Física: Trabalho e Energia Mecânica

Rafael da Silva

Criado: 3 de julho de 2025 Atualizado: 11 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] 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.

1.2 Trabalho de uma Força Constante

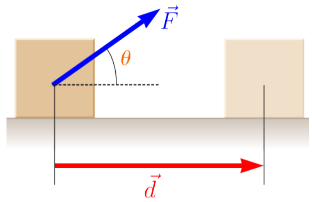


Figura 1

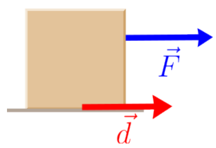
Quando uma força ($\vec{F}$) constante atua sobre um corpo, causando um deslocamento ($\vec{d}$), conforme ilustra a figura 1, o trabalho realizado por essa força é definido como o produto escalar entre o vetor força e o vetor deslocamento. Se houver um ângulo (θ) entre a direção da força e a direção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

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

em que:

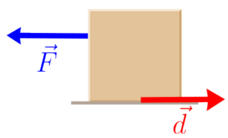
- F é o módulo da força aplicada.
- d é o módulo do deslocamento.
- $\cos\theta$ é o cosseno do ângulo entre a força e o deslocamento.

1.2.1 Casos Particulares



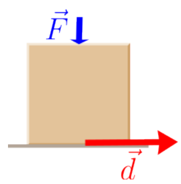
Trabalho Motor ($\theta = 0°$): Quando a força e o deslocamento têm a mesma direção e sentido ($\cos 0° = 1$), o trabalho é positivo e máximo, favorecendo o movimento.

$$W = F\,d$$



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.

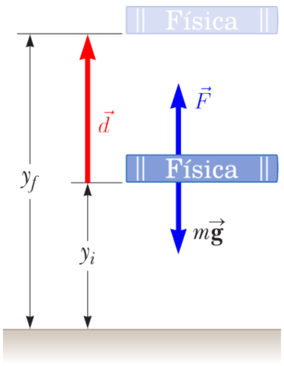
$$W = -F\,d$$



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.).

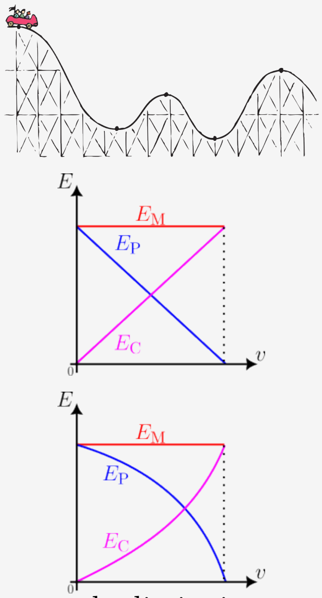
A unidade de medida da energia mecânica no SI é o joule (J).

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:

[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.

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

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:

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

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 gravidade (g), é definida como:

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

em que:

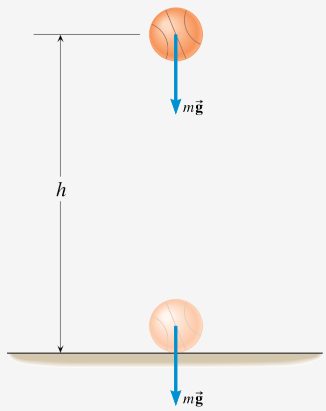
- m é a massa do corpo em quilogramas (kg).
- g é o módulo da aceleração da gravidade (≈ 10 m/s^2 na superfície da Terra).
- h é a altura do corpo em relação ao nível de referência em metros (m).

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.

[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*).

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

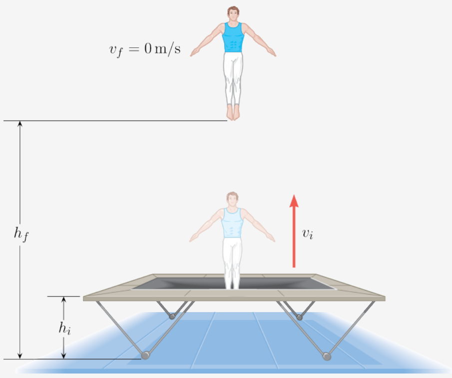
A massa da bola é $m = 0{,}5$ kg, a altura é $h = 2$ m e a aceleração da gravidade é $g = 10$ m/s^2.

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

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

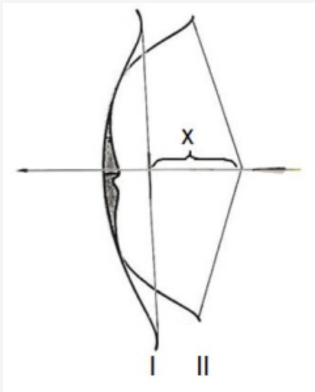
[4]É importante observar que a variável x desempenha papel funcionalmente equivalente à variável d. A notação com x para energia potencial elástica constitui a convenção predominante adotada pelos autores.

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.

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:

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

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:

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

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:

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

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 definida 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:

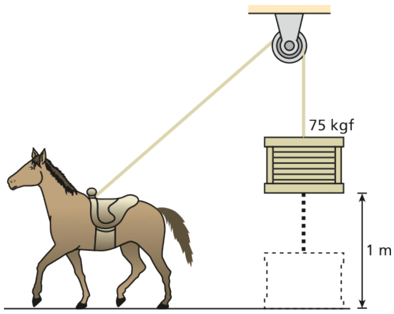
- F é a força aplicada em Newtons (N).
- v é a velocidade do corpo em metros por segundo (m/s).

Watt teve um papel essencial no avanço das máquinas térmicas, que foram a base tecnológica de um dos períodos mais marcantes da história: a revolução industrial.

[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.

As principais máquinas criadas ou aperfeiçoadas por ele funcionavam usando vapor de água em alta pressão. Esse vapor era produzido pela fervura da água em caldeiras. Além dessas, também existiam outras máquinas que aproveitavam diferentes fontes de energia, como a força de animais, a movimentação de rodas d'água e a força dos ventos em moinhos.

Watt também criou uma forma de medir a potência dessas máquinas: o cavalo-vapor (cv). Ele definiu que 1 cv corresponde à força que um cavalo forte é capaz de exercer para levantar uma carga de 75 quilogramas-força[6](kgf) a uma altura de 1 metro, em 1 segundo, como ilutra a figura ao lado.



A relação entre a potência em watts e calo-vapor é:

$$\begin{aligned} P = \frac{W}{\Delta t} &= \frac{m\ g\ h}{\Delta t} \\ &= \frac{75\text{ kg} \cdot 9{,}807\text{ m/s}^2 \cdot 1}{1\text{ s}} \\ &\approx 735,5\text{ W} \end{aligned}$$

Hoje sabemos que 1 cv equivale a aproximadamente 735,5 W, e essa relação permite converter valores entre as duas unidades de forma precisa.

Se uma máquina tem potência de 2 cv, ela consegue produzir:

$$2 \cdot 735{,}5\text{ cv} = 1471\text{ W}$$

E como 1 W = 1 joule por segundo, 2 cv significam que a máquina transforma 1 471 joules de energia a cada segundo.

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.

[6]O **quilograma-força** (kgf) é uma unidade de força. Ele representa a força que a gravidade exerce sobre um corpo com massa de 1 quilograma na superfície da Terra. Em termos mais simples: imagine você segurando uma massa de 1 kg na mão. O "peso" que você sente é 1 kgf.

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

A potência média desenvolvida pelo motor é de 120 W.

7.2 Rendimento

O conceito de rendimento é usado em muitas áreas da vida, especialmente nas áreas técnicas. No dia a dia, dizemos que "o rendimento de um carro não está bom" quando ele consome mais combustível do que o normal ou não entrega a mesma performance. Até nos esportes usamos a ideia: quando um atleta "não está rendendo", significa que ele não está desempenhando como de costume.

Agora, pense no exemplo de uma locomotiva elétrica que se move para a direita. Ela recebe da rede elétrica uma certa potência, que chamaremos de Potr. Mas será que toda essa potência é usada para mover a locomotiva? Claro que não! Parte dela se perde devido a atritos e outras resistências, como o aquecimento de peças, o barulho produzido pelo funcionamento e outras formas de dissipação de energia.

Sendo P_{U} a potência útil (utilizada no movimento) e P_{D} a potência dissipada, temos:

$$P_{\mathrm{U}} = P_{\mathrm{R}} - P_{\mathrm{D}}.$$

O rendimento (η), por sua vez, é calculado pelo quociente da potência útil (P_{U}) pela potência recebida (P_{R}). Veja:

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{U}}}{P_{\mathrm{R}}} = \frac{P_{\mathrm{R}} - P_{\mathrm{D}}}{P_{\mathrm{R}}} = 1 - \frac{P_{\mathrm{D}}}{P_{\mathrm{R}}}.$$