un automóvil recorre en el tiempo t la distancia d = 40 m. Otro auto que se mueve a doble rapidez ($2v$) recorrería en la cuarta parte de tiempo ($t/4$) la distancia:

a) 80 m *b*) 60 m

c) 40 m *d*) 20 m

Verifica tu selección, usando los valores v = 10 m/s y t = 4 s.

¡No creas todo lo que lees!

Evaluar la sensatez de una tarea propuesta a los estudiantes

Competencia a practicar: Pensar críticamente al evaluar resultados.

En un libro de texto de física se presenta la siguiente gráfica como la instrucción de una tarea para los estudiantes (**figura 5.58**).

Analiza detenidamente el movimiento propuesto:

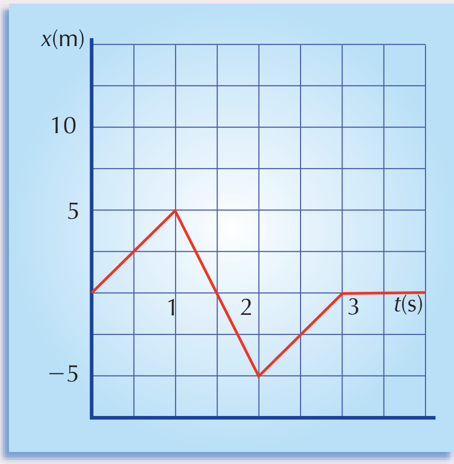


Figura 5.58. ¿Pueden los estudiantes realizar el movimiento representado en esta gráfica?

1. En el primer segundo, el estudiante tiene que recorrer 5 m, a rapidez constante.

2. En el segundo segundo, el estudiante tiene que recorrer 10 metros en el sentido opuesto a rapidez constante. ¿Qué cambio de velocidad tiene que realizar el estudiante en un solo instante (en que acaba el primer e inicia el segundo segundo)?

3. En el tercer segundo, el estudiante tiene que recorrer 5 m en el sentido opuesto a rapidez constante. ¿Qué cambio de velocidad tiene que realizar el estudiante en un solo instante (en que termina el segundo e inicia el tercer segundo)?

4. ¿Qué partes de la gráfica podrían representar un movimiento factible para los estudiantes? Describe y justifica tu razonamiento.

5. ¿Qué parte de la gráfica no podrían representar un movimiento factible para los estudiantes? Describe y justifica tu razonamiento.

Movimientos acelerados en una dimensión

6.1. Hacia el concepto de aceleración

El movimiento de velocidad constante es el movimiento más sencillo, pero no es el caso típico en lo que respecta a los movimientos que ocurren en el mundo real. Es más frecuente que los cuerpos se muevan cambiando su velocidad. Como hemos demostrado antes, la velocidad media de un cuerpo no coincide con las velocidades reales que tiene el cuerpo durante su movimiento. Para analizar mejor los movimientos, hay que considerar la posibilidad de un cambio continuo de la velocidad.

Propósitos del tema 6

- El estudiante planteará soluciones prácticas a problemas referentes al movimiento de cuerpos en una dimensión, a partir del análisis funcional y la descripción de las características de dicho movimiento.

Velocidad instantánea

Si nos interesa saber cómo cambia la velocidad con el transcurso del tiempo es necesario determinar la velocidad del cuerpo en cada instante. Esto no es una tarea fácil.

Como ya sabes, la idea de la velocidad está relacionada con la distancia recorrida en un intervalo de tiempo. Para determinar la velocidad es necesario conocer dos posiciones instantáneas del cuerpo. Si sólo se conoce una posición instantánea del cuerpo no es posible determinar su velocidad. Por eso, la determinación de la velocidad instantánea, es decir, de la velocidad que tiene el cuerpo en un instante, requiere dos mediciones de posición instantánea.

Como nos interesa la descripción del movimiento en el que la velocidad cambia de manera continua, los dos instantes de tiempo en que se determinan las posiciones instantáneas del cuerpo tienen que ser muy próximos. Solamente en el caso de intervalos de tiempo muy cortos la velocidad calculada se puede considerar como "instantánea".

Definición

La **velocidad instantánea** en el instante t es igual a la velocidad media en un intervalo del tiempo muy corto que comienza en el instante t.

Supongamos que nos interesa determinar la velocidad instantánea de un coche en el instante $t_1 = 0.00$ s y que la posición del punto representativo del coche en tal instante es $x_1 = 0.00$ m (**Figura 6.1**).

Después de una décima de segundo, es decir, en el instante $t_2 = 0.1$ s, la posición del punto representativo del coche es $x_2 = 2.00$ m (**Figura 6.2**).

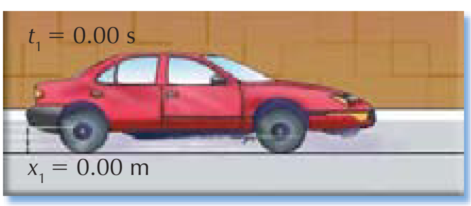


Figura 6.1. Posición del punto representativo del coche en el primer instante.

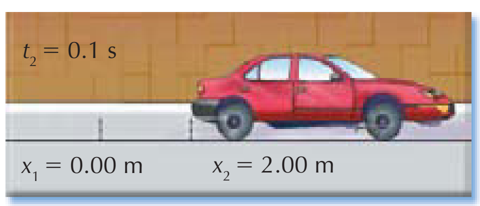


Figura 6.2. Posición del punto representativo del coche en el segundo instante.

El cambio de posición del coche es $\Delta x = x_2 - x_1 = 2.00\ \text{m} - 0.00\ \text{m} = 2.00\ \text{m}$.

La velocidad media en ese intervalo de tiempo es:

$$v_1 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{2.00\ \text{m} - 0.00\ \text{m}}{0.1\ \text{s} - 0.0\ \text{s}} = \frac{2.00\ \text{m}}{0.1\ \text{s}} = 20.0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si la velocidad del coche no cambió mucho durante una décima de segundo, el valor calculado de velocidad v_1 se puede considerar como el valor de la velocidad que tenía el coche en el instante $t_1 = 0.0$ s.

¿Tiene el coche la misma velocidad en el instante $t_2 = 0.1$ s?

No se puede responder esta pregunta sin hacer una medición adicional de la posición instantánea.

Supongamos que se hizo esa medición después de otra décima de segundo, es decir, en el instante $t_3 = t_2 + 0.1\ \text{s} = 0.2$ s, y que el resultado fue $x_3 = 4.01$ m.

La velocidad media en el segundo intervalo del tiempo es:

$$v_2 = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} = \frac{4.01\ \text{m} - 2.00\ \text{m}}{0.01\ \text{s} - 0.01\ \text{s}} = \frac{2.01\ \text{m}}{0.1\ \text{s}} = 20.1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta velocidad se puede considerar como la velocidad que tenía el coche en el instante $t_2 = 0.1$ s.

¿Es correcta la suposición de que el coche en el primer intervalo no cambió mucho de velocidad?

Como en el instante $t_1 = 0.00$ s la velocidad fue $v_1 = 20.0$ m/s y en el instante $t_2 = 0.1$s fue $v_2 = 20.1$ m/s, el cambio de la velocidad fue

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 20.1\ \text{m/s} - 20.0\ \text{m/s} = 0.1\ \text{m/s} = 10\ \text{cm/s}$$

Este cambio representa 0.5% de la velocidad que tenía el coche en el momento t_1 y se puede considerar como despreciable.

Si se quiere tener más precisión en la determinación de la velocidad instantánea, entonces hay que medir las posiciones instantáneas en los extremos de intervalos de tiempo más cortos. En este caso, en vez de una décima de segundo, se podría usar un intervalo más corto, por ejemplo, de una centésima o una milésima de segundo.

Representación del movimiento en el plano *v*-*t*

El concepto de velocidad nos brinda información sobre la distancia que recorre el cuerpo en una unidad de tiempo, suponiendo, claro, que la velocidad no cambie con el tiempo. En tal caso, en todos los instantes durante los que hay movimiento, la velocidad es la misma. Por ejemplo, supongamos que al medir la velocidad de un coche en varios instantes de tiempo se obtuvo la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1. Velocidades instantáneas en el movimiento rectilíneo uniforme.

Instante del tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0	15
1	15
2	15
3	15
4	15

Se nota que la velocidad en todos los instantes en que se midió tuvo el mismo valor: 15 m/s. El coche se movía a velocidad constante.

¿Cómo cambiaba la posición del coche?

Si la carretera es rectilínea y se toma la posición del coche en el instante inicial (t = 0 s) como el punto de referencia (x = 0 m), las posiciones instantáneas del coche fueron las que se presentan en la **Tabla 6.2**.

Tabla 6.2. Posiciones instantáneas en el movimiento rectilíneo uniforme.

Instante del tiempo (s)	Posición (m)
0	0
1	15
2	30
3	45
4	60

En cada intervalo de 1 segundo el coche recorría la misma distancia de 15 m.

Los datos de la **Tabla 6.1** están representados en la **Figura 6.3** y los de la **Tabla 6.2** en la **Figura 6.4**.

En el plano v-t, es decir, en el plano "velocidad-tiempo", el movimiento se representa por medio de una línea recta paralela al eje t.

En el plano x-t, es decir, en el plano "posición-tiempo", como hemos visto anteriormente, ese movimiento se representa también por medio de una línea recta. Pero, a diferencia de la que representa a la velocidad, esta última recta está "inclinada" con respecto al eje t. La "inclinación" de esta recta depende de la magnitud de la velocidad. A mayor velocidad corresponde mayor inclinación.

Cabe destacar una vez más que estas líneas rectas no son las trayectorias del cuerpo (aunque la trayectoria del cuerpo puede ser una línea recta). Estas dos líneas describen el movimiento desde diferentes puntos de vista.

Ambas representaciones son equivalentes, solamente que una representación gráfica usa el plano "velocidad-tiempo" y la otra el plano "posición-tiempo".

El hecho de que la velocidad o rapidez sea constante implica que la línea que representa el comportamiento de la posición del coche es una línea recta con una determinada inclinación. Y a la inversa, si sabemos que la distancia recorrida es proporcional al tiempo transcurrido, tal información implica una gráfica "velocidad contra tiempo" en la que la velocidad no cambia.

Ahora, ¿por qué nos interesa tener la otra información sobre v, cuando prácticamente dice lo mismo?

Nos interesa porque con el concepto de velocidad instantánea podemos estudiar movimientos en los que la velocidad no es constante. Si la velocidad cambia (es decir, si no es constante), el movimiento será más complicado y la gráfica que represente cómo la distancia recorrida depende del tiempo ya no será una línea recta.

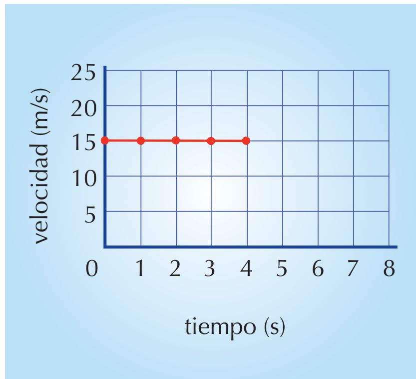


Figura 6.3. La gráfica v-t para el movimiento de velocidad constante.

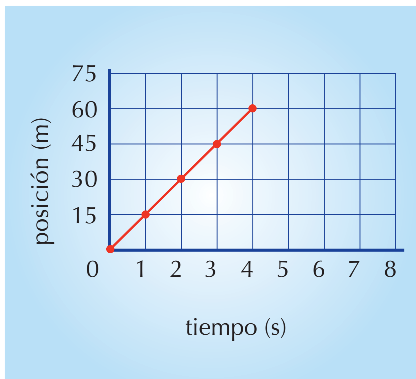


Figura 6.4. La gráfica x-t para el movimiento a velocidad constante.

Cambio de velocidad y el concepto de aceleración

Es importante notar aquí que en física el movimiento acelerado es cualquier movimiento en el que cambia la rapidez. Incluso cuando la rapidez disminuye, los físicos todavía hablan de un movimiento acelerado.

Algunos autores quieren hacer la distinción y denominan "movimiento acelerado" el movimiento en que la rapidez aumenta y "movimiento desacelerado" aquél en que la rapidez disminuye.

Abrir bien los ojos

El sentido común y la aceleración

Competencia ejemplificada: Valorar las preconcepciones comunes.

En la vida cotidiana hay dos ideas erróneas que frecuentemente se relacionan con la aceleración. Según la primera idea, una gran velocidad, aunque sea constante, tiene que ver algo con la aceleración. Es decir, la aceleración no se relaciona con el cambio de la velocidad, sino directamente con velocidades grandes.

De acuerdo con la segunda idea, se habla de aceleración solamente si la velocidad aumenta. Según el sentido común, solamente aumentar la velocidad es acelerar. En física la idea de la aceleración es más general:

Cualquier cambio de velocidad, sea de magnitud, dirección o sentido, implica una aceleración.

¿Cómo cuantificar la aceleración?

¿Cuál será el caso más sencillo de cambio de velocidad?

Es el caso en que la velocidad cambia la misma cantidad en intervalos del tiempo iguales. Si la velocidad aumenta, lo hace aumentando la misma cantidad cada segundo. El movimiento resultante se llama **movimiento uniformemente acelerado**.

Definición

El **movimiento uniformemente acelerado** es aquél en que la velocidad cambia lo mismo en intervalos de tiempo iguales.

¿Cómo definir cuantitativamente la aceleración para el movimiento uniformemente acelerado?

Supón que las velocidades instantáneas de dos coches cambian de manera que en diferentes instantes de tiempo tienen los valores indicados en la **Tabla 6.3**.

Tabla 6.3. Velocidades instantáneas de dos automóviles.

Instante del tiempo	Velocidad 1	Velocidad 2
0 s	4 m/s	0 m/s
1 s	5 m/s	2 m/s
2 s	6 m/s	4 m/s
3 s	7 m/s	6 m/s
4 s	8 m/s	8 m/s

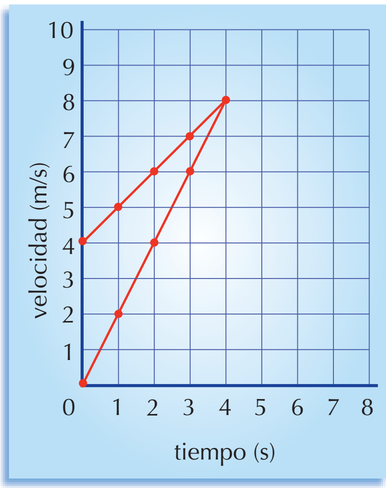


Figura 6.5. El comportamiento de las velocidades instantáneas de dos coches.

El comportamiento de las velocidades instantáneas de los dos coches puede representarse gráficamente en el plano "velocidad-tiempo" (**Figura 6.5**).

Aunque en el instante $t = 4$ s ambos coches tienen la misma velocidad de 8 m/s, los cambios de sus velocidades son diferentes.

La velocidad del primer coche aumentó $\Delta v_1 = 8 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s} = 4 \text{ m/s}$. Para el segundo coche, que partió de reposo, el aumento de la velocidad es mayor y es igual a $\Delta v_2 = 8 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s} = 8 \text{ m/s}$. Entonces, en los 4 segundos la velocidad del primer coche aumentó 4 m/s y la del segundo coche 8 m/s.

Mientras, el primer coche necesita 2 segundos para aumentar su velocidad 2 m/s, el segundo coche, para alcanzar el mismo aumento de velocidad, necesita solamente 1 segundo.

La pregunta voladora

El primer coche necesita 1 segundo para aumentar su velocidad 1 m/s. ¿Cuánto tiempo necesita el segundo coche para aumentar su velocidad 1 m/s?

Ni el cambio de la velocidad ni el tiempo transcurrido por separado nos dan la base para comparar cómo cambian las velocidades de los dos coches. Obviamente necesitamos un concepto nuevo para hacerlo. Ese concepto es la **aceleración**.

La definición y la unidad de la aceleración

La aceleración se define y cuantifica mediante la siguiente definición:

Definición

La **aceleración** es igual al cambio de la velocidad en la unidad de tiempo.

Para obtener el cambio de velocidad que corresponde a la unidad del tiempo (normalmente, a un segundo), se divide el cambio de la velocidad (expresado en m/s) entre el tiempo transcurrido (expresado en segundos), es decir:

$$\text{aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

Si en el instante t_0 la velocidad de un móvil es v_0 y en el instante t la velocidad es v, entonces el cambio de velocidad es igual a:

$$\Delta v = v - v_0$$

y el tiempo transcurrido es igual a:

$$\Delta t = t - t_0$$

Aceptando esas notaciones, la aceleración en forma simbólica se escribe así:

$$a = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

No está de más aclarar que el símbolo Δv representa el cambio de velocidad que ocurrió en el intervalo de tiempo Δt.

Si la velocidad inicial es cero ($v_0 = 0$) y si el instante inicial también es cero ($t_0 = 0$), entonces el cambio de la velocidad es igual al valor de la velocidad ($\Delta v = v - v_0 = v - 0 = v$) y el intervalo del tiempo es igual al tiempo transcurrido ($\Delta t = t - t_0 = t - 0 = t$). En este caso, la fórmula para la aceleración sería:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{t}$$

Abrir bien los ojos

Lo simple no siempre se cumple

Competencia ejemplificada: Seguir procedimientos de manera reflexiva.

Para poder usar esta fórmula simplificada, hay que estar seguros de que el tiempo se comenzó a medir “desde cero” y que, en el instante inicial, la velocidad era cero.

Por eso, al calcular la aceleración, siempre es mejor comenzar con la fórmula general y verificar si se cumplen las suposiciones para el uso de la fórmula simplificada.

La unidad de aceleración

La unidad de aceleración en el Sistema Internacional (SI) se obtiene de la fórmula que la define:

$$[a] = \frac{[\Delta v]}{[\Delta t]} = \frac{1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\text{ s}} = 1\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Un móvil tiene la aceleración 1 m/s² si cada segundo su velocidad aumenta (o disminuye) 1 m/s.

Problema resuelto

La aceleración de dos coches

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Si las velocidades de dos coches cambian como indica la **Tabla 6.3**, ¿cuáles son sus aceleraciones?

Solución: La aceleración del primer coche es igual a:

$$a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} = \frac{8\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 4\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\text{ s} - 0\text{ s}} = \frac{4\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\text{ s}} = 1\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La aceleración del segundo coche es igual a:

$$a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t_2} = \frac{8\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\text{ s} - 0\text{ s}} = \frac{8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\text{ s}} = 2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: La diferencia radica en que la aceleración del segundo coche es mayor que la aceleración del primer coche.

Mientras la velocidad del primer coche aumenta 1 m/s en cada segundo, el aumento de la velocidad del segundo coche es de 2 m/s en cada segundo.

La diferencia entre las aceleraciones de los dos coches, expresada numéricamente en el problema anterior, en la representación gráfica (**Figura 6.5**) se refleja en la "inclinación" de las rectas que representan cómo cambian las velocidades instantáneas de los coches con el tiempo. A la aceleración mayor le corresponde la recta de mayor "inclinación".

Problema resuelto

Encontrar las velocidades instantáneas que faltan

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En el instante inicial t_0 = 1 s la velocidad inicial de un coche es v_0 = 3 m/s y en el instante final t = 4 s, la velocidad final es v = 15 m/s.

Si la aceleración del coche es constante, ¿cuáles son las velocidades instantáneas en los instantes $t_1 = 2$ s y $t_2 = 3$ s?
Solución: Primero hay que encontrar la aceleración del coche. El cambio de la velocidad del coche es:

$$\Delta v = v - v_0 = 15\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 3\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El tiempo transcurrido o el tiempo que transcurre mientras ocurre ese cambio de velocidad es:

$$\Delta t = t - t_0 = 4\text{ s} - 1\text{ s} = 3\text{ s}$$

Aplicando la definición de la aceleración se tiene:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{3\text{ s}} = 4\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La aceleración del coche, supuesta constante en el intervalo considerado, es de 4 m/s^2. Esto significa que la velocidad del coche aumenta 4 m/s en cada segundo.

Si en el momento inicial $t_0 = 1$ s la velocidad fue $v_0 = 3$ m/s, después de un segundo, en el momento $t_1 = 2$ s, será $v_1 = 3$ m/s + 4 m/s = 7 m/s.

De la misma manera, si en el momento $t_1 = 2$ s, la velocidad es $v_1 = 7$ m/s, un segundo después, en el momento $t_2 = 3$ s, la velocidad será $v_2 = 7$ m/s + 4 m/s = 11 m/s.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Cuánto aumenta la velocidad cada medio segundo? ¿Cada dos segundos?

Problema por resolver

Representar el comportamiento de la velocidad con el transcurso del tiempo en forma tabular y gráfica

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, dominar la representación gráfica.

Usa los datos del ejemplo anterior para completar la tabla de abajo ("La velocidad en el tiempo") y dibuja la gráfica correspondiente en el plano "velocidad-tiempo" (**Figura 6.6**).

La velocidad en el tiempo.

Instante del tiempo	Velocidad
1 s	
2 s	
3 s	
4 s	

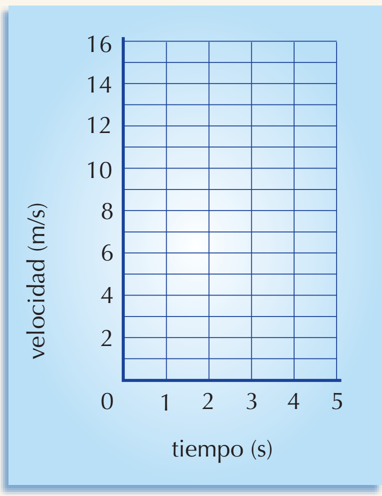


Figura 6.6. Comportamiento de la velocidad con el tiempo en el plano v-t.

Física y biología

La impresionante aceleración del guepardo

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

El guepardo (**Figura 6.7**), al perseguir a su presa, puede correr a una velocidad de 100 km/h. Pero aún más impresionante que esta gran velocidad, es su capacidad para acelerar.

Partiendo del reposo, en dos segundos un guepardo logra alcanzar la velocidad de 72 km/h.

Como la velocidad de 72 km/h es 20 m/s, su aceleración media es:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\text{ s}} = 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

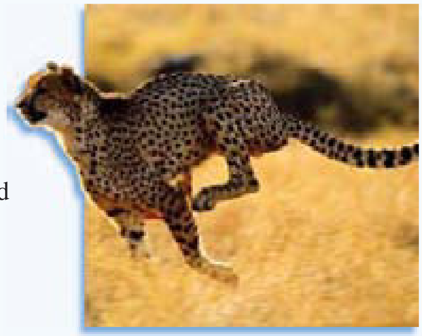


Figura 6.7. Guepardo que corre.

Como podrás ver en un próximo ejemplo, esa aceleración supera considerablemente a la aceleración que pueden desarrollar los coches comunes y corrientes.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Cuánto tiempo transcurre, desde el inicio del movimiento hasta el momento en que el guepardo alcanza una velocidad de 5 m/s? ¿Y una de 15 m/s?

Problema por resolver

La aceleración del balón de fútbol

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

En una patada futbolística, el pie del jugador está en contacto con el balón durante 0.04 s y éste sale disparado a una rapidez de 24 m/s (**Figura 6.8**). ¿Cuál es la aceleración media del balón durante la patada?

Figura 6.8. El balón sale disparado.

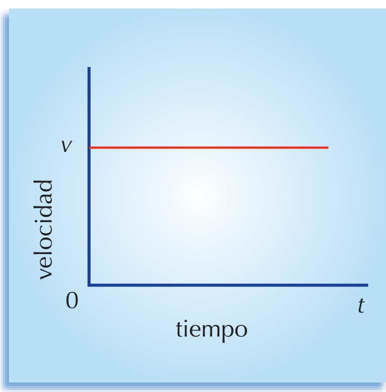


Figura 6.9. La velocidad no cambia en el movimiento uniforme.

6.2. Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

Si la velocidad cambia, ya no es posible calcular la distancia recorrida multiplicando la velocidad por el tiempo transcurrido. ¿Cómo, entonces, cambia la distancia recorrida con el tiempo en el caso del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado?

Veamos primero otra manera de representar la distancia recorrida. Sabemos que, en el caso del movimiento de velocidad constante, la distancia recorrida se obtiene multiplicando la velocidad por el intervalo de tiempo o por el tiempo (si nuestro reloj comienza a correr en el instante $t_0 = 0$):

$$d = v \cdot t$$

Esta fórmula se puede "ver" en el plano *v-t*. Si la velocidad es constante, su representación en el plano *v-t* es una línea recta paralela al eje *t* (**Figura 6.9**)

La distancia recorrida corresponde al área sombreada bajo esa línea que representa cómo la velocidad cambia con el tiempo (**Figura 6.10**).

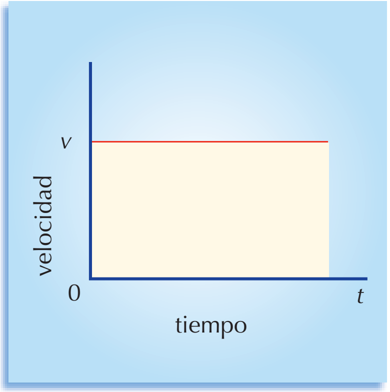


Figura 6.10. La distancia recorrida como el área en el plano v-t.

La distancia recorrida en el movimiento uniformemente acelerado

La interpretación de la distancia recorrida como área en el plano v-t nos permite encontrar la fórmula para la distancia recorrida en casos más complicados. ¿Cuál es el procedimiento?

Si nos interesa la distancia recorrida en algún tipo de movimiento, tenemos que dibujar primero la línea que representa el comportamiento de la velocidad con respecto al tiempo en ese movimiento y luego calcular el área bajo esa línea. El resultado será la distancia recorrida.

¿Cómo encontrar la distancia recorrida en el movimiento uniformemente acelerado?

En este caso la aceleración es constante. Supongamos que la velocidad inicial es 0 y que el momento inicial también es 0 (el cronómetro se activa en el momento en que comienza el movimiento). La velocidad cambia uniformemente con el tiempo y se representa en el plano v-t mediante una recta que forma un ángulo con el eje t (**Figura 6.11**).

Como hemos dicho, la distancia recorrida en un intervalo de tiempo es igual al área de la figura sombreada (**Figura 6.12**).

En este caso particular, se trata de un triángulo con un ángulo de 90°. La "base" de ese triángulo es igual al intervalo de tiempo t (expresada en segundos) y su "altura" es igual a la velocidad instantánea v en el instante t (expresada en m/s). La velocidad en el instante t es igual a la aceleración multiplicada por el tiempo transcurrido hasta ese instante:

$$v = a \cdot t$$

El área del triángulo es igual a la mitad del producto de la base y la altura. Como la "base" es igual a t y la "altura" es igual a at, el área equivalente a la distancia recorrida d es:

$$d = \frac{1}{2} \cdot t \cdot at = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

En el movimiento uniformemente acelerado con velocidad inicial igual a cero, la distancia recorrida es directamente proporcional a la aceleración y al cuadrado del tiempo transcurrido.

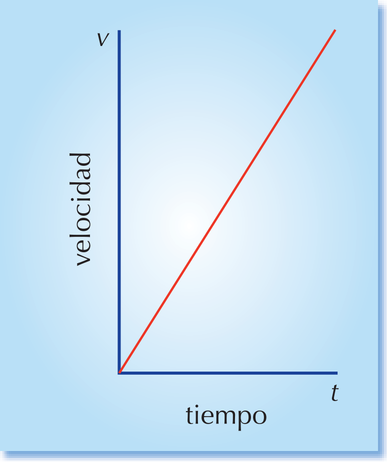


Figura 6.11. El comportamiento de la velocidad con el tiempo en el movimiento de aceleración constante.

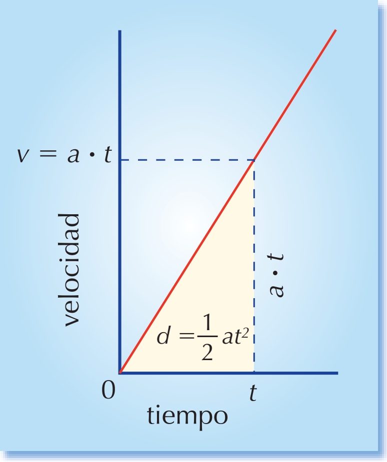


Figura 6.12. Representación gráfica de la distancia recorrida en el movimiento uniformemente acelerado.

Problema resuelto

El movimiento acelerado de un Renault Clio

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 6.13. Renault Clio 1.6 16V 2000.

Según los datos de prueba, un *Renault Clio 1.6 16V 2000* (**Figura 6.13**) tarda 12.3 s en alcanzar una velocidad de 100 km/h partiendo del reposo.

1. Suponiendo que el movimiento del coche es uniformemente acelerado, ¿cuál es su aceleración?
2. ¿Qué distancia recorre desde el instante inicial hasta que alcanza la velocidad de 100 km/h?
3. ¿Cómo cambian la velocidad instantánea y la distancia recorrida durante los primeros 10 segundos? Representar los datos en forma tabular y en forma gráfica.

Solución:

1. Como el coche parte del reposo, el cambio de velocidad es igual a la velocidad alcanzada, es decir, Δv = 100 km/h − 0 km/h = 27.8 m/s. El tiempo transcurrido es Δt = 12.3 s − 0 s = 12.3 s. Por eso, la aceleración del coche es:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{27.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{12.3\,\text{s}} = 2.26\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

2. Suponiendo que el movimiento del coche es un movimiento uniformemente acelerado (de velocidad inicial nula), la distancia recorrida es:

$$d = \frac{1}{2}at^2 = 0.5 \bullet 2.26\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \bullet (12.3\,\text{s})^2 = 1.13\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \bullet 151.3\,\text{s}^2 = 171\,\text{m}$$

3. Veamos primero cómo cambiaba la velocidad instantánea del coche.

Por tener la aceleración constante de 2.26 m/s^2, la velocidad del coche aumentaba cada segundo 2.26 m/s. Si en el instante t = 0 s la velocidad instantánea era 0 m/s, en el instante t = 1 s era 2.26 m/s, en el instante t = 2 s era 4.52 m/s (2.26 m/s + 2.26 m/s = 4.52 m/s), en el instante t = 3 s era 6.78 m/s (4.52 m/s + 2.26 m/s), etcétera.

Los valores de la velocidad instantánea en los primeros 10 segundos están dados en la siguiente tabla:

Instante de tiempo (s)	Velocidad instantánea (m/s)
0	0
1	2.26
2	4.52
3	6.78
4	9.04
5	11.3
6	13.56
7	15.82
8	18.08
9	20.34
10	22.60

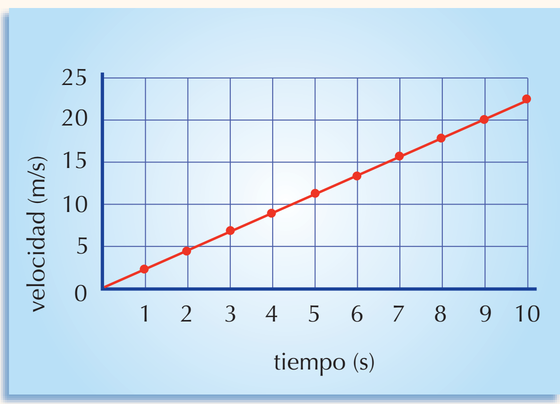


Figura 6.14. El cambio de la velocidad instantánea de un Renault Clio en los primeros 10 segundos.

Su representación gráfica en el plano v-t está dada en la **Figura 6.14**.

Como la distancia recorrida se calcula con respecto a la posición inicial, la distancia recorrida hasta el instante t = 0 s es igual a cero. En el primer segundo (t = 1 s), la distancia recorrida es:

$$\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.26\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (1\,\text{s})^2 = 1.13\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\,\text{s}^2 = 1.13\,\text{m}$$

En los primeros dos segundos (t = 2 s), la distancia recorrida es:

$$\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.26\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2\,\text{s})^2 = 1.13\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4\,\text{s}^2 = 4.52\,\text{m}$$

En los primeros tres segundos (t = 3 s), la distancia recorrida es:

$$\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.26\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (3\,\text{s})^2 = 1.13\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 9\,\text{s}^2 = 10.17\,\text{m}$$

Los valores de la distancia recorrida en los primeros 10 segundos se presentan en la siguiente tabla:

Instante de tiempo (s)	Distancia recorrida (m)
0	0
1	1.13
2	4.52
3	10.17
4	18.08
5	28.25
6	40.68
7	55.37
8	72.32
9	91.53
10	113.00

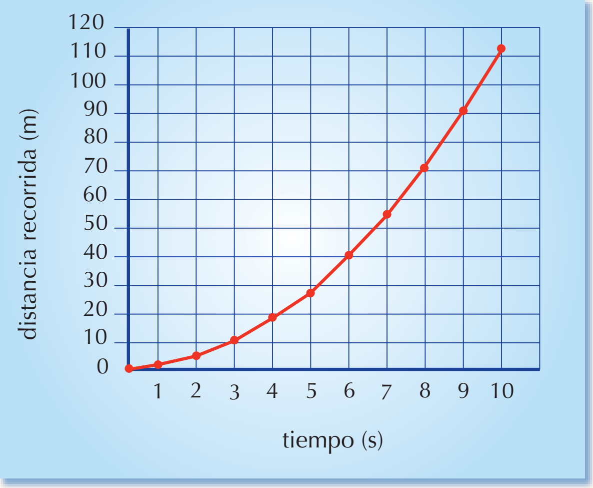


Figura 6.15. La distancia recorrida por un Renault Clio en los primeros 10 segundos.

La representación gráfica de esos valores en el plano posición-tiempo aparece en la **Figura 6.15**.

Dar sentido al resultado: Es importante que notes que la línea que represente el comportamiento de la distancia recorrida con el tiempo no es una línea recta, sino una línea curva. Esto se debe al hecho de que la distancia recorrida no es proporcional al tiempo, sino al cuadrado del tiempo. La trayectoria del coche sí es una línea recta.

Problema por resolver

El tiempo que tarda un Porsche 911 en alcanzar una velocidad de 100 km/h

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

El coche deportivo *Porsche 911 Turbo* (**Figura 6.16**) pertenece a la clase de coches caracterizados por una aceleración muy alta. Partiendo del reposo, su velocidad puede, en promedio, aumentar 7.31 m/s cada segundo, hasta alcanzar el valor de 27.8 m/s, equivalente a 100 km/h.

Figura 6.16. Porsche 911 Turbo.

a) ¿Cuánto tiempo necesita un Porsche 911 Turbo para alcanzar la velocidad de 100 km/h, partiendo del reposo?
b) Suponiendo que su aceleración es constante, ¿qué distancia recorre en este movimiento acelerado?
c) ¿Puedes decir, sin hacer ningún cálculo, qué parte de la distancia calculada en *b*) ha recorrido el coche hasta el momento en que su velocidad era de 50 km/h?

El movimiento uniformemente acelerado cuando la velocidad inicial no es cero

En la mayor parte de las situaciones de la vida real, el movimiento acelerado no comienza cuando el móvil está en reposo, es decir, cuando su velocidad inicial es cero. Por ejemplo, un coche se mueve en la carretera a una velocidad de 90 km/h y alcanza a un autobús que viaja a la misma velocidad. Si el conductor quiere rebasar al autobús, tiene que aumentar su velocidad. Presiona el acelerador y comienza un movimiento acelerado. Su velocidad inicial en ese movimiento acelerado no era cero, sino 90 km/h.

Si el móvil tiene velocidad inicial, entonces no se puede usar la fórmula simplificada para encontrar su aceleración:

$$a = \frac{v}{t}$$

Para tales situaciones, la aceleración media se calcula según la definición general de la aceleración como el cociente entre el cambio de la velocidad y el tiempo transcurrido. La única simplificación que se puede hacer es suponer que el tiempo se comienza medir en el instante t_0, lo que implica que $t_0 = 0$.

En tal caso se tiene:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{v - v_0}{t - 0} = \frac{v - v_0}{t}$$

Problema resuelto

La aceleración de un Toyota Corolla

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

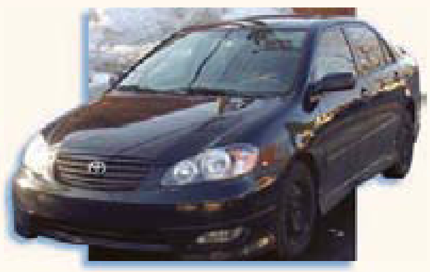


Figura 6.17. Toyota Corolla XRS TM.

En el instante $t_0 = 0$ s, un coche Toyota Corolla XRS TM (**Figura 6.17**) se mueve a velocidad $v_0 = 80$ km/h. Si en el instante $t = 7.99$ s logra alcanzar la velocidad $v = 120$ km/h, ¿cuál fue su aceleración media en el intervalo considerado?

Solución: El primer paso será expresar la unidad de las velocidades, dadas en km/h, en m/s. Como $1\ \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1{,}000\ \text{m}}{3{,}600\ \text{s}} = \frac{1\ \text{m}}{3.6\ \text{s}}$, los resultados son

$$v_0 = 22.22\ \text{m/s y } v = 33.33\ \text{m/s}$$

Entonces, la aceleración media es:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{33.33\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 22.22\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{7.99\,\text{s}} = \frac{11.11\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{7.99\ \text{s}} = 1.39\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: En promedio, cada segundo la velocidad del coche aumentaba 1.39 m/s o 5 km/h.

Competencia practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Puedes determinar, sin usar la calculadora o lápiz y papel, en qué momento, aproximadamente, la velocidad del coche era de 100 km/h?

Problema por resolver

El tiempo necesario para duplicar la velocidad

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un Toyota Corolla XRS TM se mueve a una velocidad de 17 m/s y puede acelerar, en promedio, 1.5 m/s^2.

a) ¿Cuánto tiempo necesita para duplicar su velocidad?
b) ¿Puedes decir, sin usar la calculadora y sin hacer ningún cálculo en el papel, cuánto tiempo necesita el coche para que su velocidad aumente de 17 m/s a 23 m/s?

Problema por resolver

¿Es posible triplicar la velocidad?

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar un resultado.

Un coche puede desarrollar una aceleración máxima de 2.2 m/s^2 y puede mantenerla a lo largo de 13 segundos. Cuando el velocímetro indica el valor 15 m/s, el conductor dice a su copiloto que intentará triplicar la velocidad. ¿Es posible que el conductor logre realizar su propósito?

Velocidad en términos de velocidad inicial, aceleración y tiempo

Si se conocen la velocidad inicial y la aceleración media, es posible predecir cuál será la velocidad en cualquier instante posterior. Para eso es necesario despejar la velocidad final v de la fórmula para la aceleración media.

Si multiplicamos ambos lados de la ecuación por t, el resultado es:

$$at = v - v_0$$

Intercambiando los lados, se obtiene:

$$v - v_0 = at$$

Pasando el término v_0 del lado izquierdo al lado derecho, la expresión para la velocidad final es:

$$v = v_0 + at$$

Problema por resolver

La velocidad de un Volkswagen Bora

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un coche Volkswagen Bora (**Figura 6.18**) se mueve a una velocidad de 6 m/s.

a) Si durante 19 s el conductor presiona más el acelerador, logrando una aceleración media de 1.5 m/s^2, ¿cuál será al final la velocidad del coche?
b) ¿Puedes decir, sin usar la calculadora y sin hacer ningún cálculo con papel y lápiz, qué velocidad tendrá el coche después de 4 segundos?

Figura 6.18. Volkswagen Bora.

Distancia recorrida en un movimiento acelerado con velocidad inicial

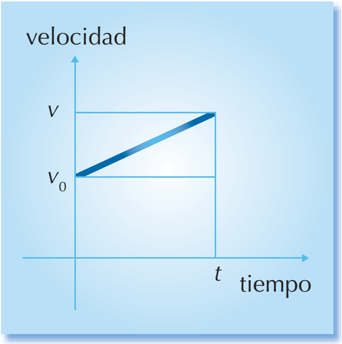


Figura 6.19. La gráfica que representa el comportamiento de la velocidad con el tiempo.

Como ya se ha visto, la distancia recorrida se puede obtener calculando el área bajo la línea que representa a la velocidad en el plano "velocidad-tiempo" (**Figura 6.19**).

El área que se debe calcular es el área de la figura que consiste en un rectángulo, de base t y altura v_0, y un triángulo rectángulo, de base t y altura v-v_0.

El área del rectángulo es:

$$d_1 = v_0 t$$

y representa la distancia recorrida por un cuerpo que se mueve a velocidad v_0 durante t segundos.

El área del triángulo es:

$$d_2 = \frac{1}{2}(v - v_0) \cdot t$$

Insertando en esta ecuación la igualdad $v - v_0 = at$, se obtiene:

$$d_2 = \frac{1}{2}(at) \cdot t = \frac{1}{2}at^2$$

Esta distancia es la que recorre un cuerpo que parte del reposo y se mueve con aceleración a durante t segundos.

Sumando ambas áreas, la distancia recorrida que se busca es:

$$d = d_1 + d_2 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

El primer término cuantifica la distancia que recorrió el cuerpo moviéndose durante el tiempo t a velocidad constante v_0. El segundo término cuantifica el aumento de la distancia recorrida que se debe al crecimiento de la velocidad.

Problema resuelto

Distancia recorrido por un Mini Cooper

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un Mini Cooper S Clubman TA (**Figura 6.20**) se mueve a velocidad v_0 = 17 m/s (aproximadamente 60 km/h). Para alcanzar una velocidad v = 34 m/s (aproximadamente 120 km/h) necesita un tiempo t = 7 s.

Figura 6.20. Mini Cooper S Clubman TA.

a) ¿Cuál es su aceleración media?

b) Suponiendo que la aceleración del coche es constante, ¿cuál sería la distancia recorrida durante ese movimiento acelerado?

Solución:

a) La aceleración media es:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{34\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 17\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{7\text{ s}} = 2.43\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

b) La distancia recorrida durante el movimiento acelerado es:

$$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = 17\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 7\text{ s} + 0.5 \cdot 2.43\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (7\text{ s})^2 = 119\text{ m} + 59.54\text{ m} = 178.54\text{ m}$$

Dar sentido al resultado: Cuando la velocidad inicial se duplica ($v = 2v_0$), el aumento de la distancia recorrida debido al aumento en la velocidad (59.54 m) es igual a la mitad del camino que se hubiera recorrido a la velocidad constante de 17 m/s (119 m).

Para que este aumento sea igual al camino recorrido a velocidad constante, la velocidad inicial debería triplicarse. Verifica si se cumple esta afirmación en el siguiente problema por resolver.

Problema por resolver

Camino recorrido al triplicar la velocidad inicial

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un coche Mini Cooper S Clubman TA triplica en 9 s el valor de su velocidad, pasando de 11 m/s a 33 m/s (de 40 km/h a 120 km/h, aproximadamente).

a) ¿Cuál es su aceleración media?
b) Suponiendo que la aceleración es constante, ¿cuál es la distancia recorrida durante el movimiento acelerado?
c) Verifica si el valor del término $\left(\frac{1}{2}at^2\right)$ es igual al valor del término (v_0t).

Problema resuelto

Un descenso increíble en los Andes

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar resultados.

En septiembre de 2007, el austriaco Markus Stoeckl, de 33 años, rompió el récord de velocidad en bicicleta al bajar La Parva, en los Andes chilenos, a una velocidad de 210.4 km/h. De esta manera superó en 23 km/h su propio récord, impuesto 8 años antes, al recorrer el trecho de 2,000 metros con una inclinación de 45 grados (**Figura 6.21**).

El frío intenso hizo que Markus tuviera que aguantar la respiración durante los 40 segundos que duró el descenso para no empañar el visor del casco.

¿Cuál de los modelos matemáticos del cambio de la velocidad y de la distancia recorrida podría describir el movimiento de Markus en el descenso?

Solución: Los modelos matemáticos que hemos usado hasta ahora para describir los movimientos se resumen en la siguiente tabla:

Figura 6.21. El descenso de Markus en los Andes.

Movimiento	Velocidad	Distancia recorrida
1. Velocidad constante	v = constante	$d = vt$
2. Aceleración constante (sin velocidad inicial)	$v = at$	$d = \frac{1}{2}at^2$
3. Aceleración constante (con velocidad inicial)	$v = v_0 + at$	$d = v_0t + \frac{1}{2}at^2$

Los datos disponibles sobre el descenso de Markus son:

- Camino recorrido d = 2,000 m;
- Tiempo de descenso t = 40 s;
- Velocidad alcanzada por Markus v_M = 210.4 km/h = 58.444 m/s.

Veamos si los modelos mencionados se puedan acoplar a los datos disponibles.

1. Si Markus hubiera tenido todo el tiempo la velocidad v_M (v_M = constante), el tiempo de descenso sería:

$$t_1 = \frac{d}{v_M} = \frac{2{,}000 \text{ m}}{58.444 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 34.22 \text{ s}$$

Como el tiempo de descenso es 40 s, el primer modelo matemático no puede generar los datos disponibles sobre el movimiento y, en consecuencia, la bajada de Markus no pudo ser un movimiento a velocidad constante.

2. Supongamos ahora que el movimiento de Markus fue un movimiento acelerado sin velocidad inicial. En tal caso, la aceleración promedio sería:

$$a = \frac{v_M}{t} = \frac{58.444 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40 \text{ s}} = 1.461 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

El camino recorrido, con ese valor de la aceleración, debería haber sido:

$$d_2 = \frac{1}{2}at^2 = 0.5 \cdot 1.461 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (40 \text{ s})^2 = 0.7305 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1{,}600 \text{ s}^2 = 1{,}168.8 \text{ m}$$

Como el camino recorrido era de 2,000 m, Markus no pudo alcanzar su velocidad al final del descenso y, por eso, su movimiento no pudo haber sido un movimiento de aceleración constante sin velocidad inicial.

3. Como Markus partió del reposo, es decir, no fue "disparado" junto con la bicicleta a una velocidad inicial, tampoco el tercer modelo de (movimiento acelerado con velocidad inicial) es aplicable.

4. ¿Cuál pudo haber sido el movimiento de Markus en el descenso?
Una primera aproximación podría ser:

a) En la primera parte su movimiento era acelerado (sin velocidad inicial) hasta cuando alcanzó la velocidad v_M;
b) En la segunda parte se movía a esa velocidad v_M hasta terminar la bajada.

Si el tiempo del movimiento acelerado es t_a, la distancia recorrida se puede expresar como:

$$d = \frac{1}{2}at_a^2 + v_M(t - t_a)$$

El primer término describe el movimiento acelerado sin velocidad inicial y el segundo término es la descripción de movimiento a velocidad constante.

Insertando la fórmula para la aceleración $a = \frac{v_M}{t_a}$ en la expresión anterior, se obtiene:

$$d = \frac{1}{2}\frac{v_M}{t_a}t_a^2 + v_M(t - t_a) = \frac{1}{2}v_M t_a + v_M t - v_M t_a = v_M t - \frac{1}{2}v_M t_a$$

Al reorganizar los términos, tenemos:

$$\frac{1}{2}v_M t_a = v_M t - d$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación por 2 y dividiendo ambos entre v_M, finalmente se obtienen la expresión y el valor para el tiempo t_a (la duración del movimiento acelerado):

$$t_a = 2t - 2\frac{d}{v_M} = 2 \cdot 40 \text{ s} - 2\frac{2{,}000 \text{ m}}{58.444 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 80 \text{ s} - 2 \cdot 34.22 \text{ s} = 80 \text{ s} - 68.44 \text{ s} = 11.56 \text{ s}$$

La aceleración promedio que corresponde a ese tiempo es:

$$a = \frac{v_M}{t_a} = \frac{58.444\ \frac{m}{s}}{11.56\ s} = 5.056\ \frac{m}{s^2}$$

y el camino recorrido correspondiente es:

$$d_a = \frac{1}{2}at_a^2 = 0.5 \cdot 5.056\ \frac{m}{s^2} \cdot (11.56\ s)^2 = 2.528\ \frac{m}{s^2} \cdot 133.634\ s^2 = 337.827\ m$$

En el resto de la bajada, en esta aproximación, se supone que el movimiento de Markus era un movimiento a velocidad constante (v_M) y por eso el camino recorrido d_c debía ser:

$$d_c = v_M(t - t_a) = 58.444\ \frac{m}{s} \cdot (40\ s - 11.56\ s) = 58.444\ \frac{m}{s} \cdot 28.44\ s = 1{,}662.147\ m$$

El camino recorrido total, en esta aproximación, es:

$$d = d_a + d_c = 337.827\ m + 1{,}662.147\ m = 1{,}999.974\ m$$

Dar sentido al resultado: Como el resultado generado teóricamente (1,999.974 m) difiere del resultado experimental (2,000 m) por una diferencia despreciable (0.026 m), se puede afirmar que la supuesta modelación matemática es compatible con los datos disponibles.

¿Quiere decir eso que el verdadero movimiento de Markus era exactamente como se supuso?

No, pero seguramente no pudo haber sido muy diferente de lo supuesto: un movimiento acelerado seguido por un movimiento a velocidad constante.

Para generar modelos matemáticos más acertados, se necesitan más datos sobre el movimiento de Markus en su increíble descenso en los Andes chilenos. Es muy probable que la aceleración no fuera constante, sino que tal vez, al principio, fue igual a la aceleración que corresponde al movimiento de los cuerpos que se deslizan sobre una pendiente de 45° (a_0= 6.9 m/s²) y que, después, disminuyó hasta cero.

Distancia recorrida en un movimiento acelerado expresada como el producto de una velocidad y el tiempo

En el movimiento uniformemente acelerado la velocidad cambia de forma constante y por eso no es posible expresar la distancia recorrida como v_0t ni como vt. En el primer caso, la distancia calculada tendría un valor inferior al valor correcto y en el segundo caso, superior al valor correcto.

¿Existe alguna velocidad v_m que multiplicada por t dé el valor correcto de la distancia recorrida?

Según la descripción, la cantidad v_m debe satisfacer la relación:

$$v_m t = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = (v_0 + \frac{1}{2}at) \cdot t$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación entre t, se obtiene:

$$v_m = v_0 + \frac{1}{2}at = \frac{2v_0 + at}{2}$$

Como $at = v - v_0$, la expresión para la velocidad v_m se vuelve:

$$v_m = \frac{2\,v_0 + v - v_0}{2} = \frac{v_0 + v}{2}$$

La velocidad v_m se llama ***velocidad media***.

Conociendo la velocidad inicial, la velocidad final y el tiempo transcurrido, es posible calcular la distancia recorrida sin necesidad de conocer explícitamente el valor de la aceleración.

La utilidad del concepto de ***velocidad media*** se verá en el siguiente problema.

Problema resuelto

La carrera después del semáforo

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, valorar una preconcepción común.

Figura 6.22. El comienzo de la carrera.

Un automóvil está detenido en un semáforo (**Figura 6.22**). Cuando se pone la luz verde, el automóvil arranca con una aceleración constante de 2 m/s^2. En el momento de arrancar es adelantado por un camión que se desplaza a una velocidad constante de 54 km/h (15 m/s).

a) ¿Qué velocidad lleva el coche en el momento en que alcanza al camión?

b) ¿Cuánto tiempo necesitó para alcanzarlo?

c) ¿Qué distancia tuvo que recorrer hasta alcanzarlo?

d) ¿En qué momento t_1 el coche logró tener una velocidad igual a la velocidad del camión?

e) ¿Qué distancia ha recorrido hasta este momento t_1 el camión? ¿Y el coche?

Solución:

a) Para alcanzar al camión, el coche tuvo que recorrer la misma distancia en el mismo tiempo. Entonces su velocidad media tiene que ser igual a la velocidad del camión:

$$v_m = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v}{2} = v_{cam}$$

De aquí se obtiene:

$$v = 2\,v_{cam} = 2 \cdot 15\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 30\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) El tiempo t_a necesario para alcanzarlo es:

$$t_a = \frac{v}{a} = \frac{30\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 15\text{ s}$$

c) La distancia d que tuvo que recorrer el coche hasta alcanzar al camión es:

$$d = \frac{1}{2}a \cdot t^2 = \frac{2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (15\text{ s})^2}{2} = \frac{2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 225\text{ s}^2}{2} = 225\text{ m}$$

d) El coche alcanzó una velocidad igual a la del camión en el momento t_1:

$$t_1 = \frac{v_{cam}}{a} = \frac{15\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 7.5\text{ s}$$

e) Hasta ese momento, el camión había recorrido la distancia:

$$d_{1\,cam} = v_{cam} \cdot t_1 = 15\,\frac{m}{s} \cdot 7.5\,s = 112.5\,m$$

El coche recorrió la distancia:

$$d_{1\,coche} = \frac{1}{2} a \cdot t_1^2 = \frac{2\,\frac{m}{s^2} \cdot (7.5\,s)^2}{2} = \frac{2\,\frac{m}{s^2} \cdot 56.25\,s^2}{2} = 56.26\,m$$

Dar sentido a los resultados: Muchas personas piensan que el coche logra tener la misma velocidad en el momento en que está al lado del camión. Si esto fuera cierto, entonces en todos los instantes anteriores su velocidad tendría que ser menor. En tal caso el coche jamás podría alcanzar al camión porque mientras la velocidad del coche sea menor que la velocidad del camión, la distancia entre los vehículos estará aumentando.

En el momento en que el coche alcanza la velocidad del camión (t_1 = 7.5 s), la distancia entre ellos tiene el máximo valor. Después de ese momento, cuando la velocidad del coche comienza a ser más grande que la velocidad del camión, la distancia entre los vehículos comienza a disminuir. El coche, en el momento de alcanzar al camión (t = 15 s), tiene una velocidad que es ***dos veces mayor*** que la velocidad del camión.

El movimiento acelerado cuando la velocidad decrece

En diversas situaciones, cuando se arranca o cuando en la carretera se intenta rebasar a otro coche, el conductor tiene que aumentar la velocidad del vehículo. Sin embargo, en otras situaciones el conductor tiene que disminuir parcial o completamente la velocidad de su vehículo.

En esas situaciones, la velocidad inicial v_0 (en el momento t_0 = 0 s) es mayor que la velocidad final v ($v < v_0$) y, en consecuencia, el cambio de la velocidad ($v - v_0$) es negativo: $v - v_0 < 0$.

Como $t > 0$, la aceleración también tiene valor negativo:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \leq 0$$

La pregunta voladora

¿En cuáles situaciones el conductor está obligado a disminuir la velocidad del coche?

Problema resuelto

El valor de la aceleración cuando disminuye la velocidad

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un coche, al frenar durante un tiempo t = 5 s, disminuye su velocidad de v_0 = 30 m/s a v = 10 m/s. ¿Cuál es el valor de la aceleración?

Solución: El valor de la aceleración, según la definición, es:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{10\,\frac{m}{s} - 30\,\frac{m}{s}}{5\,s} = \frac{-20\,\frac{m}{s}}{5\,s} = -4\,\frac{m}{s^2}$$

Dar sentido al resultado: El signo negativo de la aceleración significa que cada segundo la velocidad disminuye 4 m/s.

Cálculo mental: ¿Cuál era el valor de la velocidad del coche después de 1 s de frenado? ¿Y después de 3 s de frenado?

Como ya se ha visto, si se conocen los valores de la velocidad inicial v_0, de la aceleración a y del tiempo t, es posible determinar la velocidad final v y la distancia recorrida d:

$$v = v_0 + at$$

$$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

Estas fórmulas siguen siendo válidas también cuando la velocidad disminuye con el tiempo.

Problema resuelto

La distancia recorrida por una bici con un conductor cansado

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 6.23. La bicicleta con un conductor cansado.

Para descansar un poco, el conductor de una bicicleta deja de mover los pedales (**Figura 6.23**). Como consecuencia de eso y, además, de una pendiente desfavorable, la velocidad de la bicicleta, que era de 20 m/s, comienza a disminuir a una tasa de 0.5 m/s^2.

Después de 8 s, ¿cuáles serán *a*) la velocidad de la bicicleta y *b*) la distancia recorrida por la bicicleta?

Solución:

a) La velocidad de la bicicleta será:

$$v = v_0 + at = 20\,\frac{\text{m}}{\text{s}} + \left(-0.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 8\,\text{s} = 20\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 4\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 16\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) La distancia recorrida será:

$$d = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = 20\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8\,\text{s} + 0.5 \cdot \left(-0.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot (8\,\text{s})^2 = 160\,\text{m} - 0.25\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 64\,\text{s}^2 = 144\,\text{m}$$

Dar sentido al resultado: La distancia recorrida, debido a la disminución de la velocidad, es menor que la distancia de 160 m que recorrería la bicicleta en 8 segundos si el conductor no fuera descansando.

Vía alternativa hacia la solución: El camino recorrido se puede encontrar también usando el concepto de *velocidad media*:

$$d = v_m \cdot t = \frac{v + v_0}{2} \cdot t = \frac{16\,\frac{\text{m}}{\text{s}} + 20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} \cdot 8\,\text{s} = \frac{36\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} \cdot 8\,\text{s} = 18\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8\,\text{s} = 144\,\text{m}$$

Tiempo y distancia de detención

Cuando el valor de la velocidad decrece con el tiempo, el valor de la aceleración es negativo ($a < 0$). Este hecho se puede integrar explícitamente en las ecuaciones para la velocidad y la distancia recorrida:

$$v = v_0 - at$$

$$d = v_0 t - \frac{1}{2}at^2$$

Si se hace esto, se tiene que tomar el valor absoluto de la "aceleración", lo que implica su redefinición:

$$a = \frac{v_0 - v}{t}$$

Esta manera de escribir las ecuaciones se vuelve práctica en los problemas que consideran el tiempo y la distancia de detención.

Si la velocidad de un móvil decrece, entonces llega el momento en que la velocidad se vuelve cero (el móvil se detiene). Esto ocurre cuando pasa el tiempo t_d, que satisface la ecuación:

$$0 = v_0 - at_d$$

De esa ecuación se tiene:

$$t_d = \frac{v_0}{a}$$

El tiempo t_d, que tiene que pasar para que se detenga un móvil que se movía a una velocidad v_0, se llama el ***tiempo de detención***.

La pregunta voladora

¿Puedes demostrar que la fórmula para el tiempo de detención sería $t_d = -\frac{v_0}{a}$, si la aceleración es negativa y se mantiene su definición común?

Problema por resolver

El tiempo de detención

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un automóvil se mueve a una velocidad de 20 m/s.

a) Si reduce su velocidad a razón de 4 m/s cada segundo, ¿cuál será el tiempo de detención?

b) Si la reducción de la velocidad fuera de 2 m/s por segundo, ¿cuál sería el tiempo de detención?

Otra cantidad física importante en las situaciones en que la velocidad de un móvil disminuye es la ***distancia de detención***.

Definición

La **distancia de detención** es la distancia que recorre un móvil desde el momento en que la velocidad comienza a disminuir hasta el momento en que se detiene.

Para encontrar la fórmula para la ***distancia de detención***, hay que insertar la expresión para el tiempo de detención en la fórmula para la distancia recorrida:

$$d_d = v_0 t_d - \frac{1}{2}at_d^2;$$

$$d_d = v_0 \cdot \frac{v_0}{a} - \frac{1}{2}a \cdot \frac{v_0^2}{a^2};$$

$$d_d = \frac{v_0^2}{a} - \frac{1}{2}\frac{v_0^2}{a};$$

$$d_d = \frac{v_0^2}{2a}$$

La pregunta voladora

¿Puedes demostrar que la fórmula para la **distancia de detención** es $d_d = -\frac{v_0^2}{2a}$, si la aceleración es negativa y se mantiene su definición común?

La pregunta voladora

Para mantener **el mismo valor de la distancia de detención al aumentar la velocidad inicial dos veces**, ¿cuántas veces debería aumentar la aceleración?

La distancia de detención es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad inicial e inversamente proporcional a la aceleración (la tasa de reducción de la velocidad). Si la velocidad inicial aumenta **dos veces** y la aceleración se mantiene igual, la distancia de detención será **cuatro veces** mayor. Si la velocidad inicial disminuye **tres veces** y la aceleración se mantiene igual, la distancia de detención sería **nueve veces** menor.

La distancia de detención es muy importante en relación con el tráfico vehicular y el aterrizaje de aviones y naves espaciales. En las carreteras y autopistas, cuando hay que detenerse intempestivamente por alguna emergencia, el valor de la distancia de detención de los vehículos determina la vida o la muerte de las personas que viajan en ellos.

La distancia de detención en la terminología de los transportes, por razones obvias, se llama ***distancia de frenado***.

Física en la vida cotidiana

Reducción de la distancia de frenado

Competencia ejemplificada: Conocer la relación entre la ciencia y la tecnología.

Los conductores de automóviles tienen la responsabilidad de manejar de tal manera que la distancia con respecto al vehículo que está delante sea considerablemente mayor que la distancia de frenado. Así, el conductor podrá evitar una colisión cuando, por alguna razón, el vehículo que va delante reduzca repentinamente su velocidad o se detenga.

En el caso de los aviones y las naves espaciales, las pistas de aterrizaje deben tener una longitud que sea mayor que la distancia de frenado. Si se pretende aterrizar a una velocidad mayor y no es posible mejorar los frenos y las llantas, hay que buscar otras maneras de reducir la distancia de frenado.

Figura 6.24. El paracaídas reduce la distancia de frenado.

Para ese fin, la nave espacial Endeavour (**Figura 6.24**) usa un paracaídas trasero cuyo diámetro es de 49 m.

El resultado es impresionante: con el paracaídas, que se abre en el momento del aterrizaje, la distancia de frenado se reduce de 600 m a solamente 300 m.

La misma técnica se usa para reducir la distancia de frenado de los aviones caza cuando aterrizan en un portaaviones.

Como ya se ha dicho, la calidad de los frenos y las llantas de un coche se evalúa según los valores que tiene la distancia de frenado necesaria para que se detenga el automóvil. La prueba estándar se realiza cuando el automóvil viaja a 100 km/h. Los rangos de la distancia de frenado estándar se presentan en la siguiente tabla:

Distancia de frenado estándar	Calidad de frenos y llantas
30 m a 40 m	Excelente
40 m a 50 m	Regular
50 m a 60 m	Insuficiente

Problema resuelto

El frenado de un Renault Laguna

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Cuando viaja a 100 km/h, un Renault Laguna (**Figura 6.25**) emplea 40 metros en detenerse.

a) ¿Cuál es la calidad de los frenos y las llantas del Renault Laguna?
b) ¿Cuál es, aproximadamente, el valor promedio de la aceleración?
c) ¿Cuál es, aproximadamente, el tiempo de detención?

Figura 6.25. Renault Laguna.

Solución:

a) La calidad de los frenos y las llantas, según la tabla anterior, está entre excelente y regular. Para los optimistas, la calidad es excelente y para los pesimistas es regular.

b) El valor de la aceleración promedio es:

$$a = \frac{v_0^2}{2d_d} = \frac{\left(27.78\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 40\text{ m}} = \frac{771.73\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{80\text{ m}} = 9.65\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) El tiempo de detención es:

$$t_d = \frac{v_0}{a} = \frac{27.78\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.65\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2.88\text{ s}$$

Dar sentido al resultado: El automóvil necesita casi 3 segundos para detenerse si viaja a 100 km/h (27.78 m/s) y recorre 40 m antes de detenerse.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si un Renault Laguna pudiera viajar a 200 km/h y tener la misma eficacia de frenos y llantas en el frenado, ¿cuáles serían aproximadamente la distancia de frenado y el tiempo de detención?

En los manuales de manejo de coches se menciona una regla para determinar la "***distancia segura***" que el conductor debe mantener para evitar la colisión con el automóvil que viaja delante. Se sugiere que la distancia debe ser mayor que la distancia que recorre el automóvil en 3 segundos a la velocidad a la que se conduce.

La pregunta voladora

¿De qué manera podrías determinar si el coche que viaje delante de ti en la carretera está a la "distancia segura de 3 segundos"?

¿Por qué es "demasiado grande" la distancia segura?

En las autopistas la velocidad "normal" es de alrededor de 100 km/h (27.78 m/s). A esta velocidad, la distancia segura es mayor que 83 m. La pregunta "natural" de muchas personas es: ¿por qué un conductor de un Renault Laguna, cuya distancia de frenado estándar es de 40 m, debe respetar esa regla?

Antes de accionar los frenos, el conductor debe:

1. darse cuenta de que el automóvil que va delante redujo considerablemente su velocidad o se detuvo, gastando en eso el "tiempo de percepción"; y
2. "mandar" la instrucción a su pierna mediante una señal nerviosa dirigida a los músculos de que deben comenzar a reaccionar adecuadamente, lo que toma un tiempo adicional, llamado el "tiempo de reacción".

En condiciones normales, la suma del "tiempo de percepción" y el "tiempo de reacción" suele ser hasta de 1.5 segundos. En ese tiempo, a 100 km/h, se recorre una distancia de casi 42 m. Agregando a eso los 40 m que recorre el coche con los frenos aplicados, la distancia total recorrida hasta llegar al reposo en la situación de emergencia es de 82 m.

La distancia de frenado estándar se mide en condiciones perfectas de los frenos, las llantas y el suelo. En otras condiciones (frenos y llantas gastados, suelo mojado), la distancia de frenado es mayor. Además, en un estado de cansancio y, especialmente, de ebriedad, tanto el "tiempo de percepción" como el "tiempo de reacción" aumentan drásticamente. En condiciones adversas hay que aumentar la distancia segura o, simplemente, no manejar. Manejar un coche no debe ser un juego divertido, sino una actividad seria y de gran responsabilidad.

Problema resuelto

¿Cómo cambia la distancia de frenado al aumentar la velocidad inicial?

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar resultados.

Para el Nissan 350 Z (**Figura 6.26**) se realizaron mediciones de la distancia de frenado para diferentes velocidades iniciales.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Velocidad inicial (km/h)	Distancia de frenado (m)
96.54	35.75
128.72	63.61
160.9	100.07

Figura 6.26. Nissan 350 Z.

a) ¿Los aumentos de la distancia de frenado medidos son iguales a los que predice la teoría?

b) ¿Cuál debería ser la distancia de frenado si la velocidad inicial fuera de 100 km/h? ¿Cuál es la calidad de los frenos y las llantas de ese coche?

Solución:

a) Como ya se ha dicho, la distancia de frenado es proporcional al cuadrado de la velocidad inicial. Si el coche en el frenado siempre tiene la misma aceleración sin importar la velocidad inicial, entonces el factor del aumento de la distancia de frenado será igual al cuadrado del factor del aumento de la velocidad inicial.

Simbólicamente, si la velocidad inicial aumenta de v_0 a kv_0, entonces la distancia de frenado debería aumentar de d_d a k^2d_d.

Al aumentar la velocidad inicial de 96.54 km/h a 128.72 km/h, el factor de aumento es: $k = \dfrac{128.72\,\frac{\text{km}}{\text{h}}}{96.54\,\frac{\text{km}}{\text{h}}} = 1.333.$

En tal caso, la teoría predice que la distancia de frenado debería aumentar por un factor igual a $k^2 = (1.333)^2 = 1.777$. A partir de los valores medidos de la distancia de frenado para esas dos velocidades iniciales se tiene el factor de aumento medido: $\dfrac{63.61\text{ m}}{35.75\text{ m}} = 1.779$. La predicción teórica es muy buena, pues la diferencia entre el valor experimental y el valor teórico es de 0.1%.

Para el tercer valor de la velocidad inicial, 160.9 km/h, el factor del aumento es: $k = \dfrac{160.90\,\frac{\text{km}}{\text{h}}}{96.54\,\frac{\text{km}}{\text{h}}} = 1.667$. Teóricamente, la distancia de frenado en la tercera situación debería aumentar por un factor $k^2 = (1.667)^2 = 2.779$ con respecto a la distancia de frenado en la primera situación.

Comparando los valores medidos de la distancia de frenado en estas dos situaciones, se tiene el factor de aumento igual a: $\dfrac{100.70\text{ m}}{35.75\text{ m}} = 2.817$.

La predicción teórica es buena porque la diferencia entre el valor experimental y el valor teórico del factor de aumento es solamente 1.35%.

b) Para la velocidad inicial de 100 km/h, el factor de aumento de la velocidad inicial sería $k = \dfrac{100\,\frac{\text{km}}{\text{h}}}{96.54\,\frac{\text{km}}{\text{h}}} = 1.036$

La distancia de frenado, medida para la primera velocidad inicial, debería aumentar por el factor $k^2 = (1.036)^2 = 1.073$ y ser igual a $1.073 \cdot 35.75\text{ m} = 38.36\text{ m}$. Como la distancia de frenado para la velocidad inicial de 100 km/h es, con gran probabilidad, menor que 40 m, la calidad de los frenos y las llantas de este coche es excelente.

La diferencia entre los valores experimentales y teóricos

En el problema anterior se notaron las diferencias, aunque pequeñas, entre los valores medidos de los factores de aumento de las distancias de frenado y los valores predichos por la teoría.

¿A qué se deben estas diferencias?

Para derivar teóricamente la relación entre la distancia de frenado y la velocidad inicial, se supuso que durante el frenado la aceleración se mantiene constante. Al usar esa relación en la predicción de las distancias de frenado, para casos con diferentes velocidades iniciales, se supuso que en todos los frenados la aceleración se mantuvo constante.

Las pequeñas diferencias entre los valores teóricos y los medidos se deben a las pequeñas variaciones de la aceleración durante el frenado. Para notar estas variaciones es indispensable medir cómo cambia la velocidad del vehículo durante el frenado. Si las mediciones no confirman que la aceleración es constante durante el frenado, entonces los modelos matemáticos basados en esa suposición dan solamente una descripción aproximada del movimiento. Veamos esto, que es una muestra de una característica general de la física, en el siguiente problema.

Problema resuelto

La gráfica de un frenado

Competencias ejemplificadas: Dominar la representación gráfica, aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar un resultado.

En la prueba de frenado de una moto, se obtuvo la gráfica que representa el comportamiento de la velocidad instantánea durante el frenado (**Figura 6.27**). Las unidades de la velocidad son m/s y las del tiempo son s.

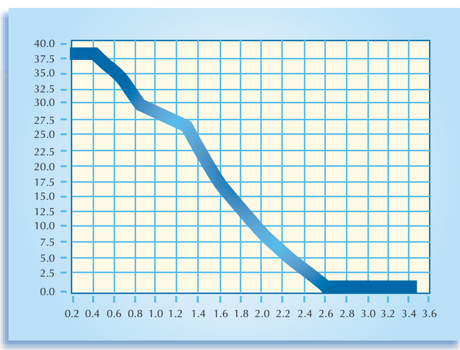


Figura 6.27. El comportamiento de la velocidad durante el frenado.

a) ¿Fue constante la aceleración durante el frenado?
b) ¿Cuál fue la aceleración media?
c) ¿Cuál fue la distancia de frenado?

Solución:

a) Como la gráfica velocidad contra tiempo no es una línea recta, la aceleración no fue constante durante el frenado.
b) La velocidad inicial de la moto era de 38 m/s (136.8 km/h) y la velocidad final fue cero. El frenado comenzó en el instante 0.4 s y terminó en el instante 2.6 s. Por eso, la aceleración media es:

$$a = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{0 - 38\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2.6\text{ s} - 0.4\text{ s}} = \frac{-38\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2.2\text{ s}} = -17.27\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) Como la aceleración no fue constante durante el frenado, la fórmula para la distancia de detención dará solamente un valor aproximado para la distancia de frenado:

$$d_\text{d} = -\frac{v_0^2}{2a} = -\frac{\left(38\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{-2 \cdot 17.27\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 41.8\text{ m}$$

Dar sentido al resultado: Aunque la distancia de frenado medida para esa moto es mayor que el valor aproximado, la eficacia de los frenos de la moto es impresionante. Para percatarse de eso es bueno saber que un coche que para 100 km/h tuviera una distancia de frenado de 30 m (¡lo que es todavía un sueño para la tecnología actual de frenos y llantas!), tendría, para una velocidad inicial de 136.8 km/h, una distancia de frenado mayor que 56 m.

Competencia a practicar: Dominar la representación gráfica.

Dibuja la gráfica "velocidad contra tiempo" si la aceleración de la moto en el frenado fuera constante.

6.3. Caída libre

El movimiento natural más frecuente en nuestro entorno es la caída de los cuerpos. El joven de la **Figura 6.28a** sostiene una pelota de béisbol. Si la suelta, la pelota comenzará a moverse hacia el suelo (**Figura 6.28b**). El movimiento de la pelota es un ejemplo de **caída libre**.

Figura 6.28 a. El joven sostiene una pelota de béisbol.

Figura 6.28 b. Cuando la suelta, la pelota cae.

Definición

La **caída libre** es el movimiento que realizan los cuerpos cuando se sueltan sin velocidad inicial desde un punto cercano a la superficie terrestre.

La trayectoria que sigue un cuerpo en caída libre es una línea recta en dirección vertical con respecto a la superficie terrestre. Las prolongaciones de las trayectorias de caída pasarían por el centro de la Tierra (**Figura 6.29**).

Fue muy difícil llegar a conocer las características de la caída libre porque este movimiento no se presta para medir cómo cambian con el tiempo la posición y la velocidad del cuerpo que cae. Gracias a las contribuciones de Galileo Galilei, desde el siglo XVII se sabe que la caída libre puede considerarse como un caso especial de movimiento uniformemente acelerado.

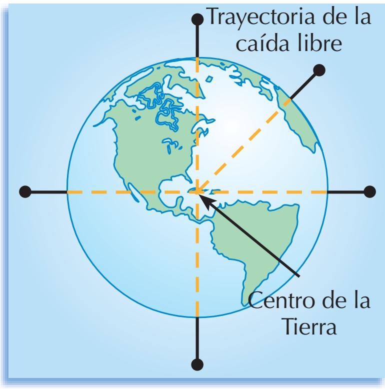


Figura 6.29. Las trayectorias de caída libre en puntos de la superficie terrestre.

La velocidad y la distancia recorrida en la caída libre

Si la caída libre es un movimiento de aceleración constante, la velocidad es proporcional al tiempo transcurrido, y la distancia recorrida es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido. Por eso, para la velocidad y la distancia recorrida valen las fórmulas:

$$v = gt$$

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

La distancia recorrida hacia abajo se mide con respecto a la posición inicial en la que el cuerpo que cae estaba en reposo.

Para la aceleración, en las fórmulas de la caída libre se usa la letra "g" para hacer notar que se trata de una aceleración especial.

Definición

La **aceleración de caída libre** es la aceleración que tienen los cuerpos en caída libre.

El valor de la aceleración de caída libre

Aunque el valor de la aceleración de caída libre varía a lo largo y ancho de la superficie terrestre, se toma como estándar el valor:

$$g = 9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Para hacer cálculos rápidos se puede usar, sin cometer un gran error, el valor aproximado:

$$g \approx 10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Problema resuelto

¿Qué tan grande es el error al usar $g = 10$ m/s^2?

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar un resultado.

Al estimar el valor de alguna cantidad física relacionada con la caída libre, se suele usar para la aceleración de caída libre el valor aproximado de 10 m/s^2. ¿Qué tan grande es el error que se comete?

Solución: Como 10/9.8 = 1.02, el error cometido para la aceleración de caída libre es de 2%.

Dar sentido al resultado: Se tendrá el mismo error para todas las cantidades físicas cuyo valor sea proporcional a la aceleración de caída libre, como son, por ejemplo, la velocidad y la distancia recorrida.

Actividad de cálculo

¿Cómo caen los cuerpos durante los primeros cinco segundos?

Propósito: Conocer las velocidades que alcanzan y las distancias que recorren los cuerpos en caída libre.

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Material: Calculadora de bolsillo.

En el primer segundo un cuerpo en caída libre logra alcanzar la velocidad:

$$v = g \cdot t = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\,\text{s} = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Usando el valor aproximado para la aceleración, el valor aproximado de la velocidad sería:

$$v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\,\text{s} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Expresadas en km/h, estas dos velocidades son, respectivamente, de 35.3 km/h y 36 km/h. Recuerda que 1 m/s equivale a 3.6 km/h.

La distancia que recorre un cuerpo en caída libre durante el primer segundo es:

$$d = \frac{1}{2} g t^2 = 0.5 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (1\text{s})^2 = 49 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1\,\text{s}^2 = 4.9\,\text{m}$$

El valor aproximado de esa distancia, si se usa g = 10 m/s^2, sería de 5 m.

Efectúa los cálculos correspondientes para completar la **Tabla 6.4** con los valores de la velocidad y de la distancia recorrida en la caída libre para los primeros cinco segundos. Dentro de los paréntesis se deben indicar los valores aproximados en cuyo cálculo se usa el valor aproximado para la aceleración de caída libre (g = 10 m/s^2).

Tabla 6.4. Los valores de la velocidad y la distancia recorrida en la caída libre.

Instante de tiempo (s)	Velocidad instantánea (m/s)		Velocidad instantánea (km/h)		Distancia recorrida (m)	
0	0	0	0	0	0	0
1	9.8	(10)	35.3	(36)	4.9	(5)

(*Continúa*)

(*Continuación*)

2		( )		( )		( )
3		( )		( )		( )
4		( )		( )		( )
5		( )		( )		( )

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Tomando en cuenta que la velocidad es proporcional al tiempo transcurrido, y la distancia recorrida al cuadrado del tiempo transcurrido, determina, sin usar la calculadora, el valor aproximado de la velocidad (en m/s) y de la distancia recorrida (en m) después de 10 segundos.

v (10 s) = ________________________. d (10 s) = ________________________.

Actividad de graficado

Las gráficas de la caída libre

Propósito: Representar gráficamente el comportamiento de la velocidad y de la distancia recorrida en la caída libre.

Competencia a practicar: Dominar la representación gráfica.

Material: Libreta de física, regla y lápiz.

1. Representa en tu libreta el plano "velocidad-tiempo" usando las siguientes "escalas":

En el eje de las abscisas, 1.5 cm corresponden a 1 segundo (y 7.5 cm a 5 segundos).
En el eje de las ordenadas, 2 cm corresponden a 10 m/s (y 10 cm corresponden a 50 m/s).
Representa en ese plano los valores aproximados de la velocidad instantánea en los primeros cinco segundos. Conecta los puntos con una línea adecuada.

2. Representa en tu libreta el plano "distancia recorrida-tiempo" usando las siguientes "escalas":

En el eje de las abscisas, 1.5 cm corresponden a 1 segundo (y 7.5 cm a 5 segundos). En el eje de las ordenadas, 0.5 cm corresponden a 5 m (y 12.5 cm corresponden a 125 m).
Representa en este plano los valores aproximados de las distancias recorridas en los primeros cinco segundos. Conecta estos puntos con una línea adecuada.

Dos fórmulas para el tiempo en la caída libre

Si un cuerpo, partiendo del reposo, logra alcanzar en caída libre la velocidad v, el tiempo transcurrido para alcanzarla es:

$$t = \frac{v}{g}$$

Si un cuerpo, partiendo del reposo, recorre en caída libre la distancia d, el tiempo transcurrido es:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

Si no ves cómo se obtiene esta fórmula de la fórmula para la distancia recorrida, abajo se presenta el despeje paso a paso.

Conexión con las matemáticas

El despeje del tiempo en la fórmula para la distancia recorrida

Competencia ejemplificada: Construir modelos matemáticos.

La fórmula para la distancia recorrida en la caída libre es:

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

¿Cómo despejar el tiempo *t* de esta fórmula?

Vamos hacerlo paso a paso. Multiplicando ambos lados de la ecuación por 2, se obtiene la ecuación equivalente:

$$2d = gt^2$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación entre *g*, se obtiene la ecuación:

$$\frac{2d}{g} = t^2$$

Al intercambiar los miembros de la ecuación, se obtiene la expresión para el cuadrado del tiempo de caída:

$$t^2 = \frac{2d}{g}$$

Al sacar la raíz cuadrada de ambos lados, se obtiene la fórmula para el tiempo de caída:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

Problema por resolver

Coches en caída libre

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Las compañías que producen coches tienen que averiguar cómo se comportan los vehículos en diferentes tipos de colisiones. Una de esas colisiones es el choque frontal a velocidad de 100 km/h contra una pared firme.

Un coche que tarda 15 segundos en alcanzar desde el reposo esa velocidad recorre en el movimiento acelerado una distancia superior a los 200 metros. Para no construir pistas tan largas, los coches cuyo comportamiento en la colisión se quiere averiguar, se dejan caer desde una altura mucho menor que 200 metros (**Figura 6.30**).

¿Cuánto tiempo es necesario para que un coche en caída libre alcance la velocidad de 100 km/h?

¿Desde qué altura se deja caer?

Figura 6.30. Coche listo para alcanzar 100 km/h en caída libre.

Problema por resolver

La altura de un acantilado

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un grupo de alpinistas jóvenes llega hasta un acantilado y decide determinar aproximadamente su altura. Dejan caer una piedra y miden el tiempo que tarda la piedra en caer hasta el fondo (**Figura 6.31**).

a) Si el tiempo de caída es t = 2.5 s, ¿cuál es la altura del acantilado?
b) Esta determinación de la altura del acantilado es una "medición indirecta". ¿Cuál sería la manera directa de medir la altura?
c) ¿Qué velocidad logra alcanzar la piedra?
d) Si la altura del acantilado hubiera sido **cuatro veces mayor**, ¿cuál habría sido el tiempo de caída medido?

Figura 6.31. La medición indirecta de la altura de un acantilado.

Problema resuelto

Una caída para valientes

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar resultado.

Figura 6.32. La Torre de la caída gigante.

The Giant Drop (La caída gigante) es la "torre de caída libre" (**Figura 6.32**) que se encuentra en el parque de diversiones "Dreamworld" (El mundo de los sueños), en Australia.

Si los visitantes al bajar desde una altura de 119 m alcanzan la velocidad de 135 km/h, ¿se trata de una verdadera caída libre?

Solución: La caída libre desde la altura d = 119 m tarda:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 119 \text{ m}}{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \sqrt{24.286 \text{ s}^2} = 4.93 \text{ s}$$

En ese tiempo, un cuerpo en verdadera caída libre lograría alcanzar la velocidad:

$$v = gt = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4.93 \text{ s} = 48.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 174 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Como la velocidad alcanzada es de 135 km/h, el movimiento de la cabina en la caída gigante no es una caída libre.

Dar sentido al resultado: Durante la parte final del movimiento la aceleración no es la de una caída libre (las vías no son verticales) e, incluso, tiene que ser negativa debido al frenado.

El movimiento de los cuerpos en caída se puede describir con modelos teóricos cuando el camino recorrido es pequeño, porque en ese caso el efecto de la resistencia del aire es despreciable ya que no logra modificar considerablemente la aceleración de la caída libre. Por eso, las fórmulas matemáticas que se refieren a la caída libre generan valores que no difieren mucho de los valores que se medirían experimentalmente. Este hecho se usa para calcular valores cuya medición no es posible por la falta de instrumentos precisos. La siguiente actividad presenta un ejemplo de este uso de las fórmulas de la caída libre.

Actividad de medición

¿Cuál es tu tiempo de reacción?

Propósito: Usando la ley de la caída libre, estimar el tiempo de reacción.

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente, aplicar modelos matemáticos, explicitar un concepto en una situación cotidiana.

Material: Una regla escolar, calculadora del bolsillo.

El tiempo de reacción es el tiempo que transcurre entre el momento en que percibimos algo y el momento en que somos capaces de realizar una acción deseada. En muchas situaciones de la vida, por ejemplo, en el frenado de emergencia, es importante que el tiempo de reacción no sea demasiado largo.

En esta actividad, en que se dejará caer una regla escolar, el tiempo de reacción será el intervalo entre en el momento en que notes que la regla se suelta y el momento en que la agarras con tus dedos.

La actividad se realiza en pares. Un compañero sostiene la regla en posición vertical, mientras tú colocas tu pulgar y tu índice a unos centímetros del cero de la regla (**Figura 6.33**).

Figura 6.33. Estimando el tiempo de reacción.

La regla se suelta sin previo aviso. Tu tarea es agarrarla cuanto antes. El lugar de la regla en que quedan tus dedos al detenerla permite estimar cuántos centímetros cayó la regla antes de haberla detenido. Suponiendo que el movimiento de la regla es de caída libre, la distancia que ha recorrido la regla permite estimar el tiempo de su caída. Tal tiempo es aproximadamente igual a tu tiempo de reacción.

Si la regla recorre una distancia d, tu tiempo de reacción t es:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

Si, por ejemplo, alguien agarra la regla cerca del número 15, la distancia que ha caído la regla es d = 15 cm = 0.15 m. Su tiempo de reacción sería:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.15\,\text{m}}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \sqrt{\frac{0.3}{9.8}\,\text{s}^2} = \sqrt{0.031}\,\text{s} = 0.176\,\text{s} \approx 0.18\,\text{s}$$

Entonces, en este caso el tiempo de reacción sería 18 centésimas o casi 2 décimas de segundo.

Para determinar la distancia d que se insertará en la fórmula para el tiempo, hay que repetir la caída de la regla cinco veces, sumar los resultados obtenidos para la distancia y dividir el resultado entre cinco. Este valor medio de la distancia reflejará mejor tu capacidad de reacción.

Después de estimar tu tiempo de reacción, ayuda a tu compañero para que determine su tiempo de reacción.

¿Quién, en tu clase, tuvo el tiempo de reacción más corto?

La caída de los cuerpos y la resistencia del aire

Como ya se ha dicho, las fórmulas simples para la caída libre usadas arriba valen solamente si la influencia del aire se puede despreciar. Esto se cumple para cuerpos pesados cuando la distancia de caída no es grande. En la Luna, que no posee atmósfera, las fórmulas para la caída libre serían completamente válidas para todos los cuerpos.

La demostración fue hecha en 1971 por el astronauta estadounidense David Scott, quien dejó caer un martillo y una pluma (**Figura 6.34**). Ambos objetos llegaron al suelo lunar al mismo tiempo.

Figura 6.34. La caída libre de un martillo y una pluma en la Luna.

En la Luna el valor de la aceleración de caída libre no es 9.8 m/s^2, sino 1.6 m/s^2, es decir, es aproximadamente 6 veces menor que la aceleración de la caída libre en la Tierra. Más adelante (en el bloque 3) verás a qué se debe este hecho. Tomando en cuenta la ley de la gravitación universal, los valores de masa de la Luna y el valor de su radio, se puede demostrar que la aceleración de caída libre en la Luna tiene que ser 6 veces menor que en la Tierra.

La velocidad terminal

Debido a la resistencia del aire, los cuerpos que caen no logran alcanzar la velocidad que corresponde a la de caída libre. Como la resistencia del aire aumenta con la velocidad del cuerpo, llega el momento en el que el cuerpo alcanza una velocidad máxima o **velocidad terminal**. Al continuar la caída, esta velocidad no cambia, es decir, el movimiento se vuelve un movimiento uniforme. En la **Tabla 6.5** se dan los valores de la velocidad terminal de algunos cuerpos.

Tabla 6.5. Los valores de la velocidad terminal en la caída de algunos cuerpos.

Cuerpo	Velocidad terminal (m/s)
Esfera de hierro (radio 2 cm)	80
Cuerpo humano sin paracaídas	55
Pelota de béisbol	40
Pelota de golf	30
Gota de lluvia	10
Pelota de ping-pong	7
Paracaidista	6.5

La velocidad de 6.5 m/s o 23.4 km/h, tal vez, parecerá insignificante a los obsesionados con las velocidades mayores que 100 km/h.

Para tener una idea acertada sobre qué tan grande es la velocidad de un paracaidista al tocar el suelo, se puede determinar desde qué altura tendría que brincar uno para "aterrizar" a esa velocidad. El tiempo necesario para que la Tierra acelere un cuerpo en la caída libre hasta la velocidad de 6.5 m/s es:

$$t = \frac{v}{g} = \frac{6.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.66\ \text{s}$$

La altura desde la que hay que brincar es:

$$d = \frac{1}{2}gt^2 = 0.5 \cdot 9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0.66\ \text{s})^2 = 4.9\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.44\ \text{s}^2 = 2.16\ \text{m}$$

En ninguna circunstancia debes intentar "sentir" cómo es el aterrizaje de un paracaidista. ¡Solamente las personas bien entrenadas son capaces de brincar desde esta altura sin romperse un hueso!

Problema por resolver

La caída de los "voladores celestes"

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Después de unos diez segundos, los paracaidistas acrobáticos logran caer a la velocidad terminal (**Figura 6.35**).

a) ¿Qué tanto caen en dos segundos los paracaidistas acrobáticos al caer a la velocidad terminal?
b) ¿Durante cuántos segundos deberían caer para recorrer esa distancia si sus paracaídas están abiertos?

Para saber el valor de sus velocidades terminales consulta la **Tabla 6.5**.

Figura 6.35. Paracaidistas acróbatas cayendo a la velocidad terminal.

Como se verá más adelante, el cuerpo en caída alcanza la velocidad terminal en el momento en que la fuerza de resistencia del aire se hace igual a la fuerza del peso del cuerpo. Mientras la fuerza del peso es mayor, la velocidad del cuerpo sigue aumentando y, a la vez, sigue aumentando la resistencia del aire. Para pequeñas velocidades, cuando las fuerzas se igualan, la fuerza de resistencia es proporcional a la velocidad terminal. Como la fuerza de resistencia en tal situación es igual al peso del cuerpo, se concluye que la velocidad terminal es proporcional al peso del cuerpo.

Si una pelota tiene velocidad terminal de 10 m/s, otra pelota del mismo tamaño pero con el doble de peso tendrá velocidad terminal de 20 m/s.

La veracidad de esta afirmación se pondrá indirectamente a prueba en la siguiente actividad.

¡Hagamos física!

La caída de los filtros de café

Propósito: Lograr que los filtros de café caigan de la manera requerida.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar experimentos pertinentes, pensar críticamente al evaluar resultados, aprender en equipo, aprendizaje autorregulado.

Figura 6.36. Un filtro de café.

Materiales: 12 filtros de café, cinta métrica, cinta adhesiva, plumón.

Un filtro de café (**Figura 6.36**) es un objeto cotidiano que tiene dos características útiles para esta actividad. Si se deja caer, su trayectoria es bastante vertical. Además, necesita muy poco tiempo para alcanzar la velocidad terminal.

1. Junta tu equipo de cuatro miembros. Colocando un filtro dentro de otro, formen "súper-filtros" de 2, 4 y 6 filtros. Con un poco de cinta adhesiva, asegúrense de que los filtros no se puedan separar. Para no confundirlos, pueden marcarlos con el plumón con los números 2, 4 y 6.
2. Si los súper-filtros se dejasen caer simultáneamente desde una altura de 1 m, ¿en qué orden llegarían al suelo?

   Describe y justifica tu predicción

Después de que todos miembros hayan justificado su predicción, traten de llegar a una predicción justificada en equipo.

¿Cuál es la predicción justificada del equipo?

Si no te parece aceptable, escribe tus razones.

3. Realicen con cuidado la caída de los 3 súper-filtros desde una altura de 1 m y observen en qué orden llegan al suelo. Si el orden difiere del orden descrito en su predicción justificada, ¿de qué manera se puede explicar la diferencia?

4. Si el súper-filtro de 4 filtros se dejara caer desde una altura de 1.20 m, ¿desde qué alturas deberían dejarse caer simultáneamente los súper-filtros de 2 y 6 filtros para que los tres lleguen al suelo en el mismo momento? Describe y justifica tu predicción.

Después de que todos los miembros del equipo tengan su predicción justificada, traten de llegar a una predicción justificada en equipo.

¿Cuál es la predicción justificada del equipo?

Si no te parece aceptable, escribe tus razones.

5. Realicen con cuidado la caída de los 3 súper-filtros desde las alturas acordadas y verifiquen si todos llegan al suelo en el mismo momento. Si no es así, ¿de qué manera se puede explicar la diferencia y cuál sería la mejor configuración inicial de los súper-filtros para que todos lleguen al suelo en el mismo momento?

Física y meteorología

Es bueno contar con la protección de la atmósfera

Competencias ejemplificadas: Explicitar un concepto científico en una situación cotidiana, aplicar modelos matemáticos.

Figura 6.37. Hay que saber protegerse de la lluvia.

La lluvia es uno de los fenómenos meteorológicos más comunes. Para no mojarse, en caso de lluvia, la gente usa un paraguas (**Figura 6.37**). Lo que la gente no sabe es que la lluvia podría ser mucho más peligrosa.

Las nubes se forman a una altura de unos cuantos kilómetros. A pesar de la altura y gracias a la resistencia del aire, la velocidad (terminal) con que caen las gotas de lluvia no sobrepasa normalmente los 10 m/s. Sin la resistencia del aire, las gotas que caen de las nubes desde la altura mencionada lograrían alcanzar una velocidad considerable y se convertirían en proyectiles mortales.

Para darnos cuenta de lo afortunados que somos al contar con la atmósfera, calculemos la rapidez que tendría una gota de lluvia (o cualquier otro cuerpo) después de caer libremente desde una altura d = 4,000 m. El tiempo de caída sería:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}000\ \text{m}}{9.8 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \sqrt{\frac{8{,}000 \cdot \text{s}^2}{9.8}} = 28.6\ \text{s}$$

Las gotas de lluvia lograrían alcanzar en ese tiempo una rapidez:

$$v = gt = 9.8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 28.6\ \text{s} = 280\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta rapidez es escalofriante porque es comparable a la rapidez de las balas de las armas de fuego: ¡es bueno contar con la protección que nos brinda la atmósfera!

La resistencia del aire: una segunda mirada

Observando los objetos que caen en nuestro entorno, podemos notar que las cosas pesadas caen más de prisa que los objetos ligeros. Una hoja de árbol cae lentamente, y una pesa cae rápidamente. Sin pensar demasiado, parecería que la idea “mayor peso, mayor velocidad” es una idea completamente correcta.

Sin embargo, los datos en la **Tabla 6.5** de las velocidades terminales no la apoyan por completo. Un paracaidista es muchas veces más pesado que una pelota de béisbol, pero cae a una velocidad terminal 6 veces menor.

Esto quiere decir que la velocidad terminal es proporcional al peso de los objetos solamente si éstos tienen la misma forma, como era el caso de los súper-filtros.

Como la mayoría de las personas sigue creyendo que la idea “mayor peso, mayor velocidad” es aplicable a todos los objetos en caída, en alguna fiesta aburrida podrías tener éxito con la siguiente demostración.

Sé la estrella de la fiesta

¿Pueden caer juntas una libreta y una hoja suelta?

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente, explicitar un concepto científico en una situación cotidiana, seguir instrucciones de manera reflexiva.

Primero, demuestra que una libreta y una de sus hojas caen a diferentes velocidades si están separadas. Después pregunta a los presentes: ¿Es posible que caigan juntas?

La mayoría de las personas llegarán a la solución de que caerán juntas si se pone la libreta encima de la hoja o si se mete la hoja en la libreta. Reta a los participantes a que encuentren otra posibilidad, hasta que se llegue al consenso de que no hay otra posibilidad además de las ya mencionadas.

Ese momento es idóneo para que ofrezcas una posibilidad diferente: poner la hoja encima de la libreta y soltarlas juntas (**Figura 6.38**).

Los presentes no van a creer que caerán juntas. Demuestra que la hoja se "pega" a la libreta y que caen juntas hasta el suelo.

¿Cómo funciona el truco?

La diferencia entre el movimiento de la libreta y el de la hoja suelta se debe a la acción del aire que afecta más a la hoja suelta que a la libreta. Cuando la hoja se deja caer con la libreta colocada debajo de ella, la libreta elimina el efecto del aire sobre la hoja, y ésta cae junto con la libreta.

Creyendo que la libreta, por ser más pesada, cae siempre más rápidamente que la hoja, la mayoría de las personas pensarán que la libreta se separará de la hoja, dejándola atrás, y que llegará primero al suelo.

Figura 6.38. ¿Caerán juntas una libreta y una hoja puesta encima de ella?

6.4. Tiro vertical

El movimiento opuesto a la caída libre ocurre cuando se lanza, por ejemplo, una pelota de tenis verticalmente hacia arriba (**Figura 6.39**). Este movimiento se llama el ***tiro vertical***.

Mientras que en la caída libre la velocidad del cuerpo aumenta, en el tiro vertical la velocidad del cuerpo disminuye durante la subida. El valor absoluto de la aceleración es igual al valor de la aceleración en la caída libre: $g = 9.8\ m/s^2$.

Si es así, para el tiro vertical son aplicables las mismas fórmulas que hemos usado para el movimiento acelerado en que la velocidad decrece.

La velocidad en el tiro vertical cambia con el tiempo según la fórmula:

$$v = v_0 - gt$$

donde v_0 es la velocidad inicial o la velocidad de lanzamiento.

Como el movimiento se realiza en la dirección vertical, la distancia recorrida representa la altura alcanzada con respecto al punto de lanzamiento (la posición inicial). Por eso, para la distancia recorrida (la altura alcanzada) en el tiro vertical se usa el símbolo *h* (por ***h****eight*, altura en inglés) y la fórmula correspondiente es:

$$h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

Figura 6.39. Lanzamiento de una pelota hacia arriba.

Si en el tiro vertical la velocidad del cuerpo decrece al subir, entonces en un cierto instante el cuerpo debe detenerse. Esto ocurre después del ***tiempo de subida*** t_s, que satisface la ecuación:

$$0 = v_0 - g t_s$$

De aquí se obtiene:

$$t_s = \frac{v_0}{g}$$

Al tiempo de subida le corresponde, en el caso del movimiento de los coches, el tiempo de detención.

A la distancia de frenado, en el tiro vertical le corresponde la ***altura máxima*** $h_{máx}$. Esta es la altura a la que llega el cuerpo en el momento t_s en que su velocidad se vuelve cero:

$$h_{máx} = v_0 t_s - \frac{1}{2} g t_s^2 = v_0 \frac{v_0}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0}{g}\right)^2$$

La expresión final para la altura máxima es:

$$h_{\text{máx}} = \frac{v_0^2}{2g}$$

Problema por resolver

El tiempo de subida y la altura máxima en un tiro vertical

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Una pelota de béisbol se lanza verticalmente hacia arriba a una velocidad $v_0 = 24$ m/s.

a) ¿Cuánto tiempo se mueve hacia arriba hasta detenerse?
b) ¿Cuál es la altura máxima que alcanza?
c) Si la pelota fuera lanzada a la velocidad de 12 m/s, ¿cuántas veces disminuirían el tiempo de subida y la altura máxima?

Problema resuelto

El salto vertical de un delfín

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 6.40. El salto vertical de un delfín.

En un salto vertical, los delfines pueden elevarse hasta una altura máxima de 4 metros (**Figura 6.40**)

a) ¿Cuál es su velocidad inicial?
b) ¿Cuánto tiempo necesita para alcanzar la altura máxima?

Solución:

a) Despejando la velocidad inicial de la fórmula para la altura máxima se tiene:

$$v_0 = \sqrt{2\,gh_{\text{máx}}} = \sqrt{2 \cdot 9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4\ \text{m}} = \sqrt{78.4\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 8.85\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) El tiempo de subida es:

$$t_s = \frac{v_0}{g} = \frac{8.85\frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.9\ \text{s}$$

Razonamiento proporcional: Si algún "súper-delfín" pudiera saltar con velocidad inicial 2 v_0 (17.7 m/s), ¿cuáles serían su altura máxima y el tiempo de subida?

El tiempo en el aire

Hemos mencionado que el tiro vertical es un movimiento similar al movimiento de un coche que frena. La fórmula para el tiempo de subida es igual a la fórmula para el tiempo de detención, y la fórmula para la altura máxima es igual a la fórmula para la distancia de frenado.

Sin embargo, la analogía no es completa. El coche después del frenado, normalmente se queda en reposo, algo que no ocurre en el tiro vertical.

Después de detenerse al alcanzar la altura máxima, el cuerpo comienza a bajar en caída libre.

¿Cuánto tiempo dura la caída libre desde la altura máxima hasta el punto de lanzamiento?

El ***tiempo de bajada*** t_b es igual al tiempo que se necesita para realizar la caída libre desde la altura $h_{máx}$:

$$t_b = \sqrt{\frac{2\,h_{máx}}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{v_0^2}{2\,g}}{g}} = \sqrt{\frac{v_0^2}{g^2}} = \frac{v_0}{g} = t_s$$

Entonces, el cuerpo necesita el mismo tiempo para caer desde la altura máxima como para subir hasta ella.

Por eso, el tiempo t_{aire} que el cuerpo dura en el aire es:

$$t_{aire} = t_s + t_b = \frac{v_0}{g} + \frac{v_0}{g} = \frac{2v_0}{g}$$

La pregunta voladora

¿Puedes imaginar y realizar un movimiento cuyas características guarden una analogía completa con el tiro vertical?

Problema resuelto

La velocidad y la altura después del tiempo t_{aire}

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El tiro vertical es un movimiento en el que, durante la subida, la velocidad disminuye y la altura decrece, mientras que, durante la bajada, la velocidad aumenta y la altura disminuye. ¿Cuáles son los valores de la velocidad y la altura después del tiempo t_{aire}?

Solución: El valor de la velocidad después de t_{aire} es:

$$v = v_0 - g t_{aire} = v_0 - g \cdot \frac{2v_0}{g} = v_0 - 2v_0 = -v_0$$

El valor de la altura después de t_{aire} es:

$$h = v_0 t_{aire} - \frac{1}{2} g\,(t_{aire})^2 = v_0 \cdot \frac{2\,v_0}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{2\,v_0}{g}\right)^2 = \frac{2\,v_0^2}{g} - \frac{1}{2} g \cdot \frac{4\,v_0^2}{g^2} = \frac{2\,v_0^2}{g} - \frac{2\,v_0^2}{g} = 0$$

Dar sentido al resultado: Los resultados demuestran que el modelo matemático describe correctamente lo que pasa en el tiro vertical con la velocidad y la altura. El cuerpo, después del tiempo de subida y bajada, tiene la misma rapidez que al principio, pero se mueve en sentido contrario (el signo menos significa que el cuerpo se mueve hacia abajo) y está en la posición inicial (la altura con respecto a esa posición es cero).

La diferencia entre los modelos matemáticos y la realidad

El modelo matemático para la caída libre, en el que se supone que la aceleración es constante, es aplicable solamente si la resistencia del aire es despreciable. Esto ocurre en pocas ocasiones y es más probable que la presencia de aire cambie por completo el carácter del movimiento, y que éste pase de ser un movimiento acelerado (en el que velocidad crece) a ser un movimiento a velocidad constante (igual a la velocidad terminal). Como muestra el siguiente problema resuelto, la misma discrepancia entre lo matemático y lo real se puede notar en el tiro vertical.

La pregunta voladora

¿A qué es igual la aceleración del cuerpo lanzado verticalmente hacia arriba en el instante en que alcanza la altura máxima y su velocidad es cero?

Problema resuelto

La diferencia entre lo real y lo teórico en el "chorro de agua"

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, pensar críticamente al evaluar un resultado.

La fuente *Jet d'Eau* (que en francés significa, muy adecuadamente, "chorro de agua") del Lago de Ginebra es uno de los emblemas turísticos de la ciudad de Ginebra (**Figura 6.41**).

Se lanzan 500 litros de agua por segundo a una rapidez de 200 km/h y se mantienen en el aire 7,000 litros de agua. El chorro llega hasta una altura de 140 m. ¿Qué tan diferentes son estos datos experimentales de las características que debería tener la fuente según los modelos matemáticos para un tiro vertical?

Solución: Si el comportamiento del "chorro de agua" fuera el comportamiento de un tiro vertical ideal (es decir, de un tiro vertical que se comporta de acuerdo con las fórmulas teóricas), entonces el chorro debería tener las características que calcularemos a continuación. A la velocidad inicial de 200 km/h (55.56 m/s) corresponde una altura máxima:

Figura 6.41. El "chorro de agua" en el Lago de Ginebra.

$$h_{\text{máx}} = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{\left(55.56\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \frac{3{,}086.91\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{19.6\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 157.5\,\text{m}$$

y el agua se quedaría en el aire el tiempo:

$$t_{\text{aire}} = \frac{2v_0}{g} = \frac{2 \cdot 55.56\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 11.34\,\text{s}$$

Sin embargo, la altura máxima experimental es de 140 m (11% menor que el valor teórico).

El tiempo que tarda el agua en el aire se obtiene al dividir la cantidad de agua en el aire (7,000 litros) entre la cantidad de agua que se lanza cada segundo (500 litros/segundo). Entonces, ese tiempo es 14 s (23% mayor que el valor teórico).

Dar sentido al resultado Las diferencias ocurren debido a dos factores. En primer lugar, la trayectoria del agua no es perfectamente vertical (**Figura 6.41**) y, por eso, la altura máxima debe ser menor. En segundo lugar, la altura máxima experimental disminuye, en mayor medida, debido a la resistencia de aire.

¿Cómo es posible que el tiempo que el agua permanece en el aire aumente, si la altura máxima a la que llega disminuye?

Es cierto que al disminuir la altura máxima disminuye el tiempo de subida. Sin embargo, la resistencia del aire aumenta considerablemente el tiempo de bajada. Por eso es posible que el valor experimental de t_{aire} sea mayor que su valor teórico.

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. ¿Qué es la velocidad instantánea?
2. ¿Qué es la aceleración?
3. ¿Cuál es la aceleración en un movimiento en que la velocidad no cambia?
4. Dos arcos lanzan flechas a la misma velocidad inicial. En el arco *A* el hilo se tiene que estirar hacia atrás más que en el arco *B*. ¿En qué arco la flecha tiene mayor aceleración durante el lanzamiento?
5. Un coche se mueve manteniendo una aceleración constante de 3 m/s². ¿Cuál de las afirmaciones que vienen abajo es verdadera?

   a) El coche aumenta su velocidad 3 m/s cada segundo, desde 0 a 3 m/s, de 3 m/s a 6 m/s, desde 6 m/s a 9 m/s…

b) El coche va a triplicar su velocidad cada segundo, desde 0 a 3 m/s, desde 3 m/s a 9 m/s, desde 9 m/s a 27 m/s,…

c) Si partió del reposo, el coche va a recorrer 3 m en el primer segundo.

d) Si partió de reposo, el coche va a recorrer 1.5 m en el primer segundo.

Pensamiento crítico

6. ¿Es posible que en algún instante la velocidad instantánea sea igual a cero y que la aceleración instantánea sea diferente de cero? Si es posible, da un ejemplo. Si no es posible, justifica la imposibilidad.

7. Un alumno asevera que un coche que se mueve tres segundos a velocidad constante de 12 m/s tiene una aceleración dos veces mayor que un coche que se mueve tres segundos a velocidad constante de 6 m/s. Su aseveración la justifica así: la "aceleración" del primer coche es:

$$a_1 = \frac{v_1}{t} = \frac{12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{3\text{ s}} = 4\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La "aceleración" del segundo coche es:

$$a_2 = \frac{v_2}{t} = \frac{6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{3\text{ s}} = 2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

¿Puedes encontrar algún error en su argumentación?

8. En un libro de texto aparece el siguiente problema:

"Un auto a partir del reposo acelera uniformemente con una aceleración de 10 m/s^2.

a) ¿Qué tan lejos viaja en 20 s?

b) ¿Cuál es la rapidez del auto en ese tiempo?"

¿Qué dato, proporcionado por el autor, no corresponde a las características de los autos reales?

Sugerencia: Calcula el tiempo que tardaría ese coche en alcanzar una velocidad de 100 km/h y compáralo con el tiempo que tardan los buenos coches deportivos para hacer lo mismo.

9. En un libro de texto aparece el siguiente ejercicio:

"Un corredor de 100 m planos, al oír el disparo de la pistola, acelera durante 2.2 s a 1.9 m/s^2. Si después su aceleración es cero hasta el final de la carrera, ¿cuál es la rapidez del corredor *a*) en el momento $t = 2.0$ s? *b*) ¿Al final de la carrera?"

¿Podrías ganarle tú a ese corredor? ¿Qué te dice eso sobre los datos que da el autor a los estudiantes?

Pensamiento creativo

10. Imagina que tu madre y tú están en una torre y que disponen de una pequeña pelota de hule duro, un cronómetro y una calculadora de bolsillo. Describe un procedimiento con el que sería posible determinar aproximadamente la altura de la torre.

Obtener la información necesaria para responder preguntas

11. Las supuestas velocidades instantáneas de un automóvil están dadas en la siguiente tabla.

Instante del tiempo (s)	Velocidad instantánea (m/s)
0	1
1	4
2	6
3	10
4	13

Si el movimiento del automóvil es uniformemente acelerado, ¿cuál velocidad instantánea es incorrecta?

¿Cuál sería el valor correcto?

¿Cuál es la aceleración?

12. La velocidad instantánea de un Airbus cambia durante el despegue de acuerdo con la siguiente tabla:

Tiempo (s)	Velocidad instantánea (m/s)
0	0
10	22
20	49.5
25	62
26	64
28.3	69

Calcula la aceleración media en cada intervalo (0 s a 10 s, 10 s a 20 s, 20 s a 25 s, 25 s a 26 s, 26 s a 28.3 s).

¿Fue constante la aceleración durante el despegue?

Estima la distancia recorrida por el avión durante el despegue.

Aplicar modelos matemáticos

13. En el primer segundo de caída libre, cada cuerpo recorre una distancia de (aproximadamente) 5 m. En los primeros 2 segundos de caída libre, cada cuerpo recorre 20 m y en los primeros 3 segundos, 45 m.

¿Qué distancia recorre durante el segundo segundo (desde que termina el primer segundo y hasta que comienza el tercer segundo)? ¿Y durante el tercer segundo?

14. Un Jumbo jet 747 logra alcanzar su velocidad de despegue de 173 millas/h en aproximadamente 35 segundos. ¿Qué tan grande es su aceleración media?

15. La velocidad de aterrizaje de un jet es de 115 m/s; el jet se detiene en 13 segundos. ¿Cuál es la aceleración media del jet? ¿Cuál es la distancia de frenado?

16. El camaleón usa su lengua para capturar insectos. Algunos camaleones pueden extender su lengua 16 cm en una décima de segundo. Estima la aceleración media de la punta de la lengua de esos camaleones. Estima la velocidad que alcanza la punta.

17. Las bolsas de aire, que sirven para proteger a los pasajeros de un coche en una colisión vehicular, tienen que inflarse en 10 ms. Estima la aceleración del frente de una bolsa de aire mientras se expande. Compara esa aceleración con la aceleración debida a la gravedad.

21. Un canguro puede saltar hasta una altura de 2.5 m. ¿Cuál es su rapidez de despegue? ¿Cuánto tiempo permanece en el aire?

Usar información visual

22. Las posiciones de dos coches en los mismos instantes eran como se ve en la **Figura 6.42**.

¿Cómo se mueve el primer coche?

¿Cómo se mueve el segundo coche?

¿En qué momento están los coches en la misma posición?

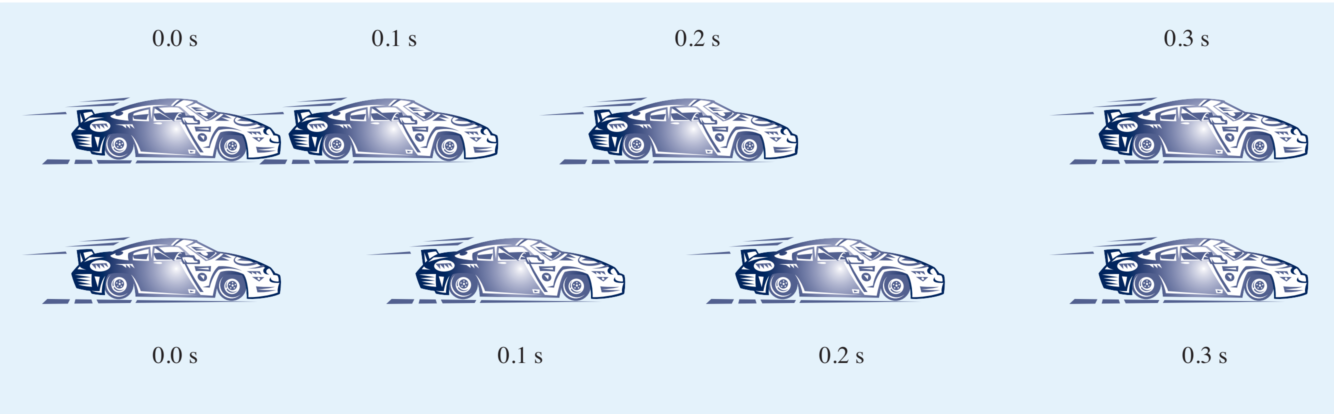


Figura 6.42. Las posiciones de dos coches.

18. En un parque de diversiones los visitantes pueden caer directamente hacia abajo alcanzando una velocidad de 45 millas/h en 2.2 segundos. ¿Cuál es la aceleración media de los visitantes en esta caída?

¿Desde qué altura aproximada caen? ¿Es el movimiento una caída libre?

19. Un ingeniero quiere diseñar una pista para aviones de manera que puedan despegar con una velocidad de 72 m/s. Estos aviones pueden acelerar uniformemente a razón de 4 m/s^2.

a) ¿Cuánto tiempo tardarán los aviones en alcanzar la velocidad de despegue?

b) ¿Cuál debe ser la longitud mínima de la pista de despegue?

20. El coche deportivo Ferrari 550 Maranello tiene, para una velocidad inicial de 90 km/h, una distancia de frenado de 33.6 m.

a) Suponiendo la misma eficacia de los frenos (la misma aceleración de frenado), ¿cuáles deberían ser las distancias de frenado para las velocidades iniciales de 100 km/h y 120 km/h?

b) La medición de la distancia de frenado para la velocidad inicial de 120 km/h tiene como resultado 59.7 m. Si ese valor medido difiere del valor calculado, ¿cómo se puede explicar la diferencia?

¿En qué intervalo de tiempo tienen los coches la misma velocidad media?

En el momento 0.3 s, *a*) los coches tienen la misma velocidad instantánea; *b*) el primer coche tiene mayor velocidad instantánea; *c*) el segundo coche tiene mayor velocidad instantánea; *d*) no se puede determinar.

23. Supón que se suelta una esfera desde una altura de 2 m, una vez en la Tierra y otra vez en la Luna. Las gráficas posición-tiempo de estas dos caídas libres están dadas en la **Figura 6.43**. ¿Cuál curva corresponde a la caída en la Tierra y cuál a la caída en la Luna? Justifica tu selección.

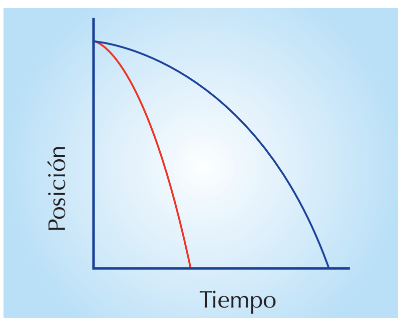


Figura 6.43. Las gráficas posición-tiempo de la caída libre en la Tierra y en la Luna.

Valorar las preconcepciones comunes

24. Partiendo del reposo, un automóvil alcanza la velocidad de 7.5 m/s en 5 segundos. Tendrá una velocidad de 10.5 m/s después de

a) 1 segundo más; *b*) 1.5 segundos más;
c) 2 segundos más; *d*) 2.5 segundos más.

25. Un automóvil en movimiento uniformemente acelerado, partiendo del reposo, recorrió durante el tiempo t la distancia de 40 metros. Si se hubiera movido con la misma aceleración durante la mitad del tiempo, es decir, durante $t_1 = t/2$, la distancia recorrida sería

a) 10 m; *b*) 15 m; *c*) 20 m; *d*) 25 m.

Verifica tu predicción, usando para el primer tiempo el valor $t = 4$ s y para la aceleración el valor $a = 5$ m/s^2.

26. En la caída libre durante un tiempo t, un cuerpo recorre aproximadamente la distancia 80 m y logra tener la velocidad aproximadamente igual a 40 m/s. En el instante $t/2$, la distancia recorrida era aproximadamente

a) 10 m; *b*) 20 m; *c*) 30 m; *d*) 40 m;

y la velocidad era aproximadamente igual a

a) 10 m/s; *b*) 20 m/s; *c*) 30 m/s; *d*) 40 m/s.

¡No creas todo lo que lees!

Evaluar los datos sobre el movimiento de los coches

Competencias a practicar: Dominar la representación gráfica, pensar críticamente al evaluar resultados, explicitar conceptos científicos en situaciones cotidianas.

1. Los supuestos cambios de la velocidad de un coche

En un libro de texto de física (¡en la décima reimpresión!), se incluye la siguiente gráfica que, según se indica, representa el cambio de la velocidad de un automóvil (**Figura 6.44**).

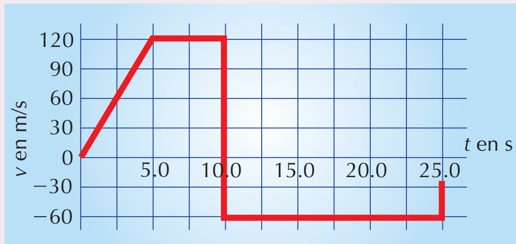


Figura 6.44. Los supuestos cambios de la velocidad de un automóvil.

a) ¿A qué velocidad, expresada en km/h, viaja el automóvil entre los instantes 5 s y 10 s? ¿Te parece sensata y posible esta velocidad? Justifica tu razonamiento.
b) ¿A qué velocidad, expresada en km/h, viaja el automóvil entre los instantes 10 s y 25 s? ¿Te parece sensata y posible esta velocidad? Justifica tu razonamiento.
c) Según la gráfica, el automóvil cambia su velocidad de 0 a 120 m/s en 5 segundos. ¿A qué aceleración corresponde tal cambio? ¿Te parece sensata y posible esta aceleración? Justifica tu razonamiento.
d) En el instante 10 s, el automóvil cambia instantáneamente su velocidad de 120 m/s en un sentido a la velocidad de 60 m/s en el sentido contrario. ¿A qué aceleración corresponde tal cambio? ¿Te parece sensata y posible esta aceleración? Justifica tu razonamiento.

2. Distancia de frenado vs. velocidad inicial

En una actividad de matemáticas para la secundaria, se plantea a los estudiantes la siguiente tarea:

"Una compañía de automóviles, al probar la distancia de frenado de uno de sus nuevos modelos obtuvo los siguientes resultados:

Velocidad (km/h)	20	40	60	80	100
Distancia de frenado (m)	2	4	6	8	10

a) ¿A qué velocidad debe ir el automóvil para que la distancia de frenado sea menor a 2 metros?
b) ¿Cuál es la distancia de frenado que se necesita para una velocidad de 125 km/h?
c) Escribe una expresión algebraica que permita obtener la velocidad inicial del automóvil, en función de la distancia de frenado".

Con lo que aprendiste en el curso sobre la distancia de frenado, encuentra todos los errores de física que han cometido los autores de la actividad en los datos proporcionados.

Tema 7

Movimientos en dos dimensiones

Propósitos del tema 7

- El estudiante planteará soluciones prácticas a problemas referentes al movimiento de cuerpos en dos dimensiones, a partir del análisis funcional y la descripción de las características de dichos movimientos.

Hasta el momento hemos estudiado movimientos de cuerpos que se mueven sobre una trayectoria recta. En tales casos, para definir la posición del cuerpo se necesita solamente determinar su distancia a un punto de referencia y por eso estos movimientos se denominan ***movimientos en una dimensión***.

En este tema se analizarán movimientos cuyas trayectorias son curvas geométricas, como la ***parábola*** y el círculo.

7.1. Tiros parabólicos

La mayoría de los movimientos que conocemos ocurren sobre la superficie de la Tierra (o son movimiento en los que el móvil está en contacto con una superficie fija). Otra clase de movimientos son aquellos que ocurren en el aire. En algunos de ellos, los móviles (por ejemplo, los aviones o los pájaros), gracias al funcionamiento de un motor o a un esfuerzo muscular, "vencen" la fuerza de gravedad y se mantienen en el aire el tiempo conveniente.

En otros movimientos, tarde o temprano, el móvil termina en el suelo. Se trata del movimiento de objetos lanzados al aire que, al carecer de motor, pueden mantenerse en el aire solamente un tiempo limitado. Después del lanzamiento, esos objetos siguen una trayectoria ***parabólica***, cuya forma particular depende de las características de la velocidad inicial.

Figura 7.1. La trayectoria parabólica del agua lanzada por los bomberos.

La trayectoria parabólica caracteriza el movimiento de todos los cuerpos lanzados al aire, así se trate de un balón de básquetbol en un preciso tiro libre de tres puntos o del agua que sale a gran presión desde las mangueras de los bomberos que apagan un incendio (**Figura 7.1**).

Como se verá más adelante, la descripción completa de las trayectorias parabólicas requiere el uso de **dos ejes de coordenadas**. Por eso se dice que el movimiento parabólico es un movimiento en **dos dimensiones** o en un plano.

Figura 7.2. La forma de la trayectoria del proyectil como se imaginaba en la Edad Media.

Los cuerpos lanzados al aire se llaman ***proyectiles***. Su movimiento era especialmente importante para los militares, a quienes les interesaba saber cómo controlar mejor el lanzamiento y la trayectoria de las balas de cañón. Como no era posible observar con mucho detalle el movimiento de una bala de cañón, no debe sorprendernos que la "descripción" de su movimiento recibiera una gran influencia de las ideas teóricas que se tenían sobre los movimientos.

La concepción medieval de la trayectoria de los proyectiles estaba basada en las ideas de Aristóteles. El proyectil va en línea recta hasta que se pierde "la fuerza de lanzamiento". Cuando eso ocurre el proyectil ha alcanzado la altura máxima y después cae verticalmente hacia abajo (**Figura 7.2**).

El primero que logró tener una idea acertada sobre el movimiento de los proyectiles fue Niccolò Fontana Tartaglia (**Figura 7.3**). Tartaglia rechazaba la teoría aristotélica del movimiento de los proyectiles y afirmaba que su alcance máximo se debería obtener cuando el ángulo de lanzamiento fuera de 45°.

Fue Galileo Galilei quien sentó la base de la teoría moderna del movimiento de los proyectiles.

Figura 7.3. Niccolò Fontana Tartaglia (1499-1557).

Los grandes nombres de la física

Galileo Galilei

(Pisa, 1564 - Arcetri, Florencia, 1642)

Galileo Galilei (**Figura 7.4**) fue un astrónomo y físico italiano. Según muchos, es uno de los creadores del método moderno de la ciencia. Fue profesor de las universidades de Pisa y Padua. Descubrió que las oscilaciones de un péndulo duraban el mismo tiempo (1583) y construyó el primer termoscopio (1592). Formuló la ley de los tiros parabólicos y demostró que el movimiento sobre un plano inclinado es un movimiento uniformemente acelerado (1604-1609).

Figura 7.4. Galileo Galilei (1564-1642).

Mediante un telescopio, hecho por él mismo (1609), descubrió en 1610 las montañas lunares, las manchas solares, las lunas de Júpiter, las fases de Venus y algunas estrellas invisibles a simple vista.

En la obra *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano* (1632) introdujo el concepto de inercia y formuló el principio de relatividad de los movimientos. En esa obra, con muchos argumentos bien sustentados, abogó por la idea del sistema heliocéntrico, lo que lo llevó a la corte de la Inquisición (1633). Tuvo que renunciar públicamente a su postura copernicana y pasar el resto de su vida encerrado en su casa.

Galileo tuvo contacto con personas que se dedicaban a disparar y observar cómo se movían los proyectiles. A diferencia del conocimiento empírico de esas personas, Galileo fue capaz de penetrar conceptualmente en el problema del movimiento de proyectiles y entender por qué su trayectoria debe ser una parábola.

Galileo conocía la ley de la caída libre según la cual la distancia recorrida es proporcional al cuadrado del tiempo. También conocía el movimiento uniforme en el que la distancia recorrida es proporcional al tiempo.

Según Galileo, el movimiento de los proyectiles no puede ser otra cosa que la suma de estos dos movimientos, el primero en la dirección vertical y el segundo en la dirección horizontal.

La pregunta voladora

¿Cuáles son los dos movimientos simples en que se podría descomponer el movimiento de un cuerpo lanzado verticalmente hacia arriba?

El tiro horizontal

Ahora vamos a aplicar las ideas de Galileo para analizar el movimiento de un cuerpo que se lanza en la dirección horizontal. Este movimiento se conoce como el ***tiro horizontal***.

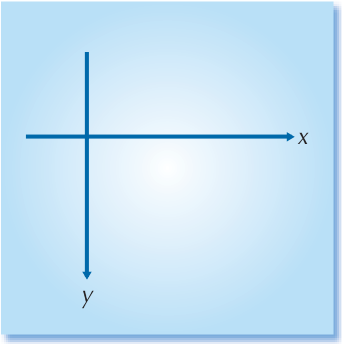


Figura 7.5. La selección de los ejes para describir el tiro horizontal.

Para simplificar la descripción cuantitativa y distinguir los dos movimientos simples, denominemos eje *x* al eje horizontal y eje *y* al eje vertical dirigido hacia abajo (**Figura 7.5**).

En la dirección hacia abajo, el cuerpo tiene que realizar un movimiento uniformemente acelerado sin velocidad inicial, que es la caída libre. Por eso, el cambio de la posición vertical *y* con respecto a la posición inicial (la distancia recorrida durante el tiempo *t*) se calcula mediante la fórmula conocida para la caída libre (en vez de la letra *d* se usa la letra *y*):

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

En la dirección horizontal se realiza un movimiento a velocidad constante igual a la velocidad inicial v_0 a la que se lanzó el proyectil. Por eso, la distancia recorrida en la dirección horizontal, con respecto a la posición inicial, es:

$$x = v_0 \cdot t$$

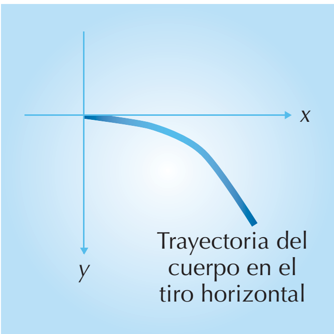


Figura 7.6. La forma parabólica de la trayectoria en el tiro horizontal.

Si no estuviera presente la fuerza de gravedad (que actúa en la dirección vertical), el movimiento del proyectil lanzado horizontalmente sería en la dirección horizontal a lo largo del eje *x*.

Si no hubiera velocidad inicial en la dirección horizontal, el cuerpo caería libremente hacia abajo a lo largo del eje *y*.

Pero como están presentes tanto la fuerza de gravedad como la velocidad en la dirección horizontal, el cuerpo tiene que moverse de tal manera que el movimiento resultante sea la suma de los dos movimientos mencionados. De cierto modo, el cuerpo trata de "satisfacer" simultáneamente las dos "demandas". En consecuencia, como se va a demostrar en seguida, la trayectoria tiene que tener la forma de una parábola (**Figura 7.6**).

Para encontrar la forma de la trayectoria en el plano *x*-*y*, hay que encontrar cómo depende la posición vertical (*y*) de la posición horizontal (*x*). La trayectoria es el conjunto de las posiciones (*x*, *y*) que tuvo el punto representativo del proyectil en los diferentes instantes del vuelo.

La dependencia funcional que nos interesa se puede encontrar si eliminamos el tiempo *t* de la ecuación para *y*. El tiempo *t*, en el que el proyectil estaba en la posición horizontal *x*, es:

$$t = \frac{x}{v_0}$$

Insertando esa expresión en la fórmula para la posición vertical *y*, se obtiene:

$$y = \frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{x}{v_0} \right)^2$$

$$y = \frac{g}{2 v_0^{\,2}} \cdot x^2$$

Esta dependencia de la posición vertical (*y*) con respecto al cuadrado de la posición horizontal (*x*) es la característica de una trayectoria parabólica.

¡Hagamos física!

El lanzamiento horizontal de dos pelotas de tenis

Propósito: Predecir, observar y explicar el comportamiento de dos pelotas de tenis lanzadas horizontalmente.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar experimento pertinente, valorar una preconcepción personal, aprender en equipo, practicar el aprendizaje autorregulado.

Figura 7.7. El lanzamiento de dos pelotas de tenis.

Material: Dos pelotas de tenis.

Forma tu equipo y consideren la siguiente situación:

En el mismo instante y desde la misma altura, se lanzan horizontalmente dos pelotas de tenis desde una ventana de un segundo piso (**Figura 7.7**), una de ellas a una velocidad grande y la otra a una velocidad pequeña.

1. **Las trayectorias de las pelotas**

En el espacio de abajo, dibuja las trayectorias de las dos pelotas, indicando claramente a qué pelota se refiere cada una.

Justifica detalladamente las diferencias entre las dos trayectorias.

___

___

Compara tu dibujo y justificación con los de tu equipo. Traten de llegar a un consenso.

Si tu dibujo o justificación difieren de lo que piensa la mayoría, describe tus argumentos.

___

___

2. **El tiempo en el aire**

De las predicciones de abajo que se refieren al tiempo en el aire, subraya la que te parezca correcta.

a) Ambas pelotas llegan al suelo en el mismo momento.
b) La pelota lenta cae primero al suelo.
c) La pelota rápida cae primero al suelo.

Describe detalladamente las razones de tu selección.

___

___

Discute con tus compañeros sus selecciones y justificaciones. Traten de llegar a una predicción y justificación compartidas.

¿Cuáles son la predicción y la justificación de tu equipo?

___

___

Si no estás de acuerdo con la mayoría del equipo, describe tus argumentos.

___

___

3. Realicen el lanzamiento horizontal de las pelotas de tenis, una a velocidad grande y la otra a velocidad pequeña, y observen con cuidado su "aterrizaje".
¿Cuál predicción se cumple?

____

4. Si la predicción del equipo (o la tuya propia) no se cumplió, ¿cómo se podría explicar la diferencia?

____

____

5. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

Problema resuelto

La altura de una torre medieval

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, reconocer y modificar prejuicios comunes.

Figura 7.8. El lanzamiento de la flecha desde una torre medieval.

Desde una torre medieval de paredes verticales se lanza horizontalmente una flecha a velocidad v_0 = 40 m/s (**Figura 7.8**).

La flecha llega al suelo a una distancia horizontal (desde el pie de la torre) igual a x = 100 m. ¿Cuál es la altura de la torre?

Solución: La altura de la torre es igual a la posición vertical de la flecha (con respecto a la posición inicial de lanzamiento) en el momento en que la flecha llega al suelo). Por eso vale:

$$y = \frac{g}{2\,v_0^2} \cdot x^2 = \frac{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \cdot \left(40\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} \cdot (100\text{ m})^2 = \frac{98{,}000\,\frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}}{3{,}200\,\frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}} = 30.6\text{ m}$$

Dar sentido al resultado: Es muy útil entender el movimiento de la flecha en términos del tiempo. ¿De cuánto tiempo dispone la flecha para moverse en la dirección horizontal, alejándose de la torre? Es el mismo tiempo que necesita la flecha para caer verticalmente desde la cima de la torre hasta el suelo. Como el movimiento componente en la dirección vertical es una caída libre, si la altura de la torre es H, entonces ese tiempo disponible es:

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

Aunque intuitivamente nos parece que ese tiempo debería aumentar si aumenta la velocidad inicial para, así, obtener una trayectoria más larga, no es así. El tiempo que permanece en el aire un proyectil lanzado horizontalmente *no depende* de la velocidad inicial, sino solamente de la altura desde la que se lanza. Todos los proyectiles lanzados horizontalmente desde la misma altura permanecen en el aire el mismo tiempo: el tiempo que dura la caída libre desde esa altura.

Lo que sí cambia con la velocidad inicial es el alcance horizontal.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Cuántas veces debería aumentar la altura de la torre para que el alcance horizontal sea **3 veces mayor**? ¿Cuántas veces debería disminuir la altura de la torre para que el alcance horizontal sea **dos veces menor**?

Problema resuelto

Los clavados en Acapulco

Competencia ejemplificada: Explicar un concepto científico en una situación cotidiana, aplicar modelos matemáticos.

Figura 7.9. Un salto desde La Quebrada en Acapulco.

Los valientes clavadistas que se lanzan al mar desde la roca *La Quebrada* son, tal vez, el más famoso icono turístico de Acapulco (**Figura 7.9**).

La altura de la roca es de 36 m. La roca no es vertical, sino inclinada, y al nivel del mar se aleja 6.4 m de la vertical. ¿Cuál es velocidad horizontal inicial que debe tener el clavadista para evitar una colisión con la roca al nivel del mar?

Solución: El clavadista, al nivel del mar, debe alejarse de la vertical, por lo menos, 6.4 m. Entonces, la posición horizontal al nivel del mar debe ser mínimamente:

$$x_{\text{mín}} = v_{0\,\text{mín}} \cdot t_{\text{aire}} = 6.4\,\text{m}$$

donde t_{aire} es el tiempo que transcurre entre el instante en que se lanza el clavadista hasta el instante en que comienza a entrar en el agua.

De esa fórmula se obtiene:

$$v_{0\ \text{mín}} = \frac{6.4\,\text{m}}{t_{\text{aire}}}$$

El tiempo t_{aire} es igual al tiempo que tarda un cuerpo en caída libre desde la altura y = 36 m:

$$t_{\text{aire}} = \sqrt{\frac{2\,y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 36\,\text{m}}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \sqrt{7.35\,\text{s}^2} = 2.7\,\text{s}$$

Conociendo el tiempo que tarda el clavadista en llegar al agua, se puede calcular la velocidad inicial en la dirección horizontal:

$$v_{0\,\text{mín}} = \frac{6.4\,\text{m}}{2.7\,\text{s}} = 2.37\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: Como a esta velocidad el clavadista entraría al mar casi tocando la roca, una velocidad horizontal segura debe ser mucho mayor.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si el clavadista se lanza con una velocidad horizontal que es dos veces más grande que la mínima (4.74 m/s), ¿cuáles serían su alejamiento (al nivel del mar) con respecto a la vertical y con respecto a la roca?

El tiro horizontal con un chorro de agua

La universalidad de los conceptos y las leyes de la física se revela en el hecho de que los mismos modelos matemáticos describen los movimientos de diferentes objetos.

Hasta el momento, hemos aplicado las ideas relacionadas con el tiro horizontal a los movimientos de pelotas de tenis, de una flecha y de un clavadista en Acapulco.

Figura 7.10. La trayectoria parabólica de un chorro de agua.

Las aplicaremos ahora a un chorro de agua que sale horizontalmente de una manguera (**Figura 7.10**).

La ventaja de esta situación es que el chorro de agua es capaz de "dibujar" muy visiblemente su trayectoria parabólica en el aire.

La desventaja es que no es fácil medir el tiempo que tarda un elemento de agua en viajar desde la salida de la manguera hasta el suelo. Pues se trata de un chorro continuo en el que no se puede ver cómo se mueven sus diferentes partes.

Sin embargo, conociendo la altura H de la salida de agua y el alcance horizontal D, es posible determinar la velocidad inicial v_0 en la dirección horizontal:

$$v_0^2 = \frac{g}{2H} \cdot D^2,$$

$$v_0 = D\sqrt{\frac{g}{2H}}$$

Esta fórmula se va a usar en la siguiente actividad para determinar la velocidad de lanzamiento de un chorro de agua.

Actividad práctica

¿A qué velocidad sale el chorro?

Propósito: Idear y realizar un experimento para determinar la velocidad del agua que sale de una manguera.

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente, aplicar modelos matemáticos, desarrollar pensamiento crítico y creativo, aprender en equipo.

Material: Una manguera conectada a una llave de agua, cinta métrica.

La tarea en esta actividad es determinar, usando la última fórmula, la velocidad de salida del agua lanzada horizontalmente por una manguera.

Es obvio que se tienen que medir

1. el alcance horizontal; y
2. la altura de la abertura de la manguera.

El alcance horizontal se debe medir para tres diferentes alturas (0.5 m; 1 m; 1.5 m).

Al tener los valores de y y x, se tiene que calcular el valor de la velocidad de salida. Todos los valores se deben anotar en la siguiente tabla:

La altura H de la abertura de la manguera (m)	El alcance horizontal D medido en el suelo (m)	Velocidad de lanzamiento v_0 (valor calculado) (m/s)
0.5		
1		
1.5		

a) Si los valores de la velocidad de lanzamiento difieren más de un 5%, hay que discutir las posibles causas de esas diferencias en los valores calculados.

b) ¿De qué manera se podría mejorar el experimento?

Tiro parabólico oblicuo

Ahora vamos a ver un movimiento más complicado que el tiro horizontal. Se trata del ***tiro parabólico oblicuo***.

Definición

El **tiro parabólico oblicuo** es el movimiento de un proyectil cuya velocidad inicial forma un ángulo con la dirección horizontal.

Es posible observar un ejemplo cotidiano de este tiro en las fuentes de agua (**Figura 7.11**).

En el tiro parabólico oblicuo, la dirección del lanzamiento es la dirección del vector de velocidad inicial $\vec{v}_0$. La velocidad inicial forma el ángulo α con la dirección horizontal (**Figura 7.12**).

Como por definición, $\frac{v_{0x}}{v_0} = \cos\alpha$, la componente horizontal de la velocidad inicial es:

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha$$

Tomando en cuenta que también vale $\frac{v_{0y}}{v_0} = \text{sen}\,\alpha$, la componente vertical de la velocidad inicial es:

$$v_{0y} = v_0 \text{sen}\,\alpha$$

Aplicando otra vez la idea de Galileo, el movimiento complejo se puede descomponer en dos movimientos más sencillos que ya conocemos:

1. un movimiento hacia arriba con velocidad inicial v_{0y}, que es un tiro vertical; y
2. un movimiento horizontal a velocidad constante v_{0x}.

Escogiendo la dirección positiva del eje y hacia arriba, la posición vertical y en el momento t sería:

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

La velocidad vertical en el momento t sería:

$$v_y = v_{0y} - gt$$

En la dirección horizontal, la posición en el momento t sería:

$$x = v_{0x}t$$

La velocidad en la dirección horizontal no cambia, siendo todo el tiempo igual a la velocidad inicial en la dirección horizontal:

$$v_x = v_{0x}$$

Figura 7.11. Los chorros en una fuente de agua.

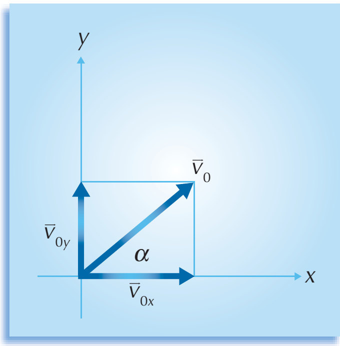


Figura 7.12. El vector de velocidad inicial en el tiro parabólico y sus componentes.

La pregunta voladora

¿Cuántos chorros de la figura 7.11 son ejemplos del tiro parabólico oblicuo?

La conexión con las matemáticas

Las fórmulas para la trayectoria del tiro parabólico

Competencia ejemplificada: Construir modelos matemáticos.

Como se ha hecho en el caso del tiro horizontal, para encontrar la fórmula que expresa cómo la posición vertical (y) depende de la posición horizontal (x) se tiene que eliminar el tiempo de la fórmula para la posición vertical. El tiempo transcurrido hasta que el proyectil llega a la posición horizontal x es:

$$t = \frac{x}{v_{0x}} = \frac{x}{v_0 \cos\alpha}$$

Insertando estas expresiones del tiempo en la fórmula para la posición vertical, se obtiene:

$$y = v_{0y} \cdot \left(\frac{x}{v_{0x}}\right) - \frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{x}{v_{0x}}\right)^2$$

$$y = v_0 \operatorname{sen}\alpha \cdot \frac{x}{v_0 \cos\alpha} - \frac{1}{2} g \cdot \frac{x^2}{v_0{}^2 \cos^2\alpha}$$

$$y = \tan\alpha \cdot x - \frac{g}{2v_0{}^2 \cos^2\alpha} \cdot x^2$$

Otra vez se tiene una expresión en la que y depende del cuadrado de x. Eso implica que la trayectoria que sigue el proyectil es una parábola.

El tiempo de vuelo y el alcance horizontal

El tiempo disponible que tiene el proyectil para alejarse en la dirección horizontal de la posición inicial ($x = 0$ y $y = 0$) se llama ***tiempo de vuelo***. Para ese tiempo se usa el símbolo t_{aire}. Como se ha visto en el caso del tiro vertical, ese tiempo es igual a la suma de dos tiempos: el tiempo de subida (t_s) y el tiempo de bajada. Para el caso del tiro parabólico, el tiempo de vuelo es:

$$t_{aire} = \frac{2v_0 \operatorname{sen}\alpha}{g}$$

En ese tiempo la posición vertical del proyectil vuelve a ser cero ($y = 0$). Si la posición de lanzamiento era el suelo, entonces, al pasar el tiempo t_{aire}, el proyectil regresa otra vez al suelo. En ese instante el proyectil tiene el alcance D:

$$D = v_0 \cos\alpha \cdot t_{aire}$$

$$D = v_0 \cos\alpha \cdot \frac{2v_0 \operatorname{sen}\alpha}{g}$$

$$D = \frac{v_0{}^2}{g} \cdot 2\operatorname{sen}\alpha \cos\alpha = \frac{v_0{}^2}{g} \operatorname{sen}2\alpha$$

Esa expresión cuantifica el alcance horizontal D para la velocidad inicial y el ángulo dados.

Para una velocidad inicial dada, el valor máximo del alcance se obtiene cuando sen 2α tiene su valor máximo que es 1. Como el seno de un ángulo es máximo cuando el ángulo es 90°, eso implica que $2\alpha = 90°$ o $\alpha = 45°$. Entonces, teóricamente, para una velocidad inicial dada, el máximo alcance horizontal se obtiene si el proyectil se lanza a un ángulo de 45° con respecto a la dirección horizontal.

El valor de ese alcance horizontal máximo $D_{máx}$ se calcula según la fórmula:

$$D_{máx} = \frac{v_0^2}{g} \operatorname{sen} 90° = \frac{v_0^2}{g}$$

El alcance vertical o la altura lograda H, para una velocidad inicial v_0 y un ángulo de lanzamiento α, es:

$$H = \frac{v_0^2 \operatorname{sen}^2 \alpha}{2g}$$

La pregunta voladora

¿Cuál sería el alcance vertical H cuando el ángulo de lanzamiento es de 45°, para el cual el valor del alcance horizontal es máximo $D_{máx}$?

¿Para cuál ángulo de lanzamiento el valor de alcance vertical tendría su valor máximo $H_{máx}$?

¿Cuál sería, en tal caso, el alcance horizontal?

Problema resuelto

Los saltos de los delfines

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En el parque acuático "Sea World" (Mundo Marino), en San Diego, un delfín salta con una velocidad inicial de 9 m/s cuya dirección forma un ángulo de 75° con la superficie del agua (**Figura 7.13**).

a) ¿Cuánto tiempo dura en el aire?
b) ¿Cuál es la altura que alcanza?
c) ¿Cuál sería la distancia que recorre en dirección horizontal?
d) ¿Cuál podría ser el máximo alcance horizontal?

Figura 7.13. Los delfines saltan en el "Sea World" (San Diego).

Solución: *a*) El tiempo en el aire es:

$$t_{aire} = \frac{2v_0 \operatorname{sen}\alpha}{g} = \frac{2 \cdot 9\,\frac{m}{s} \cdot \operatorname{sen}75°}{9.8\,\frac{m}{s^2}} = \frac{18\,\frac{m}{s} \cdot 0.966}{9.8\,\frac{m}{s^2}} = 1.77\text{ s}$$

b) La altura alcanzada es:

$$H = \frac{{v_0}^2 \operatorname{sen}^2\alpha}{2g} = \frac{\left(9\,\frac{m}{s}\right)^2 (0.966)^2}{2 \cdot 9.8\,\frac{m}{s^2}} = \frac{75.6\,\frac{m^2}{s^2}}{19.6\,\frac{m}{s^2}} = 3.86\text{ m}$$

c) La distancia que recorre el delfín saltador en la dirección horizontal es:

$$D = v_{0x} \cdot t_{aire} = v_0 \cos\alpha \cdot t_{aire} = 9\,\frac{m}{s} \cdot \cos 75° \cdot 1.77\text{ s} = 15.93\text{ m} \cdot 0.259 = 4.13\text{ m}$$

d) Si el ángulo del salto del delfín fuera de 45°, el alcance tendría su valor máximo:

$$D_{máx} = \frac{v_0^{\ 2}}{g} = \frac{\left(9\,\frac{m}{s}\right)^2}{9.8\,\frac{m}{s^2}} = 8.3\,m$$

Dar sentido al resultado: Para el cambio de ángulo de 75° a 45°, el alcance horizontal aumenta dos veces. Esto se debe al aumento de la velocidad inicial en la dirección horizontal. Ese cambio en la dirección disminuye la velocidad inicial en la dirección vertical. Por eso, disminuyen el tiempo de vuelo y la altura que alcanza el delfín.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Cuáles serían el tiempo de vuelo t_{aire} y la altura H para el ángulo de 45°?

Problema resuelto

Guillermo Tell perfora la manzana colocada sobre la cabeza de su hijo

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El grabado en madera (**Figura 7.14**), realizado por O. Schweitzer en 1698, es una de las muchas obras artísticas que representan la escena de mayor suspenso de la leyenda de Guillermo Tell.

La leyenda cuenta que Guillermo, para salvarse del cruel gobernador de Altdorf, Hermann Gessler, tenía que demostrar su habilidad como arquero atravesando con una flecha una manzana colocada sobre la cabeza de su hijo.

Figura 7.14. Guillermo Tell prepara el lanzamiento de la flecha.

Supón que la rapidez inicial de la flecha era de 55 m/s, que el muchacho (asustado) estaba a una distancia de 15 m, y que Guillermo se aseguró de que el punto de salida de la flecha estaría a la altura del muchacho. ¿Cuál tenía que ser el ángulo de lanzamiento?

Solución: Guillermo no puede realizar un tiro horizontal porque la flecha caería una distancia

$$y = \frac{g}{2v_0^{\ 2}}x^2 = \frac{9.8\,\frac{m}{s^2}\cdot(15\,m)^2}{2\cdot\left(55\,\frac{m}{s}\right)^2} = 0.36\,m$$

y eso sería mortal para su hijo.

Debe, entonces, realizar un tiro parabólico oblicuo, apuntando un poco por arriba de la posición de la manzana. Despejando sen2α de la expresión para el alcance D se tiene:

$$\text{sen}2\alpha = \frac{D\cdot g}{v_0^{\ 2}} = \frac{15\,m\cdot 9.8\,\frac{m}{s^2}}{\left(55\,\frac{m}{s}\right)^2} = 0.0486$$

El valor de 2α es:

$$2\alpha = \text{sen}^{-1}0.0486 = 2.78^{\circ}$$

Entonces, el ángulo de lanzamiento α debe ser 1.39°.

Dar sentido al resultado: Este pequeñísimo ángulo de lanzamiento es necesario para que la flecha atraviese la manzana en vez de que mate al hijo de Guillermo.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿A qué altura *H* se levanta la flecha con respecto a la horizontal?

Todas las características del tiro parabólico, como son el alcance horizontal *D*, la altura *H* y el tiempo de vuelo t_{aire}, están determinadas por los valores de dos cantidades: la magnitud de la velocidad inicial v_0 y el ángulo de lanzamiento α. Gracias a las relaciones matemáticas que existen entre las cantidades físicas que describen el tiro parabólico, si sabemos los valores de dos de esas cantidades es posible calcular los valores de las demás. Por ejemplo, conociendo las características geométricas de la trayectoria (el alcance horizontal *D* y la altura *H*) es posible calcular el ángulo de lanzamiento y la velocidad inicial.

Los dos problemas que siguen van a ilustrar esa posibilidad en dos contextos a primera vista muy diferentes.

Problema resuelto

El salto del "tigre de río"

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 7.15. El tigre de río en reposo.

El pez dorado (nombre científico *salmones*) es uno de los predadores más feroces. Por eso se le conoce como "tigre de río" (**Figura 7.15**).

Los biólogos que estudian su comportamiento han observado peces dorados dando saltos de 4 m de altura y 5 m de extensión.

a) ¿Cuáles son la rapidez inicial y el ángulo del salto?

b) ¿Cuál es el tiempo de vuelo?

Solución:

a) Dividiendo la expresión para la altura entre la expresión para el alcance horizontal se elimina una cantidad desconocida (v_0) y queda otra (el ángulo α):

$$\frac{H}{D} = \frac{\dfrac{v_0^2 \operatorname{sen}^2 \alpha}{2g}}{\dfrac{2v_0^2 \operatorname{sen}\alpha \cos\alpha}{g}} = \frac{1 \operatorname{sen}\alpha}{4 \cos\alpha} = \frac{1}{4}\tan\alpha$$

De aquí se obtiene:

$$\tan\alpha = 4\frac{H}{D} = 4\frac{4\text{ m}}{5\text{ m}} = 3.2$$

Este valor de la tangente implica que:

$$\alpha = \tan^{-1} 3.2 = 72.64^\circ$$

Conociendo el ángulo del salto y la altura alcanzada, se puede calcular el cuadrado de la velocidad inicial:

$$v_0^{\,2} = \frac{2gH}{\text{sen}^2\alpha} = \frac{2 \cdot 9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4\ \text{m}}{(0.9544)^2} = 86.07\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

y, en consecuencia, la velocidad inicial:

$$v_0 = \sqrt{86.07\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 9.3\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) El salto del "tigre de río" dura el tiempo:

$$t_{\text{aire}} = \frac{2v_0\text{sen}\alpha}{g} = \frac{2 \cdot 9.3\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.9544}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1.8\ \text{s}$$

Dar sentido al resultado: No está de más destacar que los datos relacionados con la forma de la trayectoria, que son la altura H y el alcance horizontal D, permiten inferir cuáles son los datos iniciales (la velocidad y el ángulo de lanzamiento).

Ahora te toca a ti aplicar el mismo procedimiento para inferir la velocidad inicial en un contexto diferente. Se trata de la Primera Guerra Mundial y de un cañón gigantesco.

Problema por resolver

El famoso cañón alemán "Gran Bertha"

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

En la Primera Guerra Mundial, los alemanes construyeron el cañón más grande del mundo, llamado *Gran Bertha*, cuyas dimensiones sobrepasaban por mucho las dimensiones de un cañón común de esa época (**Figura 7.16**). Lo usaron para bombardear París.

Los proyectiles del "Gran Bertha" tenían un alcance de 113 km y alcanzaban una altura de 39 km. El cañón se dejó de operar después de 65 tiros, porque los proyectiles llevaban solamente 7.5 kg de explosivo y su poder destructivo era muy bajo.

a) Calcula el valor teórico del ángulo de lanzamiento y la velocidad inicial que darían el alcance y la altura máxima.

b) Calcula el valor teórico del tiempo en el aire y compáralo con el valor experimental que era $t_{\text{aire}} = 170$ s.

c) ¿Qué tanto perturbaba la resistencia del aire el movimiento de los proyectiles?

Figura 7.16. Un cañón común en la época de la Primera Guerra Mundial.

Para el siguiente problema dejamos los dominios de la biología y la tecnología militar, y pasamos al deporte. Los datos iniciales ahora están combinados: uno se refiere a una propiedad geométrica de la trayectoria y el otro a la característica temporal del movimiento.

Problema resuelto

El ángulo y la velocidad inicial de un batazo en un juego de béisbol

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 7.17. Un batazo en un juego de béisbol.

En un juego de béisbol (**Figura 7.17**) un bateador manda la pelota de un batazo hasta el jardín izquierdo.

La pelota duró en el aire 5 segundos y fue atrapada por un jugador colocado a una distancia horizontal de 75 metros del plato.

a) ¿Cuál fue el ángulo con que salió disparada la pelota?
b) ¿Cuál fue la velocidad inicial?

Solución: El alcance horizontal es:

$$D = v_0 \cos\alpha \cdot t_{aire}$$

De aquí, la componente horizontal de la velocidad inicial es:

$$v_0 \cos\alpha = \frac{D}{t_{aire}} = \frac{75\text{ m}}{5\text{ s}} = 15\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El tiempo de subida t_s, que es la mitad del tiempo en el aire, es igual a:

$$t_s = \frac{v_0 \operatorname{sen}\alpha}{g} = \frac{t_{aire}}{2}$$

Esta ecuación implica que la velocidad inicial en la dirección vertical es:

$$v_0 \operatorname{sen}\alpha = g \cdot \frac{t_{aire}}{2} = 9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2.5\text{ s} = 24.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dividiendo la componente vertical de la velocidad inicial entre la componente horizontal se tendrá:

$$\frac{v_0 \operatorname{sen}\alpha}{v_0 \cos\alpha} = \frac{24.5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{15\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$\tan\alpha = 1.633$$

Ese valor del tangente corresponde al ángulo:

$$\alpha = \tan^{-1} 1.633 = 58.5^{\circ}$$

Al conocer al ángulo con que salió disparada la pelota se puede despejar la magnitud del vector de la velocidad inicial y obtener su valor:

$$v_0 = \frac{g t_{aire}}{2 \operatorname{sen}\alpha} = \frac{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{ s}}{2 \cdot 0.853} = 28.7\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: La pelota fue lanzada a una velocidad inicial mayor que 100 km/h (27.78 m/s).

El movimiento de los proyectiles y la resistencia del aire

Las fórmulas que hemos usado para calcular datos sobre el movimiento de los proyectiles asustan, sin duda alguna, a los que les tienen miedo a las matemáticas. Sin embargo, para los que se dedican profesionalmente a la ***balística*** esas mismas fórmulas son demasiado simples y no les ayudan mucho.

De hecho, esas fórmulas describirían correctamente el movimiento de los proyectiles solamente en el vacío (por ejemplo, en la Luna). La resistencia del aire, en el caso de los proyectiles terrestres, afecta considerablemente el movimiento y las fórmulas usadas dan solamente una descripción aproximada.

¿Qué tan buenas o malas son esas aproximaciones?

La respuesta depende de características como la velocidad inicial y el peso y la superficie del proyectil.

Si el proyectil es relativamente pesado y no se mueve a una gran rapidez, la aproximación puede ser bastante buena. Tal es el caso de una pelota de béisbol, cuyo alcance real no difiere mucho del alcance teórico.

Las aproximaciones no son muy buenas para los proyectiles ligeros y rápidos. Por ejemplo, una bala de rifle, de masa igual a 150 g, disparada a la impresionante rapidez de 600 m/s, tiene un alcance real de 4 km. Teóricamente, su alcance máximo debería ser casi diez veces mayor (alrededor de 40 km).

Como resultado, las fórmulas que no toman en cuenta la resistencia del aire y otros factores que afectan la trayectoria (temperatura y presión de aire, humedad, velocidad del viento y, en algunos casos, la rotación de la Tierra) no son útiles para quienes disparan los cañones. Experimentalmente se puede obtener la relación entre el ángulo y el alcance para condiciones estándar. Para todas las demás condiciones, las trayectorias se tienen que calcular tomando en cuenta cómo las condiciones particulares afectan la trayectoria. Los resultados de estos tediosos cálculos se juntan en las tablas balísticas. Para un ejército es crucialmente importante contar con buenas tablas balísticas porque de ellas depende la eficacia de su artillería. Como cada nuevo cañón requiere una nueva tabla balística, los militares buscaron siempre maneras de aumentar la rapidez de producción de las tablas. Esta necesidad fomentó el desarrollo de las calculadoras y de las computadoras.

La primera computadora digital, en el sentido moderno de la palabra, llamada ENIAC (**Figura 7.18**), tenía como tarea principal el cálculo rápido de las tablas balísticas para los nuevos cañones del ejército estadounidense. El diseño de ENIAC comenzó en 1943, durante la Segunda Guerra Mundial, y la computadora fue operativa en 1946.

Así, la búsqueda de soluciones a los diferentes problemas relacionados con el movimiento de los proyectiles abrió dos capítulos en el desarrollo de la física y la tecnología. La idea de la composición de los movimientos, que Galileo usó para demostrar que la trayectoria en el tiro horizontal es una parábola, marcó el inicio de la moderna teoría del movimiento.

La capacidad de ENIAC de calcular la trayectoria real de un proyectil en solamente 30 segundos fue la señal de que las computadoras iban a cambiar de modo sustancial no solamente la manera de hacer tablas balísticas, sino todo aquello que depende de la realización una gran cantidad de cálculos tediosos. Las primeras aplicaciones de ENIAC después de la guerra fueron los cálculos necesarios para la predicción del tiempo, la producción de energía atómica y las pruebas en los túneles de viento.

La raíz de las palabras

Balística

La palabra latina *balista*, derivada del griego *bállo* (arrojar), se usaba para referirse a una antigua máquina de guerra que servía para tirar piedras. De ella se derivaron el nombre en español *balista*, y también *ballista*, que es una máquina parecida a una ballesta muy grande. De la misma raíz provienen *bala* y *balística*, esta última usada para referirse a la ciencia del tiro.

La pregunta voladora

¿Cuál es el valor teórico del alcance máximo de una bala disparada con esa velocidad inicial?

Figura 7.18. ENIAC, la primera computadora, hacía cálculos balísticos.

La pregunta voladora

Una persona bien preparada necesitaba 20 horas para calcular con una calculadora una trayectoria balística de tiempo de vuelo igual a 60 segundos. ENIAC hacía los mismos cálculos en 30 segundos. ¿Cuántas veces más rápida era ENIAC?

7.2. Movimiento circular uniforme

La definición del **movimiento circular** es sencilla:

Definición

Un **movimiento circular** es aquel en el que el punto representativo del cuerpo traza una trayectoria circular.

La pregunta voladora

¿Qué otros ejemplos del movimiento circular conoces?

El movimiento circular abunda en nuestro mundo. Se observa en el movimiento de las manecillas de los relojes, en el de las llantas de los automóviles y en el centrifugado de las lavadoras. Lo ejecutan los caballitos de los carruseles y los martillos antes de ser lanzados (**Figura 7.19**).

Figura 7.19. El martillo, antes de ser lanzado, ejecuta un movimiento circular.

Periodo y frecuencia de un movimiento circular

Como el cuerpo regresa a la posición inicial y repite el movimiento, el movimiento circular es un ***movimiento periódico***. Para tales movimientos, las cantidades importantes son el periodo y la frecuencia.

Definición

El **periodo** es el intervalo que tarda el cuerpo en completar una vuelta a lo largo de la trayectoria circular.

A veces, en vez de saber cuántos segundos son necesarios para completar una vuelta, lo que es precisamente el periodo, se sabe cuántas vueltas se realizan en un segundo (o en otra unidad de tiempo). Esta última cantidad se llama ***frecuencia***.

Si el periodo es igual a un cuarto de segundo, entonces en un segundo se completan cuatro vueltas. Si el periodo es igual a cuatro segundos, en un segundo se logra recorrer solamente un cuarto de vuelta. Se ve que el periodo y la frecuencia son cantidades inversas.

Por eso, usando la letra T para el periodo y la letra f para la frecuencia, se tiene:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Como la unidad para el periodo es 1 s, la unidad para la frecuencia es $\frac{1}{s} = 1\,s^{-1}$. Esa unidad se llama hertz o hertzio y su símbolo es Hz.

Problema por resolver

El periodo y la frecuencia de las manecillas del reloj

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Cuáles son el periodo y la frecuencia del movimiento circular de:

a) el minutero (la manecilla que señala los minutos) y
b) el horario (la manecilla que señala las horas)?

Rapidez lineal

Como ya se ha dicho, el movimiento circular es un movimiento en dos dimensiones. Sin embargo, en un primer intento, se puede describir cuantificándolo mediante la determinación de la distancia recorrida a lo largo de la circunferencia.

Si las distancias recorridas en intervalos de tiempo iguales son iguales, se trata de un ***movimiento circular uniforme***.

En tal caso, no importa qué tan grande sea el intervalo considerado. Lo más sencillo es usar el ***periodo***.

Al completar una vuelta en una trayectoria circular de radio R, la distancia recorrida C es igual a la longitud de la circunferencia:

$$C = 2\pi R$$

Dividiendo la longitud de la circunferencia entre el periodo, se obtiene la **rapidez lineal**.

Definición

La **rapidez lineal** en el movimiento circular uniforme es igual a la distancia que recorre el cuerpo en la unidad de tiempo a lo largo de la circunferencia.

Simbólicamente, la rapidez lineal es igual a:

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

La unidad de la rapidez lineal, como la de cualquier rapidez, es 1 m/s.

Como $f = \frac{1}{T}$, la fórmula para la rapidez lineal se puede escribir también:

$$v = 2\pi \ f R$$

Problema resuelto

La rapidez lineal en una prueba de coches

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 7.20. El Ford GT.

En unas pruebas de movimiento circular realizadas en una pista de radio igual a 55 m, un coche deportivo Ford GT (**Figura 7.20**) necesitó cuando menos 14.34 s para recorrer la pista sin patinar.

a) ¿Cuál es la frecuencia correspondiente?
b) ¿Cuál es la rapidez lineal?

Solución:

a) La frecuencia es:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{14.39\text{ s}} = 0.069\text{ s}^{-1} = 0.070\text{ Hz}$$

b) La rapidez lineal es:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 55\,\text{m}}{14.39\,\text{s}} = 24\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: En un segundo el coche logra completar solamente 69 milésimas de una vuelta entera. La rapidez lineal de 24 m/s corresponde a 86.4 km/h.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si, con unas llantas milagrosas, el Ford GT pudiera recorrer la misma pista a una rapidez lineal de 48 m/s, ¿cómo serían el nuevo periodo y la nueva frecuencia?

En el movimiento circular uniforme se ve claramente la diferencia entre la rapidez, que es una cantidad escalar, y la velocidad instantánea, que es una cantidad vectorial.

En este caso, la rapidez es la magnitud del vector velocidad. Mientras que la rapidez se mantiene constante, la dirección del vector velocidad, que coincide con la dirección de la tangente a la trayectoria circular, cambia constantemente. En cada nueva posición, la dirección de la tangente es diferente y, en consecuencia, el vector de la velocidad es diferente, aunque su magnitud no cambie (**Figura 7.21**).

En este dibujo, se han representado los vectores velocidad para las posiciones del cuerpo en cuatro diferentes momentos. Se nota que el vector velocidad cambia constantemente, mientras que la rapidez, representada por la longitud de los vectores, no cambia. Si el cuerpo está recorriendo el círculo a una rapidez lineal constante de 5 m/s, cada segundo va a recorrer 5 m a lo largo de la circunferencia, pero la dirección de su movimiento siempre será diferente.

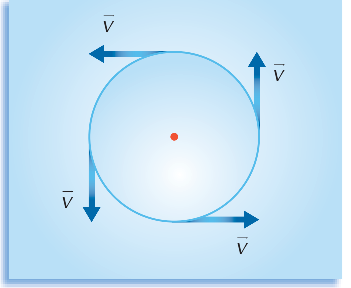


Figura 7.21. Los vectores que representan la velocidad en 4 diferentes posiciones del cuerpo en un movimiento circular.

Problema resuelto

La rapidez media en una pista circular

Competencias ejemplificadas:
Aplicar modelos matemáticos, valorar una preconcepción común.

En una pista circular para autos de carreras se llevan a cabo pruebas de dos vueltas. Si un coche que entrena recorre la primera vuelta a $v_1 = 150$ km/h y el conductor quiere lograr tener una rapidez media en las dos vueltas de $v = 200$ km/h, ¿qué rapidez media v_2 debería tener en la segunda vuelta?

Solución: Si los tiempos para la primera y segunda vuelta son t_1 y t_2, entonces el tiempo transcurrido en dos vueltas es $t = t_1 + t_2$. Siendo C la longitud de la pista circular, esos tiempos se pueden expresar mediante las rapideces medias:

$$t_1 = \frac{C}{v_1}$$

$$t_2 = \frac{C}{v_2}$$

La velocidad media en dos vueltas se obtiene al dividir la longitud total del camino recorrido ($2C$) entre el tiempo total t transcurrido en dos vueltas:

$$v=\frac{2C}{t}=\frac{2C}{t_1+t_2}=\frac{2C}{\frac{C}{v_1}+\frac{C}{v_2}}=\frac{2}{\frac{v_1+v_2}{v_1v_2}}=\frac{2v_1v_2}{v_1+v_2}$$

Multiplicando ambos lados por $(v_1 + v_2)$, se tiene:

$$vv_1 + vv_2 = 2v_1v_2$$

Despejando v_2 de esa ecuación, se llega a:

$$v_2=\frac{vv_1}{2v_1-v}=\frac{30{,}000\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2}{300\,\frac{\text{km}}{\text{h}}-200\,\frac{\text{km}}{\text{h}}}=300\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Dar sentido al resultado: Teniendo la idea errónea de que la velocidad media siempre es la mitad de la suma de la primera y la segunda velocidades, algunas personas piensan que la velocidad en la segunda vuelta debe ser 250 km/h.

$$\left(\frac{150\,\frac{\text{km}}{\text{h}}+250\,\frac{\text{km}}{\text{h}}}{2}=200\,\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$$

Esta manera de calcular la velocidad media daría el resultado correcto solamente si el tiempo empleado en cada vuelta hubiera sido el mismo. Como en la segunda vuelta la velocidad tiene que ser mayor, el tiempo empleado tiene que ser menor que el tiempo empleado en la primera vuelta. Por eso, en la segunda vuelta la velocidad debe ser 300 km/h y no 250 km/h.

La raíz de las palabras

Centrípeta

Proviene de la palabra *centripetus*, del latín moderno. Fue acuñada por Isaac Newton a partir de *centr-* y *petere*, caer, correr hacia, para referirse a una fuerza que empuja a un cuerpo hacia el centro de una trayectoria curva.

Aceleración centrípeta

Según la definición dada anteriormente, cuando hay un cambio del vector velocidad, ya sea en su magnitud o en su dirección, se tiene que hablar de aceleración. En este caso, la magnitud de la velocidad, que es la rapidez, no cambia, pero sí cambia la dirección de la velocidad. Por eso, el movimiento circular uniforme es un movimiento acelerado. La aceleración correspondiente se llama ***aceleración centrípeta*** y es una cantidad vectorial.

Definición

La **aceleración centrípeta** es la aceleración que caracteriza el cambio de la dirección de la velocidad en el movimiento circular uniforme.

La magnitud del vector de aceleración centrípeta es:

$$a=\frac{v^2}{R}$$

¿Cuáles son la dirección y el sentido del vector de aceleración centrípeta?

En cada instante el vector aceleración tiene la dirección del radio que va del centro del círculo al punto que representa la posición instantánea del cuerpo que gira. El sentido del vector de aceleración centrípeta es, en todo instante, hacia el centro de la trayectoria circular (**Figura 7.22**). Siendo así, en el movimiento circular uniforme, los vectores de velocidad y de aceleración son perpendiculares en todo instante de tiempo.

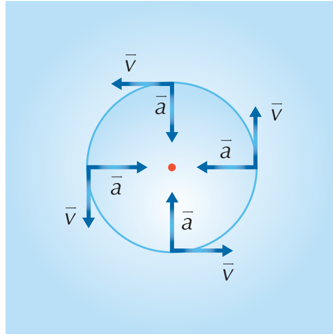


Figura 7.22. Las direcciones y sentidos de los vectores de aceleración en diferentes instantes.

Problema por resolver

La aceleración centrípeta del Porsche 911

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 7.23. El Porsche 911.

La prueba de movimiento en una pista circular de radio igual a 55 m se realiza para verificar cómo reaccionan las llantas de los coches a la aceleración centrípeta. Un Porsche 911 (**Figura 7.23**) puede moverse sobre la pista a rapidez de 88 km/h.

a) ¿Cuánto es esa rapidez expresada en m/s?
b) ¿Cuánto tarda el coche en dar una vuelta?
c) ¿Cuál es la aceleración centrípeta?
d) ¿Cuál es su valor expresado en términos de la aceleración de caída libre $g = 9.8$ m/s^2?
e) Si el Porsche 911 pudiera mantenerse, "por un milagro", en la misma pista circular a una rapidez doble (176 km/h), ¿cuáles serían el nuevo periodo y la nueva aceleración centrípeta?

A continuación tendremos más ejemplos de movimientos circulares. Aunque no parecen muy relacionados, vamos a analizar sus características cuantitativas usando las mismas fórmulas para los conceptos básicos del movimiento circular. Eso demuestra, una vez más, la universalidad de los conceptos de la física y de sus modelaciones matemáticas.

Problema resuelto

El movimiento circular del transbordador espacial

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El transbordador espacial (**Figura 7.24**) da vueltas alrededor de nuestro planeta en una trayectoria que es (aproximadamente) circular. El radio de su trayectoria es de 6,500 km (medido desde el centro de la Tierra). El tiempo que tarda en dar una vuelta es de 87 minutos.

a) ¿Cuál es la altura promedio de la nave espacial con respecto a la superficie terrestre?
b) ¿Cuál es su rapidez lineal?
c) ¿Cuál es su aceleración centrípeta?

Figura 7.24. El transbordador espacial.

Solución:

a) Como el radio de la trayectoria es R = 6,500 km y el radio de la Tierra es R_T = 6,370 km, la nave espacial anda a una altura:

$$h = R - R_T = 6{,}500\text{ km} - 6{,}370\text{ km} = 170\text{ km}$$

b) La rapidez lineal es:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 6{,}500{,}000\text{ m}}{87 \cdot 60\text{ s}} = 7{,}820\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 7.82\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$$

c) La aceleración centrípeta es:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{\left(7.82 \cdot 10^3\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{6.5 \cdot 10^6\text{ m}} = \frac{61.15 \cdot 10^6\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{6.5 \cdot 10^6\text{ m}} = 9.4\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: Aunque la nave espacial se mueve a una rapidez lineal muy grande, de 7.8 km/s, la aceleración centrípeta de 9.4 m/s^2 es casi igual a la aceleración de caída libre en la superficie de la Tierra (9.8 m/s^2). De hecho, la nave ejecuta un movimiento de "tiro horizontal" en el que la trayectoria parabólica se volvió circular.

Problema resuelto

El movimiento circular del segundero de un reloj de pulsera

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

Figura 7.25a. Un reloj de pulsera moderno.


Figura 7.25b. Un reloj de pulsera clásico con manecillas.

Los relojes de pulsera modernos son digitales (**Figura 7.25a**), es decir, dan la hora mediante dígitos que aparecen en una pantalla de cristal líquido. Los movimientos periódicos en que se basa la medición del tiempo no son visibles. En un reloj de pulsera clásico (**Figura 7.25b**), el interesado en saber la hora tiene que inferirla analizando la posición de las manecillas.

La única manecilla que se mueve visiblemente es el segundero. Su punta ejecuta un movimiento circular a rapidez constante.

a) ¿Cuáles son su periodo y frecuencia?
b) Si su longitud es de 1.5 cm, ¿cuál es la rapidez lineal de la punta?
c) ¿Cuál es su aceleración?

Solución:

a) Como el segundero da una vuelta completa en 60 s, su periodo es T = 60 s. Su frecuencia es:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{60\text{ s}} = 0.017\text{ Hz}$$

b) La rapidez lineal de la punta del segundero es:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.5\text{ cm}}{60\text{ s}} = 0.16\,\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

c) La aceleración centrípeta de la punta es

$$a=\frac{v^2}{R}=\frac{\left(0.16\ \dfrac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2}{1.5\ \text{cm}}=\frac{0.0256\ \dfrac{\text{cm}^2}{\text{s}^2}}{1.5\ \text{cm}}=0.017\ \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: La velocidad lineal de la punta es 5.76 m/h, es decir, en una hora la punta recorre una distancia de 5.76 m.

Movimiento circular de los puntos de la Tierra

La Tierra gira continuamente alrededor de su eje, con un periodo de 24 horas. La Tierra es una esfera enorme (**Figura 7.26**).

Su radio es de 6,370 km ($6.37 \cdot 10^6$ m) y a ese radio le corresponde una circunferencia de 40,000 km ($4 \cdot 10^7$ m). Por eso, la distancia que recorren los objetos que se encuentran en el ecuador es muy grande y, en consecuencia, la rapidez lineal no puede ser pequeña.

La rapidez lineal de un punto en el ecuador es:

$$v=\frac{2\pi R}{T}=\frac{2\cdot 3.14\cdot 6.37\cdot 10^6\ \text{m}}{24\cdot 60\cdot 60\ \text{s}}=\frac{40\cdot 10^6\ \text{m}}{8.64\cdot 10^4\ \text{s}}=463\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Figura 7.26. La esfera terrestre vista desde el transbordador espacial Endeavour.

La rapidez es enorme y corresponde a una rapidez de ¡1,667 km/h!

¿Cuál es la aceleración en este movimiento?

$$a=\frac{v^2}{R}=\frac{\left(4.63\cdot 10^2\ \dfrac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{6.37\cdot 10^6\ \text{m}}=\frac{2.15\cdot 10^5\ \dfrac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{6.37\cdot 10^6\ \text{m}}=0.034\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}=3.4\ \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

La pregunta voladora

¿Cómo explicarías que las personas que están en el ecuador no sientan, de ninguna manera, que se mueven a esa increíble rapidez?

Esta aceleración centrípeta es doscientas veces mayor que la aceleración de la punta del segundero. Otras características de estos dos movimientos circulares son también muy diferentes. No está de más enfatizar esas diferencias con números precisos.

Un punto en el ecuador tiene una rapidez lineal de 1,667 km/h, mientras que la punta de la manecilla tiene apenas una rapidez de 0.0576 km/h (28,941 veces menor).

El periodo de la Tierra es de 24 horas y el de la manecilla es de 1 minuto (1,440 veces menor).

El radio de la Tierra es de 6,370,000 m y la manecilla mide 0.015 m (es 425 millones veces menor).

¿Cómo se mueve un punto terrestre cuya distancia del eje de rotación es $R = 1.5$ cm, es decir, igual a la longitud del segundero?

Su rapidez lineal es:

$$v=\frac{2\pi\ R}{T}=\frac{2\cdot 3.14\cdot 1.5\ \text{cm}}{24\cdot 60\cdot 60\ \text{s}}=0.000109\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}=3.92\ \frac{\text{mm}}{\text{h}}$$

Esta vez, el segundero tiene una rapidez lineal que es 1,468 veces mayor.

La pregunta voladora

¿Dónde se encuentra el punto terrestre en consideración?

Descripción angular del movimiento circular

Como se vio en el último ejemplo, diferentes puntos de la Tierra, por estar a diferentes distancias del eje de rotación, se mueven a distintas velocidades lineales. Sin embargo, todos los puntos de la Tierra, sin importar sus distancias al eje de rotación, deben dar en un día una vuelta completa o, en otras palabras, girar un "ángulo completo" (de 360°). De tal manera, parece más práctico cuantificar el movimiento circular no mediante una distancia recorrida, sino mediante un ángulo de giro.

La medida del movimiento circular realizado será el ***desplazamiento angular***.

Definición

El **desplazamiento angular** de un cuerpo en el movimiento circular es igual al ángulo que gira su vector de posición en un intervalo de tiempo considerado.

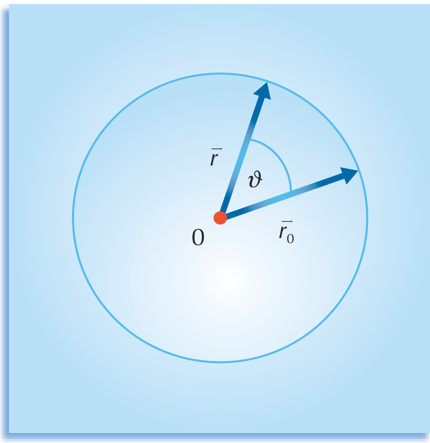


Figura 7.27. El desplazamiento angular en el movimiento circular.

El vector de posición en el movimiento circular tiene su origen en el centro de la trayectoria circular.

Si los vectores de posición del cuerpo en los instantes t_0 y t son, respectivamente, $\bar{r}_0$ y $\bar{r}$ (**Figura 7.27**), el ángulo entre estos dos vectores representa el ángulo que el vector de posición ha girado durante el intervalo de tiempo $(t - t_0)$.

Los ángulos se miden normalmente en grados, de tal manera que el ángulo completo tiene 360°. Un ángulo recto, que es la cuarta parte del ángulo completo, mide 90°.

Para los problemas del movimiento circular, es conveniente introducir otra unidad de ángulo, con la finalidad de poder relacionar las dos descripciones, la basada en la distancia recorrida y la basada en el ángulo de giro.

En el movimiento circular, a mayor distancia recorrida corresponde mayor desplazamiento angular. Esto sugiere la idea de medir y definir el ángulo mediante la longitud del arco. Para el ángulo completo, esta longitud es igual a la longitud de la circunferencia.

Si al desplazamiento angular θ (letra griega "theta") le corresponde la distancia recorrida *d* sobre la trayectoria circular de radio *R*, ese ángulo se puede cuantificar mediante la relación:

$$\theta = \frac{d}{R}$$

El desplazamiento angular es igual al cociente entre la distancia recorrida y el radio de la trayectoria circular.

Si el camino recorrido es igual a la circunferencia, entonces el ángulo es:

$$\theta = \frac{2\pi\ R}{R} = 2\pi$$

Definido así, el ángulo obviamente no se mide en grados, sino en otra unidad. Esta unidad se llama ***radián***. Su símbolo es ***rad***.

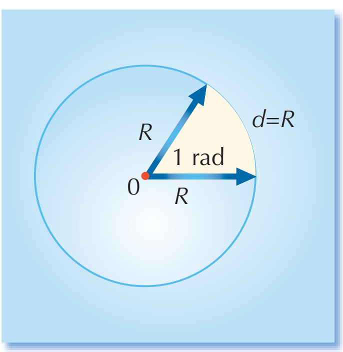


Figura 7.28. El desplazamiento angular de un radián.

Definición

Un desplazamiento angular de un **radián** ocurre cuando la distancia recorrida en el movimiento circular es igual al radio de la trayectoria circular (**Figura 7.28**).

Problema resuelto

La relación entre el grado y el radián

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En varias situaciones se necesita pasar de los grados a los radianes y viceversa. Por eso es útil responder a las preguntas:

a) ¿Cuántos grados corresponden a un radián?
b) ¿Cuántos radianes corresponden a un grado?

Solución:

a) De la igualdad 2π rad $= 360°$, se tiene:

$$1\,\text{rad} = \frac{360°}{2\,\pi} = \frac{180°}{\pi} \approx \frac{180°}{3.14} = 57.3°$$

b) De la igualdad $360° = 2\pi$ rad, se tiene:

$$1° = \frac{2\pi\,\text{rad}}{360} = \frac{\pi}{180}\,\text{rad} \approx \frac{3.14}{180}\,\text{rad} = 0.017\,\text{rad}$$

Dar sentido al resultado: Un radián tiene casi 60 grados. Por eso, un grado es aproximadamente igual (1/60) de un radián.

Problema resuelto

La relación entre la distancia recorrida y el desplazamiento angular

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un coche hace pruebas en una pista circular cuyo radio es de 55 m. ¿Cuál es el desplazamiento angular del coche, si el camino recorrido es de 110 m? Expresa el desplazamiento angular en radianes y en grados.

Solución: El desplazamiento angular (en radianes) es:

$$\theta = \frac{d}{R} = \frac{110\,\text{m}}{55\,\text{m}} = 2\,\text{rad}$$

En grados el desplazamiento angular sería:

$$\vartheta = 2\,\text{rad} \cdot \left(\frac{57.3°}{\text{rad}}\right) = 114.6°$$

Dar sentido al resultado: Como el camino recorrido es igual a dos radios, el desplazamiento angular es de 2 radianes. A esto corresponde un ángulo de casi 120 grados.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si el camino recorrido hubiera sido de 220 m, ¿cuál hubiera sido el desplazamiento angular en radianes y (aproximadamente) en grados?

Rapidez angular

La rapidez lineal representa el camino recorrido en la unidad de tiempo (normalmente, un segundo). Al describir el movimiento circular mediante el desplazamiento angular, es útil definir una cantidad análoga que va a cuantificar el desplazamiento angular que se realiza en la unidad de tiempo. Esta cantidad se llama ***rapidez angular***.

Definición

La **rapidez angular** es igual al desplazamiento angular realizado en la unidad de tiempo.

Para obtener la fórmula para la rapidez angular, supongamos un cuerpo en movimiento circular que realiza el desplazamiento angular θ durante el espacio de tiempo t. Entonces, de acuerdo a la definición, la rapidez angular se obtiene al dividir el desplazamiento angular entre el tiempo transcurrido:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

La unidad de la rapidez angular es el radián por segundo (rad/s).

Si el cuerpo da una vuelta completa, el desplazamiento angular es igual a 2π radianes y el tiempo transcurrido es igual al periodo T.

En tal caso, la rapidez angular es:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

En términos de la frecuencia $\left(f = \frac{1}{T}\right)$, la rapidez angular se expresa como:

$$\omega = 2\pi f$$

Problema resuelto

Rapidez angular de una lavadora

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

En las lavadoras modernas de carga frontal (**Figura 7.29**), cuando se está secando la ropa por centrifugado, el tambor da hasta 1,200 revoluciones por minuto (rpm).

a) ¿Cuál es la frecuencia de la rotación?
b) ¿Cuál es el periodo de la rotación?
c) ¿Cuál es la rapidez angular?
d) Si el radio del tambor es de 30 cm, ¿cuáles son la rapidez lineal y la aceleración centrípeta?

Figura 7.29. Una moderna lavadora de 1,200 rpm.

Solución:

a) Si el tambor de la lavadora da N = 1,200 vueltas en t = 60 s, entonces la frecuencia, igual al número de vueltas en un segundo, se obtiene como:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{1{,}200}{60\ \text{s}} = 20\frac{1}{\text{s}} = 20\ \text{Hz}$$

b) El periodo es:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20\frac{1}{\text{s}}} = 0.05\ \text{s}$$

c) La rapidez angular es:

$$\omega \ = 2 \quad f = 6.28\ \text{rad} \cdot 20\frac{1}{\text{s}} = 125.6\frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

d) La rapidez lineal es:

$$v = \frac{2\pi\ R}{T} = 2\pi\ Rf = 6.28 \cdot 0.3\ \text{m} \cdot 20\frac{1}{\text{s}} = 37.7\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La aceleración centrípeta es:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{\left(37.7\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0.3\ \text{m}} = \frac{1{,}421.3\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{0.3\ \text{m}} = 4{,}738\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: Los puntos del tambor se mueven a una rapidez lineal de 136 km/h. Su aceleración centrípeta es más de 480 veces mayor que la aceleración de caída libre.

Problema por resolver

Lo mismo y lo diferente de la diversión en un carrusel

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

Dos muchachas se divierten en un carrusel (**Figura 7.30**). Una eligió un caballito de la fila exterior (a 5 m del centro) y la otra uno en la fila interior (a 4 m del centro).

El carrusel da 5 vueltas en un minuto (5 rpm).

a) ¿Cuál es el periodo del carrusel?
b) ¿Cuál es su rapidez angular?
c) ¿Cuál es la velocidad lineal de cada muchacha?
d) ¿Cuáles son sus aceleraciones centrípetas?
e) Si el carrusel pudiera dar 10 vueltas en un minuto, ¿cómo cambiaría cada una de las cantidades consideradas?

Figura 7.30. La diversión en el carrusel.

La relación entre las cantidades lineales y angulares

El desplazamiento angular θ está relacionado con el camino recorrido *d* mediante la fórmula:

$$\theta = \frac{d}{R}$$

Despejando de aquí el camino recorrido, se obtiene:

$$d = R\theta$$

Entonces, si conocemos el desplazamiento angular, podemos calcular la distancia recorrida a lo largo de la trayectoria circular multiplicando el desplazamiento angular por el radio.

Una relación similar existe entre la rapidez angular y la rapidez lineal:

$$v = \frac{2\pi\ R}{T} = \frac{2\ \pi}{T} \cdot R = \omega R$$

Si se conoce la rapidez angular, la rapidez lineal se obtiene multiplicando la rapidez angular por el radio.

La aceleración centrípeta se puede expresar, también, mediante la rapidez angular:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{(R\omega)^2}{R} = \frac{R^2\omega^2}{R} = R\omega^2$$

Si se conoce la rapidez angular, la aceleración centrípeta se obtiene multiplicando el cuadrado de la rapidez angular por el radio.

Problema resuelto

Características de una centrifugadora

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

La centrifugadora PowerSpin HX (**Figura 7.31**) sirve para separar de manera limpia y completa los componentes celulares de un suero o plasma.

La centrifugadora opera a una rapidez angular fija de 3,400 rpm y los extremos más alejados del eje de rotación de sus 6 tubos tienen una aceleración centrípeta que es 1,680 veces mayor que la aceleración de caída libre.

a) ¿Cuál es la rapidez angular de la centrifugadora expresada en rad/s?
b) ¿Cuál es la distancia del extremo de los tubos al eje de rotación?
c) ¿A qué velocidad lineal se mueven esos extremos?

Figura 7.31. La centrifugadora PowerSpin HX.

Solución:

a) Según la definición, la rapidez angular es igual al cociente entre el desplazamiento angular realizado y el tiempo transcurrido:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Como la centrifugadora da N = 3,400 vueltas en t = 1 min = 60 s, realizando en cada vuelta un desplazamiento angular de 2π rad, su rapidez angular es:

$$\omega = \frac{N \cdot 2\pi \text{ rad}}{t} = \frac{3{,}400 \cdot 6.28 \text{ rad}}{60 \text{ s}} = 356 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

b) Al despejar R de la relación entre la aceleración centrípeta y la rapidez angular ω se tiene:

$$R = \frac{a}{\omega^2} = \frac{1{,}680 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\left(356 \frac{1}{\text{s}}\right)^2} = \frac{16{,}464 \text{ m}}{126{,}736} = 0.13 \text{ m} = 13 \text{ cm}$$

c) La velocidad lineal es:

$$v = R\omega = 0.13 \text{ m} \cdot 356 \frac{1}{\text{s}} = 46.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: La rapidez angular se expresa en rad/s solamente cuando se necesita tomar en cuenta su carácter angular. Como es el cociente de dos longitudes, el ángulo en radianes no tiene unidad física. Cuando se utiliza en el cálculo de cantidades lineales, la unidad de la rapidez angular es 1/s, como la de la frecuencia. De hecho, su otro nombre es ***frecuencia angular*** (el número de ángulos de 1 rad recorridos en un segundo).

La velocidad lineal de los extremos de los tubos es casi de 170 km/h. Si la centrifugadora funciona una hora y media, en ese tiempo los extremos de los tubos recorren ¡255 km!

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Los tubos tienen una longitud de 11 cm y durante la rotación están en posición horizontal. ¿Cuáles son la rapidez lineal y la aceleración centrípeta de los extremos de los tubos más cercanos al eje de rotación?

Problema por resolver

Aceleraciones centrípetas de un ventilador de techo

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

Un ventilador de techo (**Figura 7.32**) tiene dos diferentes valores de rapidez angular: la rapidez angular baja de 150 rpm y la alta de 450 rpm. Sus aspas tienen longitud R = 0.70 m.

a) ¿Cuál es la rapidez angular baja en rad/s?
b) ¿Cuál es la rapidez lineal de las puntas de las aspas (los puntos más alejados del eje de la rotación)? ¿Cuántos kilómetros recorren estos puntos en una hora a rapidez angular baja?
c) ¿Cuál es la aceleración centrípeta de las puntas?
d) Cuando el ventilador pasa de 150 rpm a 450 rpm, ¿cómo cambian la rapidez lineal, la distancia recorrido en una hora y la aceleración centrípeta?

Figura 7.32. Un ventilador de techo.

La búsqueda del conocimiento

El movimiento circular de los voladores de Papantla

Competencias a practicar: Obtener información para responder una pregunta, relacionar las expresiones simbólicas de un fenómeno con sus características observables.

En Papantla (estado de Veracruz), los indígenas totonacas realizan un antiguo ritual. Cuatro voladores y un sacerdote suben, uno por uno, a un poste de 30 metros de altura. Una vez arriba, el sacerdote comienza a bailar en un marco de madera, tocando música con una flauta y un tambor. Los voladores, que representan a **los cuatro elementos y los cuatro puntos cardinales**, se lanzan de cabeza al vacío con los brazos abiertos pendiendo de cuerdas atadas a sus cinturas (**Figura 7.33**).

Figura 7.33. Los voladores de Papantla comienzan su descenso.

Cada volador desciende lentamente dando exactamente 13 vueltas, que corresponden a los 13 meses del calendario maya. El total de vueltas ejecutadas por los cuatro voladores simboliza los 52 años del ciclo cósmico prehispánico, al comienzo del cual nace un nuevo sol y la vida vuelve a florecer.

La danza y el descenso espectacular de los voladores, que atraen muchos turistas a Papantla y a otros lugares donde se practican, fueron declarados en el año 2009 parte del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO.

Busca en www.youtube.com uno de los videos de los voladores y obsérvalo con cuidado. Después elige las mejores alternativas para completar la afirmación (de opción múltiple) que sigue:

Al descender, la velocidad lineal de los “hombres–pájaros”

a) aumenta *b*) queda igual *c*) disminuye

mientras su velocidad angular

a) aumenta *b*) queda igual *c*) disminuye

Describe detalladamente tu razonamiento.

7.3. Movimiento circular uniformemente acelerado

Hasta el momento hemos estudiado el movimiento circular uniforme, en el que la velocidad lineal y la velocidad angular no cambian. Si la velocidad angular no es constante, hay que introducir, en analogía con lo que se hace para el movimiento lineal, el concepto de aceleración angular.

Supongamos que en el instante $t_0 = 0$ la velocidad angular es ω_0, y en el instante t la velocidad angular es ω.

La aceleración angular media α es:

$$\text{aceleración angular} = \frac{\text{cambio de velocidad angular}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

Simbólicamente, esto se escribe como:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\omega - \omega_0}{t}$$

La unidad de la aceleración angular es 1 rad/s^2.

Problema resuelto

Aceleración angular de un tocadiscos

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

Figura 7.34. Un tocadiscos.

Un tocadiscos (**Figura 7.34**) alcanza su velocidad garantizada de 33.3 rpm en 1.7 s, comenzando desde el reposo.

¿Cuál es la aceleración angular promedio durante este tiempo, expresada en rad/s^2?

Solución: Como el tocadiscos comienza a girar desde el reposo, la rapidez angular inicial ω_0 es cero. De tal manera, la aceleración angula media es:

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

donde ω es la rapidez angular requerida para una buena reproducción (33 rpm), y t es el tiempo de aceleración.

La rapidez angular de 33 rpm corresponde a:

$$\omega = \frac{33 \cdot 2 \quad \text{rad}}{60\ \text{s}} = \frac{33 \cdot 6.28\ \text{rad}}{60\ \text{s}} = 3.45\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Con ese valor de la rapidez angular, la aceleración angular del tocadiscos es:

$$\alpha = \frac{3.45\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1.7\ \text{s}} = 2.03\ \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: La rapidez angular es tal que el tocadiscos da un poco más de media vuelta por segundo. Durante el periodo de aceleración, la rapidez angular aumentó 2 rad/s cada segundo.

Al despejar ω en la fórmula de la aceleración angular se obtiene la fórmula para la velocidad angular:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

Esta fórmula permite predecir el valor de la rapidez angular después del tiempo t si se conocen la velocidad angular inicial y la aceleración angular.

Problema por resolver

Aceleración angular de una licuadora

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana.

Una licuadora (**Figura 7.35**) tiene una rapidez angular sin carga de 12,800 rpm.

Al terminar un licuado a rapidez angular de 7,800 rpm, la licuadora se apaga y sus aspas, frenadas por el licuado, se detienen por completo en 3 s.

a) ¿Cuál es la aceleración angular media durante el frenado?
b) Si el tiempo de frenado fuera de 6 s, ¿cuál sería la aceleración angular media durante el frenado? Si el tiempo de frenado fuera de 1 s, ¿cuál sería la aceleración angular media durante el frenado?

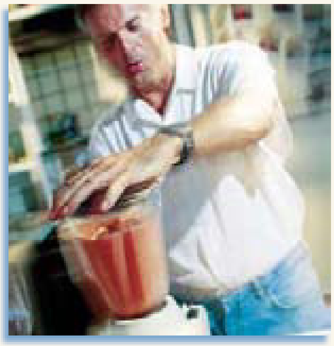


Figura 7.35. La licuadora del problema.

Si la aceleración angular es constante, el desplazamiento angular, de manera similar a lo que se tiene para el movimiento rectilíneo, sería:

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

Problema resuelto

Rotación acelerada de un rotor

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

La velocidad angular del rotor de una centrifugadora aumenta de 300 rad/s a 1,200 rad/s en 5 segundos.

a) ¿Cuáles son las velocidades angulares inicial y final en rpm?
b) ¿Qué tan grande es la aceleración angular?
c) ¿Cuál fue el desplazamiento angular?

Solución:

a) La velocidad angular inicial es:

$$\omega_0 = 300\frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot \frac{60\text{ s}}{\text{min}} \cdot \frac{\text{rev}}{2\pi\text{ rad}} = 2{,}866\frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

La velocidad angular final es:

$$\omega = 4\omega_0 = 4 \cdot 2{,}866\frac{\text{rev}}{\text{min}} = 11{,}464\frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

b) La aceleración angular es:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{1{,}200\frac{\text{rad}}{\text{s}} - 300\frac{\text{rad}}{\text{s}}}{5\text{ s}} = \frac{900\frac{\text{rad}}{\text{s}}}{5\text{ s}} = 180\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

c) El desplazamiento angular durante el movimiento circular acelerado fue:

$$\vartheta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2 = 300\,\frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 5\text{ s} + 0.5 \cdot 180\,\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}(5\text{ s})^2 = 1{,}500\text{ rad} + 90\,\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot 25\text{ s}^2 = 3{,}750\text{ rad}$$

Dar sentido al resultado: Cada segundo la velocidad angular aumentó 180 rad/s o casi 29 rev/s. Durante el intervalo de aceleración, el rotor dio 597 vueltas completas.

Física en la vida cotidiana

La velocidad angular de los "portadores de sonido"

Competencia ejemplificada: Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad.

Los discos para los primeros gramófonos (tocadiscos) (**Figura 7.36**) eran de 78 rpm y contenían solamente una canción. Después aparecieron los discos de 45 rpm que contenían normalmente 2 canciones, una por lado. Los discos más grandes, los de larga duración, eran de 33.3 rpm y contenían 10 o más canciones.

En el año 1980 la tecnología de grabación y reproducción de la música experimentó una verdadera revolución. La grabación del sonido pasó de la era analógica a la era digital, en la que la información musical se transforma y graba mediante secuencias de ceros y unos. Los "portadores de sonido" son ahora los discos compactos (CD, por *Compact Disc*, su nombre en inglés) (**Figura 7.37**). La información digital es "leída" por un rayo láser en los reproductores de discos compactos y el aparato la transforma otra vez en sonido.

Los discos compactos, aparte de ser de menor tamaño y de que permiten la reproducción de música con mayor fidelidad, tienen otras diferencias con respecto a sus antecesores. Mientras que para tocar los antiguos discos se mantenía constante la velocidad angular, para tocar los discos compactos lo que se mantiene constante es la velocidad lineal a la que el rayo láser lee los datos digitales. Esta velocidad está entre 1.2 y 1.4 m/s.

En la pista más cercana al centro de un disco compacto, que es en la que normalmente comienza la lectura, la rapidez angular es de 500 rpm u 8.33 vueltas por segundo. Al llegar a la pista más lejana al centro de disco, la rapidez angular ha disminuido a 200 rpm o 3.33 vueltas por segundo.

Figura 7.36. Un gramófono antiguo y sus discos.

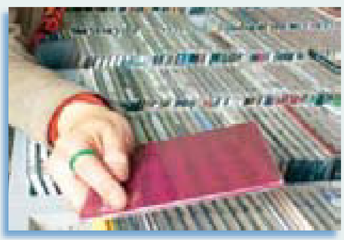


Figura 7.37. Los discos compactos han revolucionado el mundo de la música.

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, pensar creativamente.

¿Cuántos segundos necesitaban los antiguos discos de 45 rpm y 33.3 rpm para dar una vuelta completa?
¿De qué manera calcularías la aceleración angular de un disco compacto de música?

Demostrar las competencias

Verificar la comprensión de los conceptos científicos

1. ¿Cuál de los objetos mencionados abajo va a realizar un movimiento de proyectil (en dos dimensiones)?

a) Un balón de básquetbol lanzada hacia la canasta.

b) Una nave espacial, lejos de todos los cuerpos celestes, después de apagar sus motores.

c) Una bala disparada por una pistola.

d) Un paquete que se deja caer desde un globo que asciende verticalmente a rapidez constante.

e) Una pelota de béisbol en un batazo de jonrón.

2. Se lanza una piedra horizontalmente desde el borde de una barranca de 20 m de altura con una velocidad inicial de 10 m/s. Una segunda piedra se deja caer simultáneamente desde el borde de la barranca. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es la verdadera?

a) Ambas chocan con el suelo con la misma velocidad.

b) Las dos llegan al suelo con la misma rapidez.

c) Durante el vuelo, es igual el cambio de la velocidad de ambas piedras.

d) Durante el vuelo, es igual el cambio de la rapidez de ambas piedras.

3. Una pelota de béisbol, después de ser golpeada por un bateador, viaja hacia el jardín central. La aceleración de la pelota durante el vuelo:

a) Es la misma durante todo el trayecto.

b) Depende de si la pelota va hacia arriba o hacia abajo.

c) Es máxima en el punto más alto de la trayectoria.

d) Depende de cómo se le pegó.

4. Dos pelotas se lanzan horizontalmente, desde un edificio alto y al mismo tiempo, una con velocidad v_0 y la otra con velocidad $v_0/2$.

a) La pelota con velocidad inicial v_0 llega primero al suelo.

b) La pelota con velocidad inicial $v_0/2$ llega primero al suelo.

c) Ambas pelotas llegan al suelo al mismo tiempo.

d) No se puede saber cuál llega primero si no se conoce la altura del edificio.

5. Un vehículo viaja por una pista circular a rapidez constante.

a) Su aceleración es cero.

b) Su aceleración es constante.

c) Tanto *a*) como *b*) son correctos.

d) Ni *a*) ni *b*) son correctos.

6. Un automóvil de carreras da una vuelta en una pista circular de 500 m de radio en un tiempo de 50 s. La velocidad media del carro es

a) cero;

b) 100 m/s;

c) 200 m/s;

d) ninguna de las anteriores.

Para cada una de las siguientes afirmaciones, subraya (V) si es verdadera o (F) si es falsa.

7. Cuando un proyectil alcanza su altura máxima, su velocidad es cero. (V) (F)

8. Cuando un proyectil alcanza su altura máxima, su aceleración es diferente de cero. (V) (F)

9. La velocidad horizontal de un proyectil no cambia durante el vuelo. (V) (F)

10. La velocidad vertical de un proyectil no cambia durante el vuelo. (V) (F)

11. Si un proyectil en 2 segundos viajó 2 m en la dirección horizontal, también viajó 2 m en la dirección vertical. (V) (F)

Ordenar información de acuerdo con categorías, jerarquías y relaciones

12. Haz una lista de los conceptos estudiados en este tema. Elabora con ellos un mapa conceptual. Compara tu mapa con los de tus compañeros.

Aplicar modelos matemáticos

13. En un duelo de película, un pistolero dispara horizontalmente una bala con una velocidad de 200 m/s desde una altura de 1.5 m. Calcula la distancia mínima entre los dos adversarios para que la presunta víctima no sea alcanzada (los adversarios están situados al mismo nivel, en la calle principal del pueblo).

14. Una flecha es lanzada con una rapidez inicial de 18 m/s. Si debe dar en un blanco que está a 31 m de distancia y a la misma altura que el punto de lanzamiento, ¿con qué ángulo debe dispararse?

15. En una competencia de atletismo, el mejor salto largo es de 8.20 m. Si el competidor despegó con un ángulo de 37º con la horizontal, ¿qué rapidez inicial tenía?

16. Una manguera de bomberos lanza agua a la velocidad de 26 m/s y con un ángulo de 35°. ¿Cuál es el alcance? ¿Cuál es la altura máxima con respecto al punto de lanzamiento? Si se lanzan 260 litros de agua cada minuto, ¿cuánta agua hay en el chorro parabólico?

17. ¿Es posible lanzar una flecha con un alcance de 400 m? ¿Y de 900 m?

18. Una bicicleta con ruedas de 75.0 cm de diámetro viaja a una velocidad de 12.0 m/s. ¿Cuál es la velocidad angular de las ruedas de la bicicleta?

19. Si la máxima aceleración centrípeta es de 9 m/s^2, ¿cuál es la rapidez máxima a que puede viajar un automóvil en una curva horizontal de 130 m radio?

20. La Luna se mueve en una órbita casi circular alrededor de la Tierra. El radio promedio *R* de la órbita es 3.84 • 10^8 m. Si la Luna tarda 27.3 días para completar una revolución, ¿cuál es la rapidez lineal en m/s y en km/h?

21. Una estación espacial está en órbita circular alrededor de la Tierra a una altura *h* de 500 km. Si la estación da una vuelta cada 95 minutos, ¿cuáles son *a*) la rapidez orbital y *b*) la aceleración centrípeta?

22. Encuentra la velocidad angular en radianes por segundo de un antiguo disco de 33 rpm.

23. La hélice de un helicóptero gira a 200 rpm. ¿Cuál es el valor de la rapidez angular en radianes por segundo? Si el diámetro de la hélice es de 5.0 m, ¿cuál es la velocidad lineal de la punta del aspa?

24. Un gran reloj de pared de una estación de trenes tiene un segundero de 1.0 m de longitud. Suponiendo que la manecilla gira uniformemente, ¿cuáles son la magnitud, la dirección y el sentido del vector que representa la velocidad de su punta, precisamente 15 segundos después del mediodía?

25. Una centrifugadora de laboratorio opera con una rapidez angular de 12,000 rpm. *a*) ¿Qué magnitud tiene la aceleración centrípeta de un glóbulo rojo que está a una distancia radial de 8.00 cm del eje de rotación de la centrífuga? *b*) Compara esa aceleración con la aceleración de caída libre.

¡No creas todo lo que lees!

La posición y la velocidad de un atleta

Competencias a practicar: Explicitar conceptos científicos en una situación cotidiana, pensar críticamente al evaluar los resultados.

En un libro de texto de física se presenta a los estudiantes el siguiente problema:

Teniendo una rapidez inicial de 11.0 m/s, un atleta de salto de longitud se despega del suelo a un ángulo de 19 grados. *a*) ¿En qué posición se encuentra a los 0.2 s? *b*) ¿Qué es la magnitud de su velocidad en ese instante?

El texto de problema está acompañado de una figura similar a la **Figura 7.38**.

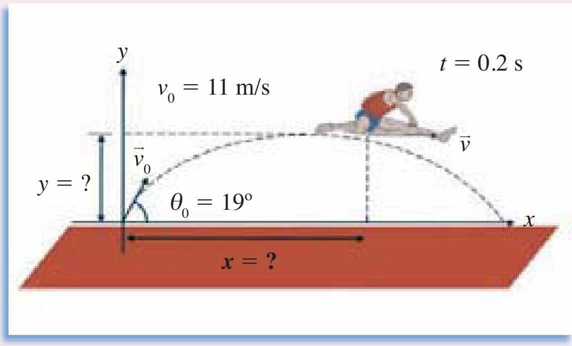


Figura 7.38. La visualización del salto de un atleta.

a) Calcula el tiempo de subida para esta situación, usando la fórmula:

$$t_s = \frac{v_0 \text{ sen } 19^\circ}{g}$$

En ese tiempo el atleta logra su máxima altura. Su velocidad vertical (v_y) se vuelve cero y su velocidad instantánea coincide con la velocidad horizontal (v_x).

b) Compara el valor del tiempo de subida con el tiempo mencionado en el problema (0.2 s).
Según esa relación, ¿en qué punto de la trayectoria debería encontrarse "el centro del atleta" en el momento 0.2 s?

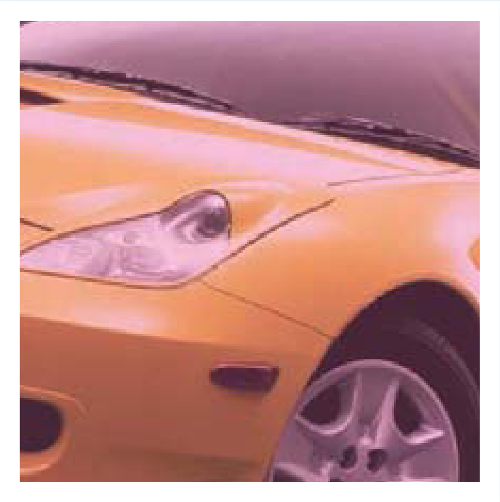
- en un punto anterior al punto de altura máxima;
- en el punto de altura máxima.
- en un punto posterior al punto de altura máxima.

¿Representa el dibujo correctamente la posición del atleta?

c) ¿Puede el vector de velocidad del atleta, en el punto que corresponde a 0.2 s, tener dirección horizontal?

BLOQUE 3

Las leyes de Newton y su utilidad práctica



Unidades de competencia

1. Analizar las leyes de Newton para explicar el movimiento de los cuerpos.
2. Utilizar las leyes de Newton para resolver problemas relacionados con los movimientos observables en el entorno.

Los temas del bloque

8. Las fuerzas y su clasificación
9. Las leyes de Newton y sus aplicaciones
10. Las leyes de Kepler y la ley de la gravitación universal

Indicadores de desempeño

- ✔ Relatar momentos trascendentales de la historia del movimiento mecánico.
- ✔ Describir la división de la mecánica para analizar el movimiento de los cuerpos.
- ✔ Expresar de manera verbal y escrita las tres leyes de Newton.
- ✔ Analizar e interpretar las leyes de Newton en el movimiento de los cuerpos.
- ✔ Reconocer la diferencia de los conceptos fuerza, masa y peso de los cuerpos.
- ✔ Utilizar modelos matemáticos para resolver problemas de las Leyes de Newton.
- ✔ Describir y aplicar la ley de gravitación universal.
- ✔ Derivar la relación entre el factor de peso **g** en la superficie de la Tierra y el radio y la masa terrestres.
- ✔ Utiliza modelos matemáticos para resolver problemas relacionados con la Ley de gravitación universal.
- ✔ Describir las Leyes de Kepler.
- ✔ Ejemplificar las Leyes de Kepler en el movimiento de los planetas.

Conocimientos

- ✔ Describir los antecedentes históricos del estudio del movimiento mecánico (Aristóteles, Galileo Galilei, Isaac Newton).
- ✔ Definir las tres leyes de Newton del movimiento (ley de la inercia, ley de la fuerza y aceleración y ley de la acción y reacción), y emplearlas en la solución de problemas y en la explicación de situaciones cotidianas.
- ✔ Conocer y aplicar la ley de gravitación universal.
- ✔ Conocer y aplicar las leyes de Kepler.

Habilidades

- ✔ Analizar los procesos históricos del movimiento mecánico propuesto por Aristóteles, Galileo Galilei, Isaac Newton, y hacer una comparación entre ellos.
- ✔ Comprender la división de la mecánica para describir el movimiento de los cuerpos.
- ✔ Comprender y diferenciar los conceptos de la física involucrados en el estudio de las causas que originan el movimiento de los cuerpos (masa, peso, inercia, fricción, fuerza).
- ✔ Analizar la ley del cuadrado inverso.
- ✔ Expresar de manera verbal y escrita la Primera Ley de Newton.
- ✔ Definir y emplear los conceptos fuerza, masa, peso y volumen de los cuerpos.
- ✔ Relacionar la condición de equilibrio con la primera ley de Newton.
- ✔ Demostrar que la fuerza causa una aceleración.
- ✔ Diferenciar una fuerza de fricción estática de una fuerza de fricción cinética.
- ✔ Expresar de manera verbal y escrita la Tercera ley de Newton.
- ✔ Identificar en situaciones cotidianas las fuerzas de acción y fuerzas de reacción.
- ✔ Utilizar modelos matemáticos para resolver problemas relacionados con la Segunda y Tercera leyes de Newton.
- ✔ Aplicar la ley de gravitación universal, para resolver problema que involucren la atracción de los cuerpos en el Universo.
- ✔ Describir cómo se logra poner en órbita un satélite artificial alrededor de la Tierra.

Actitudes y valores

- ✔ Mostrar interés por la aplicación de las leyes de Newton en su entorno.
- ✔ Valorar la importancia del uso del cinturón de seguridad al viajar en un automóvil y su funcionamiento.
- ✔ Mostrar disposición por involucrarse en actividades relacionadas a la asignatura.
- ✔ Presentar disposición al trabajo colaborativo con sus compañeros.
- ✔ Valorar la importancia del intercambio de opiniones respecto a conceptos y explicaciones sobre fenómenos naturales y cotidianos.
- ✔ Presentar disposición a escuchar propuestas de solución diferentes a la suya.
- ✔ Presentar una actitud favorable al aprendizaje de la física.
- ✔ Mostrar interés en profundizar en el aprendizaje de la física para explicar fenómenos de interés personal.

Tema 8

Las fuerzas y su clasificación

Propósitos del tema 8

- Conocer, diferenciar y aplicar los conceptos de fuerza de contacto y fuerza a distancia, masa y peso, así como fricción estática y cinética.

Figura 8.1. Sosteniendo la maleta.

La pregunta voladora

¿Puedes dar dos ejemplos de lances deportivos donde la acción humana cambie el movimiento de un cuerpo?

8.1. ¿Qué son las fuerzas?

Los orígenes del concepto de fuerza están en las acciones que el hombre realiza sobre los cuerpos de su entorno. Por ello es importante considerar cuidadosamente los efectos de esas acciones y captar sus principales características.

Para comenzar, basta notar que nuestras acciones pueden:

1. causar, modificar o impedir el movimiento de los cuerpos; y
2. deformar los cuerpos.

Ejemplifiquemos algunas de estas ideas en una situación cotidiana, como aquella donde una muchacha sostiene su maleta (**Figura 8.1**).

Una acción precedente de la muchacha provocó el movimiento ascendente de la maleta, desde el suelo hasta su posición actual. Como la acción de la Tierra sobre la maleta haría caer ésta, la acción de la muchacha impide ese movimiento natural de la maleta. Aunque no se pueda apreciar fácilmente, la maleta está deformada, pues la muchacha la jala hacia arriba y la Tierra la jala hacia abajo.

No es sorprendente que el hombre esté consciente de sus acciones físicas. Es difícil imaginar que alguien no sepa que actúa sobre algún otro cuerpo. Sin embargo, no siempre somos capaces de notar o admitir las acciones entre cuerpos físicos, especialmente cuando esas acciones no tienen efectos visibles en el movimiento de los cuerpos o en sus deformaciones.

Los cuerpos físicos ejercen acciones unos sobre otros, tanto cuando se mueven como cuando están en reposo. Una bola de boliche en movimiento derribará los pinos (**Figura 8.2**); en tanto que la ropa colgada deforma el cordel del tendedero (**Figura 8.3**).

Figura 8.2. Bola de boliche derribará los pinos.

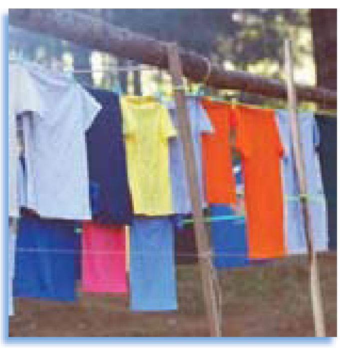


Figura 8.3. La ropa colgada deforma el cordel.

Los cuerpos expuestos a las acciones de otros cuerpos cambian su forma o su movimiento (o su estado de reposo). Aunque esto no resulta obvio, las acciones entre los cuerpos siempre son mutuas, es decir, se trata de **interacciones**. Un cuerpo no puede actuar sobre otro sin experimentar, al mismo tiempo, la acción del cuerpo sobre el que actúa: la acción no se entrega si no se recibe.

Un tanto poéticamente dicho, abrazar consiste en ser abrazado (**Figura 8.4**).

Sobre esta característica fundamental de las acciones que ejercen mutuamente los cuerpos físicos hablaremos con más detalle al tratar la tercera ley de Newton.

El concepto físico en el que están plasmadas las características de las acciones mutuas entre los cuerpos es el concepto de **fuerza**.

Figura 8.4. Abrazar es ser abrazado.

Definición

La **fuerza** es la descripción cuantitativa de la interacción entre dos cuerpos.

Física y lenguaje

¿Cómo hablar de las fuerzas?

Competencia ejemplificada: Dominar la terminología científica.

Si el concepto de fuerza sólo describe cuantitativamente la interacción entre los cuerpos, es incorrecto, en sentido estricto, decir “la fuerza actúa sobre el cuerpo”. Son los cuerpos los que actúan y no las fuerzas.

Tampoco es correcto emplear la frase pomposa “el cuerpo *A* ejerce una fuerza sobre el cuerpo *B*” en vez de una frase directa y clara: “el cuerpo *A* actúa sobre el cuerpo *B*”.

Sin embargo, para no alejarse demasiado de la terminología establecida, en este libro se usará el término “fuerza” tanto para nombrar la mera acción de un cuerpo sobre otro, como para describir tal acción cuantitativamente.

¿Cómo se clasifican las fuerzas?

Según la distancia que los separa, las fuerzas entre los cuerpos se dividen en *fuerzas de contacto* y *fuerzas a distancia*. Las fuerzas que ocurren solamente cuando los cuerpos que interaccionan están en contacto se llaman **fuerzas de contacto**. Las fuerzas que ocurren aun cuando los cuerpos están separados se llaman **fuerzas a distancia**.

En la siguiente actividad tendrás que distinguir estas dos clases de fuerzas.

Actividad de clasificación

¿Fuerzas de contacto o a distancia?

Propósito: Clasificar las fuerzas en una situación real.

Competencia a practicar: Explicitar los conceptos de física en una situación cotidiana.

Material: Foto

Infiere las fuerzas entre los cuerpos de la **Figura 8.5** y determina su carácter (*de contacto* o *a distancia*):

Figura 8.5. Dos globos que cuelgan después de haber sido frotados con un pedazo de tela.

Las fuerzas entre los globos son fuerzas

____.

La fuerza del hilo sobre el globo es una fuerza

____.

La fuerza de la Tierra sobre los globos es una fuerza

____.

La fuerza del aire sobre los globos es una fuerza

____.

Justifica con argumentos cada decisión.

____

____

____

____

Las fuerzas a distancia que percibimos en nuestro mundo son las fuerzas gravitacionales, eléctricas y magnéticas. Como las fuerzas eléctricas y las magnéticas son similares entre sí y difieren de la fuerza gravitacional, se denominan fuerzas electromagnéticas.

Mientras que la fuerza gravitacional es siempre una fuerza atractiva, las fuerzas electromagnéticas pueden ser tanto atractivas como repulsivas. A pesar de esa diferencia, la fuerza gravitacional y las fuerzas electromagnéticas comparten una propiedad importante: no se pueden considerar como manifestaciones de alguna fuerza más sencilla.

Por ello, se dice que se trata de **fuerzas fundamentales**.

Las fuerzas de contacto entre los cuerpos no son fuerzas fundamentales, sino que son una complicada manifestación de las fuerzas electromagnéticas de interacción entre las partículas, eléctricamente cargadas, que forman esos cuerpos.

¿Por qué las fuerzas de contacto tienen naturaleza electromagnética? Esto se debe a que la intensidad de las fuerzas gravitacionales entre las partículas que forman los cuerpos es despreciable en comparación con la intensidad de las fuerzas electromagnéticas.

A nivel microscópico, hay dos fuerzas que se consideran fundamentales. Son la *fuerza nuclear fuerte* y la *fuerza nuclear débil*. Como su nombre lo indica, los físicos se vieron obligados a "inventarlas" al estudiar los procesos que ocurren en los núcleos atómicos.

La fuerza nuclear fuerte es responsable de la estabilidad del núcleo atómico. Sin esa fuerza, los protones, cuya carga eléctrica es positiva, no podrían formar el núcleo atómico debido a una fuerte repulsión.

La fuerza nuclear fuerte no existe solamente entre los protones sino, también, entre los protones y neutrones, y entre los neutrones. La fuerza nuclear débil es responsable de la transformación de algunos núcleos.

La pregunta voladora

¿Es atractiva o repulsiva la fuerza nuclear fuerte entre los protones que forman los núcleos de los átomos?

La naturaleza de la física

La unificación de las fuerzas

Competencia ejemplificada: Identificar los principios medulares que subyacen una serie de fenómenos.

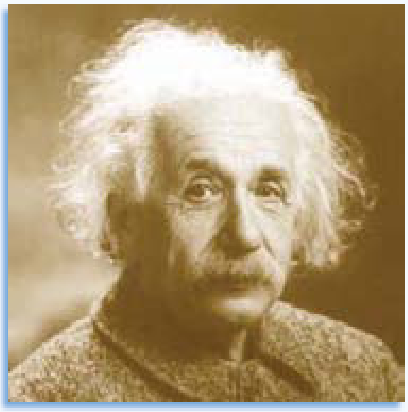


Figura 8.6. Albert Einstein (1879-1955).

La evolución de la física no se debe solamente a los esfuerzos que se llevan a cabo para tratar de explicar las discrepancias entre la teoría y el experimento. También se debe a una creencia de los físicos, según la cual las ideas teóricas sobre el mundo físico deben ser lo más simples posibles.

Los químicos demostraron que la enorme diversidad de sustancias existente en la Tierra se debe a diferentes combinaciones de 92 elementos químicos. Los físicos simplificaron mucho esa visión: los átomos de todos los elementos químicos se componen solamente de tres ingredientes: protones, neutrones y electrones.

Desde esta perspectiva, entender todas las interacciones estudiadas como diferentes manifestaciones de solamente cuatro interacciones (gravitacional, electromagnética, fuerte y débil) parecería un logro muy satisfactorio.

Sin embargo, a Albert Einstein (**Figura 8.6**) la existencia de dos fuerzas (la gravitacional y la electromagnética, pues todavía no se conocían las otras dos fuerzas) le parecía una complicación innecesaria.

Einstein creía que las ideas teóricas sobre el mundo deberían ser sencillas y por eso buscaba formular una teoría que permitiese entender las fuerzas gravitacional y electromagnética como diferentes manifestaciones de una sola fuerza. Esa teoría, conocida técnicamente como "teoría del campo unificado", no era satisfactoria y a muchos físicos les parecía un "callejón sin salida", especialmente cuando en la década de 1930 aparecieron dos fuerzas más.

Sin embargo, en los años setenta del siglo pasado se logró un gran avance en la dirección trazada por Einstein. Fue posible formular y corroborar experimentalmente una teoría en que las fuerzas electromagnética y débil aparecen como diferentes manifestaciones de una fuerza más fundamental, llamada *electro-débil*. Más tarde fue posible, también, unificar esa fuerza electro-débil y la fuerza fuerte. El avance en la comprensión de las fuerzas fue gracias al mejor entendimiento de los protones y neutrones. Estas partículas, que antes se consideraban como elementales, ahora se imaginan como compuestas por quarks. La fuerza nuclear fuerte entre protones y neutrones ya no es una fuerza fundamental, sino más bien una consecuencia de las fuerzas fuertes entre los quarks.

La fuerza gravitacional todavía no se presta a la unificación con las otras tres fuerzas, ya vistas como diferentes manifestaciones de una sola fuerza. A diferencia de lo que ocurría en la época en la que la idea de Einstein sobre una fuerza única era sostenida por muy pocos, ahora esa idea es la base de un programa de investigación altamente apreciado y donde trabajan muchos de los mejores físicos teóricos del mundo.

¿Cómo medir las fuerzas?

Las fuerzas que ejercen los cuerpos se pueden medir si se mide el tamaño del cambio que provocan en alguna cantidad física característica de los cuerpos que interaccionan. Como ya se ha dicho, el cambio podría ser un "cambio en la forma del cuerpo" o un "cambio del estado de movimiento o de reposo del cuerpo".

Por ejemplo, ¿de qué manera se comparan las fuerzas que pueden ejercer dos individuos? La forma más sencilla es comparar qué tanto pueden hacer aumentar la longitud de un resorte. Es evidente que el aumento de longitud mayor corresponderá a una fuerza mayor (**Figura 8.7**).

Más adelante, al estudiar la segunda ley de Newton, verás que la aceleración de los cuerpos también indica el tamaño de la fuerza que describe las acciones que sobre ellos realizan otros cuerpos. Por ejemplo, cuando dos futbolistas practican tiros libres, la fuerza más grande la ejerce el futbolista que, al pegarle a la pelota, le provoca mayor aceleración.

Figura 8.7. ¿Quién ejerce mayor fuerza?

8.2. El peso de los cuerpos

La fuerza que más destaca en nuestro entorno es el **peso** de los cuerpos. Aunque no es aplicable en todas situaciones, una primera definición de ese concepto podría ser la siguiente:

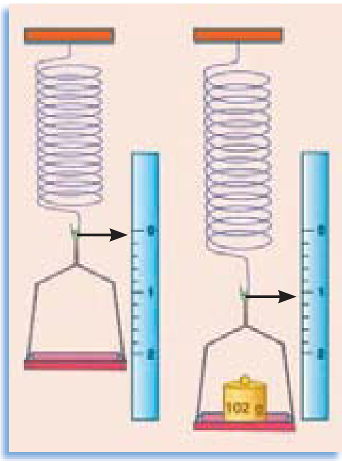


Figura 8.8. El peso de una pesa de 0.102 kilogramos es 1 newton.

Definición

El **peso** de un cuerpo es igual a la fuerza gravitacional que la Tierra ejerce sobre él.

Antes de que fuese aceptado el Sistema Internacional (SI), la unidad de fuerza era el "kilogramo-fuerza", definido como "el peso de un cuerpo cuya masa es un kilogramo". Su símbolo era "kgf". En el sistema internacional, la unidad de fuerza es el "newton" y su símbolo es "N". Pronto verás que en su definición se emplean las unidades de masa (1 kg) y aceleración (1 m/s^2). La definición, a la manera antigua, sería:

Definición

Un **newton** es igual al peso de un cuerpo cuya masa es de 0.102 kilogramos (**Figura 8.8**).

En tal unidad el peso de un cuerpo de un kilogramo es

$$W_1 = 1\,\text{kg} \cdot \frac{1\,\text{newton}}{0.102\,\text{kg}} = 9.8\,\text{N}$$

Entonces, si la masa del cuerpo es m kilogramos su peso es

$$W = mg,$$

donde $g = 9.8$ N/kg es el "factor de peso" con el cual se tiene que multiplicar la masa del cuerpo en kilogramos para obtener su peso en newtons.

Problema por resolver

¿Cuánto pesa un balón de fútbol?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

La masa de un balón de fútbol (**Figura 8.9**) es $m = 0.450$ kg.

a) ¿Cuál es su peso?
b) Si la masa de ese balón fuera el doble, ¿cuál sería su peso?

Figura 8.9. ¿Cuánto pesa un balón de fútbol?

Si el peso del cuerpo es W newtons, su masa m en kilogramos es:

$$m = \frac{W}{g}$$

Problema por resolver

¿Es posible levantar tres veces el propio peso?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

En los Juegos Olímpicos de Seúl de 1988, el atleta turco Suleimanoglu (**Figura 8.10**) levantó, en la categoría de envión, un conjunto de pesas cuya masa total fue de 190 kg. El peso del atleta era de 588 newtons.

¿Tenían razón los periodistas que reportaban que Suleimanoglu levantó tres veces su propio peso?

Figura 8.10. Suleimanoglu levanta las pesas.

Problema por resolver

La masa de las ballenas grises

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Las ballenas grises (**Figura 8.11**) son una atracción turística en las costas de Baja California.

Su peso promedio es de 637,000 N. ¿Cuál será su masa promedio en kilogramos?

Figura 8.11. La ballena gris.

El factor de peso g cambia de un lugar a otro. Sus cambios de un punto a otro sobre la superficie de la Tierra son pequeños y, si no es necesario ser muy meticulosos, los podemos despreciar.

Pero, en la Luna el factor tiene un valor seis veces menor, es decir, el peso de un cuerpo en la Luna (que se debe a la atracción lunar) es seis veces menor que el peso del cuerpo en la superficie terrestre.

Por ello, la masa y el peso son conceptos diferentes. La masa de un cuerpo no depende de su posición; mientras que su peso sí depende. Veamos esta importante diferencia conceptual en el problema que sigue.

La pregunta voladora

El factor de peso en la Tierra tiene el valor $g_T = 9.8$ N/kg. Si en la Luna ese factor es 6 veces menor, ¿cuál será su valor g_L?

Problema resuelto

La masa y el peso del vehículo lunar

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El primer vehículo que se movió sobre un suelo no terrestre, fue el vehículo lunar (**Figura 8.12**).

Fue diseñado y construido para la misión lunar Apolo 15 de la NASA en el año de 1971. Sus dimensiones eran de 3 m x 2.3 m y su masa era de 216 kilogramos.

1. ¿Cuál era su peso en la Tierra?
2. ¿Cuál era su peso en la Luna?
3. ¿Cuál era su masa en la Luna?

Figura 8.12. El vehículo lunar en el suelo de la Luna.

Solución:

1. El peso del vehículo lunar en la Tierra era:

$$W_T = mg_T = 216\,\text{kg} \cdot 9.8\frac{\text{N}}{\text{kg}} = 2{,}116.8\,\text{N}$$

2. Su peso en la Luna es la sexta parte de su peso en la Tierra:

$$W_L = \frac{W_T}{6} = \frac{2{,}116.8\,\text{N}}{6} = 352.8\,\text{N}$$

3. Aunque su peso en la Luna es seis veces menor que su peso en la Tierra, la masa del vehículo lunar en la Luna es la misma que en la Tierra: ¡216 kilogramos!

Dar sentido al resultado: La masa de los cuerpos es proporcional a la cantidad de sustancia de que están hechos. Como en los cuerpos físicos (no vivos) esta cantidad normalmente no cambia cuando van de un lugar a otro, la masa de los cuerpos tampoco cambia. El vehículo lunar no es la excepción.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si milagrosamente el vehículo lunar pudiese cambiar su masa en el viaje entre la Tierra y la Luna, ¿cuál debería ser su nueva masa en la Luna, de manera que su nuevo peso lunar fuera igual a su antiguo peso terrestre?

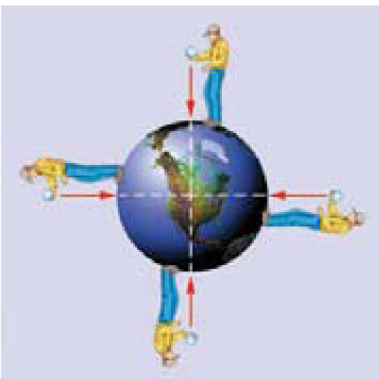


Figura 8.13. El peso de un cuerpo es una cantidad vectorial.

Figura 8.14. La levitación en la nave espacial.

Las acciones de los cuerpos siempre tienen una dirección y un sentido. La acción de la Tierra sobre los cuerpos se ejerce en la dirección perpendicular a la superficie terrestre. (Esto sería completamente cierto si la Tierra fuera una esfera). El sentido de la acción es hacia el centro de la Tierra. Entonces, el peso del cuerpo es una cantidad vectorial, cuya intensidad es igual a la magnitud del peso, la dirección es perpendicular a la superficie de la Tierra y el sentido es hacia abajo (**Figura 8.13**).

El peso de los cuerpos: una segunda consideración

Los astronautas pueden hacer en el transbordador espacial varias cosas que no serían posibles en la Tierra. Por ejemplo, son capaces de levitar en la posición que deseen (**Figura 8.14**).

Se dice que están en el "estado de ingravidez". ¿Qué significa esta popular frase?

En primer lugar, implica que los objetos no necesitan soporte para no caer con respecto a la nave. ¡Se quedan donde se dejan!

A los astronautas les da igual moverse en cualquier dirección. Esto difiere muchísimo de lo que experimentamos en la Tierra. Caer no requiere esfuerzo y subir, sí. Atribuimos esta diferencia a la fuerza gravitacional con la que la Tierra atrae a los cuerpos.

En la Tierra, esta fuerza gravitacional se mide mediante las básculas y se llama el "peso de los cuerpos". Se podría decir que "el peso de un cuerpo es lo que se mide con una báscula".

¿Qué indicaría una báscula de baño si un astronauta se coloca encima de ella en un transbordador espacial que orbita la Tierra?

No indicaría nada, porque el astronauta no es capaz de activarla. Si el peso del astronauta es lo que mide la balanza, entonces en órbita el astronauta no tiene peso. Este es otro significado del "estado de ingravidez".

¿Atrae la Tierra a la nave espacial? ¡Sí, sí la atrae! Sin esta atracción, la nave y el astronauta no podrían orbitar la Tierra. ¿Cómo es que dentro de la nave no se notan los efectos comunes de la gravedad?

Una manera de entender eso es la siguiente. La nave y todo lo que está adentro están en caída libre. Como el astronauta y la báscula llevan a cabo el mismo movimiento, el astronauta no es capaz de ejercer presión sobre la báscula. Entonces, el astronauta no tiene peso, si éste se define como lo que mide la báscula.

Como esta explicación parece ser una cuestión truculenta de la definición del peso, hay otra manera, más radical, de conceptualizar la ingravidez: *En el interior de la nave no existe el campo gravitacional*.

Cuando la nave está en reposo en el campo gravitacional de la Tierra, dentro de la nave existe el mismo campo.

La situación cambia cuando la nave está en caída libre debido al campo gravitacional de la Tierra. A causa del movimiento acelerado de la nave, dentro de la nave se "induce" un campo gravitacional. Las propiedades del "campo inducido" son tales que éste cancela perfectamente el campo exterior y el interior de la nave queda libre de campos gravitacionales.

Para observar los efectos de la ausencia de campo gravitacional dentro de los sistemas en caída libre, no es necesario estar en una nave espacial que orbite la Tierra. De esto te vas a convencer en la siguiente actividad.

¡Hagamos física!

Los chorros de agua de una botella que cae y de una que sube

Propósito: Predecir, observar y explicar el comportamiento del chorro de agua que sale de una botella, si la botella se deja caer o si se lanza hacia arriba.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar el experimento pertinente, aprender en equipo y aprendizaje autorregulado.

Material: Una botella de plástico con el fondo perforado, agua.

Recomendación: Por razones obvias, se recomienda que la parte práctica de esta actividad se realice en el patio de la escuela.

Todos sabemos que una botella de plástico con su fondo perforado no puede mantener el agua dentro. Al llenarla, el agua comienza a salir a través del orificio, formando un chorro (**Figura 8.15**).

Forma a tu equipo y elijan, primero individualmente y después en equipo, las mejores respuestas a las preguntas que siguen.

1. Si se deja caer una botella de cuyo fondo está saliendo un chorro, ¿cómo se va a comportar el chorro durante la caída?

   a) Seguirá saliendo con menor rapidez.

   b) Seguirá saliendo con mayor rapidez.

   c) Dejará de salir.

   Debe justificarse la respuesta elegida:

   ¿Cuáles son la respuesta y la justificación a que llegó tu equipo?

____

Si no las compartes, ¿cuáles son tu respuesta y tu justificación?

____

____

Figura 8.15. El chorro de agua que sale de una botella perforada.

2. Si se lanza verticalmente hacia arriba una botella de cuyo fondo está saliendo un chorro, ¿cómo se va a comportar el chorro durante la subida libre (después de que cese el contacto con la mano)?

a) Seguirá saliendo con menor rapidez.
b) Seguirá saliendo con mayor rapidez.
c) Dejará de salir.

Debe justificarse la respuesta elegida:
¿Cuáles son la respuesta y la justificación a que llegó tu equipo?

Si no las compartes, ¿cuáles son tu respuesta y tu justificación?

3. Dejen caer una botella de cuyo fondo esté saliendo un chorro. Observen con cuidado y describan el comportamiento del chorro.

Si el comportamiento no coincidió con lo predicho, ¿cómo se podría explicar la diferencia?

4. Lancen verticalmente hacia arriba una botella de cuyo fondo esté saliendo un chorro. Observen con cuidado y describan el comportamiento del chorro.

Si el comportamiento no coincidió con lo predicho, ¿cómo se podría explicar la diferencia?

En la actividad anterior se observó que el comportamiento del chorro de agua de una botella que cae, o que sube, en el campo gravitacional terrestre difiere del comportamiento normal que se observa cuando la botella está en reposo en el mismo campo.

Durante la caída y la subida de la botella, el agua está en el "estado de ingravidez" y por ello no se comporta de manera usual. El cuerpo humano tampoco se comporta de manera usual cuando se encuentra en una nave espacial que orbita la Tierra.

Física en la vida cotidiana

El cuerpo humano en el "estado de ingravidez"

Competencia ejemplificada: Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad, en un contexto específico.

Ser capaz de levitar en una nave espacial parece divertido; sin embargo, hay que pagar un precio alto. Quitar el campo gravitacional al que el cuerpo humano está acostumbrado es un cambio muy drástico. El cuerpo reacciona y hace los ajustes correspondientes.

Durante el proceso de evolución de la especie humana, todas las partes del cuerpo humano se desarrollaron para funcionar de manera óptima en un entorno gravitacional tal como el que existe en la superficie terrestre. Por ejemplo, los músculos y los huesos tienen la fuerza y la dureza necesarias para contrarrestar la fuerza de gravedad, que jala cada parte del cuerpo hacia abajo.

En estado de ingravidez, no obstante, los músculos y los huesos se atrofian rápidamente porque no se necesitan sus "servicios". En cuatro semanas de ingravidez, los músculos de la cadera y de la columna pierden una quinta parte de su masa. Los huesos pierden masa a un ritmo más lento. Sin embargo, se teme que en las estancias espaciales muy prologadas, las pérdidas podrían llegar a ser hasta de un 60% de la masa inicial.

La distribución y la presión de la sangre cambian, también, en el estado de ingravidez. En la superficie terrestre, debido a la gravedad, hay una tendencia natural de la sangre a acumularse en los pies. Además, por la misma causa, la presión de la sangre es mayor en los pies que en la cabeza.

Esto cambia en el estado de ingravidez y la sangre se distribuye de igual manera en todo el cuerpo. La presión, también, se iguala y es igual a la presión proporcionada por el bombeo del corazón. El cambio en la distribución de la sangre es visible. Con menor sangre que en el estado normal, las piernas se vuelven más delgadas. Los rostros de los astronautas, por el contrario, se ven hinchados por el exceso de sangre.

Al detectar una mayor cantidad de sangre en la cabeza, el cerebro se "espanta" y activa los mecanismos corporales que reducen la cantidad de sangre. Después de unos días en estado de ingravidez, el volumen de la sangre en el cuerpo disminuye en un 20%. Los músculos del corazón, al tener que bombear una cantidad menor de sangre a través del cuerpo, comienzan a atrofiarse.

Al regresar a la Tierra, todos esos cambios tienen que revertirse, es decir, hay que recuperar los valores normales de la masa de músculos y huesos, así como de la cantidad de sangre. El proceso de recuperación no es ni fácil ni rápido. Para los músculos, el tiempo de recuperación es, aproximadamente, igual al tiempo de estancia en el espacio. No obstante, para los huesos ese tiempo es 6 veces más largo. Un astronauta que haya estado 6 meses en el espacio necesita 36 meses para que sus huesos se recuperen.

Para hacer el regreso a la Tierra menos problemático, los astronautas en órbita hacen ejercicios que ayudan a reducir la atrofia de sus músculos y huesos (**Figura 8.16**).

Figura 8.16. El astronauta estadounidense Jeffry N. Williams realiza un ejercicio de resistencia a bordo de la Estación Espacial Internacional. (Cortesía de la NASA).

8.3. Fuerzas de fricción estática y cinética

Para arrastrar una caja muy pesada, hay que hacer un esfuerzo considerable, antes de que la caja comience su movimiento (**Figura 8.17**).

Una vez en movimiento, resulta mucho más fácil hacer que se deslice. Si a pesar del esfuerzo la caja no se mueve, entonces, existe una fuerza que se opone al movimiento de la caja sobre el suelo. Esta fuerza es la **fricción**.

Figura 8.17. El esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de la caja es mayor que el esfuerzo necesario para deslizarla.

Definición

La **fricción** es la fuerza que impide o se opone al movimiento relativo de dos superficies en contacto.

La dirección de la fuerza de fricción es siempre paralela a las superficies en contacto. Sin embargo, en diferentes situaciones, el sentido de la fuerza de fricción llega a diferir.

Problema por resolver

El sentido de la fuerza de fricción

Competencia a practicar: Explicitar un concepto físico en una situación cotidiana.

Figura 8.18a. La caja se desliza sobre la mesa.

Figura 8.18b. La caja se mueve junto con la mesa.

Imagina una caja colocada sobre una mesa. Un joven mueve la caja de dos diferentes maneras. Una vez, la empuja directamente, deslizándola sobre la superficie de la mesa (**Figura 8.18a**). Otra vez, la mueve jalando la mesa (**Figura 8.18b**).

1. ¿Cómo es el sentido de la fuerza de fricción entre la caja y la mesa, en comparación con el sentido del movimiento de la caja, cuando ésta se desliza sobre la mesa?
2. ¿Cómo es el sentido de la fuerza de fricción entre la caja y la mesa en comparación con el sentido del movimiento de la caja, cuando ésta se mueve junto con la mesa?

Pensamiento crítico: ¿Qué pasaría con la caja en la segunda situación, si no existiera la fuerza de fricción entre la caja y la mesa? ¿Es correcto decir que la fuerza de fricción siempre se opone al movimiento de los cuerpos?

Las desventajas y las ventajas de la fuerza de fricción

Las fuerzas de fricción son el mejor ejemplo de las fuerzas de contacto. Es muy difícil que ocurra el movimiento de un cuerpo sobre la superficie de otro, sin que las fuerzas de fricción estén presentes y se opongan al deslizamiento. Esta oposición al movimiento, en el caso de los automóviles, es para nosotros una desventaja considerable que resulta de la existencia de las fuerzas de fricción. De hecho, el 20% del combustible que consume el vehículo se gasta para vencer la fricción.

Adicionalmente, uno de los problemas más grandes a los que se enfrentan los ingenieros consiste en reducir la fricción entre las diferentes partes de las máquinas. Estas fricciones son la causa del desgaste de las partes: reducen el desempeño y la duración de las máquinas. Una manera de reducir la fuerza de fricción es usar lubricantes.

Sin embargo, no tenemos derecho a quejarnos demasiado de las desventajas que nos causa la existencia de las fuerzas de fricción. En un mundo sin fricción sería imposible hacer muchas cosas rutinarias. Sin fricción entre las llantas y el suelo los automóviles no podrían moverse. La fricción entre tus zapatos y el suelo es indispensable para que puedas caminar. Si esa fuerza es menor, como cuando uno está sobre hielo o una superficie engrasada, es más fácil caer que caminar.

Aunque no lo hayas pensado, sin la fuerza de fricción sería imposible sostener objetos con las manos.

Problema resuelto

¿Cómo se sostiene un vaso de agua con la mano?

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

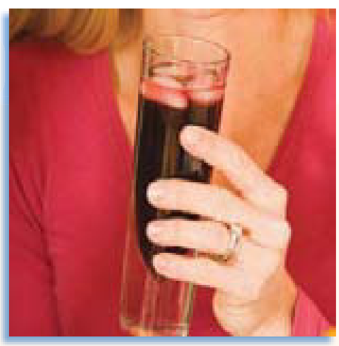


Figura 8.19. ¿Cómo es posible sostener el vaso?

Es una rutina diaria sostener con la mano un vaso de agua (**Figura 8.19**).

Lo que no es rutinario es conceptualizar este acontecimiento en términos de fuerzas. ¿Qué fuerzas intervienen cuando sostenemos un vaso con la mano y cuáles son sus direcciones?

Solución: Estando el vaso en equilibrio, la suma de todas las fuerzas implicadas debe ser cero. Los dedos presionan el vidrio del vaso en dirección horizontal. El vidrio, a su vez, presiona los dedos. Como el vaso no se mueve en la dirección horizontal, esas fuerzas tienen que equilibrarse entre sí.

La Tierra atrae el vaso de agua verticalmente hacia abajo. Como el vaso no se mueve hacia abajo, debe existir una fuerza, dirigida verticalmente hacia arriba, que equilibre la fuerza de la Tierra. Esa fuerza es la suma de las fuerzas de fricción que surgen en todas las zonas de contacto entre los dedos y el vaso.

Dar sentido al resultado: Aunque los dedos actúan en la dirección horizontal (perpendicularmente a la superficie de vaso), las fuerzas de fricción actúan en la dirección vertical, oponiéndose al deslizamiento del vaso. Si el vaso está mojado, se reducen las fuerzas de fricción y no son capaces de equilibrar el peso del vaso. Como consecuencia, el vaso se nos cae de la mano.

El origen de la fuerza de fricción

A pesar de la importancia de las fuerzas de fricción no se conocen todavía todas sus causas. En una primera aproximación, se atribuye la fuerza de fricción a la rugosidad de las superficies en contacto. Incluso en superficies que parecen muy lisas, siempre existen irregularidades (**Figura 8.20**).

Hablando de manera general, las irregularidades se insertan unas en otras e impiden el movimiento de las superficies. Pero esto no es todo. En los puntos donde hay contacto estrecho aparecen fuerzas atractivas entre las partículas que forman las superficies. Cuando las superficies se pulen mejor, estas fuerza atractivas aumentan tanto que las superficies se pegan ("soldadura fría") y es difícil separarlas o hacer que se muevan una sobre otra. En este caso, la fuerza de fricción sería mucho mayor que en las superficies menos pulidas.

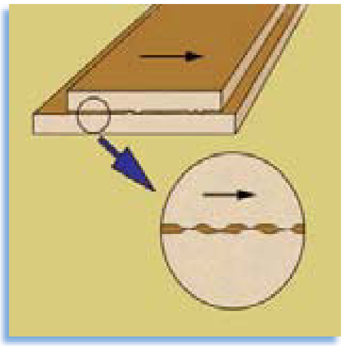


Figura 8.20. Imagen aumentada de la región de contacto de dos superficies.

¿Qué tan grande es la fuerza de fricción?

Usando un dinamómetro, resulta sencillo determinar la intensidad de la fuerza de fricción entre un cuerpo y una superficie (**Figura 8.21**). Se aumenta lentamente la intensidad de la fuerza con que se jala el cuerpo hasta que éste empieza a deslizarse. La intensidad de la fuerza que "rompe" la fricción es la intensidad de la **fricción estática**.

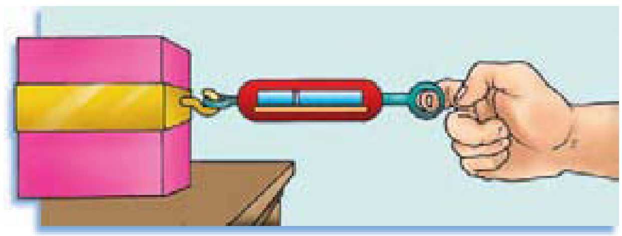


Figura 8.21. Método para determinar el tamaño de la fuerza de fricción.

Es importante destacar que si no intentamos mover el cuerpo, la fuerza de fricción estática no existe. Aparece cuando comienza la acción que pretende mover el cuerpo. Al aumentar la fuerza externa, se incrementará la fuerza de fricción estática. Existe un valor máximo de la fuerza de fricción estática. Si la fuerza externa sobrepasa ese límite, el cuerpo comienza a deslizarse.

Para determinar la fuerza de fricción cinética (o de deslizamiento) hay que lograr que el cuerpo se deslice a velocidad constante. En ese caso, las dos fuerzas sobre el cuerpo (la que lo jala hacia adelante y la fricción, que actúa hacia atrás) se equilibran. La intensidad de la fuerza con que se jala es igual a la intensidad de la fuerza de **fricción cinética**.

La fuerza de fricción estática es mayor que la fuerza de fricción cinética. La menor fuerza de fricción es la que ocurre cuando un objeto rueda. Esta fricción se llama **fricción de rodadura**.

La magnitud de la **fuerza de fricción** entre un cuerpo y una superficie sobre la que el cuerpo descansa o se desliza se expresa en la forma:

$$f = \mu \cdot N$$

donde μ es el coeficiente de fricción (ya sea estática, cinética o de rodadura) y N es la fuerza normal con que el cuerpo actúa sobre la superficie.

El valor del coeficiente de fricción es igual a:

$$\mu = \frac{f}{N}$$

Entonces, el coeficiente de fricción indica qué parte de la fuerza normal se "convierte" en la fuerza de fricción.

Problema por resolver

El coeficiente de fricción

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Para comenzar a deslizar un garrafón lleno de agua sobre una superficie lisa (**Figura 8.22**), se necesita jalar con una fuerza horizontal $f = 42$ N.

1. Considerando que la fuerza normal N que ejerce el garrafón sobre la superficie es igual a su peso ($P = 210$ N), ¿cuál es el coeficiente de fricción estática entre el garrafón y la superficie?
2. ¿Cuál sería el coeficiente de fricción, si el garrafón se hubiera comenzado mover al aplicar la fuerza $f = 21$ N?

Figura 8.22. Un garrafón sobre una superficie lisa.

Cuando el cuerpo está sobre una superficie horizontal, la magnitud de la fuerza normal N es igual al peso del cuerpo, W = mg (**Figura 8.23a**).

Si la superficie está inclinada, la magnitud de la fuerza normal no coincide con la magnitud del peso del cuerpo (**Figura 8.23b**).

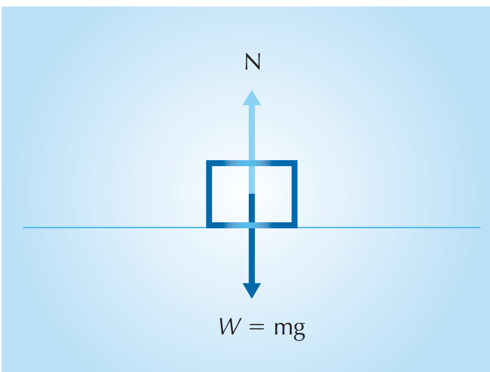


Figura 8.23a. La fuerza normal es igual al peso del cuerpo.

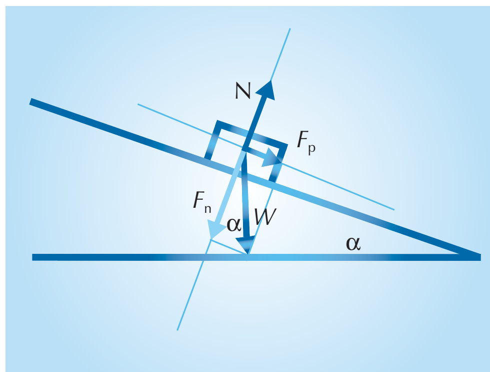


Figura 8.23b. La fuerza normal no es igual al peso del cuerpo, sino que es menor.

Al estar sobre un plano inclinado, la acción de la Tierra sobre el cuerpo (el peso del cuerpo) se manifiesta de dos maneras. Por un lado, obliga al cuerpo a actuar perpendicularmente sobre la superficie. Por otro lado, jala al cuerpo para que se deslice hacia abajo sobre la superficie. Estas dos acciones están representadas por las fuerzas F_N y F_P que son las componentes del peso del cuerpo (**Figura 8.23b**).

Sus magnitudes son:

$$F_N = W \cos \alpha$$

$$F_P = W \operatorname{sen} \alpha$$

Mientras el cuerpo no se desliza, la fuerza de fricción estática f es capaz de equilibrar la fuerza F_P que intenta mover el cuerpo hacia abajo ($f = F_P$).

Al aumentar la inclinación, llegará el momento en que el cuerpo comience a deslizarse, pues justo antes de que eso ocurra la fuerza de fricción estática entre el cuerpo y la superficie habrá alcanzado su máximo valor posible.

Si esto ha ocurrido para el ángulo α, entonces el valor máximo del coeficiente de fricción estática es:

$$\mu_{\text{máx}} = \frac{f}{N} = \frac{F_p}{F_N} = \frac{W \text{ sen } \alpha}{W \cos \alpha} = \tan \alpha$$

Esta relación permite determinar experimentalmente el valor del coeficiente de fricción estática (o, más precisamente, su valor máximo), encontrando a qué ángulo de inclinación comienza a deslizarse el cuerpo sobre una superficie inclinada.

La pregunta voladora

Basándote en la última ecuación, ¿podrías diseñar y realizar un experimento para determinar experimentalmente el coeficiente de fricción estática entre una moneda de cinco pesos y la superficie de una regla escolar?

Foto laboratorio

Lata sobre plano inclinado

Propósito: Explicar dos diferentes comportamientos de un lata de Coca-Cola.

Competencia a practicar: Identificar el principio medular que subyace a dos fenómenos.

Material: Fotos.

Una lata de Coca-Cola, ubicada verticalmente sobre una tabla, se queda en equilibrio aunque la tabla se incline considerablemente (**Figura 8.24a**).

Cuando la misma lata se acuesta sobre la tabla, una inclinación mínima de la tabla haría que la lata comenzara a rodar hacia abajo (**Figura 8.24b**).

Figura 8.24a. Una lata en equilibrio sobre una tabla inclinada.

Figura 8.24b. Una inclinación mínima rompe el equilibrio de la lata.

¿A qué se debe esta diferencia en el comportamiento de la lata?

En la **Tabla 8.1** se presentan algunos coeficientes de fricción para diferentes superficies en contacto. El valor del coeficiente de fricción estática corresponde a su valor máximo.

Tabla 8.1. Los valores de coeficientes de fricción.

Superficies y su condición	Coeficiente de fricción estática	Coeficiente de fricción cinética
Goma sobre hormigón seco	1.0	0.7
Goma sobre hormigón mojado	0.7	0.5
Acero sobre acero seco	0.6	0.3
Acero sobre acero lubricado	0.05	0.03
Zapatos sobre madera	0.9	0.7
Zapatos sobre hielo	0.1	0.05
Hielo sobre hielo	0.1	0.03

No está de más destacar que el coeficiente de fricción cinética es menor que el coeficiente de fricción estática. No puede ser de otra manera, ya que el valor máximo de la fuerza de fricción estática es siempre mayor que el valor de la fuerza de fricción cinética. Cuesta más trabajo comenzar a mover una caja pesada, que mantenerla en movimiento a velocidad constante.

Problema resuelto

La fuerza de fricción entre un bloque de goma y una superficie de hormigón

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un bloque de goma, cuya masa es de 20 kg, descansa sobre una superficie horizontal de hormigón mojado.

1. ¿Cuál es el valor mínimo de la fuerza horizontal con que se tiene que jalar el bloque, para comenzar a moverlo sobre el hormigón mojado?
2. ¿Hasta qué ángulo se debería inclinar la superficie de hormigón mojado para que el bloque de goma comience a deslizarse?

Solución:

1. En el caso de la superficie horizontal, la fuerza normal *N* es igual al peso del bloque de goma:

$$N = P = mg = 20\,\text{kg} \cdot 9.8\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} = 196\,\text{N}$$

Según la **Tabla 8.1**, el coeficiente de fricción estática entre la goma y el hormigón mojado es $\mu = 0.7$. Entonces, el máximo valor de la fuerza de fricción estática es:

$$f = \mu\,\text{N} = 0.7 \cdot 196\,\text{N} = 137.2\,\text{N}$$

Para comenzar a mover el bloque sobre el hormigón mojado, hay que jalarlo con una fuerza horizontal cuya magnitud sea mayor que 137.2 N.

2. El ángulo que corresponde al máximo valor del coeficiente de fricción estática es:

$$\alpha = \tan^{-1}\mu = \tan^{-1} 0.7 = 34.99^{\circ} \approx 35^{\circ}$$

Dar sentido al resultado: La fuerza que se requiere para comenzar a mover el bloque es menor que su peso.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si el hormigón fuera seco (μ = 1), ¿cuál sería la fuerza máxima de fricción estática y el valor máximo del ángulo de inclinación?

Problema por resolver

Presionar un bloque de goma sobre una pared de hormigón mojado

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Imagina que el bloque de goma (m = 20 kg) del problema anterior se debe mantener sobre una pared vertical de hormigón mojado. ¿Con qué fuerza normal hay que presionarlo contra la pared para evitar su deslizamiento hacia abajo? Considerar dos posibilidades:

1. Tan sólo se necesita la fricción entre el bloque y la pared para equilibrar el peso del bloque (una suposición poco realista).
2. La fricción entre el bloque y la pared, y la fricción entre el bloque y la mano, equilibran el peso del bloque y, además, el coeficiente de fricción estática entre la mano y el bloque es igual al coeficiente de fricción estática entre el bloque y la pared (una suposición simplificada pero mejor que la anterior).

¡Hagamos física!

¿Cuándo comienza a deslizarse una cadena?

Propósito: Averiguar las ideas sobre el tamaño de la fuerza de fricción entre una cadena y la superficie de una mesa.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar un experimento pertinente, aprender en equipo y aprendizaje autorregulado.

Material: Cadena y regla.

Forma a tu equipo e imaginen la siguiente situación: una cadena descansa sobre una mesa de manera que una parte de la cadena, de longitud $l_{colgada}$, cuelga del borde de la mesa (**Figura 8.25**). La parte de la cadena que queda sobre la mesa tiene longitud l_{mesa}.

¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta?

a) La cadena se desliza cuando la longitud de la parte que cuelga ($l_{colgada}$) es menor que la de la parte que queda sobre la mesa (l_{mesa}).

b) La cadena se desliza cuando la longitud de la parte que cuelga ($l_{colgada}$) es igual a la de la parte que queda sobre la mesa (l_{mesa}).

c) La cadena se desliza cuando la longitud de la parte que cuelga ($l_{colgada}$) es mayor que la de la parte que queda sobre la mesa (l_{mesa}).

Figura 8.25. ¿Cuándo comienza a deslizarse esta cadena?

Selecciona la afirmación que te parezca correcta y justifica tu selección.

____

____

Comparen las selecciones realizadas dentro del grupo y traten de llegar a un consenso. ¿Cuáles son la afirmación y la justificación aceptadas por el equipo?

____

____

Si hay diferencias con respecto a la afirmación que seleccionaste y su justificación, ¿cuáles son?

____

____

Coloquen una cadena sobre la mesa, de modo que una parte pequeña quede colgando.

Sosteniendo con la mano esta parte, aumenten, poco a poco, su longitud jalando la cadena. Antes de soltarla, determinen con la regla la longitud de la parte de la cadena que queda sobre la mesa (l_{mesa}) y anoten el resultado. Determinen, de esa manera, la longitud de la parte de la cadena que, quedando sobre la mesa en el momento en que se suelta la parte que cuelga, ya no puede impedir el deslizamiento y caída de la cadena.

Si la longitud de la cadena es l, la longitud de la parte que cuelga l_{cadena} es:

$$l_{colgada} = l - l_{mesa}$$

¿$l_{colgada}$ fue menor, igual o mayor que l_{mesa}, cuando la cadena ya no puede quedar parcialmente colgada y cae? Si el resultado del experimento difiere de la predicción del equipo, analicen las causas de la diferencia.

Pensamiento creativo: ¿Cómo se podría determinar el valor del coeficiente de fricción estática entre la cadena y la mesa?

Física del cuerpo humano

La maravilla del fluido sinovial

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

En tus articulaciones no hay contacto directo entre los huesos. Ese tipo de contacto daría lugar a un desgaste de los huesos similar al que sufren las partes de una máquina por el rozamiento contra otras. Los huesos terminan en un cartílago articular y están separados entre sí por la cápsula sinovial (**Figura 8.26**), la cual está llena de fluido sinovial. Tanto el cartílago articular como la cápsula de fluido sinovial contribuyen a la reducción de la fricción entre los huesos. El coeficiente de fricción es solamente de 0.0003. Compara este valor con los valores de la **Tabla 8.1**.

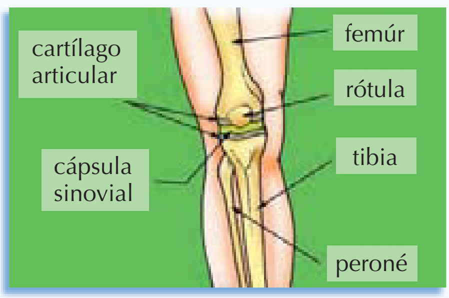


Figura 8.26. En las articulaciones humanas la fricción es muy pequeña.

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. ¿Cuál es la diferencia entre las fuerzas de contacto y las fuerzas a distancia?
2. ¿La fuerza gravitacional de la Luna que causa las mareas es una fuerza de contacto o una fuerza a distancia?
3. ¿El peso de un cuerpo puede cambiar sin que cambie su masa?
4. ¿La Tierra tiene peso?
5. ¿Cuándo se llama a la fuerza de fricción entre dos superficies *fuerza de fricción estática*?
6. ¿Cuándo se llama a la fuerza de fricción entre dos superficies *fuerza de fricción cinética*?
7. ¿La fuerza de fricción estática es constante?
8. ¿La fuerza de fricción cinética es constante?

Pensamiento crítico

9. En un manual se indica que el coeficiente de fricción estática entre dos superficies es 0.25 y que el coeficiente de fricción cinética es 0.30. ¿Es creíble esta información? Justifica tu respuesta.
10. ¿Por qué no es correcto decir que el peso de un individuo es de 70 kg? ¿Cómo sería la manera correcta de presentar esa información?
11. ¿Es correcto decir que la fuerza de fricción siempre se opone al movimiento de los cuerpos?

Dominar la representación gráfica

12. En las **Figuras 8.27a** y **8.27b** se presentan dos posibles gráficas sobre cómo cambia la fuerza de fricción entre dos superficies al modificar la fuerza externa.

    ¿Cuál de las dos gráficas representa mejor el cambio de la fuerza de fricción? Justifica tu respuesta.

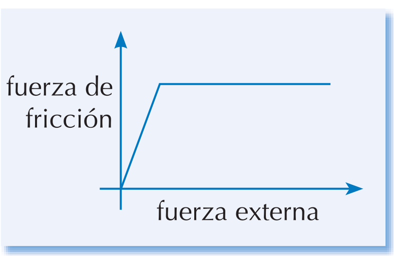


Figura 8.27a. Gráfica 1.

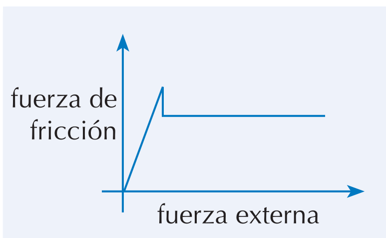


Figura 8.27b. Gráfica 2.

Aplicar modelos matemáticos

13. En comparación con los balones que se usan en otros deportes, una bola de boliche tiene una masa considerable, de 7.25 kg, y es más cómodo sostenerla con ambas manos (**Figura 8.28**).

Figura 8.28. Sentir el peso de la bola de boliche.

¿Cuál es el peso de la bola de boliche en newtons?

14. El peso de los coches de carreras Fórmula 1 (**Figura 8.29**) es de 5,978 newtons.

Figura 8.29. Un coche de carreras Fórmula 1.

¿Cuál es su masa en kilogramos? ¿Esa masa es mayor o menor que la masa de un automóvil común y corriente?

15. En 1997 el vehículo robótico de la NASA llamado *Sojourner Rover* (**Figura 8.30**) realizó varias mediciones científicas en la superficie de Marte. Su masa era de 16 kg. Si el factor de peso en Marte es $g_M = 3.7$ N/kg, ¿cuál era el peso de ese vehículo en Marte? ¿Cuál era su peso en la Tierra?

Figura 8.30. El *Sojourner Rover* de la NASA.

16. Aunque la presión y la temperatura de la atmósfera del planeta Venus (**Figura 8.31**) difieren muchísimo de lo que se tiene en la Tierra, el valor del factor de peso en la superficie de Venus g_V es similar a su valor terrestre g_T. Un cuerpo cuya masa es 10 kg en Venus tendría el peso de 89 N. ¿Cuál es el factor de peso g_V en la superficie de Venus?

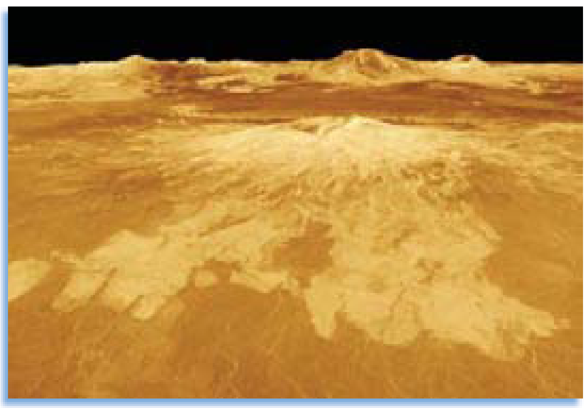


Figura 8.31. Imagen de la superficie de Venus realizada por computadora.

17. El célebre libro de texto de física, escrito por Douglas Giancoli y publicado por la editorial Pearson Educación, tiene una masa de 1.735 kg y un peso de 17 newtons. Para impedir que se deslice hacia abajo sobre una pared vertical (**Figura 8.32**), hay que ejercer una fuerza perpendicular al libro cuya intensidad sea: *a*) menor que 17 newtons, *b*) igual a 17 newtons, o *c*) mayor que 17 newtons.

Figura 8.32. Impidiendo que el libro se deslice.

Justifica la respuesta que seleccionaste.

18. El coeficiente de fricción estática entre una caja y el suelo es 0.3. Si el peso de la caja es 200 N, ¿qué tan grande debería ser la fuerza horizontal para comenzar a mover la caja?

19. Un hombre, cuyo peso es de 700 N, está parado sobre hielo. Para empujarlo a rapidez constante se requiere una fuerza horizontal de 35 N. ¿Cuál es el coeficiente de fricción cinética entre los zapatos del hombre y el hielo?

20. Para que una goma para borrar esté a punto de deslizarse hacia abajo, la tabla de madera sobre la que se encuentra la goma debe tener una inclinación de 42°. ¿Cuál es el valor máximo del coeficiente de fricción estática entre la goma y la madera?

21. El coeficiente de fricción estática entre las llantas de un automóvil y el pavimento normal es 0.8. ¿Cuál es la máxima inclinación de una carretera montañosa sobre la que se podría dejar estacionado este vehículo?

Explicitar un concepto físico en una situación cotidiana

22. Observa el video "Bus was drifting" (El autobús se estaba resbalando) en http://www.youtube.com/watch?v=p5gR1nCvi24&feature=related (**Figura 8.33**) donde se ve el comportamiento inusual y peligroso de varios vehículos en carreteras cubiertas por nieve y hielo.

¿Qué concepto físico es idóneo para explicar este comportamiento? Justifica tu respuesta.

Figura 8.33. Autos en una carretera con nieve y hielo.

23. En algunas fiestas populares mexicanas, como la del carnaval, una de las competencias más divertidas es aquella en la cual los competidores tienen que trepar por un palo alto, con la finalidad alcanzar los regalos que se encuentran en su cima (**Figura 8.34**). ¿Qué crees que hacen los organizadores para dificultar la subida y prolongar la diversión?

Figura 8.34. El que sube se lleva un regalo.

Sé la estrella de la fiesta

Los libros inseparables

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana, y realizar un experimento pertinente.

Intercala cuidadosamente las hojas de un libro en las de otro (**Figura 8.35**).

Reta a tus compañeros que separen los dos libros, jalando, lo más que puedan, desde los lomos de éstos. Todos quedarán sorprendidos al darse cuenta de que no lograrán separarlos.

¿Cómo funciona el truco? Las fuerzas de fricción estática entre las muchas hojas en contacto, al sumarse, darán una gran fuerza total de fricción estática. Esa gran fuerza de fricción impide que los libros se separen.

Sugerencia: Hay que practicar cómo intercalar bien las hojas de los libros. Una manera de hacerlo, "hoja por hoja", la puedes consultar en: http://www.youtube.com/watch?v=N4LZCqqq15M&feature=related

Figura 8.35. Dos libros con las hojas intercaladas.

Tema 9

Las leyes de Newton y sus aplicaciones

Propósitos del tema 9

- Conocer y comprender las tres leyes de Newton del movimiento (ley de la inercia, ley de la fuerza y aceleración, y ley de la acción y reacción), así como aplicarlas en la solución de problemas y en la explicación de situaciones cotidianas.

9.1. La teoría del movimiento desde Aristóteles hasta Newton

Antes de analizar la relación que hay entre las fuerzas y los movimientos de acuerdo con la concepción de Newton, vale la pena considerar las ideas que sobre las fuerzas y los movimientos tenía Aristóteles. Estas ideas, que eran generalizaciones de observaciones superficiales acerca de los movimientos, parecen correctas y es muy difícil cambiarlas sin reconocer tanto su significado como sus limitaciones.

Según Aristóteles, los movimientos de los cuerpos se dividen en dos grupos:

1. los movimientos naturales y
2. los movimientos violentos.

Los movimientos naturales se realizan según la naturaleza del cuerpo y no necesitan ninguna acción externa para su realización. Tales movimientos eran el movimiento circular de los astros y los movimientos verticales que ocurren en regiones cercanas a la superficie terrestre (hacia arriba o hacia abajo).

Se pensaba que, según su naturaleza, cada cuerpo tiene un lugar natural en el mundo. Por ejemplo, la piedra cae hacia el suelo porque es ahí su lugar natural. Una burbuja de aire, al encontrarse en el agua, se mueva hacia arriba, pues su lugar natural está sobre el agua.

Todos los demás movimientos eran, según Aristóteles, "movimientos violentos". Para su realización debería existir una causa externa que obligara al cuerpo a moverse de una manera que no es natural. Esta causa se llamaba *fuerza*.

Si hay un movimiento que no es natural (es decir, que no sea el movimiento circular de los astros, o el vertical hacia abajo o hacia arriba de los cuerpos terrestres), hay una fuerza que lo provoca. Para que una piedra se mueva hacia arriba, lo que, según la concepción aristotélica, sería un movimiento contrario a la naturaleza de la piedra de moverse hacia abajo, entonces, hay que aplicarle una "fuerza lanzadora". De esta manera, el movimiento de la piedra lanzada hacia arriba era un "movimiento violento".

Esta concepción del movimiento, al parecer, concuerda bien con la observación.

Al arrastrar un cuerpo (al causar un movimiento horizontal que no es un movimiento natural), nadie se sorprenderá de que después de un rato el cuerpo se detenga. Para mantenerlo en movimiento, es necesario empujarlo o jalarlo. ¿Acaso no es cierto que los veleros navegan en el mar únicamente cuando los vientos soplan y que la carreta se mueve tan sólo cuando el caballo la jala (**Figura 9.1**)?

Figura 9.1. La carreta se detiene si no la jala el caballo.

La crítica de Galileo

Galileo hizo importantes consideraciones en cuanto a las características básicas del movimiento. Según él, la razón de que los movimientos cesen es la presencia de la fricción. En un mundo sin fricción u otras fuerzas que se opongan al movimiento, los cuerpos se moverían eternamente sin ser empujados o jalados. Aquí está la crítica hecha por Galileo a la concepción aristotélica de que los movimientos horizontales necesariamente son "movimientos violentos", que requieren una fuerza externa para mantenerse.

La naturaleza de la física

Demostración pensada de Galileo del movimiento sin fuerza

Competencia ejemplificada: Pensar críticamente al considerar evidencias.

La pregunta de Galileo era: ¿el movimiento rectilíneo en la dirección horizontal puede realizarse sin una causa externa? Galileo demostró que sí es posible. Usó un razonamiento similar al siguiente:

Imaginemos dos planos inclinados separados por un tramo horizontal y una esfera que se sostiene a cierta altura en el primer plano (**Figura 9.2**). Si se suelta, la esfera se moverá hacia abajo por el primer plano inclinado, continuará moviéndose por el tramo horizontal y, finalmente, subirá por el segundo plano inclinado hasta que alcance la altura inicial (**Figura 9.3**). ¿Cómo se movió esta esfera?

Al descender por el primer plano inclinado, la velocidad de la esfera iba aumentando, en el tramo horizontal la velocidad se mantuvo constante y, al subir por el segundo plano inclinado, la velocidad disminuía, pero la esfera logró llegar hasta una altura igual a la altura inicial.

¿Qué sucede si disminuye la inclinación del segundo plano inclinado?

La esfera alcanzará también la misma altura, aunque su movimiento durará más tiempo (**Figura 9.4**). Si la inclinación continúa disminuyendo, la esfera llegará siempre hasta la misma altura, pero tardará cada vez más tiempo y recorrerá cada vez una distancia mayor.

El caso límite ocurre cuando el segundo plano se vuelve horizontal y tiene una longitud infinita. ¿Cómo se movería la esfera en ese caso?

Si no hay algo que impida este movimiento, la esfera se movería hasta infinito.

Esta argumentación sencilla forma lo que hoy se denomina “experimento pensado” o “experimento imaginario”, porque fue realizado solamente en la mente de Galileo. Se trata de un caso imaginario porque en el mundo real no es posible tener un plano horizontal infinito.

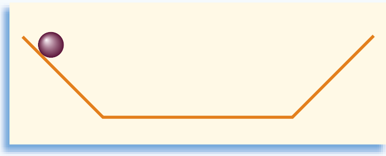


Figura 9.2. La posición inicial de la esfera.

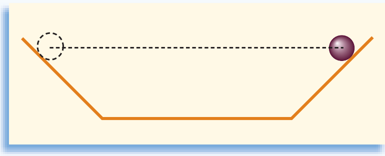


Figura 9.3. La posición final de la esfera.

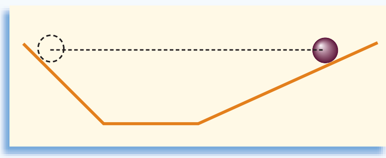


Figura 9.4. La posición final de la esfera cuando el segundo plano tiene menor inclinación.

Lo que Galileo muestra es que existe la posibilidad, en principio, de que ocurra un movimiento de velocidad constante, en el cual el cuerpo se desplazaría hasta el infinito si no hay algo que impida este movimiento. Tal conclusión choca fuertemente con la concepción de Aristóteles porque muestra la posibilidad de un movimiento horizontal eterno que no necesita que una causa externa lo mantenga.

La teoría newtoniana del movimiento

Describir el movimiento de un cuerpo significa decir cómo cambia la posición del cuerpo con el transcurso del tiempo. Como hemos visto, cierto tipo de cambio de la posición instantánea implica cierta característica de la velocidad. Por ejemplo, si la distancia recorrida es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido, la velocidad aumentará de manera uniforme con el tiempo.

Una vez que se tiene una descripción precisa de los movimientos, el siguiente paso es preguntarse sobre sus causas. Las preguntas más sencillas son:

- ¿En qué circunstancias ocurre un movimiento rectilíneo de velocidad constante?
- ¿En qué circunstancias ocurre un movimiento rectilíneo de aceleración constante?

Llegar a entender las causas de estos y otros tipos de movimientos fue uno de los pasos más importantes en la investigación de los fenómenos naturales. Este programa fue ideado y realizado en forma completa por Isaac Newton (1643-1727).

Los grandes físicos

Isaac Newton

Woolsthorpe (1643)-Londres(1727).
Isaac Newton (**Figura 9.5**) fue un físico, astrónomo y matemático inglés.

Además trabajó como catedrático de física y matemáticas en la Universidad de Cambridge y fue presidente de la Sociedad Real (Royal Society). Realizó importantes trabajos en mecánica, óptica, astronomía y matemáticas. Formuló las leyes de la mecánica y la ley de la gravitación universal, descubrió la dispersión de la luz y formuló la teoría corpuscular de la luz.

Gracias a su obra más importante, *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), publicada en 1687, logró ser el físico más influyente de todos los tiempos.

Figura 9.5. Isaac Newton.

Newton fue el primero en establecer la conexión correcta entre los movimientos y las fuerzas, creando así el primer sistema de conocimiento que abarcaba tanto la física del cielo como la física del ámbito terrestre. A partir de entonces, los movimientos de los planetas y de los cuerpos terrestres fueron explicados usando las mismas leyes del movimiento que Newton formuló.

A continuación conocerás las formulaciones de esas leyes, su significado y algunas de sus aplicaciones sencillas.

La pregunta voladora

¿Puedes dar tres ejemplos en los que las acciones de otros cuerpos provoquen el cambio del movimiento de algún cuerpo (cambio de rapidez, de dirección o de sentido del movimiento)?

9.2. La primera ley de Newton

Es un conocimiento común que los cuerpos que están en reposo no comienzan a moverse sin acciones de otro cuerpo. Parece que los cuerpos, por naturaleza, conservan su estado de reposo.

El experimento pensado de Galileo demostró algo menos obvio: Los cuerpos, por naturaleza, también tratan de conservar su movimiento. Sin acciones de otros cuerpos, un cuerpo no puede cambiar su movimiento. Seguirá moviéndose en la misma dirección, en el mismo sentido y a la misma rapidez.

Newton retomó las ideas de Galileo y las resumió en la primera ley.

Primera ley de Newton

Sin acciones de otros cuerpos, un cuerpo mantiene su estado de reposo o de movimiento.

Los cuerpos también mantienen su estado de reposo o de movimiento cuando las acciones de otros cuerpos se cancelan. En tales casos, la suma de los vectores de fuerza que describen las acciones de otros cuerpos es igual a cero.

Inercia y masa

El cambio del estado de movimiento de un cuerpo se debe a las interacciones con otros cuerpos. Si no hay influencias de otros cuerpos o esas influencias se cancelan mutuamente, un cuerpo por sí mismo no puede cambiar su velocidad. Para nombrar esta propiedad de los cuerpos se inventó el concepto de **inercia**.

Definición

La **inercia** es la propiedad de los cuerpos de resistirse al cambio de su estado de movimiento o de reposo.

La inercia se cuantifica a través del concepto de **masa**.

Definición

La **masa** es la medida de la inercia.

El cuerpo con mayor masa tiene mayor resistencia al cambio de su estado de reposo o de movimiento. A un balón de fútbol, cuya masa es de alrededor de medio kilogramo, puedes darle fácilmente una velocidad de 15 m/s o detenerla cuando se mueve a esa velocidad. Sin embargo, no puedes hacer esto mismo con un automóvil que tiene una masa de 1,000 kilogramos. No solamente no puedes darle una velocidad de 15 m/s, sino que sería mortalmente peligroso intentar detenerlo, con las manos o el cuerpo, cuando se mueve a esa velocidad.

Todos los cuerpos, sólidos, líquidos o gaseosos, poseen inercia, es decir, se oponen al cambio de su estado de reposo o de movimiento. El cuerpo humano también la posee y eso llega a tener peligrosas consecuencias que es mejor prevenir.

Física en la vida cotidiana

La inercia del cuerpo humano puede ser peligrosa

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto físico en una situación cotidiana.

El cinturón de seguridad (**Figura 9.6**) impide que, en un accidente, el cuerpo del conductor golpee contra al volante o que su cabeza rompa el parabrisas. Esto ocurriría si el automóvil, de repente, disminuyera su rapidez (por un frenado violento) o se detuviera completamente (por un choque contra otro auto que venga en sentido opuesto o contra un muro).

El cuerpo del conductor, sin la fuerza de detención proporcionada por el cinturón de seguridad, continuaría moviéndose a la rapidez anterior al frenado. El cuerpo humano no puede cambiar esa velocidad por sí mismo. Si el cuerpo sigue moviéndose con el auto detenido, el pecho del conductor chocaría contra el volante, y la cabeza contra el parabrisas.

Mucha gente cree que la cabecera del asiento (**Figura 9.7**) sirve solamente para que el conductor descanse con mayor comodidad si se siente fatigado.

Sin embargo, ese complemento también protege la vida del conductor porque impide que su cabeza haga un movimiento muy brusco hacia atrás. Tal movimiento podría lesionarle el cuello.

Competencia a practicar: Explicitar un concepto físico en una situación cotidiana.

¿En qué situación ocurriría ese movimiento peligroso?

Figura 9.6. Sin el cinturón de seguridad, el cuerpo del conductor seguiría moviéndose en el caso de una detención accidental del vehículo.

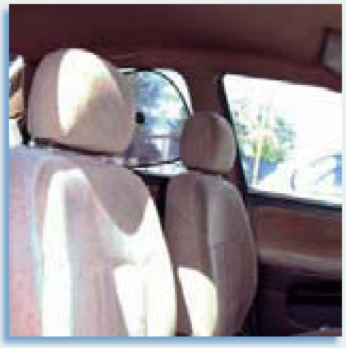


Figura 9.7. La cabecera del asiento impide el movimiento brusco de la cabeza hacia atrás.

La búsqueda del conocimiento

Las bolsas de aire

Competencia a practicar: Obtener la información para responder preguntas.

Desde hace algún tiempo, muchos automóviles, aparte de los cinturones de seguridad, cuentan con un nuevo recurso para proteger al conductor y a sus acompañantes en caso de un accidente. Se trata de las "bolsas de aire" (**Figura 9.8**). Al detectarse un cambio brusco en el estado de movimiento del vehículo, las bolsas se inflan e impiden que el cuerpo del conductor y del pasajero sufran daños.

Busca en la Internet información sobre el funcionamiento de las bolsas de aire y responde las siguientes preguntas:

1. ¿De qué manera se detecta un cambio peligroso en el movimiento del auto?
2. ¿Cuánto tiempo se necesita para que se infle una de estas bolsas de aire?

Figura 9.8. Las bolsas de aire infladas.

Figura 9.9a. Al lanzar la pelota de golf, se requiere una gran aceleración y por eso la fuerza del golpe debe ser grande.

Figura 9.9b. Para meter la pelota en un hoyo cercano, se requiere poca aceleración y la fuerza del golpe debe ser pequeña.

9.3. La segunda ley de Newton

La primera ley de Newton afirma que la velocidad de un cuerpo no cambia, si el cuerpo no está sujeto a las acciones de otros cuerpos o si estas acciones se equilibran. El cambio en la velocidad puede ocurrir solamente si otros cuerpos lo provocan con sus fuerzas. Dicho de otra forma, el movimiento de un cuerpo y sus cambios dependen únicamente de las fuerzas que sobre ese cuerpo ejercen otros cuerpos. Las fuerzas que se ejercen sobre otros cuerpos no influyen, de ninguna manera, en el comportamiento del cuerpo en cuestión.

La segunda ley establece la relación entre el cambio de la velocidad de un cuerpo y las fuerzas debidas a la interacción con otros cuerpos. Ya sabes que el cambio de la velocidad, ya sea en magnitud o en dirección, indica la presencia de aceleración.

Si existen interacciones con otros cuerpos, la aceleración de un cuerpo es determinada tan sólo por la fuerza neta que resume las acciones de los demás cuerpos sobre él. Entonces, el punto central de la segunda ley es el siguiente: Por un lado, se tiene el cambio de la velocidad expresado a través de la aceleración y, por el otro, tenemos las interacciones con otros cuerpos resumidas en una fuerza neta.

¿Cuál es la relación entre la aceleración del cuerpo y la fuerza neta que representa las acciones de otros cuerpos sobre él? Consideremos un caso sencillo, donde solamente importe la interacción entre dos cuerpos, un palo y una pelota de golf que está en reposo.

En el caso de un lanzamiento (**Figura 9.9a**), el jugador de golf quiere que la pelota salga a gran velocidad, lo cual implica la presencia, durante un breve espacio de tiempo, de una gran aceleración, porque la velocidad inicial de la pelota es cero. Por ello, tiene que darle un duro golpe a la pelota, lo que equivale a una gran fuerza.

Al contrario, cuando la pelota está cerca del hoyo (**Figura 9.9b**), le debe dar un golpe suave para que su velocidad no sea grande, lo cual implica esta vez una pequeña aceleración.

De aquí y de otras situaciones similares parece viable la conjetura de que la aceleración que logra el cuerpo es proporcional a la fuerza neta que ejercen otros cuerpos:

$$a \propto F_{neta}$$

Si la fuerza del golpe aumenta al doble, la aceleración de la pelota de golf también será dos veces mayor. Si la fuerza del golpe disminuye hasta su cuarta parte, entonces la aceleración de la pelota de golf será cuatro veces menor. Las mediciones confirman la veracidad de esta conjetura, transformándola en una relación experimental.

¿Cuál sería la aceleración resultante si la jugadora de golf, en vez de golpear una pelota de golf, le pega con la misma fuerza a un balón de fútbol, cuya masa es diez veces mayor?

La aceleración del balón de fútbol sería 10 veces menor que la de la pelota de golf, si ambos fueran golpeados con la misma fuerza. Entonces, se supone que la aceleración del cuerpo es inversamente proporcional a su masa:

$$a \propto \frac{1}{m}$$

Al aplicar la misma fuerza a dos cuerpos, cuyas masas sean 1 kg y 5 kg, la aceleración del cuerpo de 1 kg será 5 veces mayor que la aceleración del cuerpo de 5 kg. Juntando ambas ideas en una sola relación, se tiene una de las posibles formas de expresar la segunda ley de Newton:

Segunda ley de Newton para la aceleración

La aceleración del cuerpo, causada por las interacciones con otros cuerpos, es directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a su masa.

Simbólicamente, esa afirmación se escribe como:

$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{m}$$

Conociendo de antemano la fuerza neta y la masa del cuerpo, es posible predecir cuál será la aceleración del cuerpo y, en general, su movimiento. Sin embargo, a veces no sabemos cuál es la fuerza neta. ¿Cómo la podemos inferir?

En tal caso, tendríamos que medir la masa del cuerpo y la aceleración que alcanza debido a la fuerza neta y, con estos datos, calcular el valor de la fuerza neta.

Con esa finalidad, se despeja la fuerza neta de la expresión para la aceleración y se tiene:

$$F_{\text{neta}} = ma$$

En esta fórmula, a es la aceleración del cuerpo y F_{neta} es la intensidad de la fuerza neta que describe todas las interacciones en que participa el cuerpo cuyo movimiento nos interesa. Esta relación permite expresar la segunda ley de Newton en una forma equivalente:

Segunda ley de Newton para la fuerza neta

El producto de la masa y la aceleración de un cuerpo es igual a la intensidad de la fuerza neta que resume las acciones de otros cuerpos.

Unidad de la fuerza

La unidad de fuerza en el Sistema Internacional (SI) se deriva a partir de la segunda ley de Newton:

$$[F] = [m][a] = 1\,\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

Esta unidad "1 kgm/s²" se denomina *newton* y su símbolo es N.

El detalle que importa

"Newton" no es "newton"

Hay que distinguir entre "Newton" (con mayúscula), que es el apellido del científico inglés, y el "newton" (con minúscula) que es la unidad de fuerza en el Sistema Internacional de Unidades.

Problema resuelto

La fuerza neta sobre una motocicleta Suzuki GSX-R

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 9.10. La moto Suzuki GSX-R.

La Suzuki GSX-R (**Figura 9.10**) tiene la mayor capacidad de aceleración de todas las motocicletas.

Partiendo del reposo, esta motocicleta puede alcanzar una velocidad de 100 km/h (27.8 m/s) en sólo 2.4 segundos. Si las masas de la moto y del conductor son de 200 kg y 70 kg, respectivamente, ¿qué tan grande será la fuerza neta necesaria para lograr esta aceleración récord?

Solución: La fuerza neta, según la segunda ley de Newton, es:

$$F_{neta} = ma$$

donde *m* es la suma de las masas de la moto y el conductor, y *a* es la aceleración de la moto. Suponiendo que sea constante, la aceleración se calcula con la fórmula:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{27.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2.4\text{ s}} = 11.58\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Entonces, la fuerza neta es:

$$F_{neta} = (200\text{ kg} + 70\text{ kg}) \cdot 11.58\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3{,}126.6\text{ N}$$

Dar sentido al resultado: La fuerza neta es mayor que el peso de la moto y el conductor que es de 2,646 N. Esto quiere decir que la fuerza de fricción entre el pavimento y las llantas (los neumáticos) de la motocicleta es, también, mayor que el peso de la moto y el conductor. El coeficiente de fricción que corresponde a esa fuerza es, entonces, mayor que 1.

Problema por resolver

La fuerza neta sobre un avión

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un avión completamente cargado tiene una masa de 200 toneladas (200,000 kg).

1. ¿Qué fuerza neta se necesita para que en la pista de despegue alcance una aceleración de 2 m/s^2?
2. ¿A qué porcentaje del peso del avión corresponde esa fuerza neta?

¡Hagamos física!

La moneda sobre la hoja

Propósito: Explorar el comportamiento de una moneda.

Competencias a practicar: Observar, describir y explicar el comportamiento de la moneda; aprender en equipo; aprendizaje autorregulado.

Figura 9.11. La moneda sobre la hoja.

Material: Una moneda de diez pesos, una hoja de papel y una mesa lisa.

1. Formen un equipo y pongan una moneda de diez pesos sobre una hoja de papel colocada sobre una mesa lisa. La moneda debe estar cerca de uno de los lados más cortos de la hoja (**Figura 9.11**).
2. Si alguna o alguno de ustedes, tomando la hoja por su parte más lejana a la moneda, la jala lentamente, ¿qué pasa a la moneda?

____

____

3. Si alguna o alguno de ustedes, tomando la hoja por su parte más lejana a la moneda, le da un jalón brusco, ¿qué pasa a la moneda?

____

____

4. ¿Cuál es su explicación del comportamiento observado de la moneda en las dos maneras diferentes de mover la hoja?

____

____

5. Comparen y discuten las explicaciones que propusieron los miembros del equipo. Traten de llegar a un consenso. ¿Cuál es la explicación del equipo del comportamiento de la moneda para las dos diferentes maneras de mover la hoja?

____

____

6. ¿Qué aprendiste en esta actividad?

____

____

Abrir bien los ojos

¿La segunda ley es una definición de fuerza?

Competencia ejemplificada: Valorar preconcepciones comunes sobre la segunda ley de Newton.

La segunda ley expresa la relación entre la fuerza neta y la aceleración del cuerpo. Algunas personas consideran que esa relación define la fuerza. Es cierto que esa relación puede ayudar a determinar el valor de una fuerza si uno conoce el valor de la masa y de la aceleración.

Sin embargo, si uno quiere predecir el valor de la aceleración, entonces tiene que ser capaz de determinar el valor de la fuerza de otra manera. Por ello, como ya se ha visto para la fuerza de fricción y como veremos, un poco más adelante, para las fuerzas gravitacional y elástica, en física la magnitud de las fuerzas se determina sin recurrir a la segunda ley de Newton.

Como hemos visto, la segunda ley de Newton permite resolver dos tipos de problemas de movimiento.

1. Si se conocen la fuerza neta y la masa del cuerpo, se pueden determinar la aceleración y el movimiento que corresponde a esa aceleración.
2. Si se conocen la aceleración y la masa del cuerpo, se puede inferir la fuerza neta responsable de esa aceleración.

Veamos ahora dos ejemplos ilustrativos de estos dos tipos de problemas acerca del movimiento.

Problema resuelto

Predecir el movimiento de un jumbo jet si se conocen la fuerza de sus motores y su masa

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un jumbo jet (**Figura 9.12**) tiene una masa de 320 toneladas (320,000 kg), lo cual equivale a la masa de 320 automóviles normales.

Para hacer posible el despegue a una velocidad de 280 km/h, los motores a chorro generan, en condiciones ideales, una fuerza neta de 512,000 newtons.

Figura 9.12. Un jumbo jet se prepara para el despegue.

a) ¿Qué tan grande es la aceleración del jumbo jet cuando se mueve sobre la pista de despegue?
b) ¿Cuánto dura el despegue?
c) ¿Cuál debería ser la longitud mínima de la pista?

Solución:

a) La aceleración del avión se obtiene a partir de la segunda ley de Newton:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{512{,}000 \text{ N}}{320{,}000 \text{ kg}} = 1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

b) El tiempo de despegue es igual al tiempo t que necesita el avión para alcanzar la velocidad de despegue v = 280 km/h = 78 m/s, partiendo del reposo y teniendo la aceleración a:

$$t = \frac{v}{a} = \frac{78 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 48.75 \text{ s} \approx 49 \text{ s}$$

c) En ese tiempo, moviéndose con aceleración constante a partir del reposo, el avión recorre el camino:

$$d = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (49 \text{ s})^2 = 0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2{,}401 \text{ s}^2 = 1{,}920.8 \text{ m}$$

Dar sentido al resultado: Aunque la aceleración parece escasa, los motores son capaces de mantenerla constante durante 50 segundos. Esto hace posible alcanzar la velocidad de despegue, que es una velocidad respetable que únicamente los automóviles deportivos son capaces de alcanzar.

Es verdad que los autos deportivos la alcanzan en menos tiempo, pero su masa es mucho menor que la de un jumbo jet. La longitud de la pista debe ser de casi 2 kilómetros. Por razones de seguridad, las pistas suelen tener una longitud mucho mayor para permitir los despegues en condiciones que no sean las ideales.

Pensamiento crítico: ¿Cuándo ocurren las condiciones no ideales?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Supón que un nuevo tipo de jumbo jet tenga la misma fuerza de motores y la misma velocidad de despegue, pero solamente la mitad de la masa de los aviones reales (160 toneladas). ¿Cuáles serían la aceleración, el tiempo y la distancia de despegue del nuevo avión?

Problema resuelto

Inferir la fuerza neta conociendo el movimiento de un Volkswagen Bora y su masa

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En una prueba de aceleración, un Volkswagen Bora (**Figura 9.13**) alcanzó una velocidad v = 100 km/h = 27.8 m/s y recorrió una distancia d = 227 m. La masa del automóvil es m = 1,565 kg.

a) ¿Qué tan grande, en promedio, es la fuerza neta necesaria para que ocurra un movimiento acelerado de tales características.

b) ¿Cuál es el coeficiente de fricción entre las llantas y la carretera?

Figura 9.13. El Volkswagen Bora.

Solución:

a) En este tipo de pruebas, el vehículo parte del reposo. Si se supone que el automóvil se mueve con aceleración constante a, para la velocidad alcanzada y el camino recorrido son válidas las relaciones:

$$v = at$$

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

Podemos despejar el tiempo de duración del movimiento, que es desconocido, en la primera ecuación $\left(t = \frac{v}{a}\right)$ e introducirlo en la segunda, para obtener:

$$d = \frac{1}{2}a \cdot \frac{v^2}{a^2} = \frac{v^2}{2\,a}$$

De esta ecuación, es posible obtener la aceleración:

$$a = \frac{v^2}{2d} = \frac{\left(27.8\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 227\text{ m}} = \frac{772.8\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{454\text{ m}} = 1.7\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Conociendo la aceleración promedio y la masa del auto, se infiere la magnitud de la fuerza neta:

$$F = ma = 1{,}565\text{ kg} \cdot 1.7\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2{,}660.5\text{ N}$$

b) La fuerza que acelera al automóvil es la fuerza de fricción entre las llantas y la carretera. Como la fuerza normal es igual al peso del vehículo, entonces el coeficiente de fricción es:

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{F}{W} = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g} = \frac{1.7\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.17$$

Dar sentido al resultado: El valor del coeficiente de fricción está muy por debajo del valor para la goma y el hormigón, tanto para fricción estática como para la cinética (véase la **Tabla 8.1**). Como el coeficiente de la fricción entre las llantas y el pavimento puede ser mayor que 0.17, es evidente que, con un motor más potente, se alcanzarían mayores aceleraciones.

Pensamiento crítico: Si se calcula el tiempo que debería transcurrir hasta que el auto alcance la velocidad de 100 km/h, con el modelo matemático usado $\left(t = \frac{v}{a}\right)$, se obtiene el valor $t_{\text{calculado}} = 16.35$ s. Sin embargo, el tiempo medido, el que verdaderamente tardó el automóvil para alcanzar esa velocidad, fue $t_{\text{medido}} = 13.32$ s. ¿A qué se debe esta discrepancia considerable entre lo que se mide y lo que se calcula?

Es de sentido común decir que un automóvil acelera mejor cuando el conductor viaja solo, que cuando lo hace acompañado por otras personas. Sin embargo, la segunda ley de Newton permite dar a ese conocimiento un toque cuantitativo. En otras palabras, es posible calcular cuánto va a disminuir la aceleración, si conocemos la masa adicional debida a la presencia de los acompañantes.

Problema resuelto

Un automóvil acelera menos cuando viajan en él más personas

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos, y explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Un automóvil, cuya masa es de 1,000 kg, acelera desde el reposo hasta 100 km/h en diez segundos.

a) ¿Qué tan grande es la fuerza neta causante de la aceleración?
b) Si ahora viajan con el conductor otras 4 personas, cuya masa total es de 300 kg, ¿cuál será la nueva aceleración?
c) ¿Qué velocidad alcanzará ahora el auto en 10 segundos?

Supón que la fuerza neta que acelera al vehículo no cambia.

Solución:

a) La fuerza neta F, responsable de la aceleración del coche, es:

$$F = ma$$

donde m es la masa del automóvil con conductor y a es la aceleración.

Como se conoce la masa del auto con conductor, para calcular la fuerza necesitamos conocer la aceleración. Sabemos que el cambio de velocidad $\Delta v = 100$ km/h $= 27.8$ m/s ocurrió en un intervalo de tiempo $\Delta t = 10$ s y, por tanto, la aceleración es:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{27.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{10\text{ s}} = 2.78\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Y la fuerza neta es:

$$F = ma = 1{,}000 \text{ kg} \cdot 2.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2{,}780 \text{ N}$$

b) Cuando el conductor tiene compañía, la nueva masa será $m_1 = 1{,}000 \text{ kg} + 300 \text{ kg} = 1{,}300 \text{ kg}$. Por ello, la aceleración del auto cuando viajan en él cinco personas será:

$$a_1 = \frac{F}{m_1} = \frac{2{,}780 \text{ N}}{1{,}300 \text{ kg}} = 2.14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) Si la nueva aceleración se mantiene durante $\Delta t = 10$ s, el nuevo cambio de velocidad será:

$$\Delta v_1 = a_1 \cdot \Delta t = 2.14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ s} = 21.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 77 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Dar sentido al resultado: Cuando la masa total del vehículo aumenta 1.3 veces, con la misma fuerza neta entre las llantas y la carretera, la aceleración disminuye 1.3 veces:

$$a_1 = \frac{a}{1.3} = \frac{2.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1.3} = 2.14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La velocidad que el coche alcanza en diez segundos, siendo proporcional a la nueva aceleración, también disminuye 1.3 veces:

$$\Delta v_1 = \frac{\Delta v}{1.3} = \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{1.3} = 77 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos, explicitar conceptos físicos en una situación cotidiana.

Si al conductor lo acompañan dos personas cuya masa total es de 100 kg, ¿cuál sería la aceleración del auto y qué velocidad alcanzaría en 10 s? Supón que la fuerza entre las llantas y la carretera no cambia.

9.4. La tercera ley de Newton

Todo lo que ocurre en el mundo físico se debe a las interacciones entre los cuerpos físicos. El concepto de interacción es un concepto bastante general y expresa influencias físicas de todos tipos que existen entre los cuerpos físicos. Si queremos concretar y aclarar el concepto de interacción, tenemos que cuantificar estas influencias mutuas. Como vimos, para esto nos sirve el concepto de fuerza. Pero como el concepto de fuerza describe solamente la acción de un cuerpo sobre otro, se pierde de vista una parte importante: ***las acciones de los cuerpos siempre son interacciones***.

A veces los dos lados de la interacción se notan fácilmente. Por ejemplo, las manos de un individuo que trata de estirar un resorte sienten la acción opuesta del resorte que trata de recuperar su forma original (**Figura 9.14**). ¡No es posible jalar sin ser jalado!

Figura 9.14. Las manos tratan de separar los extremos del resorte y el resorte trata de acercar las manos.

Sin embargo, muchas veces un lado de la interacción predomina y el otro queda escondido. Tú sabes bien que la Tierra te atrae. Mides esta acción terrestre cada vez que te subes a una báscula de baño. Pero hay preguntas muy interesantes:

- ¿Tú también atraes a la Tierra?
- ¿La báscula de baño mide también tu acción sobre la Tierra?

La tercera ley de Newton resuelve estas dudas.

Tercera ley de Newton

Si el cuerpo *A* actúa sobre el cuerpo *B*, la acción del cuerpo *A* sobre el cuerpo *B* es igual en dirección y magnitud, pero tiene sentido opuesto a la acción del cuerpo *B* sobre el cuerpo *A* (**Figura 9.15**).

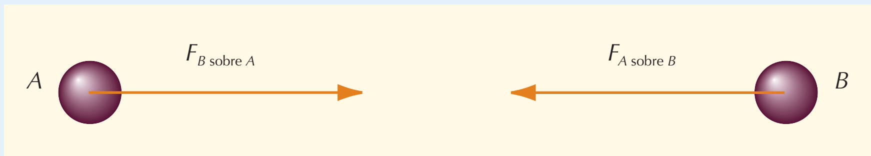


Figura 9.15. Las acciones mutuas entre los cuerpos *A* y *B*.

Simbólicamente, esto se representa mediante la fórmula:

$$F_{A \text{ sobre } B} = - F_{B \text{ sobre } A}$$

Es más fácil recitar la tercera ley que comprenderla y aplicarla adecuadamente. Por ello, no está de más hacer un comentario adicional y dar un ejemplo de la aplicación inadecuada de la tercera ley. Primero viene el comentario importante.

Abrir bien los ojos

Dos fuerzas y dos cuerpos

Competencia ejemplificada: Valorar preconcepciones comunes sobre la tercera ley de Newton.

Algunos piensan que las dos fuerzas mencionadas, denominadas algunas veces "acción" y "reacción", por tener la misma magnitud y dirección y sentidos opuestos, se deben equilibrar o cancelar.

Esto sería cierto si ambas acciones fueran sobre un mismo cuerpo. Pero las fuerzas de acción y reacción se refieren a acciones sobre dos cuerpos diferentes, y por eso no se cancelan.

Figura 9.16. Empujando un coche.

Como el ejemplo del uso inadecuado de la tercera ley se refiere a la situación en que una persona empuja un automóvil (**Figura 9.16**), vale la pena analizar detenidamente esta situación tan común y ordinaria.

Un análisis detenido requiere que se reconozcan todos los pares de fuerzas, de "acción-reacción", importantes para el movimiento del auto y de la persona.

¿Cuáles fuerzas determinan que el vehículo comience a moverse o que siga detenido? Una de ellas es la suma de las fuerzas de fricción que el suelo ejerce sobre las llantas ($f_{\text{suelo-sobre-llantas}}$) y otra es la fuerza que la persona ejerce sobre el automóvil ($F_{\text{persona-sobre-auto}}$).

Como estas dos fuerzas tienen sentidos opuestos, el coche se empieza a mover solamente cuando es cierto que:

$$F_{\text{persona-sobre-coche}} > f_{\text{suelo-sobre-llantas}}$$

No es posible comenzar a mover el coche sin vencer la fricción estática entre el suelo y las llantas. ¿Cuáles fuerzas determinan el movimiento de la persona?

Una de ellas es la fuerza de reacción del automóvil ($F_{\text{auto-sobre-persona}} = -F_{\text{persona-sobre-auto}}$) y otra es la fuerza de fricción que ejerce el suelo sobre los zapatos de la persona ($f_{\text{suelo-sobre-persona}} = -f_{\text{persona-sobre-suelo}}$).

Para que la persona no se quede parada, debe ser cierto que:

$$F_{\text{suelo-sobre-persona}} > F_{\text{coche-sobre-persona}}$$

Con estas aclaraciones, te toca ahora analizar críticamente dos explicaciones diferentes de cómo es posible empujar exitosamente un automóvil.

¡No creas todo lo que lees!

Empujar un automóvil y la tercera ley de Newton

Competencias a practicar: Pensamiento crítico; identificar los principios medulares que subyacen a un fenómeno cotidiano.

En cierto libro de texto de física se ofrecen dos explicaciones de por qué es posible lograr que un auto se mueva al empujarlo. La primera "explicación" dice:

> "Al empujar el carro hacia delante, éste ejerce una reacción igual pero en sentido opuesto. Sin embargo, se mueve, pues al aplicar la fuerza al carro estamos empujando hacia atrás el suelo con nuestros pies; por consiguiente, la Tierra nos empuja hacia delante con una fuerza mayor que la fuerza aplicada al empujar el carro; de hay que la resultante de estas dos fuerzas es la que logra mover el auto."

1. En esta primera "explicación" se afirma que la fuerza que mueve al coche es la resultante de dos fuerzas: una que aplica la persona al automóvil y otra ("mayor") que aplica la Tierra sobre la persona.

- En la mecánica de Newton ¿tiene sentido sumar dos fuerzas que actúan sobre dos cuerpos diferentes?
- ¿Es posible que la fuerza que actúa sobre un cuerpo influya en el movimiento de otro cuerpo?

El párrafo anterior está acompañado de un dibujo, similar al de la **Figura 9.16** (lo que le falta son los vectores que representan las fuerzas participantes). En el texto que aparece debajo de ese dibujo, se propone una segunda "explicación" de por qué se logra mover el vehículo:

"El coche logra moverse porque la fuerza que produce la acción (A) actúa sobre un cuerpo (la Tierra) y la fuerza de reacción (R) actúa sobre otro (el coche)."

2. Según la tercera ley, si la fuerza de acción (A) actúa sobre la Tierra y la fuerza de reacción (R) actúa sobre el automóvil, entonces, necesariamente el cuerpo responsable de la acción sobre la Tierra es el automóvil. ¿Afirma esto o algo diferente a la segunda "explicación" de por qué se logra mover el vehículo? Si te parece que afirma algo diferente, ¿es correcta esa afirmación según la tercera ley de Newton?
3. ¿Qué fuerza importante para el movimiento del auto no se toma en cuenta en ninguna de las dos "explicaciones"?

Las aceleraciones de dos cuerpos que interaccionan según la tercera ley

Si dos cuerpos, cuyas masas son m_1 y m_2, interaccionan y adquieren aceleraciones a_1 y a_2, combinando la segunda y la tercera leyes, se tendrá:

$$m_1a_1 = -m_2a_2$$

Para los cuerpos de masas iguales ($m_1 = m_2$), las aceleraciones serían de la misma magnitud aunque de sentidos opuestos ($a_1 = -a_2$). Si la masa de un cuerpo es dos veces mayor ($m_1 = 2m_2$), su aceleración debida a la interacción sería dos veces menor ($a_1 = -a_2/2$).

Problema resuelto

Aceleración en el patinaje artístico

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El patinaje artístico de parejas (**Figura 9.17**) es uno de los eventos más vistos de las olimpiadas de invierno.

Supongamos que la pareja esté formada por un patinador de masa m_1 = 60 kg y una patinadora de m_2 = 45 kg y que el patinador empuja a su compañera, dándole una aceleración de a_2 = 2 m/s^2. ¿Cuál es la aceleración a_1 del patinador?

Solución: Aplicando la tercera ley de Newton al empujón entre los patinadores, se tiene:

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2$$

De aquí se despeja la aceleración del patinador:

$$a_1 = -\frac{m_2}{m_1} \cdot a_2 = -\frac{45\text{ kg}}{60\text{ kg}} \cdot 2\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = -1.5\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dar sentido al resultado: Como la masa del patinador es mayor que la masa de la patinadora, la magnitud de su aceleración debe ser menor. El signo menos indica que los vectores de las aceleraciones de la patinadora y del patinador tienen sentidos opuestos.

Figura 9.17. El patinaje artístico de parejas.

¿Qué sucede cuando la masa de un cuerpo es extremadamente mayor que la masa del cuerpo con el que interacciona?

La aceleración del cuerpo más masivo será prácticamente igual a cero. Esto ocurre en el caso de la Tierra y los cuerpos atraídos por ella. La piedra cuya masa es de 1 kg es atraída por la Tierra con una fuerza de 9.8 N y se mueve hacia la Tierra con una aceleración de 9.8 m/s^2. La Tierra es atraída por la piedra con una fuerza de −9.8 N. Como verás dentro de poco, la masa de la Tierra es realmente muy grande: ¡$6 \cdot 10^{24}$ kilogramos! Teniendo esa masa, la Tierra se "mueve" hacia la piedra con una aceleración:

$$a_{\text{tierra}} = \frac{F_{\text{piedra-sobre-tierra}}}{m_{\text{tierra}}} = \frac{-9.8\text{ N}}{6 \cdot 10^{24}} = -1.6 \cdot 10^{-24}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Incluso dándole a la Tierra todo el tiempo de mundo, no sería posible distinguir entre el "movimiento" con esta aceleración y el reposo.

En su interacción, la Tierra y la piedra nos revelan los dos lados de la interacción. Para apreciarlos, es mejor observar los efectos de la interacción entre dos cuerpos de masas que no difieran mucho.

Actividad práctica

La tercera ley de Newton en patines

Propósito: Experimentar la tercera ley de Newton.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis; realizar experimentos pertinentes.

Material: Patines y cuerda.

Imagina que dos patinadores se juntan y tratan de empujarse uno a otro (**Figura 9.18a**).

1. ¿Qué pasaría? Justifica tu respuesta.

Figura 9.18a. ¿Cómo son los empujones entre patinadores?

Dos patinadores comienzan a jalarse con las manos (**Figura 9.18b**).

2. ¿Qué pasaría con los patinadores? Justifica tu respuesta.

Figura 9.18b. ¿Cómo son los jalones entre patinadores?

Con un compañero o una compañera realiza las dos situaciones anteriores.

3. ¿Coincide lo que ocurrió con lo que has predicho? Si no, ¿a que crees que se debe la diferencia?

¡Hagamos física!

¿Es posible modificar lo que indica una báscula de baño?

Propósito: Observar los efectos de las acciones entre los cuerpos y entenderlos aplicando la tercera ley de Newton.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar experimentos pertinentes y aprender en equipo; aprendizaje autorregulado.

Material: Báscula de baño y palo de escoba.

Imagina que estás parado sobre una báscula de baño y que sostienes en tus manos un palo (de escoba) (**Figura 9.19**).

1. ¿Qué sentido tiene el número indicado por la báscula?

Figura 9.19. Una persona parada sobre una báscula de baño con un palo en las manos.

2. ¿Qué indicaría la báscula si la presionas, lo más que puedas, con el palo? (No se debe golpear la báscula con el palo ni brincar sobre ella.)
   a) El mismo número.
   b) Un número mayor.
   c) Un número menor.

Elige la respuesta que te parezca más adecuada. Describe detalladamente tu razonamiento. Acompaña tu razonamiento con un dibujo.

3. Compara tu respuesta y tu razonamiento con los de tus compañeros.
   Intenten llegar a una respuesta común y a un razonamiento compartido.

4. Cuando tengan la respuesta, verifíquenla usando una báscula y un palo de escoba.
   Si la lectura de la báscula no es la esperada, ¿a qué se debe la diferencia?

5. Discutan las preguntas que vienen abajo. Cada respuesta debe complementarse con el razonamiento que la respalde. ¿Dónde debería presionar con el palo un individuo parado en una báscula de baño, para que la lectura de la báscula sea menor?

6. ¿Dónde debería presionar con el palo un individuo parado en una báscula de baño, para que la lectura de la báscula sea mayor?

7. Verifica la veracidad de las respuestas realizando las acciones. ¿La acción decidida produjo la lectura esperada?

9.5. Aplicaciones de las leyes de Newton

Para aplicar la segunda ley de Newton con la finalidad de predecir el movimiento de un cuerpo, hay que saber cómo encontrar la fuerza neta, es decir, hay que tomar en cuenta las acciones de otros cuerpos sobre el cuerpo cuyo movimiento nos interesa predecir. En las primeras aplicaciones, se ha dado simplemente la fuerza neta sin analizar por qué tiene el valor dado. En el análisis sobre cómo es posible comenzar a mover un automóvil sólo se aplicó cualitativamente la tercer ley de Newton.

Ahora veremos algunas aplicaciones de las leyes de Newton, para las cuales será necesario encontrar la fuerza neta cuando, sobre el cuerpo cuyo movimiento nos interesa, actúa más de un cuerpo. También veremos los aspectos básicos del movimiento circular y las condiciones en que puede surgir.

Problema por resolver

Jalar las cajas

Competencia a practicar: Explicitar conceptos físicos en una situación cotidiana.

Imagina que tienes que jalar dos cajas, una ligera y una pesada, para que se muevan con la misma aceleración sobre una plataforma horizontal y lisa (**Figura 9.20**). Las cajas están unidas con una cuerda delgada que podría romperse si se tensa demasiado al mover las cajas.

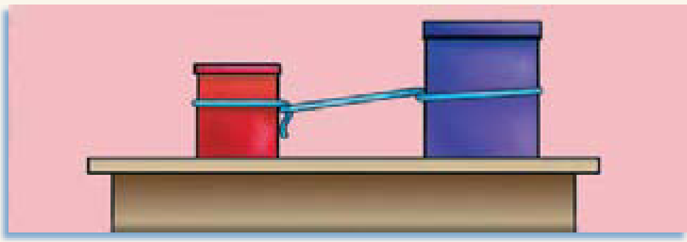


Figura 9.20. Las cajas de pesos diferentes unidas por una cuerda delgada.

Si quieres evitar que la cuerda se rompa, ¿a cuál caja, a la pesada o a la ligera, atarías la cuerda con la que las jalarás? Describe detalladamente tu razonamiento.

¿Importa qué caja viene primero?

Veamos una comparación cuantitativa entre las dos formas posibles de jalar las cajas. Así podrás verificar si los resultados de tu análisis cualitativo coinciden o no con lo que resulta de la aplicación de las leyes de Newton.

Para calcular la tensión se deben conocer las masas de las cajas y la aceleración a la cual se tienen que mover. Supongamos que las masas son m = 1 kg y M = 10 kg y que la aceleración de las cajas debe ser a = 1 m/s^2.

La caja pesada jala a la caja ligera

Esta situación está representada en la **Figura 9.21a**.

Sobre la caja pesada actúan la cuerda que tú jalas (fuerza F), la Tierra (peso W), la reacción de la plataforma (fuerza N) y la cuerda que jala a la caja ligera (fuerza T). Las fuerzas W y N se cancelan y no se tomarán en cuenta.

Sobre la caja ligera actúan la cuerda que la une con la caja pesada (fuerza T), la Tierra (peso w) y la reacción de la plataforma (fuerza n). Las fuerzas w y n se cancelan y no se tomarán en cuenta.

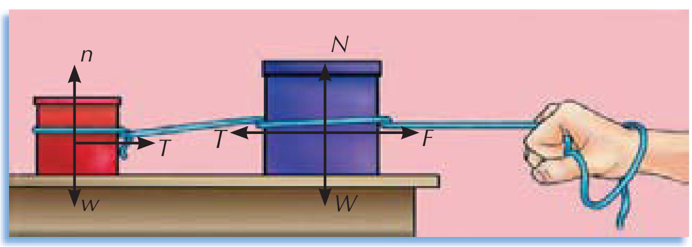


Figura 9.21a. Las fuerzas cuando la caja pesada jala a la caja ligera.

De acuerdo con la segunda ley, la intensidad de la fuerza F con que tienes que jalar para que las cajas, cuya masa total es $(M + m)$, tengan la aceleración a es:

$$F = (M + m) \cdot a = (10\,\text{kg} + 1\,\text{kg}) \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11\frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} = 11\,\text{N}$$

La intensidad de la fuerza de tensión T de la cuerda débil se calcula aplicando la segunda ley a cada caja por separado. La intensidad de la fuerza neta sobre la caja pesada es $F_{neta} = F - T$ y la segunda ley tiene la forma:

$$F - T = Ma$$

Despejando T, se tiene:

$$T = F - Ma = 11\,\text{N} - 10\,\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11\,\text{N} - 10\,\text{N} = 1\,\text{N}$$

En el caso de la caja ligera, la fuerza neta es la fuerza de tensión T y la segunda ley toma la forma:

$$T = ma = 1\,\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1\,\text{N}$$

La caja ligera jala a la caja pesada

Esta situación está representada en la **Figura 9.21b**.

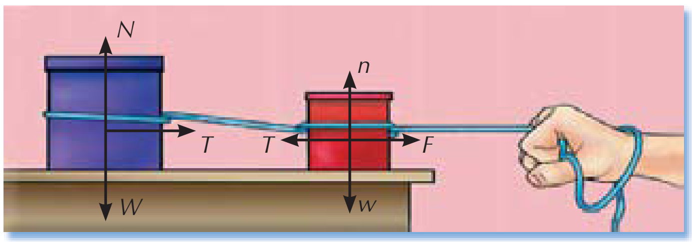


Figura 9.21b. Las fuerzas cuando la caja ligera jala a la caja pesada.

Sobre la caja ligera actúan la cuerda que tú jalas (fuerza F), la Tierra (peso w), la reacción de la plataforma (fuerza n) y la cuerda que jala a la caja pesada (fuerza T). Sobre la caja pesada actúan la cuerda que la une a la caja ligera (fuerza T), la Tierra (peso W) y la reacción de la plataforma (fuerza N).

Como otra vez tienes que lograr que las cajas, cuya masa total es la misma que antes, tengan la misma aceleración, la intensidad de la fuerza F con que tienes que jalar las cajas será la misma, es decir, se tendrá $F = 11$ N.

Lo que sí cambiará es la intensidad de la fuerza de tensión T de la cuerda que une a las dos cajas. La intensidad de la fuerza neta sobre la caja ligera es ahora $F_{neta} = F - T$ y la segunda ley tiene la forma:

$$F - T = ma$$

Despejando T, se tiene:

$$T = F - ma = 11\,\text{N} - 1\,\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11\,\text{N} - 1\,\text{N} = 10\,\text{N}$$

Para la caja pesada, la fuerza neta es la fuerza de tensión T y la segunda ley toma la forma:

$$T = Ma = 10\,\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10\,\text{N}$$

Entonces, en este caso, la cuerda que une a las cajas estaría 10 veces más tensa que en el caso anterior.

La fuerza neta cuando se conocen el cambio de la velocidad y la distancia recorrida

En los cálculos de la aceleración anteriores se conocía el cambio de la velocidad y el tiempo transcurrido. Existen varias aplicaciones interesantes de la segunda ley de Newton para situaciones en que se conocen el cambio de la velocidad del cuerpo y la distancia recorrida por el cuerpo, ambos causados por cierta fuerza neta.

Para simplificar la modelación matemática, conviene suponer que la velocidad inicial es cero y que la aceleración es constante. En tal caso, la velocidad alcanzada es:

$$v = a \cdot t$$

y el camino recorrido es:

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

Despejando el tiempo t de la fórmula para la velocidad, se obtiene:

$$t = \frac{v}{a}$$

Insertando esa expresión en la fórmula para el camino recorrido, se obtiene:

$$x = \frac{1}{2}a \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^2 = \frac{av^2}{2a^2} = \frac{v^2}{2a}$$

De aquí sale la expresión para la aceleración en términos de la velocidad alcanzada y el camino recorrido:

$$a = \frac{v^2}{2x}$$

Si la masa del cuerpo es m, entonces la fuerza neta que causó este tipo de movimiento es:

$$F_{\text{neta}} = ma = \frac{mv^2}{2x}$$

¿Qué ocurre si en el camino recorrido x el cuerpo que se movía a la velocidad v se detiene completamente? En tal caso, la aceleración es negativa y tiene el valor:

$$a = -\frac{v^2}{2x}$$

La fuerza neta que causó la detención del cuerpo es entonces:

$$F_{\text{neta}} = -\frac{mv^2}{2x}$$

La pregunta voladora

¿Cómo influiría en la tensión de la cuerda la presencia de la fuerza de fricción cinética entre las cajas y la plataforma?

Problema resuelto

Fuerza neta en un servicio de tenis

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En un servicio de tenis (**Figura 9.22**), la raqueta "empujó" a la pelota a lo largo de una distancia $x = 0.20$ m.

En contacto con la raqueta, la pelota alcanzó una velocidad $v = 40$ m/s.

a) Si la masa de la pelota es $m = 0.060$ kg, ¿qué tan grande era la fuerza neta sobre la pelota?
b) ¿Cuál era la aceleración de la pelota?
c) ¿Cuánto tiempo duró el contacto entre la pelota y la raqueta?

Solución:

a) La fuerza neta sobre la pelota era:

$$F_{neta} = -\frac{mv^2}{2x} 5 \frac{0.06\ \text{kg}\left(40\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 0.2\ \text{m}} = 240\ \text{N}$$

b) La aceleración de la pelota era:

$$a = \frac{F_{neta}}{m} = \frac{240\ \text{N}}{0.06\ \text{kg}} = 4{,}000\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

c) El tiempo de contacto era:

$$t = \frac{v}{a} = \frac{40\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4{,}000\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.01\ \text{s} = 10\ \text{ms}$$

Figura 9.22. Un servicio de tenis.

Dar sentido a los resultados: La fuerza es más de 400 veces mayor que el peso de la pelota (0.588 N). Por ello, la aceleración de la pelota es más de 400 veces mayor que la aceleración de la caída libre. El tiempo de contacto es diez milésimas de segundo.

Problema por resolver

Si realmente Diana hubiera lanzado una flecha…

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

El arco y la flecha fueron unas de las primeras armas que el hombre construyó, tanto para protegerse de los enemigos como para la cacería. Este último uso se hizo inolvidable gracias a varias esculturas de la diosa romana de la caza: Diana. Una de las más famosas se aprecia en la ciudad de México en el Paseo de la Reforma (**Figura 9.23**).

Figura 9.23. La Diana Cazadora.

Esta obra del escultor Juan Olaguíbel, realizada en el año de 1942, aunque conocida como la “Diana Cazadora”, tenía el nombre original más poético de la “Flechadora de las Estrellas del Norte”. A pesar de ese nombre, el escultor no consideró necesario incorporar la flecha en la escultura.

Imagina que la Diana Cazadora realmente hubiera lanzado una flecha “hacia las Estrellas del Norte” y que los datos correspondientes hubieran sido: masa de la flecha igual a 0.06 kg; velocidad de salida, 57 m/s; y camino recorrido por la flecha durante el lanzamiento, 0.58 m.

Calcula algunas características del lanzamiento imaginario de la Diana Cazadora:

a) la fuerza neta que ejercía el hilo del arco sobre la flecha,
b) la aceleración de la flecha y
c) el tiempo que duró el lanzamiento.

Problema por resolver

Detener una pelota de béisbol

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Al detener una pelota de béisbol que viajaba horizontalmente a una velocidad $v = 25$ m/s (**Figura 9.24**), el guante y el brazo del receptor se movieron hacia atrás una distancia $x = 0.25$ m.

Si la masa de la pelota de béisbol es $m = 0.14$ kg, ¿qué tan grande era la fuerza neta que causó su detención?

Figura 9.24. Deteniendo una pelota de béisbol.

¡Hagamos física!

¿Cómo se comporta un resorte estirado en caída libre?

Propósito: Aplicar cualitativamente las leyes de Newton a diferentes elementos de un resorte estirado.

Competencias a practicar: Plantear hipótesis, realizar un experimento pertinente, aprender en equipo, aprendizaje autorregulado.

Figura 9.25a. Un resorte de plástico que descansa sobre el suelo y tiene longitud mínima (no está estirado).

Material: Resorte de plástico (*slinky*).

Forma tu equipo para considerar la siguiente situación: cuando un resorte de plástico está en reposo en el suelo no está deformado (**Figura 9.25a**). Cuando el mismo resorte se levanta y se sostiene por su extremo superior se estira y toma la forma que se muestra en la **Figura 9.25b**.

Si se suelta el resorte,

a) recuperará su forma en el primer instante y después comenzará a caer;
b) comenzará a caer y recuperará su forma durante la caída antes de tocar el suelo; y
c) caerá estirado y recuperará su forma después de tocar el suelo.

Figura 9.25b. Un resorte de plástico estirado porque está sostenido de su extremo superior.

Elige la descripción del comportamiento del resorte en caída libre que te parezca más creíble y justifica tu selección.

Discutan en equipo la situación y decidan cómo debería comportarse el resorte, aplicando la segunda ley de Newton a diferentes elementos del resorte. ¿Cuál es la selección del grupo y su justificación?

Si hay diferencias, ¿en qué difieren de las tuyas?

Dejen caer el resorte varias veces y observen detenidamente su comportamiento. Si el resorte no se comporta como esperaban, ¿a qué se deben las diferencias?

Sé la estrella de la fiesta

La secadora de pelo que se vuelve móvil

Competencias a practicar: Explicitar conceptos físicos en una situación cotidiana; realizar un experimento pertinente y comunicar una explicación.

Figura 9.26. El arreglo que hace posible que la secadora se mueva al encenderla.

Primero tienes que encontrar una secadora idónea. Pon la secadora sobre la mesa y enciéndela. Si se mueve, no es idónea. Si se queda en reposo, es la que buscas.

La tarea de los participantes es que hagan que la secadora, puesta sobre la mesa, se mueva al encenderla. Después de que fracasen los intentos de los demás, toma un cartón, ponlo sobre dos latas de refresco y coloca la secadora encima (**Figura 9.26**).

Ahora, al encenderla, ¡la secadora se moverá!

¿Cómo funciona el truco?

Como siempre, para aplicar bien las leyes de Newton, hay que identificar las fuerzas relevantes. En el primer caso, cuando la secadora no se mueve, ¿cuáles son los cuerpos que actúan sobre la secadora? Son la Tierra, la mesa (dos acciones) y el aire que sale de la secadora.

El peso de la secadora se equilibra con la fuerza vertical de la mesa (primera acción de la mesa). La fuerza del aire es equilibrada por la fricción estática entre la secadora y la mesa (segunda acción de la mesa).

La única fuerza cuya intensidad es posible cambiar es la fuerza de fricción estática. Esto es precisamente lo que hiciste en el segundo caso. Al poner la secadora sobre el cartón y las latas de refresco, la fricción se reduce drásticamente, porque la fricción de rodadura es mucho menor que la fricción estática. Ahora la fuerza del aire es mayor que la fuerza de fricción y la secadora se mueve.

Un consejo importante: El chorro de aire tiene que salir de la secadora en dirección perpendicular al eje de las latas.

Las fuerzas en el movimiento circular

El movimiento circular tiene mucha importancia, tanto en la naturaleza y en la técnica como en el deporte. En la teoría de Aristóteles, el movimiento circular de los astros era un movimiento natural para el cual no era necesaria una fuerza. En la teoría de Newton, el único movimiento para el que no se requiere una fuerza es el movimiento inercial de velocidad constante. Entonces, según Newton, un cuerpo no puede realizar un movimiento circular si otros cuerpos no lo obligan a hacerlo. Tal vez nadie le creería más a Newton que los lanzadores del martillo (**Figura 9.27**).

En el movimiento circular uniforme, la magnitud de la aceleración es:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

En cada instante el vector de la aceleración está dirigido hacia el centro de la trayectoria circular (**Figura 9.28**).

La fuerza centrípeta que hace que un cuerpo de masa *m* realice un movimiento circular de radio *r* es:

$$F_{cp} = ma = \frac{mv^2}{r}$$

La dirección y el sentido de la fuerza centrípeta coinciden con los de la aceleración (**Figura 9.28**), es decir, la fuerza centrípeta siempre apunta hacia el centro de la trayectoria circular.

Figura 9.27. Sin la fuerza del lanzador, el martillo nunca realizaría un movimiento circular.

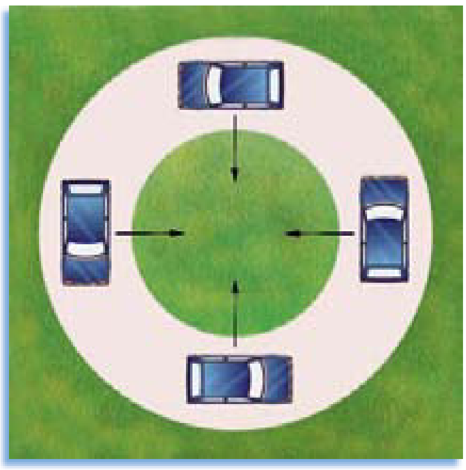


Figura 9.28. Las aceleraciones centrípetas en un movimiento circular uniforme.

Problema por resolver

La fuerza centrípeta en el lanzamiento de martillo

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

El lanzamiento de martillo (**Figura 9.27**) está entre las disciplinas atléticas que más habilidad y fuerza requieren.

La masa del martillo, en la prueba masculina, es aproximadamente de 7 kg. Antes de ser liberado, el martillo se mueve a una rapidez de 25 m/s en una trayectoria circular, cuyo radio es de cerca de 2 m.

a) ¿Cuál es la aceleración centrípeta del martillo?
b) ¿Cuál es la fuerza centrípeta que causa el movimiento circular del martillo?
c) ¿Cuál sería la masa de un cuerpo de peso igual a esa fuerza centrípeta?
d) Si en la misma trayectoria circular la rapidez del martillo disminuyera hasta la mitad (12.5 m/s), ¿cómo cambiarían la aceleración y la fuerza centrípeta?

En el movimiento circular de los automóviles, el papel de la fuerza centrípeta lo juega la fuerza de fricción o la fuerza de la carretera inclinada. En el caso de los planetas, como pronto se verá, la fuerza centrípeta es la fuerza gravitacional. En el lanzamiento del martillo, la fuerza centrípeta se debe a las manos del lanzador.

Sin embargo, en todos estos casos podemos usar las mismas fórmulas para la rapidez, la aceleración y la fuerza centrípeta. Una de las bellezas de la física es descubrir las mismas características en acontecimientos que, a primera vista, no tienen nada en común.

Problema resuelto

La fuerza de fricción como fuerza centrípeta

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un coche de masa m = 1,000 kg tiene que hacer una curva que se puede considerar parte de un círculo de radio r = 100 m. Si el máximo coeficiente de fricción entre las llantas y la carretera es μ = 0.8, ¿podría el automóvil hacer esta curva a 120 km/h?

Solución: A la rapidez de 120 km/h = 33.3 m/s la aceleración centrípeta del auto sería:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(33.3\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{100\text{ m}} = \frac{1{,}109\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{100\text{ m}} = 11.09\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Para lograr esta aceleración se necesita una fuerza centrípeta de:

$$F = ma = 1{,}000\text{ kg} \cdot 11.09\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11{,}090\text{ N}$$

La máxima fuerza de fricción es:

$$f_{\text{máx}} = \mu_{\text{máx}} \cdot \text{mg} = 0.8 \cdot 1{,}000\text{ kg} \cdot 9.8\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} = 7{,}840\text{ N}$$

Como la fuerza centrípeta necesaria para la rapidez de 33.3 m/s es mayor que la fuerza de fricción máxima, el auto no podría realizar la curva a esa rapidez.

Dar sentido al resultado: No está por demás destacar que la fuerza de fricción no solamente hace posible que el coche se mueva, sino que de su magnitud depende si se puede o no tomar una curva particular.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Se ha visto que el automóvil no puede realizar la curva descrita a 120 km/h con la fuerza de fricción disponible. ¿A qué velocidad sí se podría tomar la curva?

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. ¿Un cuerpo puede moverse en una dirección que difiere de la dirección de la fuerza neta?
2. ¿La dirección de la aceleración puede diferir de la dirección de la fuerza neta?
3. Si la aceleración de un cuerpo es cero, entonces
   a) no hay fuerzas que actúan sobre el cuerpo;
   b) la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero;
   c) hay solamente una fuerza que actúa sobre el cuerpo.
   Justifica tu selección de la respuesta.

Pensamiento crítico

4. ¿Es posible que la fuerza neta disminuya y que la velocidad del cuerpo siga aumentando?

Dominar la representación gráfica

5. Completa el mapa conceptual sobre fuerzas y movimientos (**Figura 9.29**).
6. Dos personas de igual peso disfrutan meciendo sus columpios (**Figura 9.30**).

Figura 9.30. ¿Cuál de las personas hace las cuerdas más tensas?

¿En cuál columpio las cuerdas están más tensas? Justifica tu selección mediante un diagrama de fuerzas.

Explicar fenómenos físicos

7. Un niño está sentado sobre un carrito. Si se le da un empujón súbito hacia adelante, el niño parece que cae hacia atrás. ¿Por qué se tiene esa impresión?

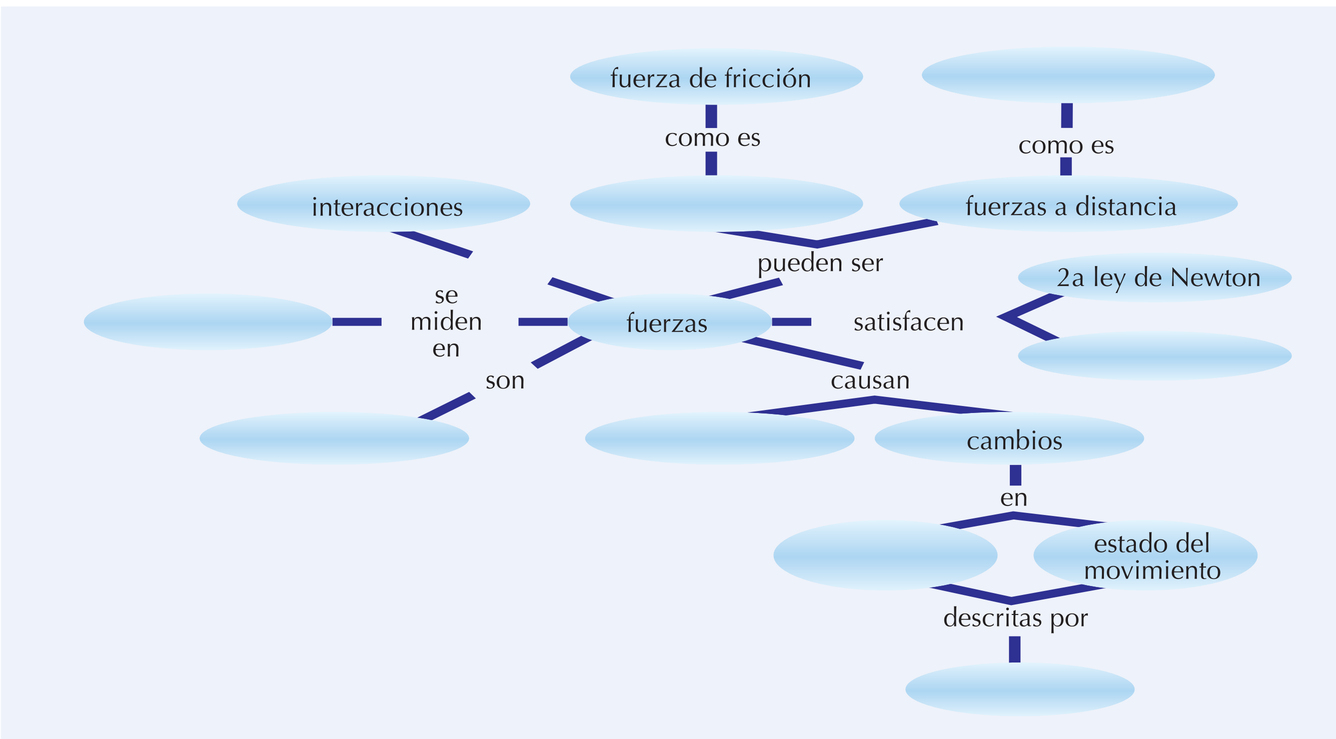


Figura 9.29. El mapa conceptual sobre fuerzas y movimientos.

8. Si pateas un escritorio muy pesado o un muro, te lastimarás. ¿Por qué ocurre eso?

9. Cuando estás de pie sobre el piso, según la tercera ley de Newton, el piso ejerce sobre tus pies una fuerza vertical hacia arriba, cuya magnitud es igual a tu peso. ¿Por qué esta fuerza no hace que te eleves en el aire?

Aplicar modelos matemáticos

10. La masa total de un niño y su trineo es de 60 kg. Si el niño empuja el suelo con una fuerza de 90 N, ¿cuál será la aceleración del niño y el trineo?

11. Usando una soga se acelera horizontalmente un automóvil cuya masa es de 960 kg.

a) Si la aceleración del auto es de 2 m/s^2, ¿cuál será la mínima tensión que debe resistir la soga?

b) Si el mismo automóvil se acelerara verticalmente hacia arriba con la misma aceleración, ¿cuál debería ser la mínima tensión que resistiera la soga?

12. Se jala una caja sobre una superficie horizontal con una fuerza $F = 20$ N.

a) Si la fuerza de fricción cinética es $f = 4.9$ N, ¿qué tan grande es la fuerza neta?

b) Si la masa de la caja es $m = 5$ kg, ¿cuál sería su aceleración?

c) ¿Cuál es el coeficiente de fricción cinética?

13. El motor de un cochecito de juguete de masa igual a 0.5 kg genera una fuerza horizontal de tracción de 3 N. Si la aceleración del cochecito es de 4 m/s^2, ¿qué tan grande es la fuerza de fricción? ¿Cuál es coeficiente de fricción cinética?

14. Un joven monta en su bicicleta haciendo un gran esfuerzo para acelerarla. La magnitud de la fuerza neta que acelera a la bicicleta es de 180 N y la aceleración de la bicicleta es de 2 m/s^2. ¿Cuál es la masa de la bicicleta con conductor?

15. En el arranque de una carrera de 100 metros, el corredor logra tener una aceleración de 3 m/s^2. Si su masa es de 60 kg, ¿cuál debería haber sido la fuerza con que el suelo lo "empujó"? ¿Qué fuerza tuvo que ejercer el corredor sobre el suelo al arrancar?

16. Los buques petroleros pertenecen al grupo de los más grandes móviles que el hombre ha construido. Su masa puede ser de hasta 500,000 toneladas ($m = 5 \cdot 10^8$ kg).

a) Si los motores del buque producen una fuerza neta de 4 millones de newtons ($F = 4{,}000{,}000$ N), ¿cuál es la aceleración?

b) Partiendo del reposo, ¿cuánto tiempo necesita un buque petrolero para recorrer una distancia de 1 km?

c) ¿Cuánto tiempo necesita para alcanzar su velocidad de crucero de 28 km/h?

17. En un buen tiro, un balón de fútbol alcanza una velocidad de 100 km/h ($v = 27.8$ m/s) en 3 milisegundos ($t = 0.003$ s). El balón de fútbol tiene masa $m = 0.450$ kg.

a) Estima la fuerza que ejerce el futbolista sobre el balón, suponiendo que esa fuerza es constante durante el contacto.

b) Si la masa de la parte de la pierna que ejecuta el tiro es de 10 kg, ¿cuál sería su desaceleración? ¿Cuánto disminuye la velocidad de la pierna durante el tiempo de tiro?

18. El choque, en pleno vuelo, de un pájaro contra el parabrisas de la cabina del piloto de un avión suele ser muy peligroso. La física que aprendiste te permite entender por qué los pilotos prefieren no chocar nunca contra las aves. Supón que en un choque el avión "acelere" a un pájaro, de masa igual a 2 kg, desde el reposo hasta la velocidad de crucero del avión ($v = 800$ km/h) en un milisegundo ($t = 0.001$ s).

a) ¿Cuál es la fuerza que el pájaro aplica al parabrisas?

b) ¿Qué masa debería tener un cuerpo para que su peso fuera igual a la magnitud de la fuerza que se genera en el choque?

19. Los famosos autos de carreras Fórmula 1 dan vueltas a rapideces que sobrepasan por mucho las rapideces de los automóviles comunes. El récord se impuso en el año 2006 en la vuelta número 8 de la pista de Estambul (Turquía). Aunque la curva tiene un radio de 116 m, el coche mantuvo una rapidez increíble: ¡285 km/h!

a) ¿Qué tan grande era la aceleración centrípeta? ¿Y cuántas veces es mayor esa aceleración que la aceleración de caída libre?

b) Si la masa del Fórmula 1 (con la del conductor y la del combustible incluidas) es de 605 kg, ¿cuál era la fuerza centrípeta? ¿Cuántas veces es mayor que el peso del coche?

20. El cañón de un rifle tiene una longitud de 0.75 m. En el disparo, una bala de 0.025 kg alcanza una velocidad de salida de 300 m/s. Suponiendo que no haya fricción entre la bala y el cañón, y que la aceleración de la bala en el cañón es constante, calcula la magnitud de la fuerza que ejerce el rifle sobre la bala.

21. En los portaaviones se usan catapultas de vapor modernas para lanzar los aviones de combate. Esos sistemas de lanzamiento son capaces de acelerar un avión de 35 toneladas (35,000 kg) hasta su velocidad de despegue de 257 km/h (71 m/s) en una distancia de 90 m.

a) ¿Qué tan grande es la fuerza neta que ejerce la catapulta de vapor sobre el avión?

b) ¿Cuál es la aceleración del avión?

c) ¿Qué tanto dura el lanzamiento?

22. El avión de combate del problema anterior ($m = 35{,}000$ kg), al usar sus propios motores para generar la fuerza de tracción, necesita, para lograr su velocidad de despegue ($v = 71$ m/s), recorrer en la pista una distancia $x = 400$ m.

a) ¿Qué tan grande es la fuerza de tracción que generan los motores del avión?

b) ¿Cuál es ahora la aceleración del avión?

c) ¿Qué tanto dura ahora el despegue?

23. El espacio limitado disponible en un portaaviones hace necesario contar tanto con una tecnología avanzada de lanzamiento como, también, con un sistema de frenado eficaz para detener los aviones cuando "aterrizan" en el portaaviones. En su parte trasera los aviones tienen un gancho que se acopla a uno de los cables estirados sobre la plataforma de aterrizaje y ese cable, al tensarse, genera una fuerza que detiene el avión. Con ese sistema un avión de 24 toneladas (24,000 kg), que aterriza a velocidad de 240 km/h (67 m/s), se detiene en una distancia de frenado de 107 m.

a) ¿Cuál es la fuerza de frenado generada por el cable y la fuerza de fricción entre las llantas del avión y la plataforma de aterrizaje?

b) ¿Cuál la aceleración del avión durante el frenado?

c) ¿Qué tanto dura el frenado?

24. Para evitar un accidente, en un frenado de emergencia un cinturón de seguridad de correa al hombro sostiene firmemente a una pasajera de 60 kg. Si el automóvil viajaba inicialmente a 100 km/h y se detuvo en una distancia de 40 m en un camino recto y plano, ¿qué tan grande era la fuerza neta que el cinturón aplicó a la pasajera?

25. Un automóvil de masa igual a 1,200 kg toma una curva circular de radio igual a 40 m. Si el pavimento es plano y el coeficiente de fricción entre las llantas del auto y el pavimento es de 0.4, ¿a qué rapidez puede tomar la curva el vehículo sin derrapar?

26. Una esfera metálica de 1 kg, atada al extremo de una cuerda horizontal, gira en un círculo de 1 m de radio sobre una superficie horizontal muy lisa. Si la cuerda se rompe cuando la tensión supera los 75 N, ¿qué tan grande es la máxima rapidez lineal que puede alcanzar la esfera?

27. Imagina que das un jalón a un envase de leche y que la aceleración del envase resulta de 4 m/s^2. Si a dos envases de leche amarrados les das un jalón cuatro veces mayor, la aceleración de esos dos envases será:

a) 16 m/s^2 *b*) 12 m/s^2

c) 8 m/s^2 *d*) 4 m/s^2

Verifica tu predicción usando los valores $m = 1$ kg y $F = 4$ N.

Tema 10

Las leyes de Kepler y la ley de la gravitación universal

Propósitos del tema 10

- Conocer y ejemplificar las leyes de Kepler acerca del movimiento de los planetas.
- Conocer la ley de la gravitación universal y aplicarla en la resolución de diversos problemas.

Figura 10.1. Nicolás Copérnico (1473-1543).

Seguramente sabrás que al hombre antiguo no le resultó sencillo aceptar la idea de una Tierra con forma esférica. Fue aún más difícil comprender el verdadero lugar que la Tierra ocupa en el Universo. El cambio de un sistema del mundo en el cual la Tierra está en el centro, a otro en el cual la Tierra no es más que un planeta que gira alrededor de una de las muchas estrellas comunes y corrientes, ha sido uno de los cambios más profundos en la historia del pensamiento humano.

La idea revolucionaria de un mundo con el Sol en el centro fue propuesta y elaborada por el astrónomo polaco Nicolás Copérnico. (**Figura 10.1**)

Esa idea fue rechazada vigorosamente por la Iglesia católica, aunque fue aceptada y popularizada por Galileo Galilei.

Las observaciones de las lunas de Júpiter y las fases de Venus, realizadas por Galileo con su telescopio, contradecían la idea geocéntrica pero concordaban totalmente con la visión copernicana.

La búsqueda del conocimiento

Los descubrimientos astronómicos de Galileo

Competencias a practicar: Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad; obtener información para responder preguntas.

Figura 10.2. El telescopio de Galileo.

El telescopio de Galileo (**Figura 10.2**), aunque parece un instrumento científico modesto, revolucionó las observaciones astronómicas. Además, mostró que el avance de la ciencia depende de los avances tecnológicos.

Busca en la Internet información sobre las observaciones astronómicas de Galileo y sus interpretaciones. Responde las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál era el factor de amplificación del telescopio de Galileo?
2. ¿Por qué el movimiento de las lunas de Júpiter contradice la teoría geocéntrica?
3. ¿Por qué la observación de fases de Venus contradice la teoría geocéntrica?

La contribución decisiva a la victoria de la visión copernicana en la astronomía, que en ese momento era la ciencia más avanzada, se debe a Johannes Kepler.

10.1. Las leyes de Kepler

Kepler (1571-1630) tuvo la habilidad matemática y la perseverancia en la búsqueda de la simplicidad del Universo, que fueron necesarias para llevar la "revolución copernicana" a una base firme en la forma de leyes sobre el movimiento de los planetas, donde la Tierra es uno de ellos.

Los grandes astrónomos

Johannes Kepler

(Weil der Stadt, 1571-Ratisbona, 1630)

Johannes Kepler (**Figura 10.3**) fue un célebre astrónomo alemán. Su interés por la astronomía despertó, gracias a la observación de un gran cometa, cuando tenía solamente 6 años.

Comenzó su carrera académica como profesor de matemáticas y astronomía en la universidad austriaca de Graz. Después de ser expulsado de esa institución, debido a su religión protestante, se mudó a Praga y comenzó a trabajar como ayudante de Tycho Brahe. A la muerte de éste, ocupó su cargo de matemático imperial. Formuló las tres leyes sobre el movimiento de los planetas que dieron inicio a la mecánica celeste. Completó y publicó *Las tablas rudolfinas* (1627), obra acerca de datos astronómicos iniciada por Tycho Brahe. En ella, usó sus leyes para estimar las posiciones futuras de los planetas.

Figura 10.3. Johannes Kepler (1571-1630).

Las tres leyes de Kepler, que aparecieron en *La nueva astronomía* (1609) y en *La armonía del mundo* (1619), sintetizan, en forma sorprendentemente sencilla, lo esencial de los datos de observación conocidos. El sistema del mundo geocéntrico, con sus complejas combinaciones de movimientos circulares, tuvo que ceder definitivamente frente al sistema del mundo heliocéntrico, en el cual los planetas siguen simples trayectorias elípticas.

La primera ley de Kepler

Esta ley se refiere a las trayectorias que siguen los planetas.

Primera ley de Kepler

La trayectoria de cada planeta del Sistema Solar es una elipse y el Sol está en uno de sus focos (**Figura 10.4**).

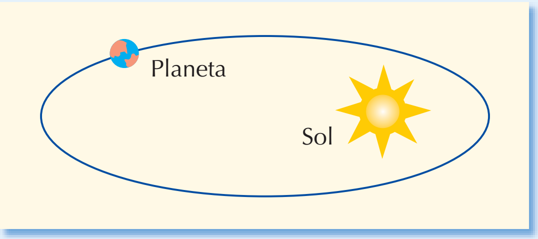


Figura 10.4. La trayectoria elíptica de un planeta. (La forma elíptica está exagerada.)

La barrera conceptual que Kepler tuvo que derribar para pasar de círculos a elipses fue muy grande. Hasta su época todos creían que las trayectorias planetarias tenían que ser círculos. Incluso Copérnico, que cambió el sistema del mundo drásticamente, creía en las trayectorias circulares de los astros y las usaba en sus cálculos.

Solamente la forma matemática de la elipse permitió a Kepler "entender" los datos precisos de la posición de Marte. Lo que antes requería muchos círculos y epiciclos necesitaba, ahora, de manera más sencilla y más precisa, una sola elipse.

Cuando Marte está más cerca del Sol, la distancia entre ambos es de 207 millones de kilómetros. Esa posición de Marte en su órbita se llama **perihelio**.

Definición

El **perihelio** es la posición en la que un planeta se encuentra a su mínima distancia del Sol.

Cuando Marte está más alejado del Sol, su distancia es de 250 millones de kilómetros. Esa posición se llama **afelio**.

Definición

El **afelio** es la posición en la cual un planeta se encuentra a su distancia máxima del Sol.

El cociente de las distancias al Sol del afelio y el perihelio brinda información sobre qué tanto se aleja la trayectoria elíptica del planeta de una trayectoria circular. En el caso de Marte, el cociente es:

$$\frac{d_{\text{M afelio}}}{d_{\text{M perihelio}}} = \frac{250,000,000 \text{ km}}{207,000,000 \text{ km}} = 1.21$$

Esto quiere decir que la distancia del afelio es 20% mayor que la distancia del perihelio. Esa diferencia fue suficiente y permitió a Kepler concluir que había que romper la tradición y admitir trayectorias elípticas.

En la **Tabla 10.1** se presentan tanto las distancias del afelio y el perihelio de algunos planetas, como el cociente de esas distancias.

Tabla 10.1. Las distancias de afelio y perihelio de algunos planetas.

Planeta	Distancia del afelio (*millones de km*)	Distancia del perihelio (*millones de km*)	Cociente de las distancias del afelio y el perihelio
Mercurio	70	46	1.522
Venus	108.9	107.5	1.013
Tierra	152.6	147.5	1.035

Es fácil notar que la forma elíptica de la trayectoria de Mercurio es bastante pronunciada. La distancia del afelio es 52.2% mayor que la distancia del perihelio.

Sin embargo, las trayectorias elípticas de Venus y la Tierra difieren muy poco de una trayectoria circular. Para Venus, por ejemplo, la distancia del afelio es solamente 1.30% más grande que la distancia del perihelio.

La segunda ley de Kepler

El estudio de las posiciones del planeta Marte, determinadas por Brahe, llevó a Kepler a establecer la segunda ley.

Segunda ley de Kepler

La línea imaginaria que conecta el centro del Sol con el centro de un planeta barre áreas iguales en intervalos iguales (**Figura 10.5**).

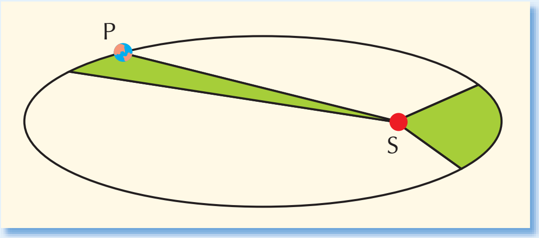


Figura 10.5. Las áreas barridas en lapsos iguales son iguales.

Otra forma de la segunda ley de Kepler es:

Segunda Ley de Kepler

El producto de la distancia al Sol y de la rapidez orbital es igual en todos los puntos de la trayectoria de un planeta.

Si en el punto 1 de la trayectoria del planeta la distancia y la rapidez son r_1 y v_1, y en el punto 2 la distancia y rapidez son r_2 y v_2, entonces:

$$r_1 v_1 = r_2 v_2$$

Entonces, la segunda ley de Kepler implica que la rapidez orbital de un planeta no se mantiene constante. Cuando un planeta está cerca del Sol se mueve a una rapidez mayor que cuando está más alejado.

Problema resuelto

El movimiento orbital de la Tierra y la segunda ley de Kepler

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

En el perihelio la rapidez orbital de la Tierra es $v_P = 29$ km/s. En el afelio la rapidez aumenta a $v_A = 30$ km/s. ¿Tales valores de la rapidez orbital satisfacen la segunda ley de Kepler?

Solución: Para las posiciones del perihelio y el afelio, la segunda ley de Kepler es:

$$r_P v_P = r_A v_A$$

Tomando de la **Tabla 10.1** los valores para las distancias al Sol del perihelio y el afelio de la Tierra, e insertándolos en la ecuación anterior, se obtiene:

$$152{,}600{,}000 \text{ km} \cdot 29 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 147{,}500{,}000 \text{ km} \cdot 30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$4.425 \cdot 10^9 \frac{\text{km}^2}{\text{s}} = 4.425 \cdot 10^9 \frac{\text{km}^2}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: Los valores de la rapidez orbital de la Tierra satisfacen la segunda ley de Kepler.

Problema resuelto

La rapidez orbital de Venus cuando está en su afelio

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Cuando está en su perihelio, Venus se mueve a una rapidez orbital v_P = 34.784 km/s. ¿Cuál es la rapidez orbital de Venus cuando está en su afelio?

Solución: Despejando la rapidez orbital de Venus en el afelio, de la segunda ley de Kepler, se obtiene:

$$v_A = \frac{r_P}{r_A} \bullet v_P$$

Tomando los valores de las distancias en perihelio y afelio de Venus de la **Tabla 10.1** e insertándolos en esa ecuación, se tendrá:

$$v_A = \frac{107{,}500{,}000 \text{ km}}{108{,}900{,}000 \text{ km}} \bullet 34.784 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 34.337 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: La rapidez en el afelio es menor que la rapidez en el perihelio, ya que en su afelio Venus está más lejos del Sol.

La tercera ley de Kepler

Esta ley se refiere a las distancias promedio y los periodos de los planetas.

Tercera ley de Kepler

Para todos los planetas, el cuadrado del periodo dividido entre el cubo de la distancia media al Sol tiene el mismo valor.

Si el periodo de revolución de un planeta es T y su distancia media al Sol es r, la tercera ley de Kepler afirma que:

$$\frac{T^2}{r^3} = K$$

donde K es la constante de Kepler. La constante K tiene el mismo valor para todos los planetas. Su valor depende de la unidad con que se midan el tiempo y la distancia. El valor más sencillo se obtiene si se toman como unidad de tiempo 1 año, y como unidad de distancia, la distancia entre el centro del Sol y el centro de la Tierra, llamada "unidad astronómica de distancia" (UA). Entonces, para la Tierra la constante de Kepler sería:

$$K = \frac{T^2}{r^3} = \frac{(1 \text{ año})^2}{(1 \text{ UA})^3} = 1 \frac{\text{año}^2}{\text{UA}^3}$$

La tercera ley de Kepler es un nuevo tipo de ley porque afirma que hay un número que es el mismo para todos los planetas. Las primeras dos leyes tienen diferentes realizaciones para cada planeta (diferentes tamaños de las elipses y diferentes rapideces medias). La tercera ley indica que existe un número (la constante de Kepler) compartido por todos los planetas.

Problema resuelto

La tercera ley de Kepler y el periodo de revolución de Mercurio

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

La distancia media entre el Sol y Mercurio es 0.387 veces la distancia media entre el Sol y la Tierra. ¿Cuánto tiempo tarda Mercurio en dar una vuelta alrededor del Sol?

Solución: Según la tercera ley de Kepler, el cociente entre el cuadrado del periodo de revolución (T) y el cubo de la distancia media (r) es igual para todos los planetas. Para Mercurio y la Tierra, la tercera ley de Kepler implica:

$$\frac{T_M^2}{r_M^3} = \frac{T_T^2}{r_T^3}$$

Esta ecuación se escribe como:

$$T_M^2 = \frac{r_M^3}{r_T^3} \cdot T_T^2 = \left(\frac{0.387 r_T}{r_T}\right)^3 \cdot T_T^2 = (0.387)^3 \cdot T_T^2 = 0.058 \cdot T_T^2$$

Sacando la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación, se obtiene que el “año de Mercurio” dura:

$$T_M = \sqrt{0.058} \cdot T_T = 0.24 \cdot T_T = 0.24 \cdot 365 \text{ días} = 87.6 \text{ días} \approx 88 \text{ días}$$

Dar sentido al resultado: El “año de Mercurio” es aproximadamente cuatro veces más corto que el año terrestre. Mientras la Tierra da una vuelta alrededor del Sol, Mercurio da más de cuatro vueltas.

Integrar conocimientos: Suponiendo que las trayectorias de Mercurio y la Tierra sean circulares, ¿cuál de esos dos planetas orbita alrededor del Sol a mayor rapidez lineal?

Las leyes de Kepler son leyes empíricas que expresan regularidades inferidas a partir de los datos de observaciones astronómicas. Frente a las leyes empíricas, los físicos de mente teórica se asombran y se preguntan ¿por qué dichas leyes tienen esa forma y no otra? Para las leyes de Kepler, las preguntas teóricas podrían haber sido:

- ¿Por qué la trayectoria de los planetas es una elipse y no alguna otra curva?
- ¿Por qué el cociente del cuadrado del periodo y el cubo de la distancia al Sol son los mismos para todos los planetas?

Responder a esas preguntas requiere la formulación de una teoría dentro de la cual sea posible deducir las leyes de Kepler.

10.2. La gravitación universal: la fuerza que da origen a las leyes de Kepler

Newton fue quien se puso como tarea derivar teóricamente la forma de las leyes de Kepler. Como él sabía que las fuerzas determinan los movimientos de los cuerpos, supuso que para realizar la tarea era necesario determinar la ley para la fuerza que describe la atracción gravitacional. Pero, ¿cómo llegó Newton a la ley de la gravitación universal?

Aunque todavía en los estudios históricos se trata de esclarecer los detalles de esta gran hazaña intelectual, se puede afirmar que Newton no “encontró” la ley de la gravitación universal en la forma referida por la famosa leyenda, según la cual, Newton estaba sentado bajo un árbol del que cayó una manzana que lo golpeó en

Figura 10.6. Un golpe legendario.

la cabeza: Newton se preguntó por qué cayó la manzana y, al tratar de encontrar la respuesta, se le ocurrió la ley de la gravitación universal (**Figura 10.6**).

Tal vez el acontecimiento fue el punto de inicio para empezar a considerar un problema importante:

¿Es posible que los fenómenos terrestres (la caída de una manzana) y los fenómenos celestes (el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra) se deban a la misma causa?

Antes de Newton hubo personas que suponían que el movimiento de los planetas estaba influido por la presencia del Sol, es decir, que consideraban que sobre los planetas había una influencia atractiva proveniente del Sol. Incluso, algunos científicos (por ejemplo, Hooke) sabían que la tercera ley de Kepler implicaba que la fuerza que rige el movimiento de los planetas debería ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. A diferencia de ellos, Newton tuvo dos virtudes excelentes:

1. Supo cómo averiguar si otros hechos conocidos apoyaban la misma relación entre la fuerza gravitacional y la distancia.
2. Fue capaz de demostrar matemáticamente que una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, junto con las leyes de la dinámica que él mismo formuló, predicen la trayectoria elíptica de los planetas.

Verificación de la hipótesis de la gravitación universal

Si se supone que la fuerza de gravedad ejercida por el Sol es responsable del movimiento (casi circular) de los planetas, es posible deducir de la tercera ley de Kepler que esa fuerza F debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d entre el Sol y el planeta:

$$F \propto \frac{1}{d^2}$$

Si la fuerza de gravedad es universal, es decir, si todos los cuerpos se atraen gravitacionalmente, la fuerza gravitacional con que la Tierra atrae a los cuerpos cercanos a su superficie o la fuerza con que atrae a la Luna deberían, también, satisfacer la misma proporcionalidad.

En el primer intento, realizado en 1666, Newton trató de verificar esta hipótesis comparando la distancia que caen los cuerpos cercanos a la superficie de la Tierra en un segundo, con la distancia que en un segundo "cae" la Luna en su trayectoria alrededor de la Tierra (**Figura 10.7**).

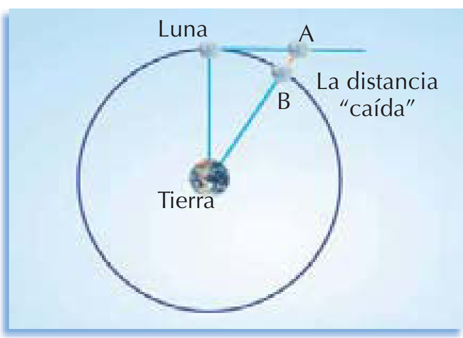


Figura 10.7. La distancia AB que "cae" la Luna en un segundo. (El dibujo no conserva la escala. ¿Puedes señalar por qué?)

Debido a la imprecisión de los datos sobre el radio de la Tierra y la distancia entre la Luna y la Tierra, el resultado de la comparación no se ajustaba bien a la hipótesis de una influencia gravitacional inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La "caída de la Luna" fue 15% menor de lo que exigía la hipótesis. A causa de esta discrepancia y de otras dificultades relacionadas, Newton dejó a un lado su trabajo sobre la ley de la gravedad.

Cuando se enteró de nuevos datos más precisos, en el año de 1682, Newton rehizo los cálculos y desapareció la diferencia entre el resultado que daba la hipótesis y el movimiento real de la Luna. Todo estaba listo para formular la ley de la gravitación universal.

Dos maneras de calcular la aceleración de la Luna

En la actualidad es fácil realizar cálculos similares a los que hizo Newton. En vez de las distancias caídas en un segundo, es más sencillo comparar las aceleraciones.

En lugar del método geométrico usado por Newton, utilizaremos las fórmulas algebraicas disponibles ahora.

La aceleración según los datos del movimiento lunar

La Luna se mueve en una trayectoria que es casi un círculo de radio d_L = 384,000 km = $3.84 \cdot 10^8$ m y da una vuelta en T = 27.3 días = $2.36 \cdot 10^6$ s. Por ello, la rapidez orbital de la Luna es:

$$v = \frac{\text{circunferencia}}{\text{periodo}} = \frac{2\pi\, d_L}{T} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 3.84 \cdot 10^8 \text{m}}{2.36 \cdot 10^6 \text{s}} = 1{,}020 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La aceleración centrípeta de la Luna, según los datos de su movimiento orbital, es:

$$a = \frac{v^2}{d_L} = \frac{\left(1.02 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{3.84 \cdot 10^8 \text{m}} = \frac{1.04 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{3.84 \cdot 10^8 \text{m}} = 2.7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.7 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$$

La aceleración de la Luna según la hipótesis de la gravitación universal

Si la Tierra atrae a la Luna con la fuerza gravitacional, entonces esa fuerza debe ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los centros de la Tierra y la Luna. Según la segunda ley de Newton, la aceleración es directamente proporcional a la fuerza y, en consecuencia, la aceleración de la Luna debida a la fuerza gravitacional de la Tierra también tiene que ser inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, medida desde el centro de la Tierra.

Para cuerpos que están en la superficie de la Tierra, a la distancia $d_T = R$ del centro de ésta (R es el radio terrestre), esa aceleración es la aceleración de la caída libre:

$$g_T = \frac{C}{d_T^{\,2}} = \frac{C}{R^2}$$

donde C es una constante de proporcionalidad.

Para la distancia que corresponde al radio de la trayectoria lunar, que es igual a 60 radios terrestres ($d_L = 60\ R$), la aceleración debida a la fuerza gravitacional terrestre sería:

$$g_L = \frac{C}{d_L^{\,2}} = \frac{C}{(60\,R)^2} = \frac{C}{3{,}600\,R^2}$$

Dividiendo las aceleraciones gravitacionales que corresponden a estas dos distancias al centro terrestre se obtiene:

$$\frac{g_L}{g_T} = \frac{\frac{C}{3{,}600\,R^2}}{\frac{C}{R^2}} = \frac{1}{3{,}600}$$

De esta ecuación se puede despejar g_L:

$$g_L = \frac{g_T}{3{,}600} = \frac{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{3{,}600} = 0.0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.7 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$$

Entonces, los datos del movimiento lunar y los datos de la caída libre en la superficie terrestre, extrapolados hasta la Luna mediante la hipótesis de la gravitación universal, generan el mismo valor para la aceleración de la Luna.

La conclusión es evidente:

La fuerza gravitacional entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros.

Usando su tercera ley, Newton fue capaz de inferir que la fuerza gravitacional debe ser directamente proporcional al producto de las masas de los cuerpos que se atraen gravitacionalmente.

La ley de la gravitación universal

La ley de la gravitación universal se formula de la siguiente manera.

Ley de la gravitación universal

La intensidad de las fuerzas gravitacionales entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros.

Si las masas de los cuerpos son m y M, y la distancia entre sus centros es d, entonces la fórmula para calcular la intensidad de la fuerza gravitacional F es:

$$F = G\frac{mM}{d^2}$$

donde G es la constante de proporcionalidad, llamada "constante gravitacional".

El valor de la constante gravitacional es:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{N}m^2}{\mathrm{kg}^2}$$

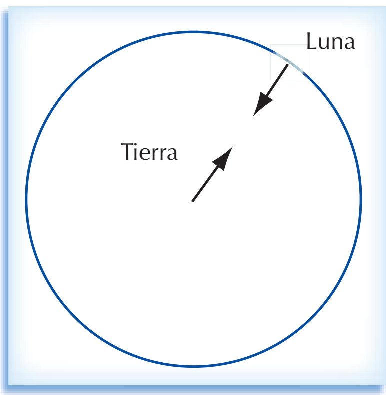


Figura 10.8. Las fuerzas gravitacionales entre dos cuerpos satisfacen la tercera ley de Newton.

Las fuerzas gravitacionales entre dos cuerpos satisfacen la tercera ley de Newton. Las fuerzas tienen la misma intensidad, la misma dirección (a lo largo de la línea que conecta los centros) y sentidos opuestos (**Figura 10.8**).

El sentido de la constante gravitacional y las consecuencias de su valor

Newton formuló la ley de la gravitación universal como una proporcionalidad y no como ecuación:

La fuerza gravitacional entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia.

Para conocer los valores de las fuerzas gravitacionales era necesario determinar cuál sería el "patrón de fuerza gravitacional" en términos del cual todas se pudiesen expresar. La idea natural era definir ese "patrón" como la fuerza gravitacional entre dos cuerpos de masa unidad cuando están separados por una distancia unidad.

En el Sistema Internacional de Unidades, tal "patrón" o "fuerza gravitacional unitaria" sería la fuerza gravitacional entre dos esferas cuyas masas son de un kilogramo ($m = M = 1$ kg) y cuyos centros están a una distancia de 1 metro ($d = 1$ m).

Es fácil convencerse de que dos esferas cuyas masas son de 1 kg y cuyos centros están a 1 m de distancia ejercen entre sí fuerzas gravitacionales iguales a $6.67 \cdot 10^{-11}$ N. De tal manera, el valor numérico de la constante gravitacional es igual al valor numérico de la fuerza gravitacional entre dos esferas de 1 kg separadas por una distancia de 1 m.

La unidad de la constante gravitacional debe ser tal, que al multiplicarla por el cuadrado de la masa y al dividirla entre el cuadrado de la distancia dé la unidad de fuerza.

Problema resuelto

¿La fuerza gravitacional de 1 N entre dos esferas de 1 kg?

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Hemos visto que la fuerza gravitacional entre dos esferas de 1 kg, separadas por una distancia de 1 m, es solamente de $6.67 \cdot 10^{-11}$ N. ¿Es posible que la fuerza gravitacional entre dos esferas de tal masa sea de 1 N?

Solución: Para aumentar la fuerza gravitacional entre las esferas, hay que disminuir la distancia entre sus centros. Entonces, para responder la pregunta, primero se tiene que ver cuál debe ser la distancia *d* entre los centros, de manera que la fuerza gravitacional sea de 1 N. Despejando la distancia de la ley de la gravitación universal se tiene:

$$d = \sqrt{\frac{Gm \cdot \mathrm{m}}{F}} = \sqrt{\frac{6.67 \cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{\mathrm{kg}^2} \cdot 1\mathrm{kg} \cdot 1\mathrm{kg}}{1\mathrm{N}}} = \sqrt{66.7 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m}^2} = 8.2 \cdot 10^{-6}\mathrm{m}$$

La distancia requerida entre los centros de las esferas debería ser pequeñísima: ¡8.2 milésimas de un 1 mm! En consecuencia, el radio r de esas esferas tendría que ser cuando mucho la mitad de esa distancia: 4.1 milésimas de mm. En otras palabras, a lo largo de 1 mm se acomodarían 120 de esas esferas.

¿Es posible tener en el mundo real esferas de ese tamaño y masa de 1kg? Para responder esta pregunta, veamos qué densidad tendrían las esferas. El volumen de las esferas sería:

$$V = \frac{4\,\pi\ r^3}{3} = \frac{4 \cdot 3.14 \cdot \left(4.1 \cdot 10^{-6}\mathrm{m}\right)^3}{3} = 2.9 \cdot 10^{-16}\mathrm{m}^3$$

En consecuencia, la densidad del material de esas esferas debería ser:

$$\rho = \frac{\mathrm{m}}{V} = \frac{1\mathrm{kg}}{2.9 \cdot 10^{-16}\mathrm{m}^3} = 3.45 \cdot 10^{15}\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$$

Dar sentido al resultado: El material más denso en la Tierra es el osmio. Su densidad es de $22{,}590\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 2.26 \cdot 10^4\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$. Las esferas deberían hacerse de un material de densidad enorme, ¡más de cien mil millones de veces mayor que la del osmio! Entonces, con materiales terrestres no es posible fabricar esferas con masas de 1 kg que se atraigan gravitacionalmente con fuerzas de 1 N.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Aunque parezca increíble, en el Universo existen cuerpos cósmicos cuya densidad permitiría, en principio, "construir" esferas de 1 kg de masa que se atraigan con una fuerza gravitacional de 1 N. Se trata de las estrellas de neutrones. Una estrella de neutrones típica tiene una masa igual a dos masas solares ($4 \cdot 10^{30}$ kg) y un radio de solamente 10 km. ¿Cuál será la densidad de esa estrella de neutrones?

Con lo que aprendiste en el problema anterior, intenta de resolver un problema similar.

Problema por resolver

¿Fuerza gravitacional de 1 N entre dos esferas separadas por una distancia de 1 m?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

La fuerza gravitacional entre dos esferas de 1 kg, separadas por una distancia de 1 m es solamente de $6.67 \cdot 10^{-11}$ N. ¿Es posible que la fuerza gravitacional entre algunas esferas separadas por la misma distancia sea de 1 N?

Los dos problemas anteriores demuestran que las fuerzas gravitacionales entre cuerpos hechos de sustancias con densidades normales tienen que ser muy pequeñas. Incluso, siguen siendo pequeñas para cuerpos que, según estándares humanos, tendrían una masa considerable. Esto lo demuestra el siguiente problema.

Problema resuelto

La fuerza gravitacional entre dos esferas masivas

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

¿Qué tan grande es la fuerza gravitacional entre dos esferas metálicas cuyas masas son de 10 toneladas (10,000 kg), cuando sus centros están a una distancia de 2 metros?

Solución: Si usamos el símbolo M para las masas de las dos esferas (M = 10,000 kg), de la ley de gravitación universal se tiene:

$$F = G\frac{M \cdot M}{d^2} = 6.67 \cdot 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{kg^2}\,\frac{\left(10^4\ \text{kg}\right)\cdot\left(10^4\ \text{kg}\right)}{\left(2\ \text{m}\right)^2} = 1.67 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$$

Dar sentido al resultado: La intensidad de las fuerzas es menor que dos milésimas de un newton.
Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.
Demuestra que esa fuerza corresponde al peso de un cuerpo cuya masa es 0.17 gramos.

¿Por qué el peso de un cuerpo cuya masa es menor de dos décimas de gramo es igual a la fuerza gravitacional entre dos cuerpos de diez toneladas? Encontrarás la respuesta en el siguiente ejemplo resuelto.

Problema resuelto

La masa de la Tierra

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un cuerpo cuya masa es m = 1 kg tiene en la superficie terrestre el peso W = 9.8 N. ¿Cuál es la masa M de la Tierra? Para el radio terrestre, toma el valor d = 6,380 km = $6.38 \cdot 10^6$ m.

Solución: Como el peso del cuerpo en la superficie terrestre es igual a la fuerza gravitacional con que lo atrae la Tierra, se escribe:

$$W = G\frac{mM}{d^2}$$

Despejando de esa fórmula la masa de la Tierra, se tiene:

$$M = \frac{W \cdot d^2}{mG} = \frac{9.8\,\text{N} \cdot \left(6.38 \cdot 10^6\ \text{m}\right)^2}{1\,\text{kg} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{\text{kg}^2}} = \frac{9.8\,\text{N} \cdot 4.07 \cdot 10^{13}\ \text{m}^2}{1\,\text{kg} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}\,\frac{Nm^2}{\text{kg}^2}} = 5.98 \cdot 10^{24}\ \text{kg} \approx\ 6 \cdot 10^{24}\ \text{kg}$$

Dar sentido al resultado: El valor tan grande de la masa de la Tierra es el responsable de que la fuerza con que ésta atrae gravitacionalmente a cuerpos de masas modestas sobrepase por mucho la atracción mutua entre cuerpos de masas relativamente grandes.

La ley de gravitación universal permite encontrar de qué depende el "factor de peso" o la "intensidad del campo gravitacional", no sólo en la superficie de la Tierra sino en la superficie de cualquier otro cuerpo cósmico. Por un lado, en la superficie de terrestre el peso del cuerpo cuya masa es *m* es:

$$W = mg$$

Por otro, el peso es igual a la fuerza gravitacional, expresada mediante la ley de la gravitación universal:

$$W = F = G\frac{mM}{d^2}$$

donde *M* es masa de la Tierra y *d* es su radio. Igualando ambas expresiones, se obtiene:

$$mg = G\frac{mM}{d^2} \quad \text{o} \quad g = G\frac{M}{d^2}$$

De tal manera, el factor de peso en la superficie de un planeta está determinado por los valores de su masa y de su radio.

La pregunta voladora

¿Cuál sería el factor de peso en un planeta cuya masa es igual a la masa de la Tierra, pero cuyo radio es 2 veces menor?

Problema resuelto

El factor de peso en Júpiter

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El planeta Júpiter (**Figura 10.9**) es el planeta más grande del Sistema Solar.

Su masa es 318 veces más grande que la masa de la Tierra. Su radio es 11.2 veces más grande que el radio terrestre. ¿Cuál es el factor de peso en la superficie de Júpiter?

Solución: El factor de peso en Júpiter es:

$$g_J = G\frac{M_J}{d_J^2}$$

Figura 10.9. El planeta Júpiter.

donde M_J es la masa de Júpiter y d_J es el radio de Júpiter. Tomando en cuenta que $M_J = 318\ M_T$ y $d_J = 11.2\ d_T$, se tiene:

$$g_J = G\frac{318\ M_T}{(11.2 d_T)^2} = \frac{318}{(11.2)^2} \cdot G\frac{M_T}{d_T^2} = 2.54 \cdot g_T = 2.54 \cdot 9.8\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} = 24.9\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$$

Dar sentido al resultado: El factor de peso en la superficie de Júpiter es 2.5 veces mayor que el factor de peso en la Tierra. Un cuerpo que en la Tierra pesa 100 N, en Júpiter pesaría 250 N.

Cuando se completó con el valor preciso de la constante gravitacional, la ley de la gravitación universal permitió a los astrónomos y físicos, además de comprender las leyes de Kepler, determinar las masas de los planetas y muchas otras de sus características. Veamos cómo esa ley nos ayuda a entender el valor del factor de peso en la Luna.

La naturaleza de la física

¿Por qué un astronauta pesa seis veces menos en la Luna que en la Tierra?

Competencias ejemplificadas: Aplicación de modelos matemáticos; conocer la relación entre ciencia, tecnología y sociedad.

Hemos visto que los cuerpos pesan seis veces menos en la Luna que en la Tierra. Eso vale también para los astronautas (**Figura 10.10**).

¿Por qué el cociente de los pesos es 6 y no algún otro número, por ejemplo, 4 o bien 9? La ley de la gravitación universal y los datos sobre la Tierra y la Luna nos permiten entender tal hecho.

Si se define el peso de un cuerpo en la superficie terrestre como la fuerza gravitacional con que lo atrae la Tierra, el peso del astronauta en la superficie terrestre es:

Figura 10.10. Un astronauta pesa seis veces menos en la Luna que en la Tierra. Sin embargo, su masa es la misma en ambos cuerpos cósmicos.

$$W_T = G\frac{m_A M_T}{d^2_T}$$

donde m_A es la masa del astronauta; M_T, la masa de la Tierra; y d_T, el radio de la Tierra. Usando la misma ley, el peso del astronauta en la superficie de la Luna sería:

$$W_L = G\frac{m_A M_L}{d^2_L}$$

donde M_L es la masa de la Luna, y d_L, el radio. El cociente de los pesos del astronauta en la Tierra y en la Luna es:

$$\frac{W_T}{W_L} = \left(\frac{M_T}{M_L}\right)\left(\frac{d_L}{d_T}\right)^2$$

Se observa que el cociente no depende ni de la constante gravitacional ni de la masa del astronauta. Para encontrar el valor del cociente, hay que conocer algunos datos sobre la Tierra y la Luna. Sus masas y radios son:

$M_T = 5.97 \cdot 10^{24}$ kg $\qquad d_T = 6.38 \cdot 10^6$ m

$M_L = 7.35 \cdot 10^{22}$ kg $\qquad d_L = 1.74 \cdot 10^6$ m

Los valores de los cocientes de las masas y de los radios, que determinan el cociente de los pesos, son:

$$\frac{M_T}{M_L} = 81.2 \quad \text{y} \quad \frac{d_L}{d_T} = 0.273$$

Por ello, el valor del cociente de los pesos es:

$$\frac{W_T}{W_L} = 81.2 \cdot (0.273)^2 = 81.2 \cdot 0.0745 = 6.05$$

De esta manera, queda claro por qué el cociente tiene el valor 6 y no algún otro valor. Conocer este dato era crucial para el diseño del vehículo lunar que sería usado por los astronautas para moverse sobre la superficie de la Luna. Gracias a la física, los ingenieros de la NASA sabían en qué "entorno gravitacional" iba a funcionar el vehículo lunar. ¡El material de que fue hecho el vehículo no hubiera sido capaz de soportar su propio peso en la superficie de la Tierra!

¡No creas todo lo que lees!

La fuerza gravitacional de la Luna

Competencias a practicar: Pensamiento crítico, obtener la información para responder preguntas.

En un popular libro de texto de física se afirma: "Al encontrarse un astronauta sobre la superficie de Luna, su masa es la misma, pero su peso se reduce a la sexta parte de lo que era su peso en la Tierra. El cambio se debe a que la masa de la Luna es igual a la sexta parte de la masa de la Tierra".

Con lo que aprendiste en la sección anterior "La naturaleza de la física" trata de responder las preguntas:

a) ¿Qué es erróneo en esa afirmación?
b) ¿Qué radio debería tener la Luna, para que, con una masa 6 veces menor que la masa de la Tierra, el peso de un astronauta fuera en ella 6 veces menor que el peso del mismo astronauta en la Tierra?
c) ¿La Luna tiene ese radio?

10.3. Los satélites artificiales

La Luna es el único satélite natural del planeta Tierra. No se sabe a ciencia cierta cómo se formó la Luna, pero no cabe duda de que el proceso consistió en una serie de acontecimientos que respetaban las leyes de física.

La primera idea sobre cómo crear un satélite artificial de la Tierra fue publicada por Isaac Newton en su obra *El sistema del mundo* (1687). Según Newton, se podría lograr esa hazaña lanzando horizontalmente los proyectiles desde una montaña alta (**Figura 10.11**).

Si la rapidez fuera pequeña, el proyectil caería en la superficie de la Tierra en el punto D. Al aumentar la rapidez de lanzamiento, el proyectil caería más lejos, por ejemplo, en los puntos E o F. Si la rapidez fuera suficientemente grande, el proyectil podría dar una vuelta completa y regresar al punto inicial con la misma rapidez. De tal manera, su movimiento se podría repetir y se tendría así un satélite artificial.

Como se trataba más bien de un *experimento pensado*, Newton no se molestó en discutir las dificultades de su realización práctica. Le bastaba la certeza de que esa idea era, en principio, realizable. ¿Cuáles eran dificultades prácticas?

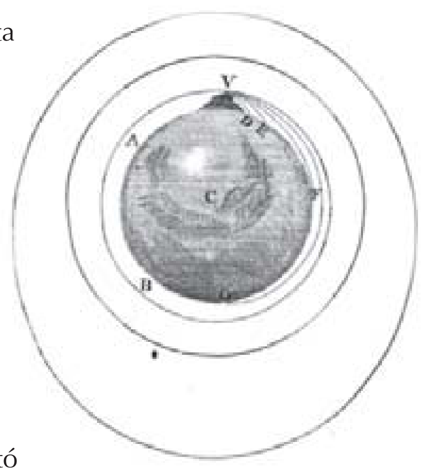


Figura 10.11. La idea de Newton de lanzar un satélite artificial.

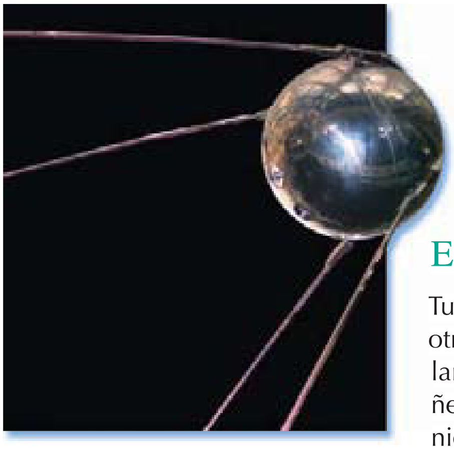


Figura 10.12. El primer satélite artificial Sputnik 1.

1. El punto de lanzamiento debería estar fuera de la atmósfera terrestre, para evitar que el rozamiento con el aire disminuyera la rapidez del satélite. Ni siquiera la montaña más alta del mundo es idónea para el lanzamiento newtoniano.
2. Debería contarse con una tecnología de lanzamiento de los proyectiles capaz de darle al satélite una rapidez muy grande.

El primer satélite artificial de la Tierra

Tuvieron que pasar precisamente 270 años para que fuera posible superar éstas y otras dificultades tecnológicas. El 4 de octubre de 1957, la antigua Unión Soviética lanzó el primer satélite artificial de la historia. Su nombre era Sputnik 1 ("compañero de viaje", en ruso). El satélite soviético (**Figura 10.12**) era una esfera de aluminio de 58 cm de diámetro que llevaba cuatro antenas largas y finas.

El Sputnik 1 tenía una masa aproximada de 83.6 kg y orbitó la Tierra a una distancia de entre 939 km, en su apogeo, y 215 km, en su perigeo.

Problema resuelto

Algunos datos sobre el movimiento del Sputnik 1

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Supón que el primer satélite tuvo una trayectoria circular, de altura promedio $h = 577$ km, y calcula:

a) la distancia entre el satélite y el centro de la Tierra,
b) la fuerza gravitacional de la Tierra sobre el satélite,
c) la rapidez lineal del satélite y
d) el periodo del satélite.

La masa del satélite era $m = 83.6$ kg y la masa de la Tierra es $M = 5.98 \cdot 10^{24}$ kg.

Solución:

a) La distancia entre el satélite y el centro de la Tierra se obtiene sumando el radio de la Tierra y la altura del satélite:

$$d = R + h = 6{,}370 \text{ km} + 577 \text{ km} = 6{,}947 \text{ km}$$

b) La fuerza gravitacional de la Tierra sobre el satélite es:

$$F = G\frac{mM}{d^2} = 6.67 \cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{83.6 \text{ kg} \cdot 5.98 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{(6.947 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = 691 \text{ N}$$

c) La fuerza gravitacional F juega el papel de la fuerza centrípeta y por eso se puede expresar mediante la rapidez lineal v como:

$$F = \frac{mv^2}{d}$$

Despejando v de esta ecuación,

$$v = \sqrt{\frac{F \cdot d}{m}} = \sqrt{\frac{691\,N \cdot 6.947 \cdot 10^6 \text{ m}}{83.6 \text{ kg}}} = 7{,}578\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

d) El periodo del satélite es el tiempo que tarda en dar una vuelta completa alrededor de la Tierra. Se obtiene al dividir la circunferencia de su trayectoria entre la rapidez orbital:

$$T = \frac{2\pi d}{v} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 6{,}947{,}000 \text{ m}}{7{,}578 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 5{,}757 \text{ s} = 95.95 \text{ min}$$

Dar sentido al resultado: La fuerza gravitacional sobre el satélite en la superficie de la Tierra es 819 N. A una altura de 577 km, su valor disminuye, aproximadamente, un 15%.

El periodo medido del satélite era de 96.2 minutos. La diferencia se debe al modelo matemático usado, en el cual se supuso que la trayectoria del satélite es circular de radio igual a 6,947 km (altura sobre la superficie terrestre de 577 km).

¡No creas todo lo que lees!

La fuerza centrífuga y el movimiento del primer satélite

Competencias a practicar: Pensamiento crítico; explicitar conceptos físicos en una situación cotidiana.

En el texto sobre el primer satélite soviético, llamado Sputnik, publicado en la revista *Popular Mechanics* en octubre de 1987 (página 60), se dice: "El paso número uno en la ciencia satelital es acelerar el satélite hasta la rapidez precisa en que la fuerza centrífuga equilibra la gravedad".

a) Si la supuesta fuerza centrífuga equilibra la fuerza de gravedad, ¿cuál sería el valor de la fuerza neta sobre el satélite?
b) Con esa fuerza neta, ¿cuál sería la aceleración del satélite?
c) Con esa aceleración, ¿podría moverse el satélite en una trayectoria curva?

¿Cómo se coloca un satélite en su órbita?

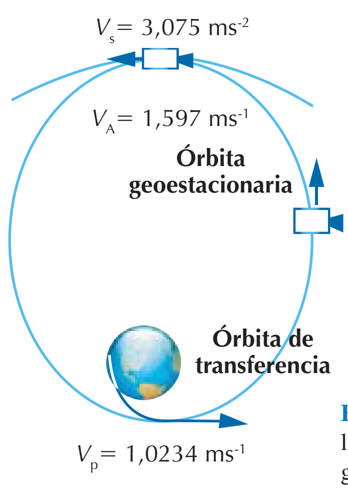
Para colocar un satélite en su órbita, hay que elevarlo a la altura adecuada y darle en esa altura una velocidad inicial adecuada. Estas delicadas tareas las realizan los cohetes espaciales portadores de los satélites. El lanzamiento de los cohetes portadores es un espectáculo de fuego impresionante (**Figura 10.13**).

El cohete portador cuenta con varios módulos llenos de combustible. Durante el ascenso, los módulos, uno tras otro, se despegan del cohete cuando se agota el combustible que contenían. El último módulo que queda es el que porta el satélite y que logrará alcanzar la altura necesaria para darle al satélite su velocidad orbital exacta. Esta manera de colocar un satélite en órbita se usa solamente para los satélites que orbitarán la Tierra a una altura menor de 2,000 km.

Una clase de satélites importante son los satélites geoestacionarios. Su periodo es igual al tiempo que dura una rotación de la Tierra alrededor de su eje, es decir, es igual a 24 horas (más precisamente, 86,164 segundos). Por eso, un satélite geoestacionario siempre está sobre el mismo punto terrestre. Para lograr que ese tiempo sea su periodo, la altura del satélite geoestacionario sobre la superficie terrestre debe ser igual 35,786 km (más de 5 radios terrestres).

Como sería muy costoso que un cohete portador llevara el satélite geoestacionario hasta esa altura tan elevada, la técnica para colocarlo en órbita es

Figura 10.13. El lanzamiento de un cohete espacial.



mucho más complicada. El cohete lleva al satélite a una altura de solamente 218 km y ahí le da una velocidad bastante grande, igual a 10,234 m/s (**Figura 10.14**).

El satélite entra en la ***órbita de transferencia***. La forma de esta órbita es una elipse pronunciada, con una distancia mínima al centro de la Tierra de 6,588 km (la posición del perigeo) y una distancia máxima al centro de la Tierra de 42,164 km (la posición del apogeo).

Al llegar al apogeo, que es también un punto de la órbita geoestacionaria, el satélite tiene una rapidez orbital de 1,597 m/s. En ese momento, los motores del satélite se activan elevando su rapidez orbital a 3,075 m/s. Con esa rapidez el satélite quedará en una órbita geoestacionaria.

Figura 10.14. El esquema del lanzamiento de un satélite geoestacionario.

La búsqueda del conocimiento

El sistema de posicionamiento global

Competencias a practicar: Conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad; obtener información para responder preguntas.

Aunque todavía no ha cumplido 60 años de vida, la numerosa comunidad de satélites ha contribuido a la integración de las sociedades modernas en la llamada *aldea global*. Además de la globalización de las comunicaciones, las tecnologías satelitales han transformado casi todo, desde el espionaje militar hasta las observaciones geológicas y climáticas (**Figura 10.15**).

Busca en la Internet información relevante para responder la pregunta:

- ¿Qué son los satélites geoestacionarios y cómo hacen posible el sistema de posicionamiento global?

Figura 10.15. Foto satelital de la zona de California y Baja California afectada por incendios forestales.

Demostrar las competencias

Pensamiento crítico

1. En comparación con la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra sobre la Luna, la fuerza gravitacional que ejerce la Luna sobre la Tierra es

   a) mayor *b*) igual *c*) menor

   Justifica tu respuesta.

2. Una manzana tiene un peso de 2 N. ¿Cuál es el valor de la fuerza que la manzana ejerce sobre la Tierra?

   a) 0 N *b*) 1 N
   c) 2 N *d*) No se puede determinar

3. En un libro de texto de física se dice: "La fuerza gravitacional entre la Tierra y la Luna se mide fácilmente porque ambos objetos tienen una gran masa." ¿Qué es correcto en esta aseveración? ¿Y qué es incorrecto en ella?

Aplicar modelos matemáticos

4. Una nave espacial tiene masa $m = 1{,}000$ kg. ¿Qué tan grande es la fuerza gravitacional que sobre la nave ejerce la Tierra cuando la nave está a una distancia de 3 radios terrestres del centro de la Tierra? La masa de la Tierra es $M = 6 \bullet 10^{24}$ kg y el radio terrestre es $R = 6.37 \bullet 10^{6}$ m. La constante gravitacional es $G = 6.67 \bullet 10^{-11}$ Nm^2/kg^2.

5. La masa de la Luna es $m = 7.35 \bullet 10^{22}$ kg. La distancia promedio entre la Luna y la Tierra es $d = 384{,}000$ km ($3.84 \bullet 10^{8}$ m). ¿Cuál es la fuerza gravitacional entre la Luna y la Tierra?

6. ¿Cuál es la fuerza gravitacional entre dos buques petroleros ($m = 500{,}000$ toneladas) cuando están a una distancia de 1 km?

7. ¿Qué tan grande es la fuerza gravitacional que el Sol ($M = 2 \cdot 10^{30}$ kg) ejerce sobre la Tierra ($m = 6 \cdot 10^{24}$ kg)? La distancia entre el Sol y la Tierra es $d = 1.5 \cdot 10^{11}$ m

8. El Sol (**Figura 10.16**) es una estrella mediana, cuya masa es $M = 2 \cdot 10^{30}$ kg y cuyo radio es $R = 695{,}000$ km ($6.95 \cdot 10^8$ m).

¿Cuál es el factor de peso g_S en la superficie del Sol? La constante gravitacional es $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg².

9. El factor de peso en la superficie del planeta Marte (**Figura 10.17**) es $g_M = 3.7$ N/kg.

Si la masa de Marte es $M_M = 6.6 \cdot 10^{23}$ kg, ¿cuál será su radio?

10. El factor de peso en el planeta Venus (**Figura 10.18**) es $g_V = 8.9$ N/kg.

Si el radio de Venus es $R_V = 6{,}052$ km ($6.052 \cdot 10^6$ m), ¿cuál es su masa?

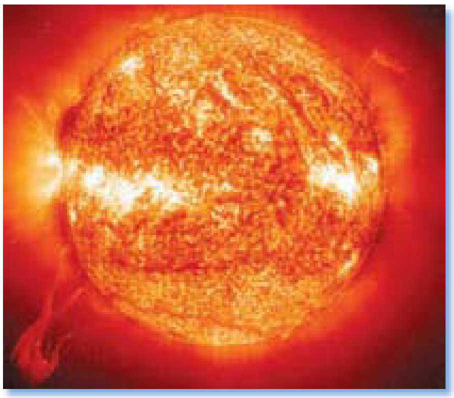


Figura 10.16. El Sol es una estrella mediana.

Figura 10.17. La superficie del planeta Marte.

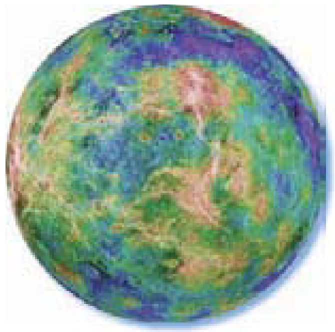


Figura 10.18. El planeta Venus.

11. Cuando el planeta Marte está en su afelio, su distancia al Sol es de 207,000,000 km y su rapidez orbital es de 26.5 km/s. Al llegar a su perihelio, la distancia entre Marte y el Sol es 250,000,000 km. ¿A qué rapidez orbital se mueve Marte cuando está en su perihelio?

12. El planeta Mercurio (**Figura 10.19**) es el planeta más cercano al Sol.

Figura 10.19. El planeta Mercurio.

Cuando está en su perihelio, su distancia al Sol es máxima y es igual a 70,000,000 km. Su rapidez orbital en el perihelio es de 39 km/s. Al llegar a su distancia mínima al Sol (afelio), su rapidez orbital alcanza los 59 km/s. ¿Cuál es la mínima distancia entre el Sol y el planeta Mercurio?

13. Cuando están a una distancia d, la fuerza gravitacional entre dos cuerpos es igual a 1 N. Si se acercaran hasta la mitad de la distancia ($d/2$), la fuerza gravitacional entre ellos sería:

a) 0.5 N *b*) 1 N *c*) 2 N *d*) 4 N

Si se alejaran hasta el doble de la distancia ($2\ d$), la fuerza gravitacional entre ellos sería:

a) 2 N *b*) 1 N *c*) 0.5 N *d*) 0.25 N

En ambos casos, justifica tu selección.

14. Un mago con poderes increíbles aumentó el radio de la Tierra hasta el doble de su tamaño original. Como no quiso que cambiara nuestro peso, también hizo aumentar la masa de la Tierra. El aumento de la masa fue de:

a) dos veces *b*) cuatro veces

c) seis veces *d*) ocho veces

Justifica tu selección.

15. Supón que existe un planeta que tiene la mitad de la masa de la Tierra y la mitad de su radio. En la superficie de este planeta, el factor de peso (o la aceleración de la caída libre) es:

a) $2g$ *b*) g *c*) $g/2$ *d*) $g/4$

BLOQUE 4 El trabajo y la energía mecánica

Unidad de competencia

1. Conocer los conceptos trabajo, potencia y energía mecánica y la ley de conservación de energía, y aplicarlos para resolver problemas relacionados con las situaciones cotidianas.

Indicadores de desempeño

- ✔ Aplicar el concepto de trabajo para resolver y comprender situaciones de la vida cotidiana.
- ✔ Interpretar el área bajo la curva, en gráficas de fuerza *versus* desplazamiento, como el trabajo realizado por una fuerza sobre un objeto.
- ✔ Indicar, para una serie de ejemplos dados, si los sistemas poseen energía cinética o algún tipo de energía potencial.
- ✔ Interpretar gráficas y expresiones matemáticas que representan la energía cinética y energía potencial que posee un cuerpo.
- ✔ Calcular, en situaciones diversas, la velocidad y la posición de un objeto mediante el uso de la ley de la conservación de la energía mecánica.
- ✔ Calcular la energía consumida por diferentes aparatos electrodomésticos, de acuerdo con la potencia de cada uno de ellos.

Conocimientos

- ✔ Definir el concepto de trabajo en física, como el producto escalar entre la fuerza y el desplazamiento.
- ✔ Emplear la expresión matemática para el trabajo, así como la gráfica que lo representa.
- ✔ Definir los conceptos de energía cinética y energía potencial, así como su relación con el trabajo.
- ✔ Identificar al joule y al ergio como las unidades en que se miden el trabajo, la energía cinética y la energía potencial.
- ✔ Definir el concepto de potencia y las unidades en que mide.
- ✔ Identificar agentes que imposibilitan la conservación de la energía mecánica.
- ✔ Reconocer que el calor es una forma de energía que resulta de la acción de fuerzas disipativas.

Los temas del bloque

Habilidades

- ✔ Distinguir entre el concepto cotidiano de trabajo y el concepto de trabajo en física.
- ✔ Reconocer el trabajo realizado por o sobre un cuerpo, como un cambio en la posición o la deformación del mismo.
- ✔ Identificar las condiciones para que se realice un trabajo.
- ✔ Comprender la ley de la conservación de la energía mecánica.
- ✔ Analizar las expresiones matemáticas y gráficas que representan la energía cinética y potencial que posee un cuerpo, en un lugar y momento determinados.
- ✔ Analizar las fuerzas que posibilitan o impiden que la energía mecánica se conserve (fuerzas conservativas y fuerzas disipativas).
- ✔ Diferenciar entre la energía cinética y la energía potencial que posee un cuerpo.
- ✔ Relacionar los cambios en la energía cinética y potencial de un cuerpo con el trabajo que realiza.
- ✔ Emplear la ley de la conservación de la energía mecánica, en la descripción de fenómenos de la vida cotidiana.
- ✔ Relacionar los conceptos de trabajo, energía y potencia para aplicarlos en problemas.

Actitudes y valores

- ✔ Mostrar interés por incrementar su aprendizaje más allá de lo visto en clase.
- ✔ Participar activamente en grupos de trabajo.
- ✔ Valorar la importancia de las actividades experimentales en la adquisición de un conocimiento.
- ✔ Presentar disposición al trabajo colaborativo con sus compañeros.
- ✔ Valorar la importancia del intercambio de opiniones respecto a conceptos y explicaciones sobre fenómenos naturales y cotidianos.
- ✔ Presentar disposición a escuchar propuestas de solución diferentes a la suya.
- ✔ Presentar una actitud favorable al aprendizaje de la física.
- ✔ Valorar la utilización de los modelos matemáticos para representar la energía cinética y potencial.

Tema 11

Trabajo y potencia

Propósitos del tema 11

- Conocer las definiciones y unidades de los conceptos físicos de trabajo y potencia, y aplicarlos para resolver problemas en diferentes situaciones de la vida cotidiana.

11.1. Trabajo mecánico

Una cuantificación inicial del trabajo

Las ideas intuitivas no fallan cuando se trata de comparar los trabajos realizados al levantar o empujar un cuerpo. Por ello, tales ideas pueden servir como punto de partida hacia el concepto científico de trabajo. Para ir perfilando las ideas intuitivas sobre el trabajo para que se acerquen al máximo al concepto de trabajo tal como se entiende en la física, será útil que las compartas con tus compañeros.

Actividad de discusión

¿Qué es lo que importa cuando se levantan ladrillos?

Propósito: Perfilar las ideas intuitivas para llegar a una cuantificación inicial del trabajo.

Competencias a practicar: Planear hipótesis, y aprender en equipo.

Forma tu equipo para comparar los supuestos trabajos realizados por dos jóvenes.

1. Un joven levantó un ladrillo hasta una altura de 1 (**Figura 11.1**), mientras que una chica levantó otro hasta una altura de 2 m (**Figura 11.2**).
2. ¿Quién hizo el trabajo mayor? Describe el criterio utilizado por tu equipo para comparar los trabajos.

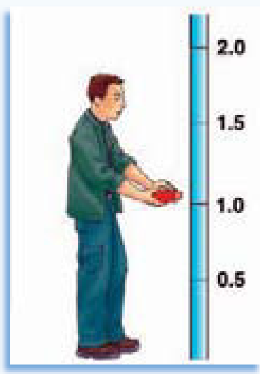


Figura 11.1. Se levante un ladrillo hasta 1m de altura.

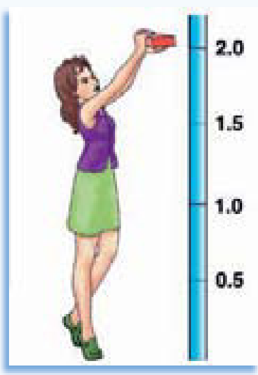


Figura 11.2. Se levanta un ladrillo hasta 2 m de altura.

3. El joven levantó dos ladrillos hasta una altura de 1.5 m (**Figura 11.3**), mientras que la chica levantó uno solo hasta la misma altura (**Figura 11.4**)
4. ¿Quién hizo el trabajo mayor? Describe el criterio utilizado por tu equipo para comparar los trabajos.

Figura 11.3. Se levantan 2 ladrillos hasta 1.5 m de altura.

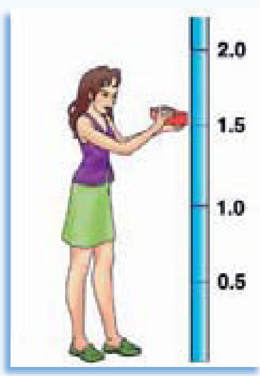


Figura 11.4. Se levanta 1 ladrillo hasta 1.5 m.

5. Si el joven levanta 1 ladrillo hasta una altura de 2 m, ¿hasta qué altura debe levantar la chica 2 ladrillos para que los trabajos sean iguales?

6. ¿Cuántos ladrillos debe levantar la chica hasta una altura de 0.5 m para que los trabajos sean iguales?

7. Si la chica levanta 3 ladrillos hasta una altura de 2 m, ¿de cuántas maneras diferentes podría el joven realizar el mismo trabajo? Describe cada una, indicando el número de ladrillos y la altura. Usa una división mínima de altura de 0.5 m.

8. ¿Cuál sería la "cantidad de trabajo", expresada en términos de *número de ladrillos* y *altura*, que permite comparar los trabajos en todas las situaciones consideradas arriba?

9. Imaginen ahora que en lugar de un solo tipo de ladrillo, los jóvenes pueden levantar dos tipos de ladrillos diferentes, los "rojos" y los "amarillos". Un ladrillo rojo es dos veces más pesado que un ladrillo amarillo. Si la chica levanta 1 ladrillo rojo hasta una altura de 1 m y el joven levanta 1 ladrillo amarillo hasta la misma altura, ¿quién hizo el trabajo mayor? Describe el criterio usado por el equipo para comparar los trabajos.

10. Si el joven levanta un ladrillo rojo y dos ladrillos amarillos hasta una altura de 2 m, hay cinco maneras diferentes de que la chica iguale el trabajo levantando ladrillos hasta una altura de 1 m. Encuentren esas maneras y completen la siguiente tabla.

Manera	Número de ladrillos rojos	Número de ladrillos amarillos
1		
2		
3		
4		
5		

11. ¿Cuál sería ahora una posible definición de la "cantidad de trabajo"?

La definición y la fórmula del trabajo

No cabe duda de que en la actividad anterior habrán llegado a la conclusión de que, no es el número, sino el peso de los ladrillos, la cantidad física que, junto con la altura, cuantifica el trabajo realizado al levantar los ladrillos.

Imaginemos ahora que las personas, en vez de levantar ladrillos, empujan cajas. Si la chica empuja una caja 5 m y el joven empuja una caja igual 10 m (**Figura 11.5**), sabemos que el joven hizo mayor trabajo, porque la distancia que recorrió su caja fue mayor. Claro, aquí suponemos que ambos usaron, al empujar, la misma fuerza, que fue determinada por la fricción entre la caja y el suelo.

Figura 11.5. Empujando una caja a diferentes distancias.

Si la chica empuja dos cajas puestas una sobre otra 5 m y el joven empuja una caja la misma distancia (**Figura 11.6**), sabemos que la joven hizo mayor trabajo, ya que tuvo que usar mayor fuerza. La fuerza de fricción aumenta con el peso del cuerpo y, como todo mundo sabe, dos cajas pesan más que una.

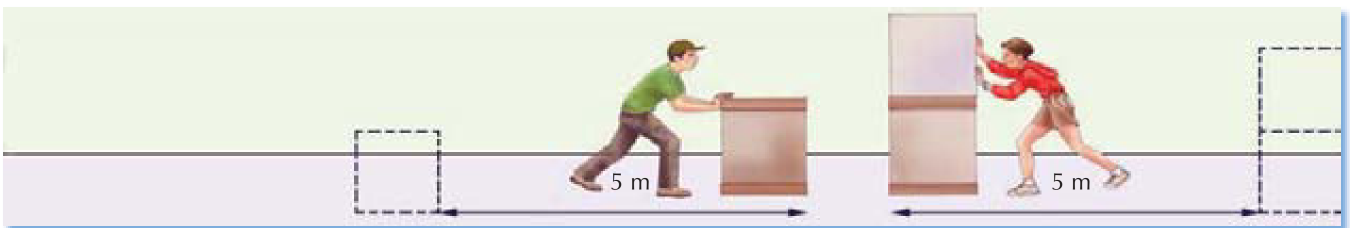


Figura 11.6. Empujar cajas diferentes la misma distancia.

¿Qué aspectos son comunes a todos los casos que se han considerado?

1. Las personas actúan sobre los cuerpos (los ladrillos y las cajas). La acción se describe mediante una fuerza constante, que sirve para vencer el peso del cuerpo (al levantar ladrillos) o para vencer la fuerza de fricción (al empujar cajas).
2. Los cuerpos se mueven en la dirección de la fuerza.

La situación donde la fuerza es constante y el movimiento se realiza en la dirección de la fuerza es aquella en la cual la definición de trabajo es lo más sencilla posible:

Definición

El **trabajo** es igual al producto de la fuerza y la distancia recorrida en la dirección de la fuerza.

Si la fuerza constante es F y la distancia recorrida en la dirección de esa fuerza es d, la definición anterior se escribe simbólicamente como:

$$T = F \cdot d$$

La unidad del trabajo en el SI

La unidad del trabajo [*T*] en el sistema internacional (SI) se deriva de las unidades para la fuerza y la distancia:

$$[T] = [F][d] = 1 \text{ N} \bullet 1 \text{ m} = 1 \text{ Nm}$$

Esta unidad recibe el nombre especial de "joule" y su símbolo es "J", es decir,

$$1\text{J} = 1\text{NM}$$

Se dio este nombre especial en reconocimiento de la gran labor realizada por el célebre físico inglés James Prescott Joule (1818-1889), quien promovió el concepto de energía como concepto científico y, junto con otros, contribuyó a la formulación de la ley de conservación de la energía.

El detalle que importa

"Joule" no es "joule"

Joule es el apellido del científico y el *joule* es la unidad de energía.

En España la unidad de trabajo (y, como verás más adelante, también de energía) recibe el nombre de "julio". En México es más común usar el término *joule* (se pronuncia algo así como "yul").

Actividad práctica

Realizar un trabajo de un joule

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente; seguir instrucciones y procedimientos de manera reflexiva.

Figura 11.7. Al levantar, 1 m verticalmente, un chocolate de 100 g se realiza un trabajo igual a 1 joule.

¿Cómo puede alguien realizar un trabajo de un joule?

Según su definición, un trabajo de un joule se realiza cuando, bajo la acción de una fuerza constante de un newton, un cuerpo recorre una distancia de un metro en la dirección y en el sentido de la fuerza. Como vimos, un cuerpo con masa de 102 gramos tiene un peso de 1 newton.

Entonces, para que obtengas una sensación aproximada del tamaño de un trabajo de un joule, levanta lentamente, un metro en dirección vertical, un chocolate de 100 gramos. Lo mismo hizo la chica de la **Figura 11.7**.

Competencias a practicar: Realizar un experimento pertinente; seguir instrucciones y procedimientos de manera reflexiva.

Para realizar un trabajo de un joule, ¿cuánto deberías aproximadamente levantar un envase de un litro de leche?

El joule no es la única unidad para el trabajo y la energía. Durante un tiempo se usó, en el sistema CGS (centímetro-gramo-segundo), la unidad llamada **ergio**. Su nombre proviene de la palabra griega *ergon* que significa "trabajo o energía". Un joule equivale a diez millones de ergios:

$$1 \text{ joule} = 10{,}000{,}000 \text{ ergios} = 10^7 \text{ ergios}$$

La aplicación cualitativa de la definición de trabajo

Según se entiende en la física, las condiciones necesarias para poder hablar de trabajo son las siguientes:

- Sobre el cuerpo considerado actúa una fuerza.
- El cuerpo se mueve en la dirección y en el sentido de la fuerza.

Para las dos situaciones que se describen abajo, analiza si se cumplen estas condiciones y decide si se hace trabajo.

Situación 1

Esperando el metro

Una chica está esperando el metro y sostiene, con la mano, una maleta (**Figura 11.8**).

Responde las siguientes preguntas:

1. ¿Se aplica alguna fuerza sobre la maleta?
2. ¿Se mueve la maleta en la dirección de esa fuerza?
3. ¿Se hace trabajo?

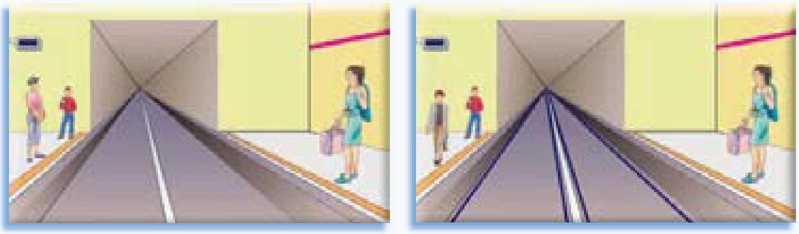


Figura 11.8. Esperando el metro.

Situación 2

Levantar los plátanos

Un joven levanta una plataforma cargada de plátanos (**Figura 11.9**).

Responde las siguientes preguntas:

1. ¿Existe una fuerza sobre la plataforma?
2. ¿La plataforma se mueve en la dirección de esa fuerza?
3. ¿Se hace trabajo?

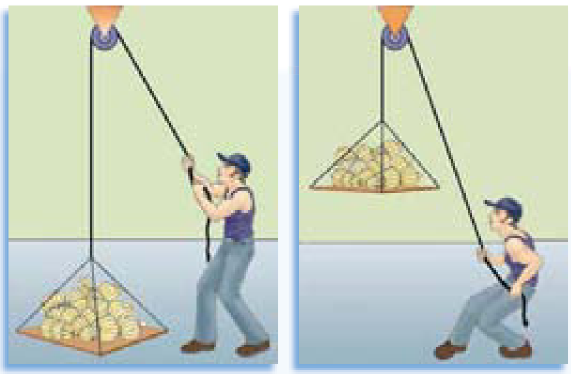


Figura 11.9. Levantando los plátanos.

Física en la vida cotidiana

¿Por qué me canso si no hago trabajo?

Competencia ejemplificada: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

Si sostienes en vilo un garrafón lleno de agua (**Figura 11.10**), según la definición aceptada en la física, no realizas trabajo. La razón es simple: ¡el garrafón no se mueve y el trabajo realizado es igual a cero!

Pero, si la situación se prolongara, te sentirías tan cansado como si hubieras movido el garrafón, levantándolo y bajándolo, por ejemplo. ¿Es esto una paradoja?

¡No, no lo es! Para poder sostener el garrafón tus músculos tienen que relajarse y tensarse rápidamente. El cansancio que sientes se debe a este trabajo "interno" de tus músculos, en el que sí hay acción de fuerzas musculares y movimiento muscular.

Figura 11.10. Sostener en vilo un garrafón lleno de agua.

La aplicación cuantitativa de la fórmula del trabajo

Si se conocen el trabajo realizado T y la distancia recorrida d, es posible calcular la fuerza aplicada F:

$$F = \frac{T}{d}$$

Si se conocen el trabajo realizado y la fuerza aplicada, se puede calcular la distancia recorrida:

$$d = \frac{T}{F}$$

En los siguientes ejemplos se calcula el trabajo, la fuerza o la distancia.

Problema resuelto

El trabajo realizado por un elevador electro-hidráulico

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El elevador de vehículos electro-hidráulico *Nussbaum SPL4000* (**Figura 11.11**) levanta automóviles hasta una altura d = 1.9 m.

Si la masa de un auto es de 1,500 kg, ¿qué trabajo realiza el elevador?

Solución: La fuerza que ejerce el elevador es igual al peso del automóvil:

$$F = mg = 1{,}500 \text{ kg} \cdot 9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 14{,}700 \text{ N}$$

Con ese valor de la fuerza, el trabajo realizado por el elevador es:

$$T = F \cdot d = 14{,}700 \text{ N} \cdot 1.9 \text{ m} = 27{,}930 \text{ J}$$

Dar sentido al resultado: Estrictamente hablando, el trabajo real es un poco mayor que el valor calculado. La fuerza que usa el elevador debe ser ligeramente mayor que el peso del auto.

Figura 11.11. El levantador electro-hidráulico.

Problema por resolver

El trabajo de un Jumbo jet cuando despega

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Los motores de un Jumbo jet (**Figura 11.12**) proporcionan durante el despegue una fuerza F = 512,000 N. La longitud de la pista recorrida por el avión es d = 2,200 m. ¿Qué tan grande será el trabajo realizado por los motores del Jumbo jet?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si la distancia recorrida fuera 1,100 metros, ¿cuál sería el trabajo realizado en el despegue?

Figura 11.12. Un Jumbo jet al despegar.

Problema resuelto

La fuerza para mover un refrigerador

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Para revisar un refrigerador doméstico, un técnico tiene que mover el aparato (**Figura 11.13**).

La masa del refrigerador es de 40 kg. Al arrastrarlo 2 m por el suelo de la cocina, el técnico realizó un trabajo de 320 J. ¿La fuerza utilizada es igual al peso del refrigerador?

Solución: La fuerza usada es:

$$F = \frac{T}{d} = \frac{320\ \text{J}}{2\ \text{m}} = 160\ \text{N}$$

Tomando el factor de peso g igual a 10 N/kg, el peso del refrigerador es

$$W = mg = 40\ \text{kg} \cdot 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 400\ \text{N}$$

Dar sentido al resultado: La fuerza usada para mover el refrigerador no es igual al peso del refrigerador: es menor. Representa el 40% del peso (160/400 = 0.4).

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

¿Qué tan grande es el coeficiente de fricción cinética?

Competencia a practicar: Pensamiento crítico.

¿Podría el técnico comenzar a mover el refrigerador aplicando una fuerza de 160 N?

Figura 11.13. El técnico mueve el refrigerador.

Problema por resolver

¿De qué piso cayó el balón de fútbol?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Desde la ventana de un edificio de varios pisos se dejó caer en el patio un balón de fútbol. En la caída libre, la fuerza del peso del balón (W = 4.5 N) realizó un trabajo T = 40.5 J. ¿Desde qué piso se dejó caer el balón? La altura de un piso es aproximadamente de 2.5 m.

Física en la vida cotidiana

El corazón es una bomba increíble

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos físicos en un fenómeno cotidiano.

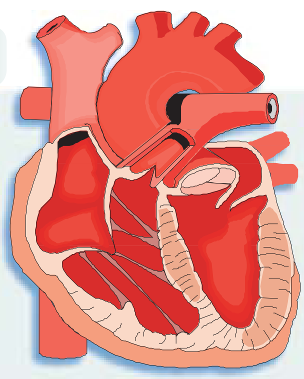


Figura 11.14. El corazón es una bomba increíble.

El corazón de un adulto (**Figura 11.14**) bombea con cada latido alrededor de 80 cm^3 (m = 80 g) de sangre. Redondeando esto a 100 cm^3 (m = 100 g), tomando la duración de un latido como de 1 segundo (de hecho es un poco menor, porque ocurren alrededor de 70 latidos en un minuto) y suponiendo que el trabajo en cada latido se puede aproximar por el trabajo realizado para levantar esa cantidad de sangre hasta una altura d = 1 m, se pueden estimar varias cantidades físicas relacionadas con el trabajo realizado por el corazón.

¿Con las aproximaciones efectuadas, el trabajo en un latido es

$$T_1 = mgd = 0.1\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1\ \text{m} = 1$$

Este trabajo no es nada impresionante, pero el trabajo que realiza el corazón en un día, haciendo 24 • 60 • 60 = 86,400 latidos, ya es respetable:

$$T_{\text{día}} = 86,400 \cdot T_1 = 86,400\ \text{J}$$

¡Esto es casi 100,000 joules! Para que tengas una idea de la magnitud de este trabajo, veámoslo así. Si la persona tiene una masa de 100 kg (el peso es de 1,000 N), al levantarla hasta una altura de 100 m se realizaría un trabajo de 100,000 N, que es aproximadamente igual al trabajo que hace el corazón durante un día.

El trabajo que realiza el corazón durante toda la vida es aún más respetable. Si un año tiene, aproximadamente, 400 días y la vida dura en promedio 75 años, el número aproximado de días es 28,000 días. El trabajo hecho por el corazón es:

$$T_{\text{vida}} = 28,000 \cdot T_{\text{día}} = 28,000 \cdot 100,000\ \text{J} = 2,800,000,000\ \text{J}$$

Se trata de ¡2,800 millones de joules!

Este trabajo es aproximadamente igual al trabajo que se realizaría al "levantar" una persona de 100 kg hasta una altura aproximadamente igual al radio de la Tierra, es decir, de 6,400,000 metros.

La fuerza es constante pero su dirección no coincide con la dirección del movimiento

Supongamos que una persona empuja una caja por el suelo pero que, en vez de ejercer una fuerza horizontal, aplica una fuerza cuya dirección forma un ángulo α con la horizontal (**Figura 11.15**).

Evidentemente, la dirección de la fuerza, ejercida por la persona, no coincide con la dirección del movimiento. Para calcular el trabajo en esta situación, es necesario descomponer la fuerza aplicada en dos componentes, una horizontal y una vertical (**Figura 11.16**).

La componente horizontal tiene la magnitud:

$$F_h = F \cdot \cos\alpha$$

Como la caja se mueve en la dirección horizontal, la dirección de la componente horizontal de la fuerza sí coincide con la dirección del movimiento. Por ello, si la caja se movió una distancia d, el trabajo realizado es:

$$T = F_h \cdot d = F \cdot \cos\alpha \cdot d = F \cdot d \cdot \cos\alpha$$

Figura 11.15. Empujando una caja por el suelo.

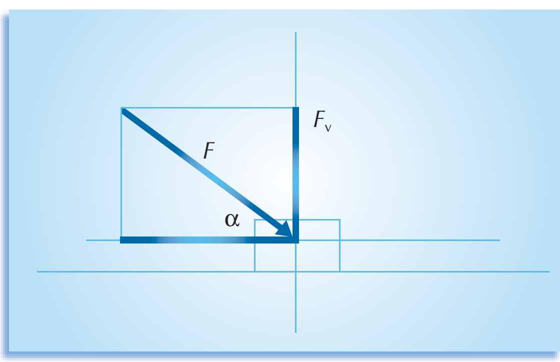


Figura 11.16. Las componentes de la fuerza aplicada.

Problema resuelto

Trabajo realizado al empujar un carrito de compras

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Al empujar un carrito de compras (**Figura 11.17**) en el supermercado, una mujer recorrió una distancia $d = 50$ m.

La intensidad de la fuerza que ejercía sobre el carrito era $F = 35$ N. La dirección de la fuerza formaba un ángulo $\alpha = 25°$ con la dirección horizontal. ¿Qué trabajo realizó la mujer?

Solución: El trabajo realizado por la mujer es:

$$T = F \bullet d \bullet \cos\alpha = 35 \text{ N} \bullet 50 \text{ m} \bullet \cos 25° = 1{,}750 \text{ Nm} \bullet 0.9063 = 1{,}586 \text{ J}$$

Dar sentido al resultado: El trabajo realizado es menor que el trabajo que hubiera realizado la mujer si la dirección de la fuerza de empuje fuera horizontal.

Figura 11.17. Empujar un carrito de compras.

Problema por resolver

Trabajo realizado al empujar un automóvil

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un conductor tuvo que empujar su auto cuando éste dejó de funcionar (**Figura 11.18**).

Aplicó una fuerza de 150 N, cuya dirección formaba un ángulo de 20° con la horizontal. Si el vehículo empujado recorrió una distancia de 20 m, ¿cuál fue el trabajo mecánico realizado por el conductor?

Razonamiento proporcional: Si la distancia recorrida por el automóvil fuera de 40 m, ¿cuál será el trabajo realizado por el conductor?

Figura 11.18. Un conductor empuja su coche.

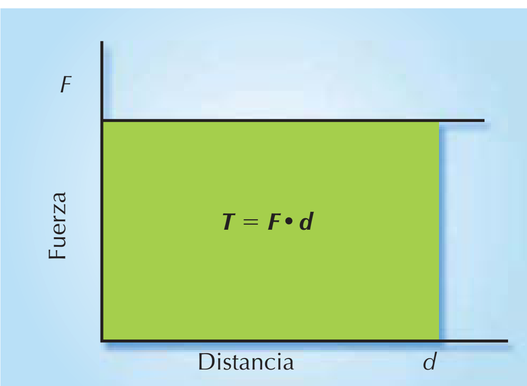


Figura 11.19. El trabajo representado por el área.

El trabajo cuando la fuerza cambia su intensidad

El trabajo de una fuerza constante está representado en el plano fuerza-distancia (F-d) como el área de un rectángulo (**Figura 11.19**).

Cuando la intensidad de la fuerza no es constante, el trabajo se puede encontrar con el mismo procedimiento que utilizamos para encontrar la distancia recorrida en la situación en que la velocidad no era constante.

Supongamos el caso más sencillo, que sucede cuando la fuerza F es proporcional a la distancia d que recorre el cuerpo:

$$F = kd$$

donde k es la constante de proporcionalidad.

Este caso lo tenemos, por ejemplo, cuando tratamos de alejar una esfera de una pared a la que está atada con un resorte horizontal (**Figura 11.20**).

Cuanto más se estire el resorte, al alejar la esfera de la pared, más grande será la fuerza elástica del resorte que pretende regresarla a su posición inicial. Como la fuerza del resorte es proporcional al aumento de su longitud, la fuerza con la cual se aleja la esfera, y se estira el resorte, también tiene que ser proporcional a la distancia con respecto a la posición inicial de la esfera. La constante de proporcionalidad k entre la fuerza F y la elongación d se llama *constante del resorte*.

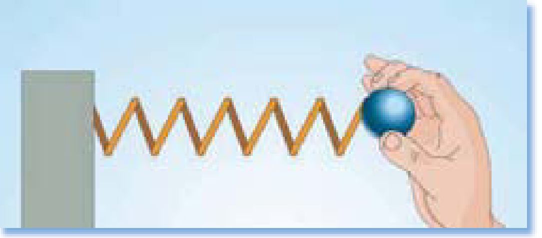


Figura 11.20. Para alejar la esfera y estirar el resorte la fuerza tiene que aumentar su intensidad.

Problema resuelto

Alargar un resorte

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Una fuerza $F_1 = 5.6$ N es necesaria para alargar un resorte una distancia $d_1 = 2.8$ cm. ¿Qué fuerza F_2 se necesita para alargar el mismo resorte una distancia $d_2 = 3.2$ cm?

Solución: Como la fuerza del resorte es proporcional al aumento de su longitud, tenemos:

$$F_1 = kd_1$$

donde k es la constante del resorte.

Para el resorte en cuestión, dicha constante tiene el valor:

$$k = \frac{F_1}{d_1} = \frac{5.6\text{ N}}{0.028\text{ m}} = 200\frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Conociendo el valor de la constante de proporcionalidad, calculamos el valor de la fuerza para el segundo aumento de la longitud del resorte:

$$F_2 = kd_2 = 200\frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 0.032\text{ m} = 6.4\text{ N}$$

Dar sentido al resultado: El aumento de la fuerza del resorte es proporcional al aumento de la longitud del resorte. Al incrementarse la longitud del resorte una séptima parte (0.4 cm es 2.8 cm/7), la fuerza también aumenta una séptima parte (0.8 N es 5.6 N/7).

Problema por resolver

Un balón de básquetbol visto como resorte

Competencias a practicar: Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Un balón de básquetbol (**Figura 11.21**), inflado de forma adecuada, no debe comprimirse más de 13 mm bajo una fuerza externa de 650 N.

Si se modelara este balón como un resorte, ¿cuál sería su constante de resorte?

¿Qué fuerza externa sería necesaria para comprimir 4 mm el balón de básquetbol?

Figura 11.21. Un balón de básquetbol.

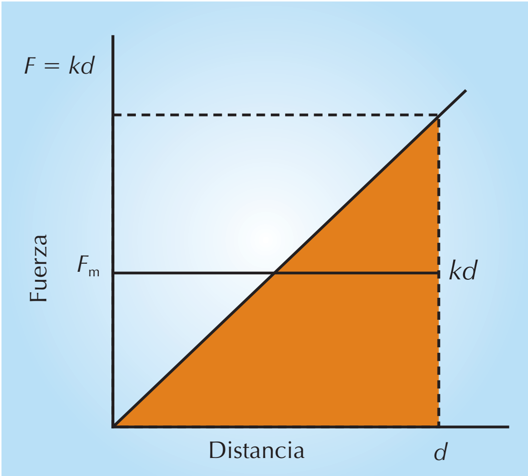


Figura 11.22. Cambio de la intensidad de la fuerza con la distancia.

Representemos gráficamente cómo cambia la intensidad de la fuerza de estiramiento con la distancia (**Figura 11.22**).

Hemos visto que la superficie sombreada representa el trabajo mecánico. Como se observa en la **Figura 11.22**, el trabajo se puede escribir como el producto de la fuerza media $F_m = kd/2$ y la elongación d.

El trabajo es:

$$T = F_m \cdot d = \left(\frac{kd}{2}\right) \cdot d = \frac{1}{2}kd^2$$

Ya mencionamos que, para el caso del resorte, el coeficiente de proporcionalidad entre la fuerza elástica generada por el estiramiento (o la compresión) y la deformación se llama constante del resorte. También se conoce con el nombre de *coeficiente de restitución*, pues el resorte siempre se opone a su deformación y trata de "restituir" su forma original.

Problema resuelto

Cambio de longitud de un resorte y el trabajo realizado

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un resorte de constante $k = 19.6$ N/m está colgado verticalmente.

1. ¿Cuánto va a aumentar la longitud del resorte al atar a su extremo inferior una pesa de 0.5 kg?
2. ¿Qué trabajo se realiza al estirar el resorte?

Solución:

1. Despejando la elongación del resorte d de la fórmula $F = kd$, se obtiene:

$$d = \frac{F}{k} = \frac{mg}{k}$$

Donde m es la masa de la pesa.
Insertando los valores de las cantidades, se obtiene:

$$d = \frac{0.5\,\text{kg} \cdot 9.8\,\frac{\text{N}}{\text{kg}}}{19.6\,\frac{\text{N}}{\text{m}}} = 0.25\,\text{m}$$

2. El trabajo realizado por la pesa es:

$$T = \frac{1}{2}kd^2 = 0.5 \cdot 19.6\,\frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0.25\,\text{m})^2 = 9.8\,\frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 0.063\,\text{m}^2 = 0.62\,\text{J}$$

Dar sentido al resultado: Si la fuerza del resorte fuera igual a 4.9 N para cada posición de la pesa, el trabajo realizado será

$$F = 4.9\text{ N} \cdot 0.25\text{ m} = 1.23\text{ J}$$

Pero, como la fuerza del resorte aumenta durante la elongación desde 0 N hasta 4.9 N, el trabajo realizado debe ser menor que 1.23 J.

Problema por resolver

Trabajo al estirar un resorte

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un resorte, cuya constante de restitución es k = 300 N/m, se estira una longitud d = 0.1 m. ¿Qué tan grande será el trabajo realizado?

Razonamiento proporcional: ¿Si el resorte se hubiera estirado 0.2 m, ¿cuál sería el trabajo realizado?

11.2. Potencia mecánica

¿Son realmente iguales los trabajos iguales?

Dos carteros, Juan y Antonio, tienen la misma masa (m = 70 kg). Al subir al quinto piso (d = 12 m) ambos realizan el mismo trabajo:

$$T = mgd = 70\,\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 12\,\text{m} = 8,400\ \text{J}$$

Pero Juan es un cartero joven, recién ingresado en la oficina de correos; es alegre y está lleno de energía. Para subir al quinto piso emplea un tiempo t_1 = 40 s (**Figura 11.23**).

A diferencia de Juan, Antonio es un cartero entrado en años, que ya piensa en su jubilación, quien toma todo con mucha calma y al subir las escaleras tarda t_2 = 120 s (**Figura 11.24**).

La diferencia entre el desempeño de Juan y el de Antonio es grande, pero el concepto de trabajo no la refleja para nada. Evidentemente, se necesita un concepto nuevo para superar la limitación del concepto de trabajo que no contiene en sí mismo el tiempo que se emplea para su realización. ¿De qué manera combinar el trabajo y el tiempo empleado en su realización, para expresar la notoria diferencia entre el desempeño de Juan y el de Antonio?

Figura 11.23. El cartero sube de prisa las escaleras.

Figura 11.24. Subir escaleras con calma.

La definición y la fórmula de la potencia

Un concepto que sí revelará la diferencia entre Juan y Antonio es la potencia, que expresa la rapidez para realizar el trabajo.

Definición

La **potencia** es igual al trabajo realizado en la unidad de tiempo.

Si el trabajo T se realiza en el tiempo t, el trabajo realizado en la unidad de tiempo (en un segundo) se obtiene al dividir el trabajo T entre el tiempo t. Por ello, la potencia P es igual al cociente entre el trabajo realizado y el tiempo transcurrido.

Simbólicamente, la definición de la potencia se representa con la fórmula para la potencia:

$$P = \frac{T}{t}$$

¿Cuál es la potencia P_1 que desarrolló Juan?

$$P_1 = \frac{T}{t_1} = \frac{8,400 \text{ J}}{40 \text{ s}} = 210 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Entonces, la potencia de Antonio es de 70 J/s. Como Juan realiza el mismo trabajo en un tiempo que es 3 veces mayor, su potencia es 3 veces más grande.

La unidad de potencia

La unidad de potencia en el sistema internacional de unidades se deriva partiendo de las unidades para el trabajo y el tiempo:

$$[P] = \left[\frac{T}{t}\right] = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 1\frac{\text{J}}{\text{s}}$$

La unidad 1 J/s tiene el nombre *watt* y el símbolo "W", es decir, 1 W = 1 J/s. Se le dio este nombre en honor al constructor inglés James Watt (1736-1819), quien contribuyó considerablemente al desarrollo de la máquina de vapor.

El detalle que importa

"Watt" no es "watt"

Watt es el apellido del científico y el watt es la unidad de potencia en el sistema internacional de unidades.

Otras unidades de potencia y su relación con el watt

En algunos casos, el watt es una unidad muy pequeña y algunas unidades más grandes resultan más prácticas. Éstas son el *kilowatt* (1 kW), que es mil veces mayor; y el *megawatt* (1 MW), que es un millón de veces mayor.

Una antigua unidad de potencia, que todavía se encuentra en la vida real, es "el caballo de vapor" (CV) o "el caballo de fuerza". Un caballo de vapor equivale a 746 watts, es decir,

$$1 \text{ CV} = 746 \text{ W}$$

Ésta es la potencia media que puede desarrollar un caballo.

Física en la vida cotidiana

El caballo de fuerza

Competencias a practicar: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana; realizar un experimento pertinente.

Si quieres sentir, más o menos, qué significa una potencia de un caballo de fuerza, toma una bolsa con 8 envases de leche llenos y levántala desde el suelo hasta una altura de dos metros tan rápidamente como puedas. Así quizás habrás desarrollado una potencia muy cercana a la de un caballo de vapor.

Entre muchas otras cuestiones, la diferencia entre los seres humanos y los caballos es que los humanos pueden desarrollar potencias de ese tamaño (e incluso más grandes) solamente durante espacios de tiempo cortos; mientras que los caballos pueden mantener esa potencia durante varias horas.

Una situación donde los humanos desarrollan potencias considerables es la del levantamiento de pesas.

Problema resuelto

La potencia en un levantamiento de pesas que valió el oro

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

La levantadora de pesas china Chen Xiexia ganó la medalla de oro en los Juegos Olímpicos de Beijing (2008) en la categoría femenil de 48 kilogramos, levantando un total de 212 kilos. Ese resultado fue, además, un nuevo récord olímpico.

Como se observa en http://www.youtube.com/watch?v=X6fGA0LRUNU (**Figura 11.25**), las pesas que Chen Xiexia levantó en el envión pesaron un total de 117 kg.

Si levantó las pesas hasta una altura de 1.30 metros en 0.8 segundos, ¿cuál fue la potencia de Chen?

Solución: Estrictamente hablando, la levantadora de pesas debe ejercer una fuerza *F* que sea mayor que el peso de las pesas. Sin embargo, con el fin de estimar el valor de la potencia, se puede suponer que la fuerza *F* de la levantadora es igual al peso de las pesas:

Figura 11.25. El primer tiempo de Chen Xiexia.

$$F = W = mg = 117\ \text{kg} \cdot 9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 1{,}147\ \text{N}$$

La potencia de Chen Xiexia fue:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{F \cdot d}{t} = \frac{1{,}147\ \text{N} \cdot 1.3\ \text{m}}{0.8\text{s}} = = \frac{1{,}491}{0.8} = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1{,}864\ \text{W}$$

Dar sentido al resultado: Esa potencia es casi 2.5 veces mayor que la potencia de un caballo de vapor.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Si Chen Xiexia hubiera levantado las pesas en 1.6 segundos, ¿cuál hubiera sido su potencia?

Problema resuelto

La máxima fuerza de resistencia

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El motor del Nissan Altima GLE (**Figura 11.26**) es capaz de desarrollar una potencia máxima de 116 kW.

¿Qué tan grande es la resistencia total del suelo y del aire, cuando el automóvil se mueve a su velocidad máxima de 190 km/h (52.8 m/s)?

Solución: Según la primera ley de Newton, si el auto se mueve a una velocidad constante *v*, la intensidad de la fuerza entre el suelo y las ruedas *F*, que mueve al vehículo, es igual a la intensidad de la fuerza de resistencia.

Si bajo la acción de la fuerza *F* el automóvil recorre en el tiempo *t* la distancia $d = v \cdot t$, el trabajo hecho es:

$$T = F \cdot d = F \cdot v \cdot t$$

Figura 11.26. Nissan Altima GLE.

La potencia del auto es:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{F \cdot v \cdot t}{t} = F \cdot v$$

Despejando F de la última ecuación,

$$F = \frac{P}{v} = \frac{116 \cdot 10^3\ W}{52.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.197 \cdot 10^3\ \text{N} = 2{,}197\ \text{N}$$

Dar sentido al resultado: Esta fuerza de resistencia es muy grande y representa el 16% del peso del automóvil (aproximadamente, una sexta parte).

Problema por resolver

La potencia de las cataratas del Niágara

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

En las cataratas del Niágara (**Figura 11.27**), el agua cae desde una altura de 50 m. La masa de agua que cae en un segundo es de 20,000 toneladas.

1. ¿Qué tan grande es el trabajo que realiza la fuerza gravitacional sobre el agua que cae?
2. ¿Qué tan grande es la potencia desarrollada?

Figura 11.27. Las cataratas del Niágara.

Problema por resolver

¿Cuántos caballos de vapor desarrolla un caballo de carne y hueso?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un caballo al arar (**Figura 11.28**) puede desarrollar durante un tiempo largo la potencia P = 500 W. ¿Cuántos caballos de vapor es esto?

Figura 11.28 Los caballos al arar.

Los valores de la potencia para diversas actividades humanas están dados en la **Tabla 11.1**. En la **Tabla 11.2** se presentan los valores de potencia que desarrollan algunas máquinas.

Tabla 11.1. Las potencias en algunas actividades humanas.

Actividad	Potencia
Pasear lentamente	20 W
Caminata rápida	40 W
Subir montañas (4 horas)	100 W
Bailar (40 minutos)	120 W
Montar una bicicleta (2 horas)	130 W
Esfuerzo en un gimnasio (2 minutos)	300 W
Subir escaleras corriendo (10 s)	500 W
Salto de altura (0.1 s)	1,200 W

Tabla 11.2. Las potencias de algunas máquinas.

Máquina	Potencia
Motor de juguete	12 W
Mofa	1,000 W
Coche (clase media)	50 kW
Tráiler de carga	230 kW
Locomotora de tren rápido	5 MW
Avión de pasajeros	30 MW
Cañón al disparar	16 GW
Cohete lunar	70 GW

Física en la vida cotidiana

Potencia máxima en el levantamiento de pesas o al subir escaleras

Propósito: Sentir, estimar y comparar las potencias del propio cuerpo en dos actividades físicas diferentes.

Competencias a practicar: Explicitar un concepto de física en una situación cotidiana; realizar experimentos pertinentes; aprender en equipo.

Material: Pesas, cinta métrica, cronómetro.

La potencia en el levantamiento de pesas: Consigue unas pesas como las que se usan en el físico-culturismo. Entérate de su masa y determina su peso. Para hacerlo, multiplica la masa por el factor de peso, que es aproximadamente de 10 N/kg. Por ejemplo, una pesa cuya masa sea de 10 kg, tiene un peso de aproximadamente 100 N. Pide a tu compañera o compañero de equipo que maneje el cronómetro.

Tan rápidamente como puedas, levanta las pesas desde el suelo hasta una altura máxima y bájalas. Repite el levantamiento y descenso diez veces, mientras tu acompañante mide cuánto tiempo tardas en hacerlo.

Determina la altura máxima hasta la cual has levantado las pesas. Calcula el trabajo realizado expresado en joules y divídelo entre el tiempo transcurrido expresado en segundos. El resultado es aproximadamente tu potencia en watts. Intercambia los roles con tu compañero(a).

Potencia al subir escaleras: Otra manera de estimar tu potencia es medir el tiempo que tardas en subir las escaleras hasta una altura conocida. Multiplica tu peso, expresado en newtons, por la altura, expresada en metros, y divide el resultado entre el tiempo de subida expresado en segundos. El resultado es aproximadamente igual a tu potencia en vatios.

¿Hay una diferencia considerable entre los valores de tu potencia obtenidos mediante estos dos métodos diferentes?

Física y la historia

Estimar el trabajo efectuado en la construcción de la Gran Pirámide

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; conocer la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad en un momento histórico.

La Gran Pirámide de Keops (**Figura 11.29**) era una de las siete maravillas de la Antigüedad y todavía, después de 4,000 años, atrae como un imán a los turistas provenientes de todo el mundo.

La pirámide tiene una altura de 146 metros y los lados de su base cuadrada miden 230 m. Está formada por 2,500,000 bloques que, en promedio, tienen una masa de 2.5 toneladas cada uno. Según relatos de antiguos historiadores la construcción de la pirámide duró 20 años con la participación de 100,000 esclavos.

Figura 11.29. La Gran Pirámide de Keops.

Usando datos sobre la potencia humana, es posible estimar la cantidad de trabajo realizado por esos esclavos. En los trabajos prolongados la potencia humana es de unos 50 W. Con tal potencia, en cada segundo se realiza un trabajo de 50 J, lo que en una hora da $T_{\text{hora}} = 3{,}600 \cdot 50 = 180{,}000 \text{ J} = 1.8 \cdot 10^5 \text{ J}$.

Suponiendo una "jornada de esclavos" de 12 horas, el trabajo realizado por un esclavo durante un día es $T_{\text{día}} = 12 \cdot 1.8 \cdot 10^5 \text{ J} = 2.16 \cdot 10^6 \text{ J}$ (aproximadamente, 2 millones de joules). El trabajo hecho por un esclavo durante un año (aproximadamente, 300 jornadas laborales) sería de 600 millones de joules ($6 \cdot 10^8$ J).

Durante 20 años los 100,000 de esclavos realizan un trabajo 2,000,000 de veces más grande. Entonces, el trabajo estimado es de $2 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^8 \text{ J} = 12 \cdot 10^{14} \text{ J} = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ J}$ (aproximadamente, mil billones de joules).

Para que puedas apreciar el tamaño de este enorme trabajo, estimaremos el trabajo necesario para levantar todos los bloques de la pirámide hasta una altura igual a la que tiene la pirámide (aproximadamente 150 m). Para levantar un bloque de 2.5 toneladas (el peso es de 25,000 newtons) hasta esa altura se tiene que realizar el trabajo $T_1 = 25{,}000 \text{ N} \bullet 150 \text{ m} = 3{,}750{,}000 \text{ J}$ (casi 4 millones de joules). El trabajo mínimo para levantar todos los bloques hasta esa altura sería $T = 2{,}500{,}000;\ T_1 = 2{,}500{,}000 \bullet 3{,}750{,}000 \text{ J} = 9.4 \bullet 10^{12} \text{ J}$ o casi 10^{13} J (diez billones de joules).

Entonces, el trabajo estimado de los esclavos es como 100 veces mayor, es decir, equivale al trabajo que se realizaría al levantar 100 veces cada bloque hasta la altura de la pirámide. Tomando en cuenta el corte de los bloques a partir de la piedra maciza y su transporte hasta el lugar de construcción de la pirámide, en el cual se gastó mucho trabajo "en vano" para vencer la fuerza de fricción, el uso de tanta fuerza humana durante tanto tiempo fue más una condición necesaria para realizar esa obra impresionante que un capricho del faraón.

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. Dependiendo de la situación, en el habla cotidiana la palabra "trabajo" puede significar "empleo", "tarea", "obra" o "esfuerzo".

Analiza cuidadosamente las siguientes caricaturas (**Figuras 11.30a, 11.30b, 11.30c, 11.30d**). Para cada situación, determina cuál de las palabras antes mencionadas expresa mejor el significado situacional de la palabra "trabajo".

Figura 11.30a. Cargando cosas.

a) La palabra "trabajo" en la situación de la **Figura 11.30a** significa ______________________.

Figura 11.30b. Haciendo cosas.

b) La palabra "trabajo" en la situación de la **Figura 11.30b** significa ______________________.

Figura 11.30c. Haciendo cosas.

c) La palabra "trabajo" en la situación de la **Figura 11.30c** significa ______________________.

Figura 11.30d. Creando cosas.

d) La palabra "trabajo" en la situación de la **Figura 11.30d** significa ______________________.

2. ¿Cómo se define en física el concepto de *trabajo*?

3. ¿Cómo se define en física el concepto de *potencia*?

4. ¿Es cierto que cada objeto que se mueve realiza un trabajo mecánico?

5. Dos jóvenes han realizado igual trabajo físico. ¿Cómo se podría explicar que uno de ellos se sienta más cansado que el otro?

Pensamiento crítico

6. Un joven empujó por el suelo una caja de peso $P = 100$ N.

La caja recorrió una distancia d = 10 m. Cuando su madre le preguntó cuánto trabajo había hecho, él respondió: "El trabajo es fuerza por distancia. La fuerza es el peso P = 100 N y la distancia es d = 10 m. Por ello, he hecho un trabajo igual a 1,000 J".

La madre le dijo que había cometido un error conceptual al plantear el cálculo.

¿Puedes encontrar el error al que se refiere la madre del joven? ¿Es el trabajo hecho por el joven mayor o menor que 1,000 J? Justifica tu selección. ¿En qué caso especial el trabajo sí sería igual a 1,000 J?

7. ¿Por qué en el movimiento circular uniforme la fuerza centrípeta no realiza ningún trabajo?

Aplicar modelos matemáticos

8. Un lanzador de disco (**Figura 11.31**) realiza durante el lanzamiento un trabajo de 600 J.

Si la fuerza del lanzador sobre el disco es de 1,000 N, ¿cuál es la distancia que recorrió el disco en la dirección de la fuerza?

Figura 11.31. El lanzamiento del disco.

9. En un video disponible en YouTube (http://www.youtube.com/watch?v=gOA5RbAQWA8) puedes observar cómo el atleta iraní Hossein Rezazadah, llamado "el hombre más fuerte del mundo", logró el récord mundial (**Figura 11.32**) en los Juegos Olímpicos de verano de 2004 (Atenas).

Figura 11.32. El triunfo de Hossein Rezazadah en Atenas.

Rezazadah levantó las pesas en dos tiempos. El peso total era de 263.5 kg. Si las pesas fueron levantadas hasta una altura de 2.10 m, ¿cuál fue el trabajo realizado por Rezazadah?

10. Al sacar del pozo una cubeta de agua de 20 kg, un hombre realiza un trabajo de 6,000 joules. Si la cubeta se sacó a rapidez constante, ¿qué tan profundo es el pozo?

11. Una persona realiza un trabajo de 50 J al mover una caja de 30 kg a lo largo de 10 m sobre una superficie horizontal. La caja se movía a una rapidez constante.

a) ¿Qué tan grande es la fuerza que ejercía la persona sobre la caja?

b) ¿Cuál es el coeficiente de fricción cinética entre la caja y la superficie?

12. Una resortera (**Figura 11.33**) es un arma de "producción casera" que sirve para lanzar proyectiles. Dependiendo de las zonas geográficas, también se le conoce como hondera, gomera, tiradora o tirachinas.

La resortera consiste en un marco de madera con forma de "Y" con dos tiras de goma atadas a las puntas superiores. Las tiras están unidas por sus otros extremos mediante un pedazo de plástico o tela donde se coloca el proyectil.

Para alargar 1 cm las tiras de goma de una resortera se necesita una fuerza externa de 30 N.

a) ¿Qué tan grande es la constante de recuperación (o de reconstitución) de la resortera?

b) ¿Qué tan grande es la constante de recuperación de cada tira de goma?

c) ¿Qué fuerza externe debería aplicarse a las tiras de la resortera para alargarlas 4 cm?

Figura 11.33. Una resortera.

13. Las moléculas de ADN (**Figura 11.34**) tienen propiedades elásticas fascinantes, similares a las de los resortes muy finos.

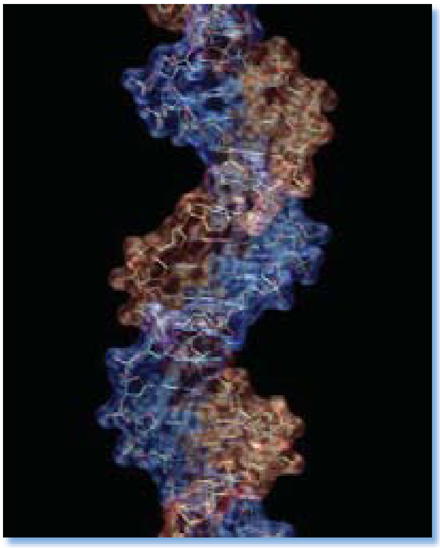


Figura 11.34. Una molécula de ADN.

Algunas pueden recuperar su longitud original a pesar de haber sido deformadas (por estiramiento o compresión) hasta un 50%.

Se fija un extremo de una molécula de ADN y sobre el otro se aplica una fuerza de 1.5 nN. Esto hace que la molécula se alargue 5.0 nm.

a) ¿Cuál es la constante de resorte de la molécula?

b) ¿Qué fuerza alargaría 1 nm esa molécula?

14. Al sentarse en su automóvil, un conductor, cuya masa es de 80 kg, comprime 0.02 m los resortes de suspensión de las ruedas. Modela el sistema de suspensión del auto como si estuviera hecho de un solo resorte.

a) De cuánto es la constante de recuperación de ese resorte?

b) ¿Cuánto bajaría el vehículo si, además del conductor, entraran 3 pasajeros más con masa total igual a 160 kg?

15. Un alpinista cuya masa es $m = 80$ kg sube en $t = 2$ horas una distancia $d = 1{,}200$ m.

a) ¿Qué trabajo realizó?

b) ¿Qué tan grande fue su potencia?

16. Una bomba, cuya potencia es $P = 4$ kW, debe hacer subir 1,000 litros de agua hasta una altura $d = 5$ m. ¿Cuánto tiempo tardará?

17. Una bomba "saca" de un pozo 1.2 m^3 de agua cada minuto. El pozo tiene una profundidad de 5 m.

a) ¿Qué trabajo tiene que realizar la bomba?

b) ¿Qué potencia desarrolla?

Para g, toma 10 N/kg.

18. La potencia del hombre, cuando hace esfuerzos prolongados, es de alrededor de 75 W. ¿En qué tiempo subiría un hombre, cuyo peso es de 750 N, una torre de altura $d = 60$ m.

19. Dos trabajadores de una bodega de libros levantan los libros desde el suelo hasta una mesa en donde se empacarán en cajas. La mesa tiene una altura de 1.5 metros. El primer trabajador levantó 10 libros en 12 segundos, cada uno de 1 kg de masa. El segundo trabajador levantó 10 libros de 2.5 kg en 16 segundos. Calcula el trabajo y la potencia de cada trabajador.

20. Un automóvil tiene una potencia de 122 CV. ¿Qué tan grande es su potencia en kilowatts?

21. Se jala un carrito con una fuerza F y el carrito recorre, en la dirección y sentido de la fuerza, la distancia d. El trabajo realizado es de 4 joules. Si jalas el carrito con la mitad de la fuerza ($F/2$) pero el carrito recorre el doble de la distancia ($2\ d$), el trabajo realizado será:

a) 8 joules

b) 6 joules

c) 4 joules

d) 2 joules

Para verificar tu predicción, vuelve a escribir el enunciado usando los valores $F = 2$ N y $d = 2$ m, y calcula los trabajos buscados.

Energía mecánica

El concepto de energía es un concepto que está presente en todas las ramas de la física; aunque no siempre fue así. La física tuvo un gran desarrollo sin el concepto de energía. ¿Cuándo entró el concepto *energía* en la física? Entró cuando se comenzaron estudiar problemas en los cuales no era posible usar los conceptos de la mecánica newtoniana. Era difícil analizar, por ejemplo, el funcionamiento de un motor térmico sólo en términos del movimiento de las piezas. El proceso determinante, la combustión del combustible, no se prestaba a ese tipo de análisis. Fue necesario desarrollar un enfoque complementario y éste fue el enfoque energético.

Pero, ¿a qué se debe la importancia que tiene la energía? Se debe a una propiedad asombrosa: la energía total se conserva. Pueden ocurrir cambios de todo tipo en los cuerpos, pero siempre hay una cantidad física cuya magnitud es constante. ¡Esta cantidad es la energía!

Comenzamos el estudio de la energía con sus formas más sencillas: la energía cinética y la energía potencial.

Propósitos del tema 12

- Conocer los conceptos de energía cinética, energía potencial y energía mecánica, y aplicarlos en situaciones cotidianas.
- Conocer la ley de conservación de la energía mecánica, tanto en su sentido como en sus límites, y aplicarla en situaciones cotidianas.

12.1. Energía cinética

Es normal tratar de ver qué es lo que cambia en un cuerpo como resultado del trabajo que se realiza sobre él. Podemos fijarnos primero en el cambio de la velocidad. Partiremos de los modelos matemáticos que describen un caso sencillísimo: Bajo la acción de una fuerza neta constante F, un cuerpo recorrió una distancia d en la dirección de la fuerza.

La pregunta voladora

¿Puedes proponer un movimiento de tu entorno cotidiano que se realice debido a una fuerza neta constante?

El trabajo realizado es:

$$T = F \cdot d$$

Según la segunda ley de Newton, la fórmula para la fuerza es $F = ma$, donde m es la masa del cuerpo y a es su aceleración. Insertando esta expresión en la fórmula para el trabajo, se obtiene:

$$T = mad$$

Si la fuerza es constante, también la aceleración es constante y el movimiento del cuerpo, a lo largo del espacio de tiempo durante el que se realiza el trabajo, es un movimiento uniformemente acelerado. En ese caso, la distancia recorrida es:

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

donde t es el intervalo durante el cual se realiza el trabajo.

Insertando esta expresión para la distancia en la expresión para el trabajo, se obtiene:

$$T = mad = ma\left(\frac{1}{2}at^2\right) = \frac{1}{2}m\left(a^2t^2\right) = \frac{1}{2}m\left(at\right)^2$$

El producto $(a \cdot t)$ de la aceleración constante y el tiempo transcurrido es igual a la velocidad v ($at = v$) que alcanza el cuerpo en el movimiento uniformemente acelerado, si su velocidad inicial era cero. Por ello,

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

Vemos que el trabajo realizado se expresa a través de una nueva cantidad igual a un medio del producto de la masa y el cuadrado de la velocidad del cuerpo sobre el que se realizó el trabajo. Esta cantidad se llama **energía cinética** y su fórmula es:

$$E_c = \frac{mv^2}{2}$$

Definición

La **energía cinética** de un cuerpo es igual a la mitad del producto de su masa y del cuadrado de su velocidad.

La unidad de la energía cinética

Como la energía cinética de un cuerpo es el resultado de un trabajo realizado sobre este cuerpo, es lógico esperar que la unidad de energía cinética sea igual a la unidad de trabajo. De tal manera, la unidad para la energía cinética sería, también, 1 joule.

Problema resuelto

La unidad de energía cinética y la unidad de trabajo

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Aunque estemos seguros de que así debe ser, no está de más demostrar que la unidad de energía cinética es igual a la unidad de trabajo. ¿De qué manera sería posible demostrar tal relación?

Solución: Como el número (1/2) no tiene unidad, la unidad de energía cinética es:

$$[E_c] = [m][v^2] = 1\text{kg} \cdot 1\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1\frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} \cdot 1\text{m}$$

Tomando en cuenta que 1 kgm/s^2 es igual a 1 N, la última relación se escribe como:

$$[E_c] = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 1\text{J}$$

Dar sentido al resultado: Si se quiere obtener el valor de la energía cinética expresado en joules, el valor de la masa se debe expresar en kilogramos; y el valor de la velocidad, en metros por segundo.

Problema resuelto

Las energías cinéticas de un halcón peregrino

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

El halcón peregrino (**Figura 12.1**) es el ave más rápida del mundo.

Sus alas tienen un diseño que les permite volar horizontalmente a 160 km/h. Al recoger las alas contra el cuerpo, el halcón es capaz de alcanzar en picada la rapidez récord para las aves: la impresionante rapidez de 320 km/h. Si la masa de un halcón peregrino es de 1 kg,

Figura 12.1. El halcón peregrino.

1. ¿cuál es su energía cinética en el vuelo horizontal?
2. ¿cuál es su energía cinética en la parte final del vuelo en picada?

Solución:

1. Para que la energía cinética se exprese en joules, la rapidez del halcón debe expresarse en metros por segundo. La rapidez en el vuelo horizontal es:

$$v_h = 160\frac{\text{km}}{\text{h}} = 160\frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1\frac{\text{m}}{\text{s}}}{3.6\frac{\text{km}}{\text{h}}} = \frac{160\text{ m}}{3.6\text{ s}} = 44.4\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La energía cinética del halcón en el vuelo horizontal es:

$$E_{ch} = \frac{1}{2}mv_h^2 = 0.5 \cdot 1\text{kg} \cdot \left(44.4\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 986\text{ J}$$

2. La rapidez alcanzada en la parte final del vuelo en picada es dos veces mayor que la rapidez en el vuelo horizontal. Por ello, la rapidez en picada es v_p = 88.8 m/s. La energía cinética que corresponde a esa rapidez del halcón es:

$$E_{cp} = \frac{1}{2}mv_p^2 = 0.5 \cdot 1\text{kg} \cdot \left(88.8\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3{,}943\text{ J}$$

Dar sentido al resultado: Como la rapidez en picada es **dos veces mayor** que la rapidez en el vuelo horizontal, la energía cinética correspondiente es cuatro veces mayor que la energía cinética en el vuelo horizontal.

¿Cómo cambia la energía cinética con el cambio de la velocidad?

Según la definición, la energía cinética de un cuerpo en movimiento es directamente proporcional a la masa del cuerpo y al cuadrado de su velocidad.

En la mayoría de los casos, la masa del cuerpo se mantiene constante y el cambio de la energía cinética se debe solamente al cambio de la velocidad. A un aumento de la velocidad le corresponde un aumento de la energía cinética; y a una disminución de la velocidad, una disminución de la energía cinética.

Si la velocidad aumenta tres veces, ¿cuántas veces aumentará la energía cinética?

Como la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad, y el cuadrado de 3 es 9, entonces, la nueva energía cinética será nueve veces mayor.

La pregunta voladora

Si la velocidad disminuye dos veces, ¿cuántas veces disminuirá la energía cinética?

Problema resuelto

Energía cinética de una pelota de béisbol

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un jugador de béisbol lanza la pelota dándole una velocidad de 110 km/h (**Figura 12.2**). Si la masa de la pelota es de 170 g, ¿cuál será su energía cinética?

Solución: La energía cinética de la pelota es:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Figura 12.2. Lanzamiento de la pelota en un juego de béisbol.

Para que la energía quede expresada en joules, la masa debe expresarse en kilogramos y la velocidad en "metros por segundo". Como 170 g es 0.17 kg y 110 km/h es aproximadamente 31 m/s, la energía cinética de la pelota es:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 0.17\,\text{kg} \cdot \left(31\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 0.085\,\text{kg} \cdot 961\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 81.7\ \text{J}$$

Dar sentido al resultado: Debido a la pequeña masa de la pelota, la energía cinética no alcanza ni 100 joules.

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

a) Si la velocidad, milagrosamente, fuera de 62 m/s, ¿cuál sería aproximadamente la energía cinética de la pelota?
b) Si la velocidad fuera de 15.5 m/s, ¿cuál sería aproximadamente la energía cinética de la pelota?

Problema por resolver

Energía cinética de una Suburban

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

La masa de la Chevrolet Suburban LT (**Figura 12.3**) es aproximadamente de 3 toneladas (m = 3,000 kg).

1. ¿Qué tan grande es su energía cinética cuando viaja a una velocidad v = 25 m/s?
2. ¿Cuántas veces aumenta su energía cinética cuando el conductor hace alcanzar a la Suburban la velocidad máxima que es de 180 km/h (50 m/s)?

Figura 12.3. Chevrolet Suburban LT.

Despejar cantidades en la fórmula para la energía cinética

La energía cinética de un cuerpo está determinada por la masa y la rapidez del cuerpo. En otras palabras, conociendo la masa y la rapidez de un cuerpo, se puede calcular la energía cinética. De igual manera, si se conocen la energía cinética de un cuerpo y su rapidez, es posible calcular la masa. Para eso, hay que despejar la masa de la fórmula para la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Multiplicando ambos lados por 2 e intercambiando los lados, se obtiene:

$$mv^2 = 2E_c$$

Dividiendo ambos lados entre v^2, se obtiene la expresión para la masa:

$$m = \frac{2E_c}{v^2}$$

Para que masa quede en kilogramos, la energía cinética debe expresarse en joules; y la rapidez, en metros por segundo.

Problema resuelto

La masa de una avestruz

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 12.4. Una avestruz.

El avestruz (**Figura 12.4**) es la más veloz de las aves corredoras.

El avestruz es capaz de alcanzar una rapidez de 20 m/s y mantenerla corriendo grandes distancias. Si a esa rapidez la energía cinética de una avestruz es de 26,000 J, ¿qué tan grande será su masa?

Solución: La masa del avestruz es:

$$m = \frac{2E_c}{v^2} = \frac{2 \cdot 26{,}000\ \text{J}}{\left(20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = \frac{52{,}000\ \text{J}}{400\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 130\ \text{kg}$$

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Sin usar la fórmula de la energía cinética, responde la siguiente pregunta: Si la masa del avestruz fuera dos veces menor, es decir, de 65 kilogramos, ¿cuál sería su energía cinética?

Verifica tu predicción, insertando $m = 65$ kg y $v = 20$ m/s en la fórmula de la energía cinética.

A veces se conoce la masa del cuerpo y la energía cinética que tiene y se quiere saber a qué rapidez se mueve. Para encontrar la rapidez, hay que despejarla de la fórmula de la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Multiplicando ambos lados por 2 e intercambiando los lados, se obtiene:

$$mv^2 = 2E_c$$

Dividiendo ambos lados entre m, queda:

$$v^2 = \frac{2E_c}{m}$$

Sacando la raíz cuadrada de ambos lados, se tiene la expresión para la rapidez en términos de la energía cinética y la masa:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

Para que la rapidez quede en metros por segundo, la energía cinética debe expresarse en joules, y la masa, en kilogramos.

Problema resuelto

Rapidez de un balón de básquetbol

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 12.5. Lanzamiento de un balón de básquetbol.

Un muchacho está a punto de lanzar un balón de básquetbol (**Figura 12.5**).

Si la masa del balón es de 0.6 kg, ¿a qué rapidez debería lanzarla para que tuviera una energía cinética de 120 J?

Solución: La rapidez del balón debe ser:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 120\ \text{J}}{0.6\ \text{kg}}} = 20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Sin usar la fórmula de la energía cinética, responde la siguiente pregunta: Si la rapidez del balón fuera dos veces menor, es decir, 10 m/s, ¿cuál sería su energía cinética?

Verifica tu predicción, insertando $m = 0.6$ kg y $v = 10$ m/s en la fórmula para la energía cinética.

El teorema de trabajo-energía cinética

Para derivar la fórmula de la energía cinética supusimos que la rapidez inicial del cuerpo era cero. En tal caso, el trabajo realizado sobre el cuerpo fue igual a la energía cinética final del cuerpo.

Esta relación se puede generalizar, formulando lo que se conoce como "el teorema de trabajo-energía cinética".

Teorema de trabajo-energía cinética

El trabajo realizado sobre un cuerpo es igual al cambio de la energía cinética del cuerpo.

Pero, ¿qué es el cambio de la energía cinética? Es la diferencia entre la *energía cinética final* y la *energía cinética inicial*. Eso se expresa simbólicamente como:

$$\Delta E_c = E_{cf} - E_{ci}$$

donde ΔE_c es el cambio de la energía cinética, E_{cf} es la energía cinética final y E_{ci} es la energía cinética inicial. Expresando estas energías cinéticas mediante las rapideces final e inicial, se obtiene:

$$E_c = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

De tal manera, el teorema de trabajo-energía cinética se expresa simbólicamente como:

$$T = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

Si la energía cinética inicial es cero (cuando la velocidad inicial del cuerpo es cero), entonces el trabajo es igual simplemente a la energía cinética final. Pero si el cuerpo tiene una energía cinética inicial, el trabajo realizado es igual al cambio de la energía cinética.

El cambio de la energía cinética puede ser mayor que cero. Esto ocurre cuando el cuerpo gana energía cinética, es decir, cuando su velocidad aumenta. En este caso, la fuerza está actuando en la dirección del movimiento y la velocidad aumenta, de modo que la velocidad final es mayor que la velocidad inicial. En el lanzamiento de una bola de boliche (**Figura 12.6**), la mano hace trabajo sobre la bola dándole energía cinética.

Figura 12.6. En el lanzamiento de una bola de boliche, la energía cinética de la bola es resultado del trabajo realizado por la mano del lanzador.

Problema resuelto

Trabajo sobre el Mazda CX-7

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Figura 12.7. Mazda CX-7.

El automóvil Mazda CX-7 (**Figura 12.7**) cambia su rapidez de $v_i = 20$ m/s a $v_f = 30$ m/s.

Si la masa del auto es $m = 1{,}780$ kg, ¿qué trabajo realizó el pavimento sobre el vehículo?

Solución: Aplicando el teorema de trabajo-energía cinética, se tiene:

$$T = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2) = 0.5 \bullet 1{,}780\text{ kg}\left[\left(30\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(20\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2\right] = 445{,}000$$

Dar sentido al resultado: Este trabajo equivale al trabajo que se realizaría al levantar este coche hasta una altura un poco mayor que 25 metros (altura de un edificio de 8 pisos).

Cuando el cambio de energía cinética es negativo (la energía cinética disminuye y el valor final es menor que el valor inicial), la fuerza actúa en sentido contrario al sentido del movimiento. Un portero que detiene un balón de fútbol (**Figura 12.8**), le quita su energía cinética.

La disminución de la energía cinética de un cuerpo ocurre a menudo por el trabajo de la fuerza de fricción. Un cuerpo que se lanza, para que se mueva deslizándose sobre el suelo, tiene, al principio, una energía cinética inicial pero, después, se detiene. Su energía cinética final será cero. El trabajo de la fuerza de fricción que detuvo al cuerpo es negativo.

Figura 12.8. El portero le quita la energía cinética al balón, al detenerlo.

Física en la vida cotidiana

Distancia de frenado

Competencias ejemplificadas: Desarrollar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

El cambio de energía cinética de un cuerpo es igual al trabajo de la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo. Si el cuerpo disminuye su energía cinética hasta detenerse, el valor absoluto del cambio de la energía cinética es igual a la energía cinética inicial.

El valor absoluto del trabajo de la fuerza de fricción es igual a:

$$T = fd = \mu mgd$$

donde d es la **distancia de frenado**. Por ello, se tiene:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \mu mgd$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación entre μmg e intercambiando los lados, se llega a:

$$d = \frac{v^2}{2\mu g}$$

La distancia de frenado es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad. En las mismas condiciones (el mismo coeficiente de fricción), el automóvil que se mueve a doble velocidad tendrá una distancia de frenado cuatro veces mayor. En el caso de un accidente en carretera, si se conoce la distancia de frenado, es posible deducir a qué velocidad se movía un vehículo antes del accidente.

Para la misma velocidad inicial, el auto con mayor coeficiente de fricción tendrá menor distancia de frenado. Los valores del coeficiente de fricción para diferentes condiciones de carretera están dados en la **Tabla 12.1**.

Tabla 12.1. Coeficiente de fricción para diferentes condiciones de la carretera.

Condiciones en carretera	Coeficiente de fricción
Seca	0.80 a 0.95
Mojada	0.40
Nieve (recién caída)	0.20
Nieve (dura)	0.30
Hielo	0.10

Los valores del coeficiente de fricción de la tabla anterior valen para llantas perfectas que tengan surcos de 8 mm de profundidad. Si las llantas están gastadas, el coeficiente de fricción disminuye y, consecuentemente, la distancia de frenado aumenta. Los factores de reducción y de aumento están dados en la **Tabla 12.2**.

Tabla 12.2. El estado de llantas y el coeficiente de fricción.

La profundidad del surco (milímetros)	Factor de reducción del coeficiente de fricción	Factor de aumento de la distancia de frenado
4	0.83	1.20
3	0.80	1.25
2	0.71	1.40
1	0.59	1.70

Problema resuelto

Distancia de frenado y las condiciones de carretera

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Figura 12.9. Volkswagen Passat 1.8 Turbo.

Un Volkswagen Passat 1.8 Turbo (**Figura 12.9**) se movía a una velocidad de 110 km/h (30.6 m/s).

Después de aplicar los frenos, el automóvil necesitó una distancia de 50 m para detenerse. ¿La carretera estaba seca o mojada? ¿Las llantas eran nuevas o viejas?

Solución: Suponiendo que la fuerza de fricción es constante, el coeficiente de fricción cinética es:

$$\mu = \frac{v^2}{2\,gd} = \frac{\left(30.6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.8\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 50\text{ m}} = \frac{936.4\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}^2}{980\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 0.95$$

Dar sentido al resultado: Según las **Tablas 12.1** y **12.2** este valor del coeficiente de fricción indica que la carretera estaba *bien seca* y que las llantas eran "nuevecitas".

Razonamiento proporcional: Si la distancia de frenado fuera de 100 metros, ¿cuál sería el coeficiente de fricción?

Dar sentido al resultado: ¿Qué condiciones de la carretera corresponden a ese coeficiente de fricción?

12.2. Energía potencial

Para llegar a otra forma de energía mecánica, que no sea la energía cinética, hay que realizar el trabajo de manera muy lenta para que el cuerpo no pueda adquirir velocidad. Para un cuerpo sin velocidad, la energía cinética es cero. Hablando precisamente, la energía cinética debe ser muy cercana a cero, porque si, durante el proceso, se mantuviera matemáticamente igual a cero, no habría movimiento del cuerpo ni realización de trabajo mecánico.

El trabajo en el cual la energía cinética no cambia

Imagina una pelota que está en reposo en el suelo (**Figura 12.10a**). Un joven que estaba cerca de ella comienza a levantarla poco a poco, con un ritmo muy lento para que podamos decir que la velocidad de la pelota, en cada momento, es despreciable (**Figura 12.10b**).

Figura 12.10a. La pelota en su posición inicial.

Figura 12.10b. La pelota en su posición final.

El joven realizó un trabajo sobre la pelota de manera muy lenta y la pelota no adquirió energía cinética. Esto es posible porque en la fórmula del trabajo no aparece el tiempo, algo que, como hemos visto, fue precisamente la razón para introducir el concepto de potencia.

¿Qué es lo que ha cambiado debido a la acción del joven? Ha cambiado la posición de la pelota con respecto a la tierra; más precisamente, ha cambiado la configuración del sistema "pelota-tierra". Este cambio no puede ocurrir sin la realización de un trabajo.

La raíz de las palabras

Potencial

significa que está latente, que es capaz de llegar a ser pero que no existe todavía. Proviene del latín *potentialis*, *poderoso*; *potentia*, *poder*, *fuerza*; y de *potens*, *potent-*, participio presente de *posse*, *ser capaz*.

Tangible

es algo que se puede tocar; que es palpable, concreto. Viene del latín tardío *tangibilis*, y éste del latín *tangere*, *tocar*, *palpar*.

Para poder describir el cambio ocurrido, debido al trabajo, en el sistema "pelota-Tierra" necesitamos un nuevo concepto. Este concepto es el de **energía potencial**.

Definición

La **energía potencial** de un sistema de cuerpos que interaccionan entre sí, cuando el sistema está en una cierta configuración, es igual al trabajo de las fuerzas externas que llevaron al sistema a esa configuración, a partir de una configuración inicial de referencia.

¿Por qué "energía potencial"? Porque si el joven suelta la pelota, ésta regresará a su posición inicial. Durante su regreso, adquirirá energía cinética, una energía que no es "potencial" sino "tangible".

La fórmula para la energía potencial

En el caso de cambios en la configuración de un sistema cuerpo-Tierra, dado que la fuerza entre la Tierra y el cuerpo es la fuerza gravitacional, la energía potencial es de tipo gravitacional. Se podría decir "es energía potencial gravitacional". La precisión del lenguaje en la física choca, a menudo, con la elegancia.

El trabajo que ha realizado el joven se calcula fácilmente. La fuerza que tuvo que ejercer fue igual al peso de la pelota, pero dirigida verticalmente hacia arriba. (Hablando estrictamente, la fuerza tenía que ser un poquito mayor que el peso de la pelota. Si no fuera así, el joven no podría levantar la pelota.)

Si la pelota de masa m se levantó hasta la altura d, el trabajo realizado es:

$$T = Fd = Wd = mgd$$

En este caso, en el cual no hubo cambio de energía cinética, el trabajo hecho es igual al cambio de la energía potencial.

Suponiendo que la energía potencial es cero en la superficie terrestre (altura cero), la energía potencial final es mgd. El cambio de la energía potencial es igual a la energía potencial final:

$$E_{\mathrm{pg}} = mgd$$

Definición

La **energía potencial gravitacional** es igual al producto de la masa, el factor de peso y la altura sobre la superficie terrestre.

Problema resuelto

La energía potencial de una caja

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar un concepto de física en una situación cotidiana.

Usando una polea dos trabajadores levantaron una caja de 50 kg hasta una altura de 5 m (**Figura 12.11**). ¿Cuál fue el cambio de la energía potencial gravitacional de la caja, como resultado del trabajo? Para el factor de peso, toma g = 10 N/kg.

Solución: Si la energía potencial de la caja en el suelo se toma como igual a cero, entonces el cambio de la energía potencial es igual a la energía potencial a la altura de 5 m:

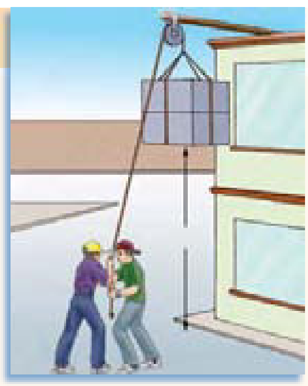


Figura 12.11. El resultado del trabajo es el cambio de la energía potencial de la caja.

$$E_{pg} = mgd = 50\,\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 5\,\text{m} = 2{,}500\,\text{Nm} = 2{,}500\,\text{J}$$

El aumento de la energía potencial de la caja de 2,500 joules es el resultado del trabajo.

Dar sentido al resultado: Una persona hace un trabajo de 2,500 J si levanta 250 veces una pesa de 1 kg (el peso es, aproximadamente, 10 newtons) desde el suelo hasta una altura de 1 m.

El nivel de referencia de la energía potencial

Para hablar con precisión de la energía potencial, siempre es importante definir el cero de la energía potencial, es decir, definir el nivel de referencia con respecto al que vamos a medir el cambio de la energía potencial. En la definición de página anterior, se tomó la energía potencial gravitacional igual a cero en la superficie terrestre. Sin embargo, uno puede elegir el nivel en el que la energía potencial sea cero donde le dé la gana.

Lo más sencillo es decidir que la energía potencial en la posición inicial sea el nivel de energía potencial cero. Lo que cuenta, en cualquier caso, es solamente la diferencia de energías potenciales.

Problema resuelto

El cambio de energía potencial no depende del nivel de referencia elegido

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un envase de leche lleno (m = 1 kg) se encuentra sobre una mesa cuya altura es d_1 = 1 m (**Figura 12.12a**). Si el envase se desplaza hasta un estante cuya altura es d_2 = 2 m (**Figura 12.12b**), ¿cuál será el cambio de la energía potencial del envase? Para el factor de peso, toma g = 10 N/kg.

Figura 12.12a. ¿Cuál es la energía potencial del envase?

Figura 12.12b. ¿Cuál es la energía potencial del envase?

Solución: Si se toma que la energía potencial del envase es cero cuando se encuentra en el suelo, las energías potenciales del envase cuando está en la mesa y en el estante son:

$$E_{p1} = mgd_1 = 1\,\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1\,\text{m} = 10\,\text{Nm} = 10\,\text{J}$$

y

$$E_{p2} = mgd_2 = 1\,\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 2\,\text{m} = 20\,\text{Nm} = 20\,\text{J}$$

Sin embargo, alguien puede decidir que el envase tiene energía potencial igual a cero cuando está en la mesa, y determinar la energía potencial del envase en el estante con respecto a la mesa. En ese caso, las energías potenciales son:

$$E_{p1} = 0 \text{ y } E_{p2} = mg(d_2 - d_1) = 1\,\text{kg} \cdot 10\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot (2\,\text{m} - 1\,\text{m}) = 10\,\text{Nm} = 10\,\text{J}$$

Se ve que los valores de la energía potencial dependen de dónde se pone el nivel en que la energía potencial es cero. Sin embargo, en ambos casos, el cambio de la energía potencial es igual. En el primer caso se tiene:

$$E_{p2} - E_{p1} = 20\,\text{J} - 10\,\text{J} = 10\,\text{J}$$

Y en el segundo caso,

$$E_{p2} - E_{p1} = 10\text{ J} - 0\text{ J} = 10\text{ J}$$

Dar sentido al resultado: El nivel con respecto al cual se calcula la energía potencial gravitacional es arbitrario. Lo que importa es la diferencia de las energías potenciales gravitacionales.

Problema por resolver

Cambio de la energía potencial al escalar una roca

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Figura 12.13. Escalando una roca.

Escalar rocas (**Figura 12.13**) se ha vuelto uno de los deportes extremos más populares.

Un escalador, cuya masa es $m = 60$ kg, logró subir hasta una altura $h = 30$ m con respecto a la base de la roca. ¿Cuánto aumentó su energía potencial?

Sugerencia: Tomar la energía potencial en el nivel de la base de la roca como cero.

12.3. La ley de conservación de la energía mecánica

En una caída libre, cambia tanto la energía potencial como la energía cinética del cuerpo que cae. Por ejemplo, la energía cinética inicial es cero mientras que durante la caída la energía cinética no sólo es diferente de cero, sino que su valor va aumentando. Evidentemente, la energía cinética del cuerpo no se mantiene constante. Lo mismo se puede decir de la energía potencial.

Pero, como la energía cinética aumenta y la energía potencial disminuye, es recomendable investigar si su suma se mantiene constante. Esta suma se llama **energía mecánica**.

Definición

La **energía mecánica** de un cuerpo es igual a la suma de su energía cinética y su energía potencial.

El cambio de la energía mecánica en la caída libre

Investiguemos el cambio de la energía mecánica de un cuerpo en la caída libre. En caída libre, la distancia recorrida en el tiempo t es:

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

La velocidad alcanzada en el tiempo t es:

$$v = gt$$

Esto es lo que ya sabemos. Veamos ahora la situación donde un cuerpo está en reposo a una altura d sobre el nivel del suelo. Su **energía potencial gravitacional**

inicial respecto al suelo es $E_{pgi} = mgd$ y su **energía cinética inicial** es igual a 0, es decir, $E_{ci} = 0$. En consecuencia, su energía mecánica inicial es:

$$E_i = E_{ci} + E_{pgi} = 0 + mgd = mgd$$

Justamente antes de que el cuerpo toque el suelo, la **energía cinética final** es:

$$E_{cf} = \frac{1}{2}mv^2$$

y la **energía potencial gravitacional final** es $E_{pgf} = 0$. La energía mecánica final es:

$$E_f = E_{cf} + E_{pgf} = \frac{1}{2}mv^2 + 0 = \frac{1}{2}mv^2$$

Si la energía cinética final fuera igual a la energía potencial gravitacional inicial, entonces la energía mecánica no habría cambiado durante la caída libre. Veremos que esto se cumple cuando es posible despreciar la fricción del aire. En tal caso, se puede afirmar que la energía mecánica se conserva. ¿Cuánto es v^2 en la caída libre sin resistencia del aire?

Como $v = g \bullet t$, entonces $v^2 = (gt)^2$. Insertando esta expresión en la fórmula para la energía cinética final, se obtiene:

$$E_{cf} = \frac{1}{2}m(g \bullet t)^2$$

Esta ecuación se puede escribir como:

$$E_{cf} = mg\left(\frac{1}{2}gt^2\right) = mgd$$

Pero esto es lo que teníamos inicialmente como E_{pgi}, es decir:

$$E_{cf} = E_{pgi}$$

Este sencillo ejemplo nos muestra que en la caída libre se conserva la energía mecánica, si la resistencia del aire se puede despreciar. Suponiendo que no hay fricción, hemos obtenido para este caso que

$$mgd = \frac{1}{2}mv^2$$

De aquí, se obtiene:

$$v^2 = 2gd,$$

o bien,

$$v = \sqrt{2\,gd}$$

Se ve que es sencillo encontrar la velocidad. Pero, con este enfoque, no sabemos cuánto tarda el movimiento entre una y otra posición. Esto es el precio que estamos pagando al usar la ley de conservación de la energía.

Si se cumple la ley de conservación de la energía, se tiene que: "La energía potencial inicial más la energía cinética inicial" es igual a "la energía potencial final más la energía cinética final". En otras palabras: la suma de la energía potencial y la energía cinética no cambia con el transcurso del tiempo. Esta afirmación se conoce como "la ley de conservación de la energía mecánica".

Ley de conservación de la energía mecánica

En los procesos mecánicos, en ausencia de fricción, se conserva la energía mecánica.

El valor de la energía mecánica es el mismo, aunque cambien las partes de ésta que corresponden a energía cinética y a energía potencial. En el caso de la caída libre, tenemos una energía potencial que se transforma en energía cinética, pero la transformación satisface la regla de que la energía potencial inicial es igual a la energía cinética final: la energía potencial se transforma en energía cinética.

Si lanzamos el cuerpo hacia arriba, tendremos el proceso opuesto. Primero, toda la energía mecánica es energía cinética. Después, mientras el cuerpo sube, disminuye la energía cinética y aumenta la energía potencial. En la cima, toda la energía es potencial y la energía cinética es 0.

Apliquemos la ley de conservación de la energía mecánica en algunas situaciones interesantes. En todas ellas, se supondrá que el cuerpo se puede modelar como si fuera un punto material. Esta suposición no es siempre correcta, pero el tratamiento preciso de esas situaciones requiere conceptos que no veremos en este curso.

Problema resuelto

Los clavadistas de Acapulco

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar los conceptos de física en una situación cotidiana.

Los saltos que realizan los audaces clavadistas de Acapulco (**Figura 12.14**) son una atracción turística que goza de fama mundial. Mientras que en las competencias de clavados la mayor altura es de 10 metros, el punto desde donde se lanzan los clavadistas de Acapulco está a 36 metros de altura sobre el nivel del mar. ¿Cuál es la velocidad del clavadista cuando está a punto de entrar al agua?

Figura 12.14. Un clavadista de Acapulco.

Solución: Para estimar la velocidad, hay que suponer que el movimiento del clavadista se puede considerar como de caída libre. Esto significa que hay que despreciar la fricción del aire y la energía cinética inicial del "volador" que tiene que lanzarse en dirección horizontal (de otra manera, chocaría contra la roca). Con estas simplificaciones, la ley de conservación de la energía indica que la energía cinética final es igual a la energía potencial inicial:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgd$$

donde d = 36 m es la altura inicial y v es la velocidad del clavadista justamente antes de que entre al agua. Despejando v, se tiene:

$$v = \sqrt{2\,gd} = \sqrt{2 \cdot 9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 36\text{ m}} = \sqrt{705.6\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 26.6\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: Para destacar la magnitud de esta hazaña, en la cual se necesita tanto destreza como valentía, conviene expresar la velocidad en kilómetros por hora. ¡Es de 96 km/h!

Problema por resolver

¿A qué velocidad sale el agua en los géiseres?

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

El parque de Yellowstone, en Estados Unidos de América, establecido en 1872, es el parque nacional más antiguo del mundo. Su extensión es de 9,000 kilómetros cuadrados. De las diversas maravillas naturales que posee, las que más captan la atención de los turistas son sus géiseres, de los cuales posee alrededor de 300. Aunque no alcanza la altura récord (que es de 120 m, alcanzada por el géiser Steamboat, ya inactivo), el más popular es el "Old Faithful" (el viejo géiser fiel).

Este géiser nunca decepciona a los visitantes porque día tras día, año tras año, cada 72 minutos lanza vapor y agua caliente (**Figura 12.15**).

Regularmente, el agua alcanza una altura de 40 metros, pero cuando el géiser está "de buen humor" (algunos creen que esto ocurre cuando hay muchos niños), lanza el agua hasta 56 metros.

Figura 12.15. El viejo géiser fiel llega a lanzar el agua hasta una altura de 56 m.

Usando la ley de conservación de la energía, estima a qué velocidad inicial tiene que lanzarse el agua para que alcance esa altura.

La extensión de la ley de conservación de la energía mecánica

Actividad de discusión

¿Se conserva siempre la energía mecánica?

Competencias a practicar: Lanzar hipótesis; pensar críticamente y creativamente sobre una solución; aprender en equipo y de manera autorregulada.

Si se deja caer una pelota elástica, ésta regresa a su altura original después de chocar contra el suelo. La energía mecánica (que inicialmente es toda energía potencial gravitacional) se ha conservado, porque la energía inicial es igual a la energía final.

Pero, ¿cuál es la energía mecánica en el momento en que la pelota se detiene debido al choque contra el suelo?

La energía potencial gravitacional en ese momento es cero (porque la pelota está en el suelo) y la energía cinética es cero (porque la velocidad es cero).

Junta a tu equipo y discutan el problema de la ausencia de energía en el momento descrito.

1. ¿Cuál es la solución que encontraron?

____

____

2. ¿De qué manera sería posible verificar esa solución?

____

____

3. ¿Qué aprendiste de esta actividad?

____

____

Si la energía mecánica se conserva, debe existir otro tipo de energía potencial y su valor tiene que ser igual al valor de la energía potencial gravitacional inicial. Este otro tipo de energía potencial es la **energía potencial de deformación elástica** o **energía potencial elástica**. Al chocar contra el suelo, la pelota se deforma y adquiere energía potencial elástica. Esta energía potencial elástica se transforma en energía cinética de la pelota cuando ésta empieza a subir.

Si la energía mecánica se define ahora como la suma de energía cinética, energía potencial gravitacional y energía potencial elástica, la ley de conservación de la energía mecánica sigue siendo válida.

Problema resuelto

Conservación de energía en un trampolín

Competencias ejemplificadas: Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Figura 12.16. ¿Se conserva la energía en el brincolín?

Brincar en un trampolín (**Figura 12.16**) es parte de la diversión en muchas fiestas. Consideremos esta diversión desde el punto de vista de la conservación de la energía.

Una niña, cuya masa $m = 25$ kg, brinca en un trampolín. Alcanza una altura $d_1 = 2.5$ m con respecto a la superficie del trampolín (cuando no está deformada). Cuando se detiene después de bajar, el trampolín está deformado y su superficie ha bajado hasta $d_2 = -0.5$ m. ¿Cuál es el valor máximo de la energía potencial elástica?

Solución: Cuando está a la altura máxima, la niña tiene solamente energía potencial gravitacional (con respecto al nivel de la superficie no deformada). Por ello, la energía mecánica inicial es:

$$E_i = E_{pgi} = mgd_1$$

Cuando está en el punto más bajo, la niña tiene energía potencial gravitacional (con respecto al nivel de la superficie no deformada) E_{pgf} y energía potencial elástica E_{pef}. De manera que la energía potencial mecánica final es:

$$E_f = E_{pgf} + E_{pef} = mgd_2 + E_{pef}$$

Si se cumple la ley de conservación de energía mecánica, la energía mecánica final es igual a la energía mecánica inicial

$$(E_f = E_i): mdg_2 + E_{pef} = mgd_1$$

Despejando E_{pef} se obtiene:

$$E_{pef} = mgd_1 - mgd_2 = mg\left(d_1 - d_2\right) = 25\,\text{kg} \cdot 10\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \left[2.5\,\text{m} - \left(-0.5\,\text{m}\right)\right] = 25\,\text{kg} \cdot 10\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 3\,\text{m} = 750\,\text{J}$$

La energía potencial elástica es igual a 750 J.

Dar sentido al resultado: Esta energía es igual a la energía cinética que tiene la niña cuando se mueve a una rapidez de casi 8 m/s.

Pensamiento crítico: ¿Puedes decir, sin hacer ningún cálculo, cuál es la energía cinética de la niña en el momento en que la superficie del trampolín regresa a su posición horizontal (las energías potenciales, gravitacional y elástica, son ambas cero)?

Problema resuelto

Conservación de energía en un salto con garrocha

Competencias ejemplificadas Aplicar modelos matemáticos; explicitar conceptos de física en una situación cotidiana.

Figura 12.17. El salto con garrocha.

Antes de realizar un salto con garrocha (**Figura 12.17**), el atleta realiza una larga carrera de impulso hasta alcanzar una gran velocidad.

Después, clava la garrocha en un cajón de arena y la encorva para que actúe como resorte y contribuya para que se obtenga un salto más alto. El uso de garrochas de fibra de vidrio permitió aumentar la marca de 5.65 a 6.15 m. Veamos el papel que juega la garrocha desde el punto de vista de la conservación de energía.

Un atleta, de masa $m = 75$ kg, alcanza la rapidez $v = 8$ m/s, deforma la garrocha y alcanza una altura $d = 6$ m. De hecho, la altura efectiva es $d_{ef} = 5$ m, porque en ningún momento todo el cuerpo de atleta está por arriba de 6 m.

1. ¿Qué tan grande es la energía potencial elástica de la garrocha?
2. ¿A qué rapidez tuvo que saltar el atleta hacia arriba?

Solución:

1. Para simplificar el cálculo, supongamos que en el punto más alto, la velocidad del atleta es cero. Para la garrocha tomaremos en cuenta solamente su energía elástica (suponiendo que sus energías cinética y potencial gravitacional son cero).

   En el primer instante, el atleta tiene energía cinética y la usa casi toda para deformar la garrocha. La energía elástica de la garrocha será:

$$E_{pe} = E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 75\,\text{kg} \cdot \left(8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot 75\,\text{kg} \cdot 64\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 2,400\ \text{J}$$

2. Cuando ha transformado su energía cinética, debido a la rapidez horizontal v, a la energía potencia elástica de la garrocha, el atleta salta hacia arriba con rapidez V. Entonces, la energía mecánica del atleta y la garrocha es:

$$E_i = E_{pe} + E_{cV} = E_{pe} + \frac{1}{2}mV^2$$

   En el punto más alto, la energía mecánica es igual a la energía potencial gravitacional del atleta:

$$E_f = E_{pg} = mgd_{ef}$$

   Aplicando la ley de conservación de la energía mecánica ($E_i = E_f$), se obtiene:

$$\frac{1}{2}mV^2 + E_{pe} = mgd_{ef}$$

   Despejando la energía cinética del salto inicial, se obtiene:

$$\frac{1}{2}mV^2 = mgd_{ef} - E_{peg} = 75\,\text{kg} \cdot 10\,\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 5\,\text{m} - 2,400\ \text{J} = 3,750\ \text{J} - 2,400\ \text{J} = 1,350\ \text{J}$$

   La rapidez V del salto es:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,350\ \text{J}}{\text{m}}} = \sqrt{\frac{2,700\ \text{J}}{75\,\text{kg}}} = 6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dar sentido al resultado: Saltando con esa rapidez inicial, el atleta podría alcanzar la altura de 1.8 metros. Esto es solamente el 36% de la altura alcanzada. La garrocha y su energía elástica son responsables del resto de la altura.

La energía potencial elástica de un resorte

En los ejemplos anteriores, se consideró la energía potencial elástica sin especificar de qué depende su valor. Según la definición general, la energía potencial es igual al trabajo de las fuerzas externas que cambian la configuración del sistema desde una configuración de referencia (donde la energía potencial se considera igual a cero) hasta la configuración final (donde se quiere determinar la energía potencial).

Para la energía potencial gravitacional, la configuración de referencia es aquella en la cual el cuerpo se encuentra colocado sobre la superficie terrestre. En el caso del resorte, la configuración de referencia es aquella en la cual el resorte no está deformado.

Como ya vimos, al alargar el resorte una longitud *d*, el trabajo realizado es:

$$T = \frac{1}{2}kd^2$$

Entonces, la energía potencial elástica de un resorte por estar deformado es:

$$E_{pe} = \frac{1}{2}kd^2$$

Aquí *k* es la constante del resorte y *d* es la deformación del resorte (ya sea alargamiento o compresión).

Problema resuelto

La energía potencial de un resorte

Competencia a practicar: Aplicar modelos matemáticos.

Un resorte de constante $k = 8.5$ N/m se alarga $d = 0.15$ m. ¿Cuál es su energía potencial elástica?

Uno de los deportes extremos más emocionantes es el salto *bungee*. No es recomendable que lo practiques, pero sí sería muy adecuado que sepas que la seguridad de los aficionados a ese deporte depende de qué tanto conozcan y tomen en cuenta las leyes de la física.

El siguiente problema resuelto muestra cómo la ley de conservación de la energía mecánica permite comprender y estimar los aspectos básicos de un salto *bungee*.

Problema por resolver

Transformaciones de energía en un salto *bungee*

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Un intrépido aficionado a los saltos *bungee* ata un extremo de la cuerda elástica a sus pies y se deja caer al vacío desde una torre alta (**Figura 12.18**).

La longitud de la cuerda sin deformación es $L = 30$ m; y su otro extremo está atado a la torre en el punto desde el cual se dejó caer el aficionado. El peso de éste es $mg = 800$ N. Suponiendo que es posible modelar la cuerda como si fuera un resorte con constante de resorte k = 200 N/m, ¿qué tanto caerá el aficionado antes de que la cuerda alargada lo detenga?

Solución: El aficionado se va detener cuando la deformación d de la cuerda sea suficientemente grande. Tomemos esa posición como nivel de referencia de la energía potencial gravitacional, en la cual esta energía vale cero. Siendo así, la posición inicial del aficionado se encuentra a una altura:

$$h = L + d$$

Dado que su velocidad inicial era cero, en la posición inicial el aficionado tiene solamente energía potencial gravitacional:

$$E_{pg} = mgh = mg\,(L + d)$$

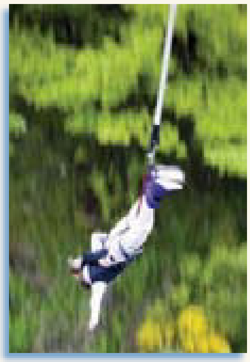


Figura 12.18. Un salto en *bungee*.

En el punto en que se detiene, la velocidad del aficionado es otra vez cero, y la única energía presente es la energía potencial elástica de la cuerda:

$$E_{pe} = \frac{1}{2}kd^2$$

Suponiendo la validez de la ley de conservación de la energía mecánica, la energía final debe ser igual a la energía inicial:

$$\frac{1}{2}kd^2 = mg(L + d)$$

Multiplicando ambos lados por 2 y reorganizado los términos de esta ecuación se obtiene:

$$kd^2 - 2mgd - 2mgL = 0$$

Dividiendo la ecuación entre k, se tendrá la ecuación cuadrática para d:

$$d^2 - \frac{2mg}{k} \cdot d - \frac{2mgL}{k} = 0$$

Insertando los valores de las cantidades, la ecuación cuadrática toma la forma:

$$d_2 - \frac{2 \cdot 800\ \text{N}}{200\,\frac{\text{N}}{\text{m}}} \cdot d - \frac{2 \cdot 800\ \text{N} \cdot 30\ \text{m}}{200\,\frac{\text{N}}{\text{m}}} = 0$$

$$d_2 - (8\ \text{m}) \cdot d - 240\ \text{m}^2 = 0$$

Las dos soluciones de esta ecuación cuadrática son:

$$d_1 = \frac{8\ \text{m} + \sqrt{64\ \text{m}^2 + 960\ \text{m}^2}}{2} = \frac{8\ \text{m} + \sqrt{1{,}024\ \text{m}^2}}{2} = \frac{8\ \text{m} + 32\ \text{m}}{2} = 20\ \text{m}$$

$$d_2 = \frac{8\ \text{m} - \sqrt{64\ \text{m}^2 + 960\ \text{m}^2}}{2} = \frac{8\ \text{m} - \sqrt{1{,}024\ \text{m}^2}}{2} = \frac{8\ \text{m} - 32\ \text{m}}{2} = -12\ \text{m}$$

Entonces, el aficionado se detendría cuando la cuerda se haya estirado 20 m. En ese momento, la longitud de su caída, con respecto al punto inicial, sería de 50 m.

Dar sentido al resultado: La deformación negativa de −12 m corresponde a la situación en la cual, si la cuerda fuera realmente un resorte ideal, el resorte detendría primero al aficionado, después de haberse estirado 20 m y, luego, lo levantaría hasta que la longitud del resorte comprimido fuera de 18 m (30 m − 12 m). La cuerda *bungee* no puede comprimirse. Por ello, la podemos modelar como un resorte solamente cuando se estira.

El modelo de resorte y la ley de conservación de la energía mecánica permiten entender conceptualmente y tratar cuantitativamente lo que sucede en el lanzamiento de flechas con un arco tensado.

Problema resuelto

La conservación de la energía en el lanzamiento de una flecha

Competencia ejemplificada: Aplicar modelos matemáticos.

Aunque todavía hay quienes usan el arco y la flecha para cazar y pescar, la mayoría de las personas practican la arquería solamente como un pasatiempo (**Figura 12.19**).

Para sostener el arco y la cuerda tensados, de manera que el punto medio de la cuerda quede desplazado hacia atrás una distancia d = 32 cm, se necesita una fuerza F = 96 N.

1. ¿Cuál es la constante de resorte del arco?
2. ¿A qué rapidez saldrá, lanzada por el arco, una flecha de 24 gramos?

Figura 12.19. Arquería como pasatiempo.

Solución:

1. La constante de resorte del arco es:

$$k = \frac{F}{d} = \frac{96\text{ N}}{0.32\text{ m}} = 300\,\frac{\text{N}}{\text{m}}$$

2. En la configuración inicial (la de la máxima deformación de la cuerda y el arco), la flecha está en reposo y su energía cinética es cero. Por eso, la energía mecánica total del sistema es igual a la energía potencial elástica del arco:

$$E_{\text{pe}} = \frac{1}{2}kd^2$$

En la configuración final (la cuerda y el arco no están deformados y su energía potencial elástica es cero), la flecha tiene la velocidad a que será lanzada y su correspondiente energía cinética. Por tanto, la energía mecánica total final del sistema será igual a la energía cinética de la flecha:

$$E_{\text{c}} = \frac{1}{2}mv^2$$

Aplicando la ley de conservación de la energía mecánica,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kd^2$$

De ahí se obtiene la fórmula para la rapidez de lanzamiento:

$$v = \sqrt{\frac{kd^2}{\text{m}}} = d\sqrt{\frac{\text{k}}{\text{m}}} = 0.32\text{ m}\sqrt{\frac{300\,\frac{\text{N}}{\text{m}}}{0.025\text{ kg}}} = 0.32\text{ m}\cdot 109.5\,\frac{1}{\text{s}} = 35\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

¿Cuándo no se conserva la energía mecánica?

La energía mecánica no se conserva cuando ocurren deformaciones que no son elásticas o cuando existen fuerzas de fricción. Las fuerzas de fricción dispersan la energía mecánica. Por eso, esas fuerza se llaman, también, **fuerzas disipativas**.

La energía mecánica se transforma en otras formas de energía que no son formas de energía mecánica. La más importante es la energía interna de los cuerpos, que es una forma de energía que vamos a analizar al estudiar los fenómenos térmicos.

Actividad de observación y de comparación de datos

La pérdida de la energía mecánica en una colisión contra el suelo

Propósitos: Observar y comparar con datos reales, la pérdida de energía en una colisión contra el suelo.

Competencias a practicar: Contrastar los resultados obtenidos en un experimento con una hipótesis previa; realizar experimentos pertinentes; seguir instrucciones de manera reflexiva; aprender en equipo; aprendizaje autorregulado.

Material: Pelotas de golf, tenis y béisbol; barra métrica.

1. Forma un equipo de tres miembros. El primer miembro sostiene la barra métrica en posición vertical. El segundo suelta la pelota desde una altura de 1 m, procurando que caiga cerca del pie de la barra. El tercero observa hasta qué altura sube la pelota después del choque contra el suelo y anota el resultado. Repitan la caída y el rebote de la pelota hasta obtener un resultado confiable.
2. Después de que hayan realizado la medición de la altura del rebote de cada pelota, respondan las siguientes preguntas:

   a) ¿Cuál pelota rebota mejor? ____________________

   b) ¿Cuál pelota rebota peor? ____________________

3. Analicen los datos reales sobre colisiones de las pelotas contra el suelo obtenidos en un experimento científico que están dados en la **Tabla 12.3**.

Tabla 12.3. La pérdida de velocidad en una colisión con el suelo.

Pelota	Rapidez inicial (m/s) (antes de la colisión)	Rapidez final (m/s) (después de la colisión)
Tenis	2.95	2.38
Golf	1.24	0.94
Béisbol	1.25	0.61

   a) ¿Cómo corroboran o cómo contradicen estos datos sus conclusiones?

   ____

   b) ¿Qué aprendiste en esta actividad?

   ____

Demostrar las competencias

Dominar la terminología científica

1. Define el concepto “energía cinética”.
2. Define el concepto “energía potencial”.
3. ¿Cuáles son las fuerzas disipativas?
4. A veces, se dice que la energía cinética es “energía de movimiento” y que la energía potencial es “energía de reposo”. ¿Puedes demostrar con un ejemplo que esta división de energías no es correcta?

Dominar el medio de la comunicación gráfica

5. Completa el mapa conceptual sobre trabajo, potencia y energía (**Figura 12.20**).
6. En la **Figura 12.21** se presenta gráficamente cómo el aumento de longitud de un resorte depende de la fuerza externa aplicada.

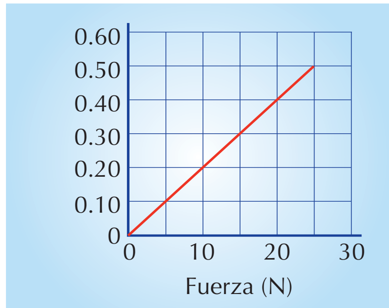


Figura 12.21. El aumento de longitud contra la fuerza externa.

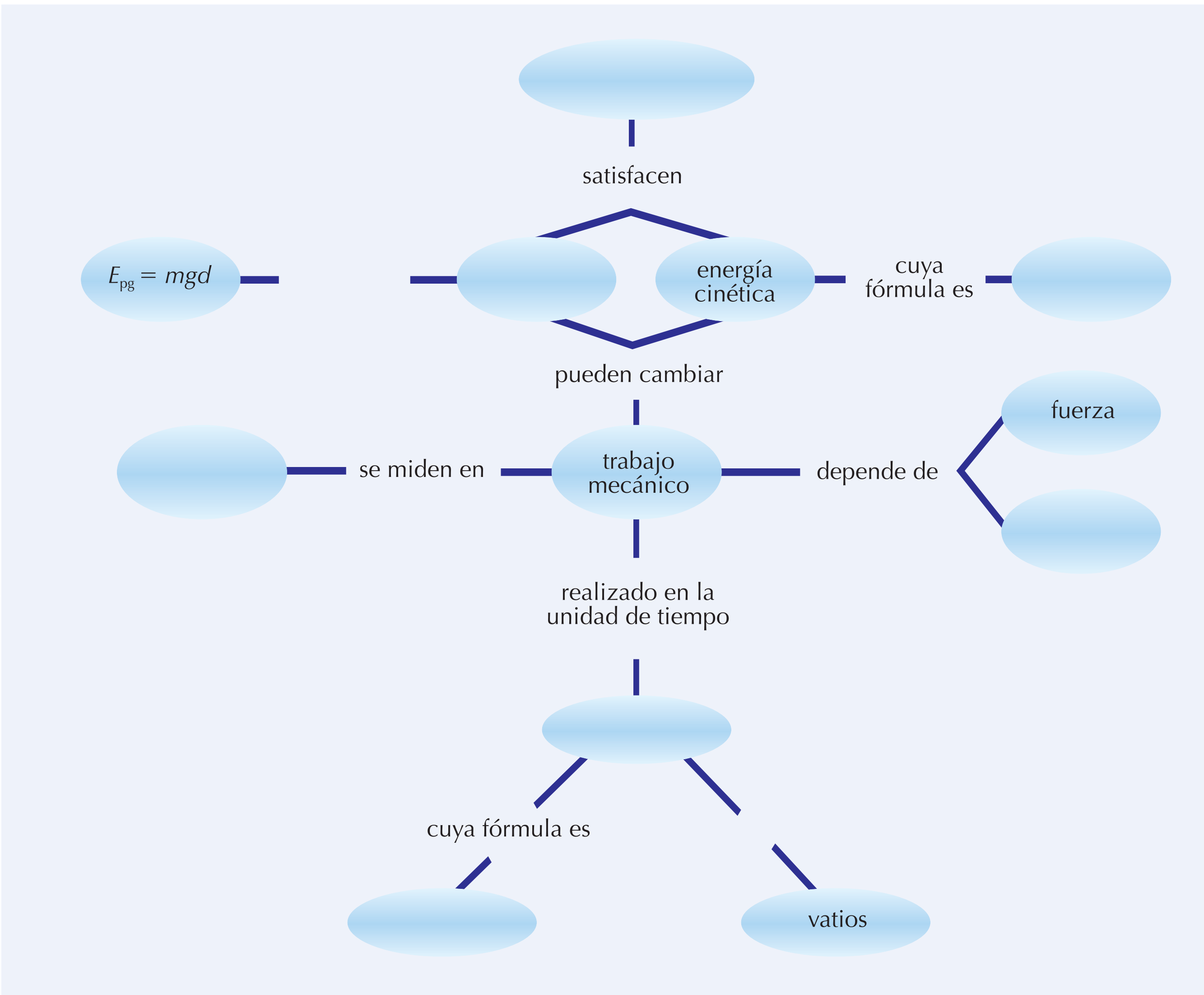


Figura 12.20. Mapa conceptual sobre trabajo, potencia y energía.

Revisa cuidadosamente la gráfica y encuentra la constante del resorte en cuestión. Describe detalladamente tu procedimiento.

Aplicar modelos matemáticos

7. Estima la energía cinética que tienes cuando paseas y cuando corres. Como seguramente sabes tu masa en kilogramos, lo que debes hacer es estimar tu rapidez al pasear y al correr; exprésalas en metros por segundo e inserta los valores de masa y rapidez en la fórmula para la energía cinética.

8. Una balón de basketball, cuya masa es $m = 0.6$ kg, se mueva a una rapidez $v = 20$ m/s. ¿Cuál es su energía cinética?

9. Un gorrión, cuya masa es de 30 gramos, tiene una modesta energía cinética de 1.85 J. ¿A qué rapidez está volando?

10. Calcula la velocidad a la que debería moverse un automóvil de 1,000 kg para que su energía cinética sea de 50,000 J.

11. La masa de una bala de una arma de fuego Parabellum es de 9.5 gramos. Al disparar, la bala tiene una energía cinética inicial de 704 J.

a) ¿Cuál es la rapidez inicial de la bala?

b) Para que tengas una idea de esa energía, calcula la altura desde la qué debería caer una pesa de 1 kg para tener una energía de 704 J.

12. Una bala de una arma Colt 45 tiene una energía cinética de salida de 636 J.

a) Si su velocidad de salida es 282 m/s, ¿cuál es la masa de la bala?

b) Para que tengas una idea de esa energía, calcula la altura desde la qué debería caer una pesa de 1 kg para tener una energía de 636 J.

13. ¿A qué altura debe subir un escalador de rocas de 70 kg para que el aumento de su energía potencial gravitacional, con respecto a la base de la roca, sea de 13,720 J.

14. Un halcón peregrino, de masa $m = 1$ kg, está volando horizontalmente a una rapidez de 40 m/s. El halcón vuela a una altura $h = 300$ m.

a) ¿Cuál es su energía cinética?

b) ¿Cuál es su energía potencial gravitacional?

c) ¿Cuál es su energía mecánica total?

15. Por estar distraída, una señora empuja una maceta que estaba en la ventana de su departamento. La maceta comienza su caída libre.

a) Si la altura de la ventana es de 12 metros, ¿a qué altura la energía potencial gravitacional de la maceta será dos veces mayor que la energía cinética?

b) ¿A qué altura serán iguales?

c) ¿A qué altura la energía potencial gravitacional será la mitad de la energía cinética?

Si no sabes como comenzar, revisa con cuidado lo que indica la ley de conservación de la energía mecánica, y cómo cambia la energía potencial gravitacional con la altura.

16. Un resorte de constante $k = 7.5$ N/m se alarga 0.20 m. ¿Qué tan grande es la fuerza elástica del resorte?

17. El comportamiento del tendón del pie se puede modelar como el comportamiento de un resorte de constante $k =$ 10,000 N/m.

a) ¿Qué fuerza se necesita para mantener estirado el tendón una longitud $d = 0.005$ m?

b) ¿Cuánta energía potencial elástica se almacena en el tendón?

18. Se necesita una fuerza $F_1 = 30$ N para sostener alargadas una distancia $d_1 = 0.01$ m las ligas de una resortera.

a) ¿Cuál es la constante de resorte de la resortera?

b) ¿Cuál es la energía potencial elástica de la resortera, cuando las ligas se alargan $d_2 = 0.20$ m?

c) Si con esa deformación de la resortera se lanzara una piedra de 0.050 kg, ¿cuál sería su rapidez inicial?

19. Una aficionada a los saltos *bungee* brinca desde un puente. La masa de la aficionada es $m = 60$ kg y ella usa una cuerda cuya longitud, cuando no está estirada, es $L = 11$ m. La aficionada se detiene cuando la cuerda se ha estirado una longitud $d = 21$ m. ¿Cuál es la constante de resorte de la cuerda?

20. Un balón de fútbol se lanza hacia arriba a rapidez de 30 m/s.

a) Si el balón alcanza una altura de 35 m, ¿cuánta energía mecánica se ha perdido debido a la fricción del aire? Para el factor de peso, toma el valor 10 N/kg.

b) ¿Cuál sería el valor promedio de la fuerza de fricción del aire?

21. Un buque petrolero, cuya masa es de 500,000 toneladas, se mueve a una rapidez de 28 km/h.

a) ¿Cuál es su energía cinética?

b) Con esa rapidez inicial y con los motores apagados, necesita una distancia de 10 km para detenerse. ¿Cuál es el valor promedio de la fuerza de resistencia del agua?

22. En un experimento científico, se investigaba cuánta energía pierde una bala de 2 g al perforar una placa de acero con grosor $d = 4$ mm. Cuando la bala incidía a una rapidez de 176 m/s, salía, después de perforar la placa, a una rapidez de 110 m/s.

a) ¿Qué trabajo realizaba la placa sobre la bala?

b) ¿Qué tan grande era la fuerza promedio ejercida por la placa sobre la bala?

23. En el mismo experimento del problema anterior, se determinó que el trabajo de la placa sobre la bala era $T = -40$ J, cuando la bala incidía a una rapidez de 580 m/s.

a) ¿A qué rapidez salía la bala?

b) ¿Cuál era la fuerza promedio ejercida por la placa sobre la bala?

24. Los cuerpos A y B se mueven y tienen la **misma energía cinética**. El cuerpo A tiene una masa de 2 kg y el cuerpo B, una de 8 kg. ¿Cuál aseveración es correcta?

a) La velocidad del cuerpo A es dos veces mayor que la velocidad del cuerpo B.

b) La velocidad del cuerpo A es cuatro veces mayor que la velocidad del cuerpo B.

c) La velocidad del cuerpo B es dos veces mayor que la velocidad del cuerpo A.

d) La velocidad del cuerpo B es cuatro veces mayor que la velocidad del cuerpo A.

Para verificar tu predicción, supón que la energía cinética de ambos cuerpos es de 16 J y calcula el valor de la velocidad de cada cuerpo.

25. Los cuerpos A y B tienen la **misma energía cinética**. El cuerpo A se mueve a una velocidad de 4 m/s y el cuerpo B se mueve a una velocidad de 8 m/s. ¿Cuál aseveración es correcta?

a) La masa del cuerpo A es dos veces mayor que la masa del cuerpo B.

b) La masa del cuerpo A es cuatro veces mayor que la masa del cuerpo B.

c) La masa del cuerpo B es dos veces mayor que la masa del cuerpo A.

d) La masa del cuerpo B es cuatro veces mayor que la masa del cuerpo A.

Para verificar tu selección, supón que la energía cinética de ambos cuerpos es de 40 J y calcula el valor de la masa de cada cuerpo.

26. Una pelota incide sobre el suelo a una rapidez de 4 m/s y rebota a rapidez de 2 m/s. ¿Qué parte de la energía cinética de incidencia representa la energía cinética de la pelota después del rebote?

a) la mitad   *b*) un tercio

c) un cuarto   *d*) un quinto

¿Qué parte de la energía cinética de incidencia se perdió en la colisión con el suelo?

a) la mitad   *b*) dos tercios

c) tres cuartos   *d*) cuatro quintos

Verifica tu selección, calculando las energías cinéticas de la pelota antes y después de su colisión con el suelo. Para la masa de la pelota toma el valor de 0.4 kg.

Apéndice

Las definiciones actuales de las cantidades fundamentales del Sistema Internacional de Unidades

El **metro**: es la *longitud* igual a la distancia recorrida en el vacío por la luz en un tiempo de 1/299,792.458 de segundo.

El **kilogramo**: es la *masa* del prototipo del kilogramo internacional.

El **segundo**: es el *intervalo de tiempo* equivalente a 9,192,631,777 veces el periodo de la radiación emitida en la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

El **ampere**: es la *intensidad de corriente eléctrica* constante que al circular por dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable, y colocados en el vacío a una distancia de un metro uno de otro, origina una fuerza mutua de 2×10^{-7} newtons por cada metro de longitud.

El **kelvin**: es la fracción 1/273.16 de la *temperatura termodinámica* del punto triple de agua.

El **mol**: es la *cantidad de sustancia* de un sistema que consta de tantas partículas como átomos hay en 0.012 kilogramos de carbono 12. (Al emplear el mol se debe especificar la clase de partículas, de composición conocida, a las que se refiere.)

La **candela**: es la *intensidad luminosa* en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia de 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 W por estereorradián.

El **radián**: es el *ángulo plano* comprendido entre dos radios de un círculo que, sobre la circunferencia de dicho círculo, interceptan un arco de longitud igual al radio.

El **estereorradián**: es el *ángulo sólido* que, teniendo su vértice en el centro de una esfera, intercepta sobre la superficie de dicha esfera un área igual a la de un cuadrado que tenga por lado el radio de la esfera.

Bibliografía

Arons, A. B. (1970). *Evolución de los conceptos de física*. México: Trillas.

Gamow, G. (1982). *Biografía de la física*. Madrid: Alianza Editorial.

Giancoli, D. C. (2007). *Física: Principios con aplicaciones*. 9a. edición. México: Prentice Hall.

Hecht, E. (1987). *Física en perspectiva*. México: Addison Wesley Iberoamericana.

Hewitt, P. (2007). *Física conceptual*. 10a. edición. México: Pearson Educación.

Kuhn, T. S. (1993). *La revolución copernicana. La astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental*. Barcelona: Planeta-De Agostini.

Perelman, Y. (1983). *Física recreativa*. Volúmenes 1 y 2. 5a. edición. Moscú: MIR.

Riveros Rotgé, H., Colado Pernas, J. y Mieres Orta, J. (2000). *Experimentos impactantes 1. Mecánica y fluidos*. México: Trillas.

Walker, J. (1979). *La feria ambulante de la física*. México: Limusa.