Física: Trabalho e Energia Mecânica

Rafael da Silva

Criado: 3 de julho de 2025 Atualizado: 10 de agosto de 2025

Sumário

1 Mecânica: Trabalho e Energia

A mecânica de Newton, utiliza os conceitos de trabalho e energia para descrever sistemas mecânicos. A energia mecânica – soma das energias cinética e potencial – é conservada quando apenas forças conservativas atuam, permitindo a análise de sistemas por meio do princípio da conservação da energia. As formas de energia potencial, como a gravitacional e a elástica, ajudam a entender as interações físicas nos sistemas. Já a potência mecânica, que mede a taxa de realização de trabalho, relaciona energia e eficiência, sendo essencial em aplicações tecnológicas.

1.1 Definição de Trabalho Mecânico

Na Física, o trabalho mecânico (W) é uma grandeza escalar que mede a transferência de energia de um corpo para outro, ou a transformação de energia, resultando em deslocamento. Ele está intrinsecamente ligado à aplicação de uma força que provoca um deslocamento. A unidade de medida do trabalho no sistema internacional (SI) é o joule[1] (J), que é equivalente a 1 Newton-metro (N m).

Para entender melhor, imagine o esforço necessário para levantar um objeto – esse esforço é uma forma de trabalho. De modo geral, o trabalho mecânico é a energia transferida pela força ao mover um corpo ou sistema, seja para elevá-lo, deslocá-lo ou modificar sua velocidade ou posição. Assim, o trabalho mede a quantidade de energia transferida durante esse processo, sendo fundamental em diversas áreas da física, especialmente na mecânica.

1.2 Trabalho de uma Força Constante

Quando uma força ($\vec{F}$) constante atua sobre um corpo, causando um deslocamento ($\vec{d}$), conforme ilustra a figura 1, o trabalho realizado por essa força é definido como o produto escalar entre o vetor força e o vetor deslocamento. Se houver um ângulo (θ) entre a direção da força e a direção do deslocamento, a fórmula para o trabalho é:

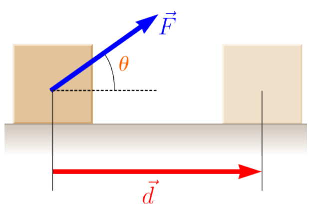


Figura 1

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = F\,d\,\cos\theta$$

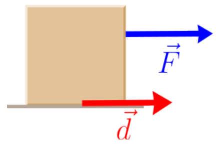
em que:

[1]Esse nome foi escolhido como homenagem a James Prescott Joule (1818-1889), físico inglês que, no século XIX, estudou as conversões de calor em trabalho e abriu o caminho para a formulação do princípio de conservação da energia.

- F é o módulo da força aplicada.
- d é o módulo do deslocamento.
- $\cos\theta$ é o cosseno do ângulo entre a força e o deslocamento.

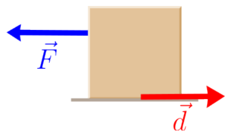
1.2.1 Casos Particulares

Trabalho Motor ($\theta = 0°$): Quando a força e o deslocamento têm a mesma direção e sentido ($\cos 0° = 1$), o trabalho é positivo e máximo, favorecendo o movimento.



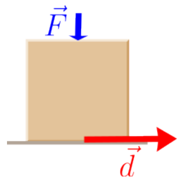
$$W = F\,d$$

Trabalho Resistente ($\theta = 180°$): Quando a força e o deslocamento têm a mesma direção, mas sentidos opostos ($\cos 180° = -1$), o trabalho é negativo, opondo-se ao movimento. Um exemplo comum é a força de atrito.



$$W = -F\,d$$

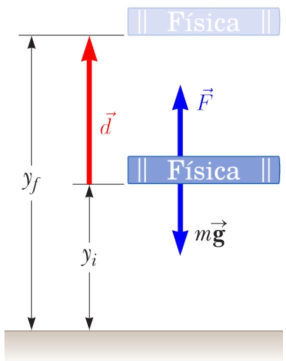
Trabalho Nulo ($\theta = 90°$): Quando a força é perpendicular ao deslocamento ($\cos 90° = 0$), o trabalho realizado por essa força é zero. Isso ocorre porque a força não contribui para o movimento na direção do deslocamento.



$$W = 0$$

1.3 Trabalho da Força Peso

A força peso ($\vec{p} = m\,\vec{g}$) é uma força constante que atua verticalmente para baixo. O trabalho realizado por essa força depende da variação da altura (h) do corpo. Por exemplo, se um livro de física é elevado de uma altura y_1 até uma altura y_2, ocorre um deslocamento vertical $h = y_2 - y_1$, conforme ilustrado na figura ao lado. Quando um corpo de massa m se desloca verticalmente sob a ação da gravidade (g), o trabalho realizado pela força peso é dado por:



$$W_p = m\,g\,h$$

- Se o corpo desce (h diminui), o trabalho da força peso é positivo (motor).
- Se o corpo sobe (h aumenta), o trabalho da força peso é negativo (resistente).

1.4 Trabalho de uma Força Variável

Quando a força que atua sobre um corpo não é constante (seu módulo, direção ou sentido variam), o cálculo do trabalho é mais complexo. Nesses casos, o trabalho pode ser determinado graficamente pela área sob a curva de um gráfico *força versus deslocamento* ($F \times d$). A área acima do eixo do deslocamento representa trabalho positivo, e a área abaixo, trabalho negativo.

Exemplo

Um baú de massa m é arrastado por uma força constante de 50 N por uma distância de 10 m. Calcule o trabalho realizado pela força nos seguintes casos.

1. A força é aplicada na mesma direção e sentido do deslocamento.
2. A força é aplicada na mesma direção, mas em sentido oposto ao deslocamento (força de atrito).
3. A força é aplicada perpendicularmente ao deslocamento.

Resolução:

1. **Força na mesma direção e sentido do deslocamento** ($\theta = 0°$):

$$W = F\,d\,\cos 0° = 50 \cdot 10 \cdot 1 = 500$$

   O trabalho é 500 J (motor).

2. **Força em sentido oposto ao deslocamento** ($\theta = 180°$):

$$W = F\,d\,\cos 180° = 50 \cdot 10 \cdot (-1) = -500$$

   O trabalho é -500 J (resistente).

3. **Força perpendicular ao deslocamento** ($\theta = 90°$):

$$W = F\,d\,\cos 90° = 50 \cdot 10 \cdot 0 = 0$$

   O trabalho é 0 J (nulo).

2 Energia Mecânica

2.1 Definição de Energia Mecânica

A energia mecânica (E_M) é uma grandeza física **escalar** que representa a capacidade de um corpo ou sistema de realizar trabalho. Ela é definida como a soma da energia cinética (E_C) e de todas as formas de energia potencial (E_P) presentes no sistema, ou seja,

$$E_M = E_C + E_P,$$

em que:

- E_C é a energia cinética, associada ao movimento do corpo.
- E_P é a energia potencial, associada à posição ou configuração do corpo (gravitacional, elástica, etc.).

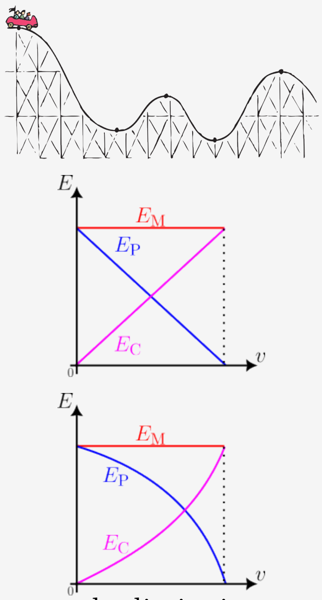
A unidade de medida da energia mecânica no SI é o joule (J).

Vamos estudar dois tipos de energia potencial: a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica.

A energia potencial gravitacional está relacionada à *altura* de um objeto em relação ao solo. Quanto maior a altura, maior será essa energia. Já a energia potencial elástica está ligada à *deformação* de objetos elásticos, como molas ou elásticos – quanto mais esticados ou comprimidos, mais energia armazenam.

Também vamos considerar o chamado *caso ideal*, em que *não há perda de energia* por atrito ou resistência do ar. Nesse cenário, a *energia mecânica se conserva*, ou seja, a soma da energia potencial e da energia cinética permanece constante. Esses conceitos são importantes para que possamos compreender melhor o exemplo a seguir.

Exemplo



Imagine você num carrinho de montanha-russa. No início do percurso, o carrinho é puxado lentamente até o ponto mais alto por um motor ou uma corrente. Nesse momento, ele está praticamente parado e muito alto em relação ao solo. Por causa dessa altura, o carrinho possui muita **energia potencial gravitacional**, mas pouca ou nenhuma **energia cinética**, já que ainda não começou a se mover rapidamente. Assim, a **energia mecânica total** do sistema (a soma da energia potencial e da cinética) está quase toda concentrada na forma de energia potencial.

Quando o carrinho começa a descer, sua altura em relação ao solo diminui, o que faz com que a energia potencial também diminua. Ao mesmo tempo, ele começa a ganhar velocidade, o que aumenta sua energia cinética. Nessa fase, ocorre uma **transformação de energia**: a energia potencial vai sendo convertida em energia cinética. No entanto, a **energia mecânica total se mantém constante**, desde que não haja perdas significativas por atrito ou resistência do ar. Esse processo mostra como a montanha-russa é um exemplo claro da conservação da energia mecânica.

3 Energia Cinética

3.1 Definição de Energia Cinética

A energia cinética (E_C) é uma grandeza física escalar, que está associada ao movimento de um corpo. Qualquer corpo em movimento possui energia cinética. Se um corpo está em repouso (velocidade nula), sua energia cinética é zero. Sua unidade no SI é o joule (J).

Matematicamente, a energia cinética de um corpo de massa (m) e velocidade (v) é definida como:

$$E_C = \frac{mv^2}{2}$$

em que:

- m é a massa do corpo em quilogramas (kg).
- v é o módulo da velocidade do corpo em metros por segundo (m/s).

Exemplo

Calcule a energia cinética de uma bola de massa 600 g ao ser arremessada e atingir uma velocidade de 18 km/h.

Resolução:

Primeiramente, as unidades tem que estarem no S.I.

- 600 g = 0,6 kg;
- 18 km/h = 18 ÷ 3,6 = 5 m/s.

$$E_C = \frac{mv^2}{2} = \frac{0{,}6 \cdot (5)^2}{2} = 7{,}5 \text{ J}.$$

Exemplo

Um projétil de 20 g, com velocidade de 240 m/s, atinge o tronco de uma árvore e nele penetra uma certa distância até parar. Determine a energia cinética do projétil antes de colidir com o tronco.

Resolução: Primeiramente, as unidades tem que estarem no S.I.

- 20 g = 20 ÷ 1000 = 0,02 kg;

$$E_C = \frac{mv^2}{2} = \frac{0{,}02 \cdot (240)^2}{2} = 576 \text{ J}.$$

3.1.1 Teorema do Trabalho e Energia Cinética

O teorema[2] do trabalho e energia cinética estabelece que o trabalho total realizado pela força resultante sobre um corpo é igual à variação da sua energia cinética. Isso significa que o trabalho realizado sobre um corpo altera sua energia de movimento.

$$W_{\text{resultante}} = \Delta E_C = E_{C_f} - E_{C_i}$$

3.2 Demonstração

O trabalho realizado pela força resultante ao longo de um deslocamento $\vec{d}$ é:

$$W = \vec{F}\,\vec{d} = F\,d\,\cos\theta.$$

Para movimento retilíneo com força na direção do movimento:

$$W = F\,d.$$

Pela segunda lei de Newton:

$$F = m\,a,$$

em que a é a aceleração do corpo.

Para movimento uniformemente variado, podemos utilizar a equação de Torricelli

$$v_f^2 = v_i^2 + 2ad,$$

para isolar o deslocamento d:

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2a}.$$

[2]Em matemática e lógica, um teorema é uma proposição que pode ser demonstrada como verdadeira através de um processo lógico, utilizando axiomas e outras proposições já estabelecidas. Em outras palavras, é uma afirmação que pode ser comprovada como verdadeira através de uma prova, que é uma sequência de argumentos lógicos.

Substituindo a força e o deslocamento na equação do trabalho:

$$
\begin{aligned}
W = F\,d = (ma)\left(\frac{v_f^2 - v_i^2}{2a}\right) \\
= ma\,\frac{v_f^2 - v_i^2}{2a} \\
= m\,\frac{v_f^2 - v_i^2}{2} \\
= \frac{mv_f^2}{2} - \frac{mv_i^2}{2}.
\end{aligned}
$$

A energia cinética é definida como:

$$E_c = \frac{mv^2}{2}.$$

Portanto:
- Energia cinética inicial: $E_{c_i} = \frac{mv_i^2}{2}$
- Energia cinética final: $E_{c_f} = \frac{mv_f^2}{2}$

Substituindo as definições de energia cinética:

$$W = E_{c_f} - E_{c_i} = \Delta E_c$$

Demonstramos que o trabalho realizado pela força resultante é igual à variação da energia cinética do corpo:

$$\boxed{W_{\text{resultante}} = \Delta E_c}$$

Este teorema é fundamental na mecânica e estabelece uma relação direta entre o conceito de trabalho (relacionado à força e deslocamento) e a energia cinética (relacionada à massa e velocidade) do corpo.

Exemplo

Uma pedra de *curling*[3] de 20 kg é lançada e atinge uma velocidade de 2 m/s. (a) Calcule a energia cinética da pedra e o trabalho realizado sobre ela, considerando que partiu do repouso. (b) Se o coeficiente de atrito cinético do gelo for de $\mu_c = 0{,}02$, qual será a distância que a pedra deslisará?

Resolução:

(a)

Cálculo da Energia Cinética:
A massa da pedra é $m = 20$ kg e a velocidade é $v = 2$ m/s.

$$E_C = \frac{m\,v^2}{2} = \frac{20 \cdot (2)^2}{2} = 40 \text{ J}.$$

A energia cinética da pedra é de 40 J.
Cálculo do Trabalho Realizado:
A pedra partiu do repouso, então sua energia cinética inicial (E_{C_i}) é 0 J. A energia cinética final (E_{C_f}) é 40 J. Pelo teorema do trabalho e energia cinética:

$$W_{\text{resultante}} = E_{C_f} - E_{C_i} = 40 - 0 = 40$$

O trabalho realizado sobre a pedra foi de 40 J.
(b) Podemos agora usar a fórmula do trabalho para obetermos a distância d:

$$W = F\,d.$$

Lembrando que a força é a força de atrito cinético, $F = \mu_c\,N = \mu_c\,m\,g$,

$$W = \mu_c\,m\,g\,d \quad \Rightarrow \quad d = \frac{W}{\mu_c\,m\,g},$$

substituindo os valores, temos:

$$d = \frac{40}{0{,}02 \cdot 20 \cdot 10} = \frac{40}{4} = 10 \text{ m}.$$

4 Energia Potencial Gravitacional

4.1 Definição de Energia Potencial Gravitacional

A energia potencial gravitacional (E_g) é uma grandeza física escalar que representa a energia que um corpo possui devido à sua posição em um campo gravitacional. Ela está associada à capacidade de o corpo realizar trabalho em função de sua altura em relação a um nível de referência. No SI, sua unidade de medida é o joule (J).

Matematicamente, a energia potencial gravitacional de um corpo de massa (m) a uma altura (h) em relação a um nível de referência, em um local com aceleração da

[3] O *curling* é um esporte jogado sobre gelo que combina precisão e estratégia: duas equipes de 4 jogadores deslizam pedras de granito em direção a um alvo circular, tentando colocá-las o mais próximo possível do centro. Cada partida é dividida em rodadas chamadas *ends*, onde cada time lança 8 pedras (2 por jogador) e os companheiros varrem o gelo para ajustar velocidade e curva da pedra (*curl*).

gravidade (g), é definida como:

$$E_g = m\,g\,h$$

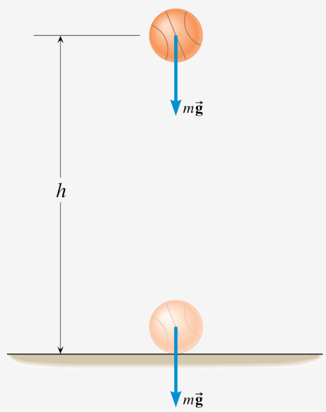
em que:

- m é a massa do corpo em quilogramas (kg).
- g é o módulo da aceleração da gravidade (≈ 10 m/s^2 na superfície da Terra).
- h é a altura do corpo em relação ao nível de referência em metros (m).

É importante notar que o nível de referência para a altura (h) é arbitrário, o que significa que a energia potencial gravitacional pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo da escolha do referencial. No entanto, a variação da energia potencial gravitacional entre dois pontos é sempre a mesma, independentemente do referencial escolhido.

Exemplo

Uma bola de 0,5 kg é levantada a uma altura de 2 m em relação ao solo. Considerando a aceleração da gravidade $g = 10$ m/s^2, calcule o módulo da energia potencial gravitacional da bola.



Resolução

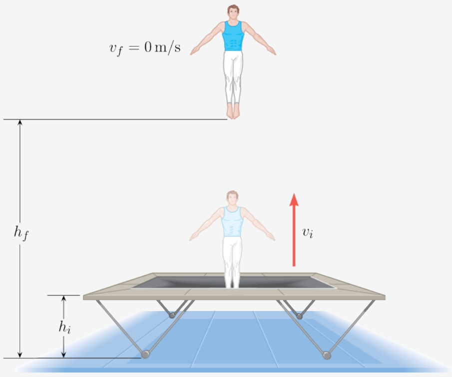
A massa da bola é $m = 0{,}5$ kg, a altura é $h = 2$ m e a aceleração da gravidade é $g = 10$ m/s^2.

$$E_g = m\,g\,h = 0{,}5 \cdot 10 \cdot 2 = 10$$

A energia potencial gravitacional da bola é de 10 J.

Exemplo

Uma ginasta salta verticalmente para cima de um trampolim, como na figura abaixo. O ginasta sai do trampolim a uma altura de 1,20 m e atinge uma altura máxima de 4,40 m antes de cair novamente. Todas as alturas são medidas em relação ao solo. Ignorando a resistência do ar, determine a velocidade inicial v_0 com que o ginasta sai do trampolim. Use $g = 10$ m/s^2.



Resolução

Podemos encontrar a velocidade inicial do ginasta usando o teorema do trabalho-energia, desde que o trabalho realizado pela força externa resultante possa ser determinado. Como apenas a força gravitacional atua sobre o ginasta no ar, ela é a força resultante, e podemos calcular o trabalho da seguinte forma:

$$W_{\text{grav}} = m\,g\,h_f - m\,g\,h_i = m\,g\,(h_f - h_i) = m\,g\,h.$$

Em que $h = h_f - h_i$ = 4,4 - 1,2 = 3,2 m. Pelo teorema trabalho-energia cinética, temos:

$$W_{\text{grav}} = \Delta E_C = \frac{m\,v_f^2}{2} - \frac{m\,v_i^2}{2} = \frac{m\,v_f^2}{2}.$$

Em que o segundo termo da energia cinética é nula, pois $v_i = 0$. Substituindo o trabalho da força gravitacional

$$\begin{aligned} W_{\text{grav}} &= \frac{m\,v_f^2}{2} \\ m\,g\,h &= \frac{m\,v_f^2}{2} \\ g\,h &= \frac{v_f^2}{2}. \end{aligned}$$

Isolando v_f, obtemos:

$$\begin{aligned} v_f^2 &= 2\,g\,h \\ v_f &= \sqrt{2\,g\,h} \\ &= \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 3{,}2} = \sqrt{64} = 8 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

5 Energia Potencial Elástica

5.1 Definição de Energia Potencial Elástica

A energia potencial elástica (E_l) é a energia armazenada em corpos elásticos (como molas) quando são deformados (esticados ou comprimidos) e que têm a capacidade de retornar à sua forma original, realizando trabalho nesse processo. A unidade de medida da energia potencial elástica no SI é o joule (J).

Matematicamente, a energia potencial elástica de uma mola com constante elástica (k) e deformação (x) é definida como[4]:

$$E_l = \frac{kx^2}{2},$$

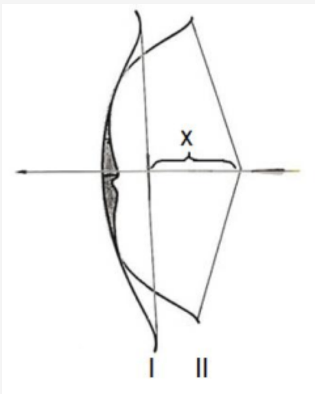
em que:

- k é a constante elástica da mola em Newtons por metro (N/m), que mede a rigidez da mola.
- x é a deformação (esticamento ou compressão) da mola em metros (m), em relação à sua posição de equilíbrio.

A energia potencial elástica é sempre positiva ou nula, pois a deformação (x) é elevada ao quadrado. Quanto maior a constante elástica ou a deformação, maior a energia potencial elástica armazenada.

Exemplo

Um arco e flecha possui uma corda que atua como uma mola com constante elástica de 200 N/m. Ao ser puxada, a corda é deformada em 0,5 m de sua posição inicial. Calcule a energia potencial elástica armazenada na corda.



Resolução:

A constante elástica é $k = 200$ N/m e a deformação é $x = 0{,}5$ m.

$$E_l = \frac{kx^2}{2} = \frac{200 \cdot (0{,}5)^2}{2} = 100 \cdot 0{,}25 = 25$$

A energia potencial elástica armazenada na corda do arco é de 25 J.

[4]É importante observar que a variável x desempenha papel funcionalmente equivalente à variável d. A notação com x para energia potencial elástica constitui a convenção predominante adotada pelos autores.

6 Conservação da Energia Mecânica

6.1 O Princípio de Conservação da Massa e da Energia

A ideia de que a matéria não pode ser criada nem destruída é muito antiga. Um dos primeiros registros dessa noção vem do poeta romano **Lucrécio** (c. 99 a.C.–c. 55 a.C.), contemporâneo de Júlio César, que escreveu no poema *De Rerum Natura*:

> "As coisas não podem nascer do nada, nem desaparecer voltando ao nada."

Essa ideia permaneceu como uma reflexão filosófica durante muitos séculos, até ganhar base científica. No século XVIII, o químico francês **Antoine de Lavoisier** (1743–1794), considerado o *pai da Química Moderna*, formulou experimentalmente o que ficou conhecido como o **princípio de conservação da massa**. Em 1789, ele afirmou:

> "Devemos tomar como axioma incontestável que, em todas as operações da arte e da natureza, nada é criado; a mesma quantidade de matéria existe antes e após um experimento [...] e nada ocorre além de mudanças e modificações nas combinações dos elementos envolvidos."

6.1.1 Do Princípio da Massa ao Princípio da Energia

No século XIX, o físico e médico alemão **Julius Robert von Mayer** (1814–1878) foi o primeiro a propor o **princípio de conservação da energia**. Em 1842, ele escreveu:

> "Quando uma quantidade de energia de qualquer natureza desaparece numa transformação, produz-se uma quantidade igual de energia de outra natureza."

Pouco depois, em 1843, o físico inglês **James Prescott Joule** (1818–1889) demonstrou experimentalmente a equivalência entre calor e trabalho, obtendo o valor:

$$1 \text{ caloria} = 4{,}1855 \text{ joules}.$$

Assim, a conservação da energia passou a fazer parte também da *Termodinâmica*. Em homenagem a seus estudos, a unidade de energia no SI recebeu seu nome.

6.1.2 A Visão Moderna: Energia no Universo

De forma mais abrangente, se considerarmos o universo como um **sistema isolado**, a **lei de conservação da energia** afirma que:

$$E_{\text{total}} = \text{constante}.$$

Isso significa que a energia total contida no universo permaneceu a mesma desde sua formação.

O físico alemão **Max Planck** (1858–1947), um dos fundadores da mecânica quântica, formulou matematicamente essa lei em 1887. Segundo ele:

> "A energia total (mecânica e não mecânica) de um sistema isolado, isto é, um sistema que não troca matéria nem energia com o exterior, mantém-se constante."

6.1.3 Unificando Massa e Energia

Com a **teoria da relatividade**, **Albert Einstein** (1879–1955) mostrou que a massa e a energia são, na verdade, aspectos de uma mesma entidade física, expressa pela famosa equação:

$$E = mc^2.$$

Ele destacou que, antes da relatividade, havia duas leis aparentemente independentes – a conservação da massa e a conservação da energia – mas que, na verdade, se unem em um único princípio.

Um exemplo é o **aniquilamento** entre um elétron e um pósitron: essas partículas possuem massas iguais, cargas elétricas de mesmo módulo e sinais opostos. Ao colidirem, elas desaparecem, dando origem a radiação gama (γ), cuja energia equivale à soma das massas de repouso das partículas mais suas energias cinéticas.

6.1.4 Nosso Foco: Energia Mecânica

Neste estudo, vamos concentrar nossa atenção na **energia mecânica**, que pode se apresentar como:

- **Energia cinética**: associada ao movimento, como no caso de um cavalo a galope.
- **Energia potencial**: associada à posição ou à configuração, como no caso de uma mola comprimida prestes a lançar uma bola.

Essas duas formas de energia estão no centro da compreensão de muitos fenômenos físicos.

6.2 Definição Matemática

O **princípio da conservação da energia mecânica** é um dos conceitos fundamentais da física. Ele afirma que, em um sistema onde atuam apenas forças conservativas (como a força gravitacional e a força elástica), a energia mecânica total do sistema permanece constante. Isso significa que a energia pode se transformar de uma forma para outra (cinética em potencial, ou vice–versa), mas a soma total dessas energias não se altera.

Matematicamente, a conservação da energia mecânica é expressa como:

$$E_{M_i} = E_{M_f},$$

ou, em termos de energia cinética e potencial:

$$E_{C_i} + E_{P_i} = E_{C_f} + E_{P_f}$$

6.2.1 Sistemas Conservativos e Não Conservativos

Forças Conservativas: Uma força é considerada conservativa quando o trabalho realizado por ela para deslocar um objeto entre dois pontos é independente da trajetória seguida. Em outras palavras, o trabalho depende apenas das posições inicial e final, não do caminho percorrido. Exemplos de forças conservativas incluem:

- **Força gravitacional:** O trabalho para elevar um objeto depende apenas da diferença de altura, não do caminho seguido.
- **Força elástica:** O trabalho para comprimir ou esticar uma mola depende apenas da deformação inicial e final.
- **Força elétrica:** Em campos elétricos, o trabalho depende apenas da diferença de potencial elétrico.

Uma característica fundamental das forças conservativas é que elas podem ser associadas a uma energia potencial. Quando apenas forças conservativas atuam sobre um sistema, a energia mecânica total se conserva.

Sistemas conservativos: São aqueles em que atuam exclusivamente forças conservativas. Nesses sistemas, a energia mecânica total ($E_M = E_C + E_P$) permanece constante ao longo do tempo. A energia pode se transformar de cinética para potencial e vice-versa, mas a soma total não se altera.

Forças Não Conservativas (Dissipativas): São forças cujo trabalho depende da trajetória seguida. Exemplos incluem:

- **Força de atrito:** O trabalho do atrito é sempre negativo e depende da distância percorrida.

- **Resistência do ar:** Sempre se opõe ao movimento, dissipando energia.
- **Forças de arrasto:** Presentes em fluidos, sempre removem energia mecânica do sistema.

Sistemas não conservativos (dissipativos): São aqueles onde forças não conservativas realizam trabalho, causando a dissipação da energia mecânica do sistema, geralmente convertendo-a em calor, som ou outras formas de energia. Nesses casos:

$$E_{M_f} < E_{M_i}$$

A diferença entre a energia mecânica inicial e final representa a energia dissipada pelas forças não conservativas:

$$W_{\text{não conservativas}} = E_{M_f} - E_{M_i} = \Delta E_M$$

Critério matemático: Uma força $\vec{F}$ é conservativa se, e somente se, o trabalho realizado em qualquer trajetória fechada for nulo:

$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0$$

Exemplo

Um pêndulo simples de massa $m = 0{,}2$ kg é solto do repouso de uma altura $h = 0{,}8$ m em relação ao seu ponto mais baixo. Desprezando a resistência do ar, calcule a velocidade do pêndulo no ponto mais baixo de sua trajetória. Considere $g = 10$ m/s^2.

Resolução:

Vamos aplicar o princípio da conservação da energia mecânica entre o ponto inicial (altura máxima) e o ponto final (ponto mais baixo).

Ponto inicial (altura máxima):

- Velocidade inicial $v_i = 0$ m/s (solto do repouso), então $E_{C_i} = 0$.
- Altura inicial $h_i = 0{,}8$ m.
- $E_{P_i} = m \cdot g \cdot h_i = 0{,}2 \cdot 10 \cdot 0{,}8 = 1{,}6$.

Ponto final (ponto mais baixo):

- Altura final $h_f = 0$ m (nível de referência), então $E_{P_f} = 0$.
- Velocidade final $v_f = ?$, então $E_{C_f} = \frac{1}{2}mv_f^2$.

Aplicando a conservação da energia mecânica:

$$
\begin{aligned}
E_{C_i} + E_{P_i} &= E_{C_f} + E_{P_f} \\
0 + 1{,}6 &= \frac{1}{2} m v_f^2 + 0 \\
1{,}6 &= 0{,}1 \cdot v_f^2 \\
v_f^2 &= \frac{1{,}6}{0{,}1} = 16 \\
v_f &= \sqrt{16} = 4.
\end{aligned}
$$

A velocidade do pêndulo no ponto mais baixo de sua trajetória é de 4 m/s.

6.3 Extensão do Teorema Trabalho–Energia Cinética

O teorema trabalho–energia cinética aplica-se a mais do que variações de energia cinética. Quando um trabalho é realizado por uma força externa, podemos dizer que o trabalho é igual a ΔE, onde E representa todos os tipos de energia. O trabalho não é uma forma de energia, mas sim um modo de transferir energia de um lugar para outro ou de uma forma para outra.

Como E_C pode transformar-se em E_P e vice-versa, não faria sentido dizer que apenas E_C corresponde ao trabalho no teorema trabalho–energia cinética. Em vez disso, podemos generalizar esse teorema dizendo que *o trabalho resultante, realizado pelas forças internas e externas sobre um corpo, é igual à variação de sua energia mecânica*, pois a energia se conserva. Matematicamente, podemos escrever:

$$W_{\text{resultante}} = \Delta E_M = E_{M_f} - E_{M_i}$$

A energia cinética e a energia potencial são duas entre as muitas formas de energia e constituem a base para outras, como a energia química, a energia nuclear e a energia transportada pelo som e pela luz. A energia cinética do movimento molecular aleatório está relacionada à temperatura; as energias potenciais de cargas elétricas são responsáveis pela voltagem; e as energias potencial e cinética do ar em vibração definem a intensidade do som. Mesmo a energia luminosa tem origem no movimento de elétrons no interior dos átomos. Cada forma de energia pode ser transformada em qualquer outra.

Exemplo

Ao ser disparado verticalmente para cima a partir do solo, um projétil de massa 0,010 kg atingiu a altura máxima de 3000 m. Durante esse deslocamento, houve uma dissipação de 1200 J de energia mecânica. Considerando g = 10 m/s^2, calcule a energia potencial gravitacional do projétil no ponto mais alto da trajetória em relação ao solo e determine a sua energia cinética no instante em que deixa o solo, ambas em joules.

Resolução

A energia potencial gravitacional do projétil no ponto mais alto da trajetória pode ser determinada por:

$$E_g = m\,g\,h = 0{,}01 \cdot 10 \cdot 3000 = 300 \text{ J}.$$

A energia cinética do projétil, no instante em que ele deixa o solo, pode ser determinada pelo teorema trabalho–energia cinética, levando em consideração o trabalho das forças não conservativas:

$$\begin{aligned} W_{\text{não conserv.}} = \Delta E_M &= \left(E_{C_f} + E_{g_f}\right) - (E_{C_i} + E_{g_i}) \\ &= \left(\frac{mv_f^2}{2} + mgh_f\right) - \left(\frac{mv_i^2}{2} + mgh_i\right) \end{aligned}$$

Considerando que $h_i = 0$ e sabendo que $v_f = 0$ (uma vez que o lançamento é vertical), $E_{g_f} = 300$ J (determinado anteriormente) e que $W_{\text{não conserv.}} = -1200$ J, temos:

$$\begin{aligned} -1200 &= (0 + 300) - (E_{C_i} + 0) \\ E_{C_i} &= 1500 \text{ J}. \end{aligned}$$

7 Potência Mecânica

7.1 Potência Mecânica

A potência mecânica (P) é uma grandeza escalar que mede a rapidez com que o trabalho é realizado ou a energia é transferida. Em outras palavras, ela indica a quantidade de trabalho realizada por unidade de tempo. A unidade de medida da potência no sistema internacional (SI) é o Watt[5] (W), que equivale a um joule por segundo (J/s).

Matematicamente, a potência média, que vamos usar a mesma variável, (P) é defi-

[5]O nome dessa unidade de potência foi dado em homenagem a James Watt, engenheiro escocês que aperfeiçoou a máquina a vapor criada por Thomas Newcomen (1663-1729), no começo do século XVIII, reduzindo as perdas de calor por resfriamento do vapor e vazamentos.

nida como a razão entre o trabalho (W) realizado e o intervalo de tempo (Δt) necessário para realizar esse trabalho:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

em que:

- W é o trabalho realizado em joules (J).
- Δt é o intervalo de tempo em segundos (s).

Alternativamente, a potência também pode ser expressa em termos de força (F) e velocidade (v), quando a força é **constante** e atua na mesma **direção** e **sentido** do deslocamento:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \cdot d}{\Delta t} = F \cdot v$$

em que:

- F é a força aplicada em Newtons (N).
- v é a velocidade do corpo em metros por segundo (m/s).

Exemplo

Um motor realiza um trabalho de 1200 J em 10 s. Calcule a potência média desenvolvida por esse motor.

Resolução:

O trabalho realizado é $W = 1200$ J e o intervalo de tempo é $\Delta t = 10$s.

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{1200}{10} = 120$$

A potência média desenvolvida pelo motor é de 120 W.