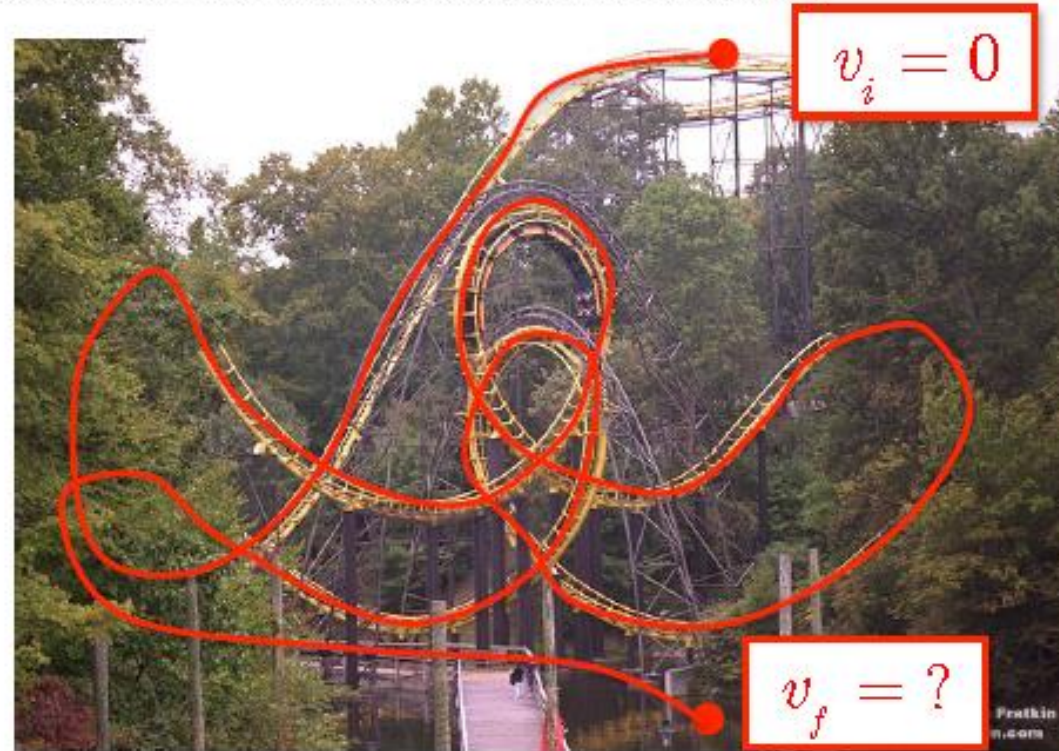


F-106 Fundamentos de Física para Biologia

Dinâmica, Trabalho, Energia e Potência

Energia

As leis de Newton permitem analisar vários movimentos. Essa análise pode ser bastante complexa, necessitando de detalhes do movimento que são inacessíveis. Exemplo: qual é a velocidade final de um carrinho na chegada de um percurso de montanha russa? Despreze a resistência do ar e o atrito, e resolva o problema usando as leis de Newton.



Energia

O termo energia é muito amplo, tornando difícil pensar em uma definição. Ela é, tecnicamente, uma grandeza escalar associada ao estado de um ou a um sistema de corpos. Trabalharemos com determinadas formas, como a manifestada no movimento de um corpo, ou pela sua posição em relação a outros, pela sua deformação, etc.

**A energia em um sistema isolado sempre se conserva.
Esta é uma lei fundamental da natureza.**

Energia Cinética e Trabalho

A **energia cinética** K é a energia associada ao estado de movimento de um objeto. A energia cinética K de um objeto de massa m , movendo-se com velocidade v (muito menor que a velocidade da luz) é:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

A unidade de energia cinética no SI é o joule (J):

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$$

Quando se aumenta a velocidade de um objeto aplicando-se a ele uma força, sua energia cinética aumenta. Nessa situação, dizemos que um **trabalho** é realizado pela força que age sobre o objeto.

“Realizar trabalho”, portanto, é um ato de transferir energia. Assim, o trabalho tem a mesma unidade que a energia e é uma grandeza **escalar**.

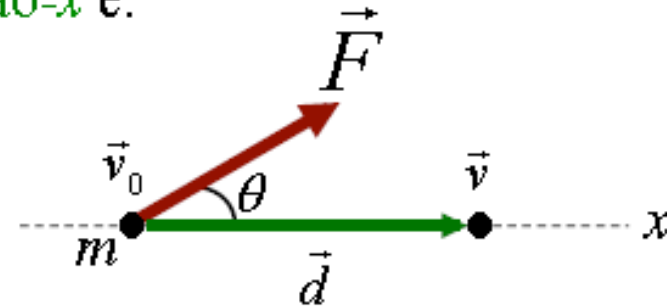
Energia Cinética e Trabalho

Problema 1-D: um corpo de massa m desloca-se na direção- x sob ação de uma força resultante constante que faz um ângulo θ com este eixo.

Da segunda lei de Newton a **aceleração na direção- x** é:

$$a_x = \frac{F_x}{m} \quad \Rightarrow \quad v^2 - v_0^2 = 2a_x d = 2\frac{F_x}{m}d$$

$$\text{Então:} \quad \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = F_x d$$



O lado esquerdo representa a variação da energia cinética do corpo e o lado direito é o trabalho, ***W, realizado pela força para mover o corpo por uma distância d:***

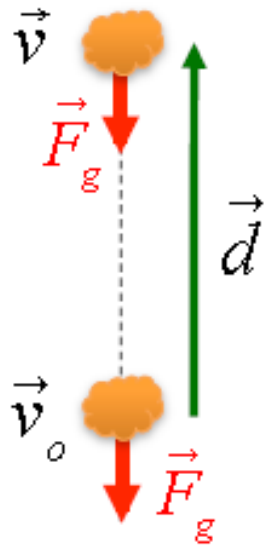
$$W = F_x d = \vec{F} \cdot \vec{d}$$

(o produto escalar vem do fato que $F_x = F \cos\theta$)

Se um objeto está sujeito a uma força resultante constante, a velocidade varia conforme a equação acima após percorrer uma distância d .

Trabalho – Força Constante

Se o corpo se *eleva* de uma altura d , então o **trabalho realizado** pela força peso é:



$$W = mgd \cos \theta = mgd \cos 180^\circ = -mgd$$

O sinal negativo indica que a força gravitacional *retira* a energia mgd da energia cinética do objeto durante a subida.

Agora, qual é o **trabalho realizado** pela força peso sobre um corpo de $10,2 \text{ kg}$ que *cai* $1,0$ metro?

$$W = mgd = 10,2 \times 9,8 \times 1,0 \approx +100 \text{ J}$$

Neste caso, qual é a **velocidade final** do corpo, se ele parte do repouso?

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 = W \Rightarrow$$

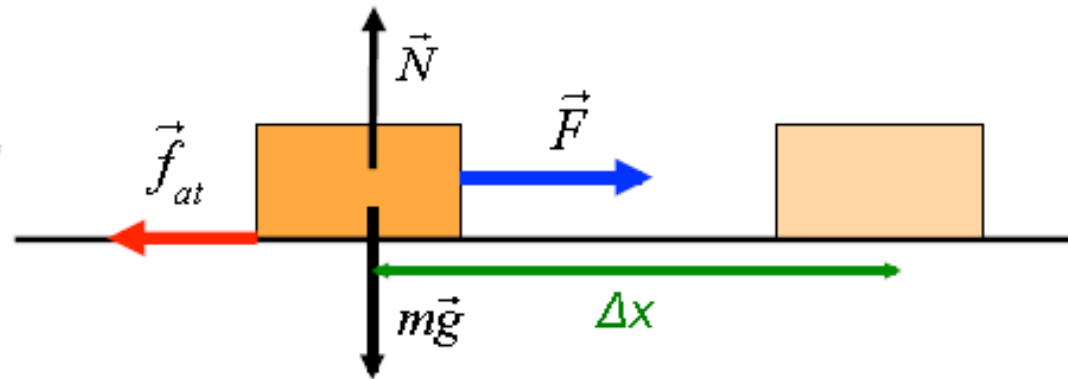
$$v_f = \sqrt{\frac{2W}{m}} = \sqrt{\frac{200}{10,2}} = 4,4 \text{ m/s}$$

(O mesmo resultado, obviamente, poderia ter sido obtido diretamente da equação de Torricelli).

Trabalho – Força Constante



Modelo para resolver o problema:



Trabalho realizado pelos **carregadores**:

$$W_c = F \Delta x$$

Trabalho realizado pela **força de atrito**:

$$W_a = f_a \Delta x \cos \pi = -f_a \Delta x$$

Se o carrinho se desloca com **velocidade constante**:

$$\Delta K = 0$$

E a força resultante é nula, pois **não há aceleração**:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{F} + \vec{f}_a$$

Isto é consistente com o fato de que o trabalho total ser nulo: $W_c + W_a = 0$.

(O trabalho da **força peso e normal** são nulos, pois o **deslocamento** é perpendicular a estas forças!)

Energia Cinética e Trabalho em 2D e 3D

(Força resultante constante com 3 componentes)

Se uma força resultante \vec{F} constante provoca um deslocamento $\Delta\vec{s}$ numa partícula de massa m , o trabalho de \vec{F} é:

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

Para cada componente:

$$F_x \Delta x = \frac{1}{2} m v_x^2 - \frac{1}{2} m v_{0x}^2$$

$$F_y \Delta y = \frac{1}{2} m v_y^2 - \frac{1}{2} m v_{0y}^2$$

$$F_z \Delta z = \frac{1}{2} m v_z^2 - \frac{1}{2} m v_{0z}^2$$

Então:

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{s} = F_x \Delta x + F_y \Delta y + F_z \Delta z = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - \frac{1}{2} m (v_{0x}^2 + v_{0y}^2 + v_{0z}^2)$$

Ou seja:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

Trabalho de uma força variável – 1D

Seja $F = F(x)$ a força resultante que atua sobre uma partícula de massa m .

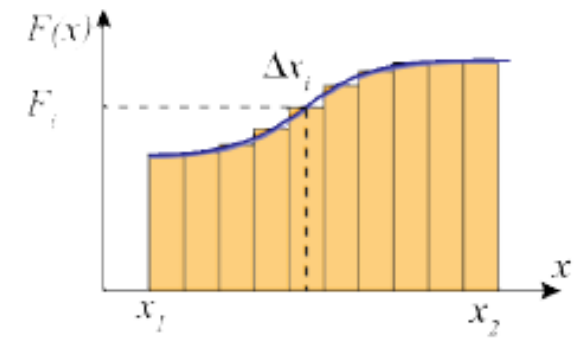
Dividimos o intervalo $(x_2 - x_1)$ em um número muito grande de pequenos intervalos Δx_i .

Então: $W = \sum_i F_i \Delta x_i$

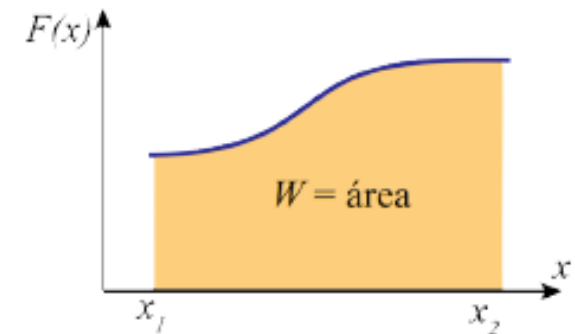
No limite, fazendo $\Delta x_i \rightarrow 0$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx$$

(O trabalho é a área sob a curva de força em função da posição!)



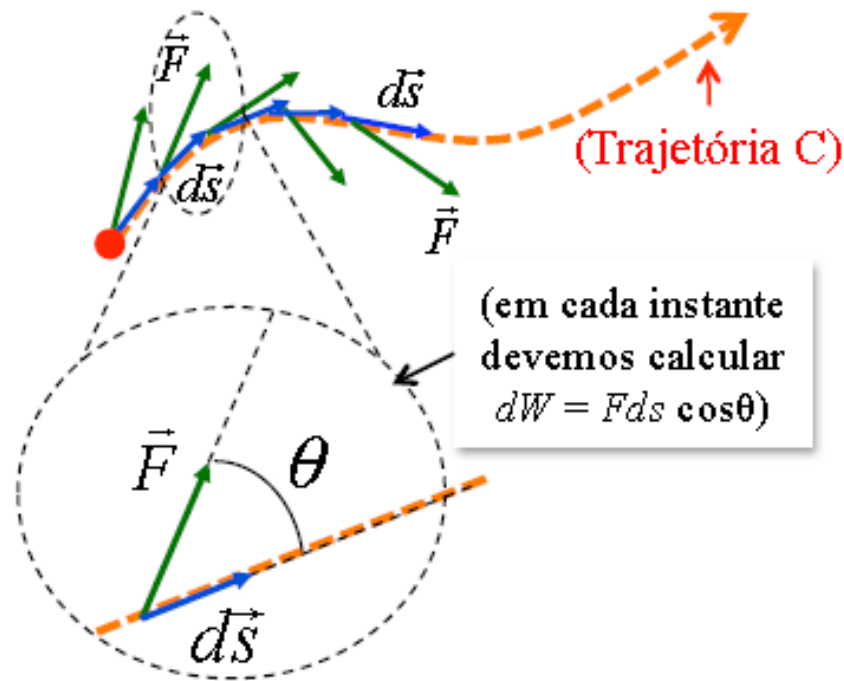
$\Delta x_i \rightarrow 0$



Trabalho de uma força variável – 3D

O trabalho infinitesimal dW de uma força F agindo em uma partícula ao longo de um deslocamento infinitesimal $d\vec{s}$ é:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$



Portanto o **trabalho total**, W , será a **soma** de todos estes **trabalhos infinitesimais**, dW , ao longo da trajetória descrita pela partícula.

Esta soma leva um nome e um símbolo especial; é a **Integral de Linha**

$$W = \int_C dW = \int_C \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_C F ds \cos \theta$$

Se $\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$

e

$$F_x = F_x(x); F_y = F_y(y); F_z = F_z(z)$$



$$W = \int_{x_i}^{x_f} F_x dx + \int_{y_i}^{y_f} F_y dy + \int_{z_i}^{z_f} F_z dz$$

Teorema Trabalho – Energia Cinética

Substituindo a **força** pela segunda lei Newton teremos:

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx = m \int_{x_i}^{x_f} \frac{dv}{dt} dx = m \int_{x_i(v_i)}^{x_f(v_f)} dv \frac{dx}{dt} = m \int_{v_i}^{v_f} v dv$$

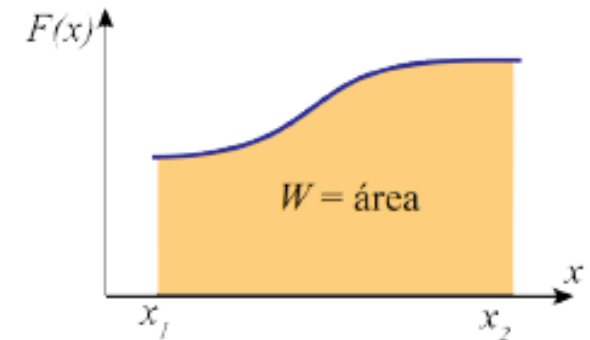
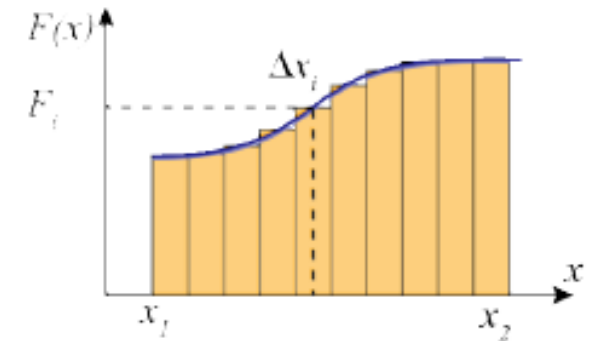
$$= \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) = \Delta K$$

Ou seja:

$$W = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) = \Delta K$$

Este é o **teorema do trabalho-energia cinética**:

“O trabalho da força resultante que atua sobre uma partícula entre as posições x_1 e x_2 é igual à variação da energia cinética da partícula entre estas posições”.



$$W = \text{área} = \Delta K$$

Potência

Até agora não nos perguntamos sobre **quão rapidamente** é realizado um trabalho!

A potência P é a razão (taxa) de realização do trabalho por unidade de tempo:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Unidade SI:
J/s = watt (W)

Considerando o trabalho em mais de uma dimensão: $dW = \vec{F} \cdot d\vec{r}$

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt}$$

O segundo termo é a velocidade. Então:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Potência e Trabalho

100 m rasos × Maratona

P. A. Willems *et al*, The Journal of Experimental Biology 198, 379 (1995)

100 m rasos

Trabalho realizado sobre o corredor:

$$2,1 \times 10^4 \text{ J}$$

Potência:

$$P_{100} = \frac{2,1 \times 10^4 \text{ J}}{10 \text{ s}} = 2100 \text{ W}$$

Maratona (42.142 m)

Trabalho realizado sobre maratonista:

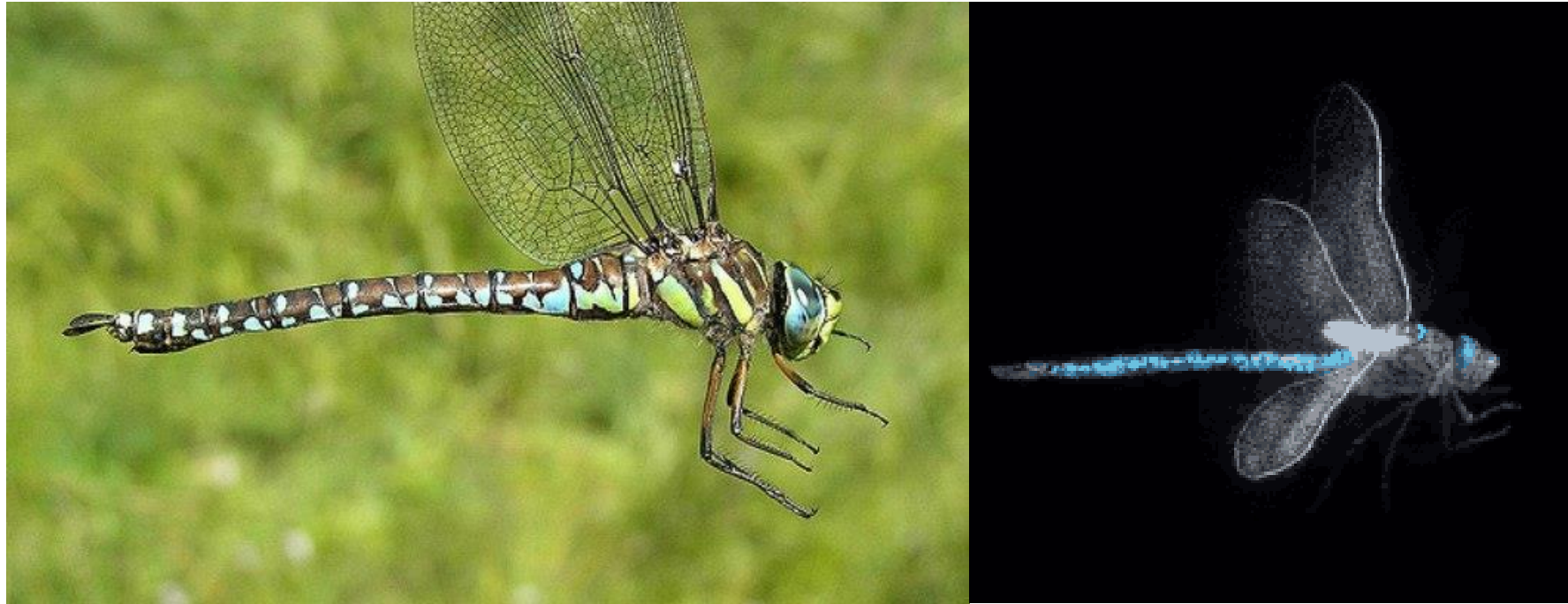
$$5,9 \times 10^6 \text{ J}$$

Potência:

$$P_{100} = \frac{5,9 \times 10^6 \text{ J}}{2 \times 60 \times 60 \text{ s}} = 816 \text{ W}$$

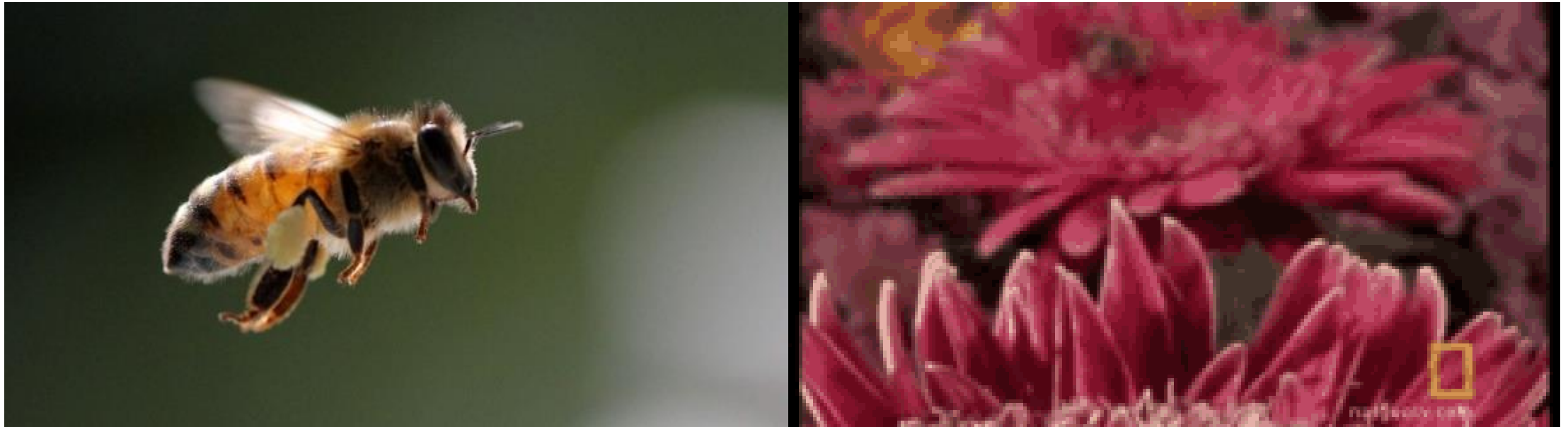
Voo de Insetos

Insetos que pairam no ar...



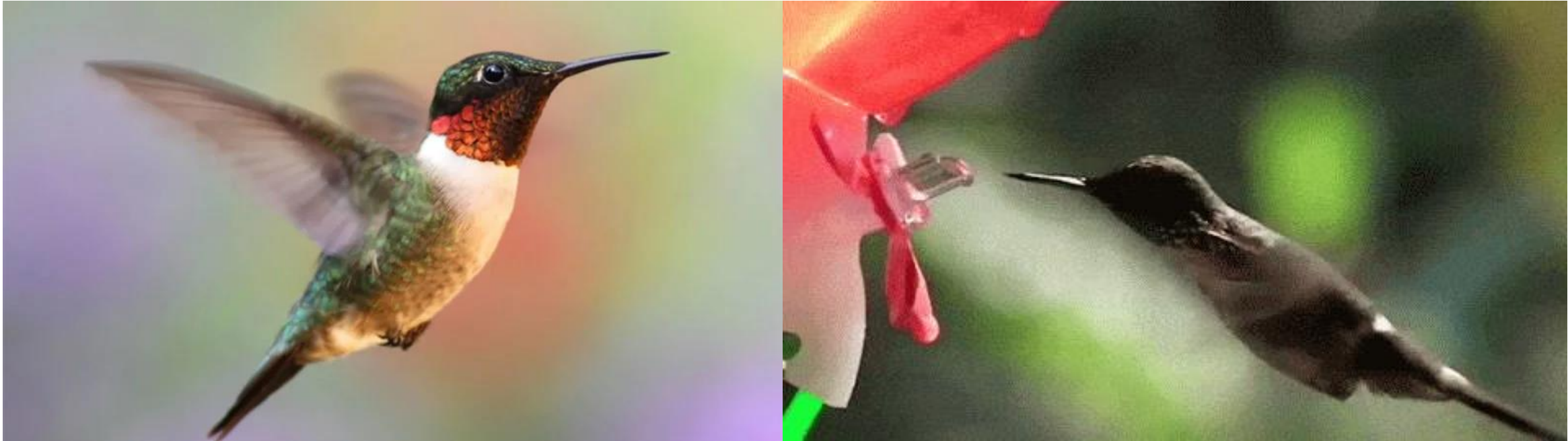
Voo de Insetos

Insetos que pairam no ar...

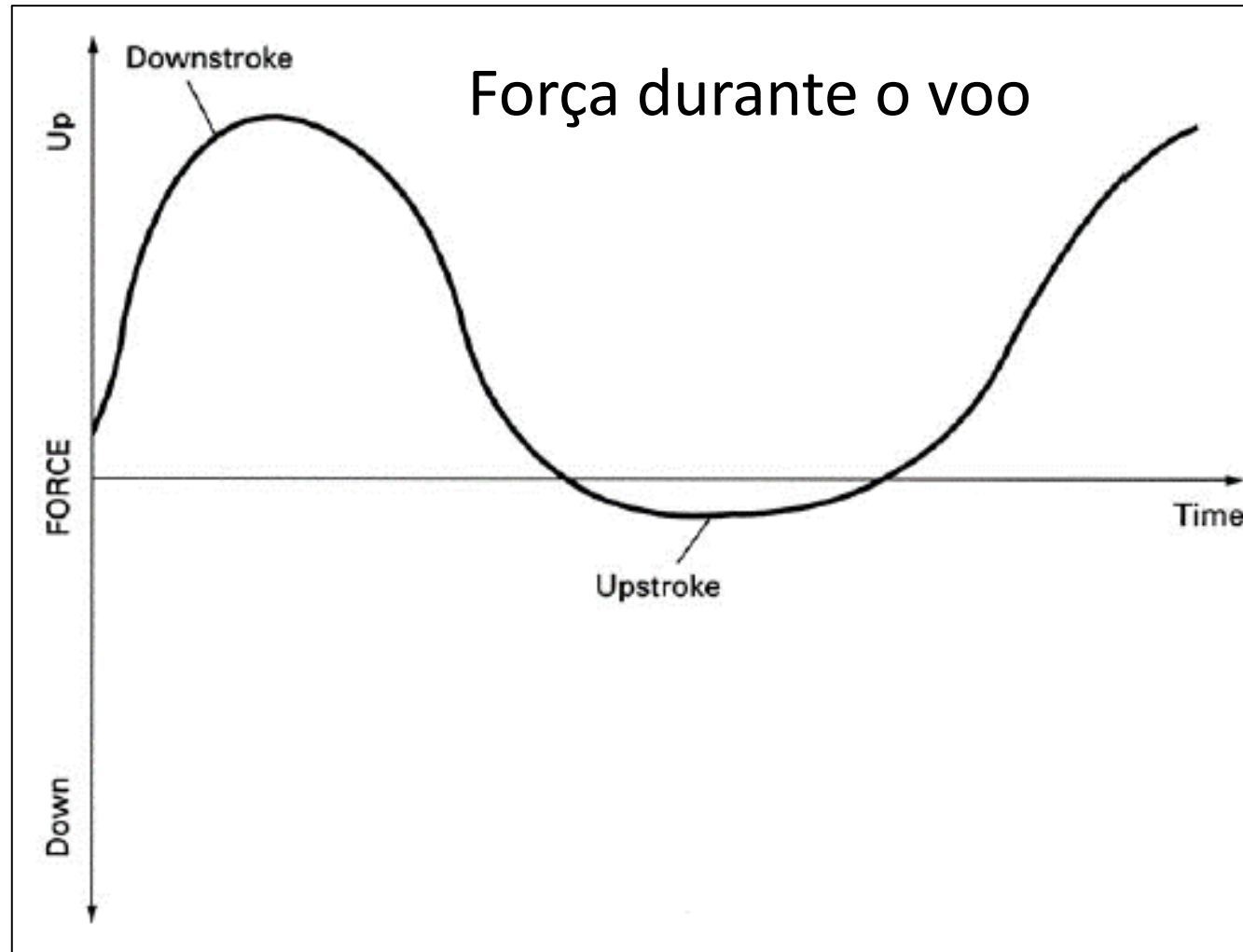


Voo de Insetos

Nem só insetos pairam no ar...



Voo de Insetos – Um pouco de Física...



As asas são necessárias para fornecer estabilização lateral, bem como a força de elevação necessária para superar a força da gravidade. A força de elevação resulta do movimento descendente das asas. À medida que as asas empurram o ar circundante, a força de reação resultante do ar nas asas força o inseto a subir. As asas da maioria dos insetos são projetadas para que, durante o movimento ascendente, a força nas asas seja pequena.

Voo de Insetos – Um pouco de Física...

O inseto cai uma distância h (onde h é da ordem de 0,1 mm)

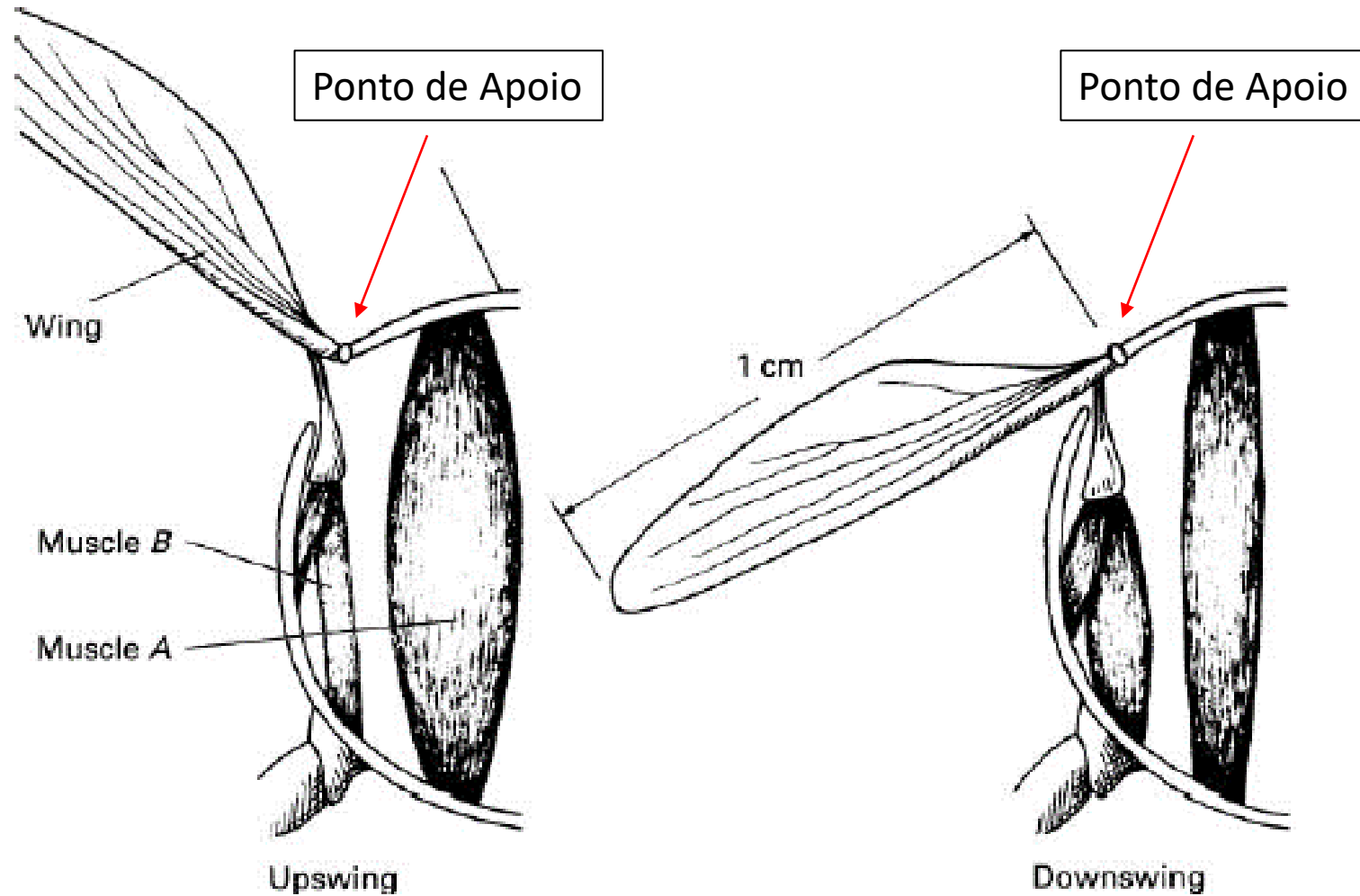
$$h = \frac{g(\Delta t)^2}{2} \quad \longrightarrow \quad \Delta t^2 = \left(\frac{2h}{g}\right)^{1/2} = 4,5 \times 10^{-3} s$$

O período será $T = 2\Delta t = 9 \times 10^{-3} s$

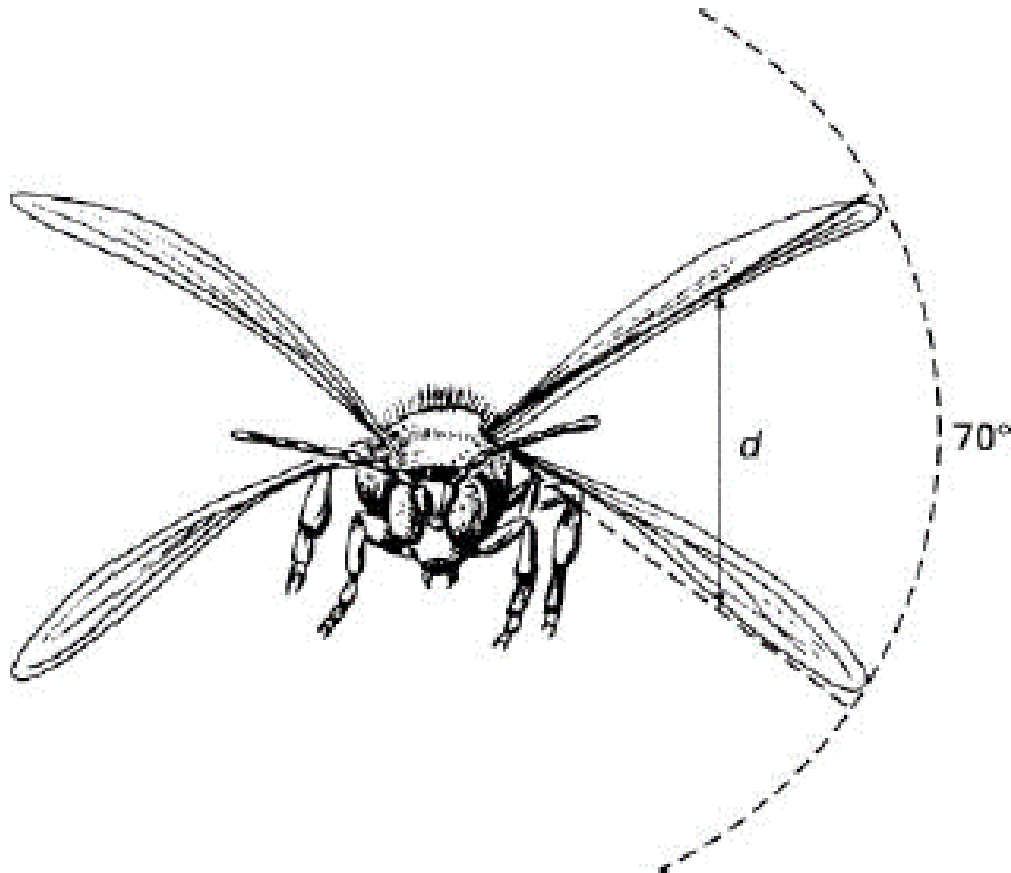
E a frequência $f = \frac{1}{T} = 110 s^{-1}$

Ou seja, 110 batidas de asa por segundo! Para restaurar a posição vertical do inseto durante o curso da asa descendente, a força média ascendente, \mathbf{F} no corpo do inseto deve ser igual ao dobro do peso do inseto.

Voo de Insetos – Um pouco de Física...



Voo de Insetos – Um pouco de Física...

Potência necessária para pairar no ar ($m = 0,1 \text{ g}$)

$$\text{Trabalho} = F \times d = 2Pd$$

$$\text{Trabalho} = 2 \times 0,0001 \times 9,8 \times 0,0057$$

$$\text{Trabalho} = 1,12 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Energia necessária para elevar 0,1 mm

$$E = mgh = 0,98 \times 10^{-7} \text{ J}$$

Para 110 batidas de asas por segundo:

$$P = 1,12 \times 10^{-5} \times 110 = 1,23 \times 10^{-3} \text{ W}$$

Voo de Insetos – Um pouco de Física...

Para onde foi a energia? Energia Cinética...

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{onde} \quad I = \frac{ml^3}{3} \quad l = 1 \text{ cm e } m = 10^{-3} \text{ g (duas asas)}$$

$$\omega_{max} = \frac{v_{max}}{l/2} \quad v_{média} = \frac{d}{\Delta t} = 127 \text{ cm/s} \quad v_{max} = 254 \text{ cm/s}$$

$$\omega_{max} = \frac{254}{l/2} \quad E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 = 0,43 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Como temos movimento para cima e para baixo

$$E_c = 0,86 \times 10^{-5} \text{ J}$$

Conservação da Energia

➤ Lei da Conservação da Energia:

"A energia total de um sistema isolado é sempre constante"

Ecosistema (sistema aberto)

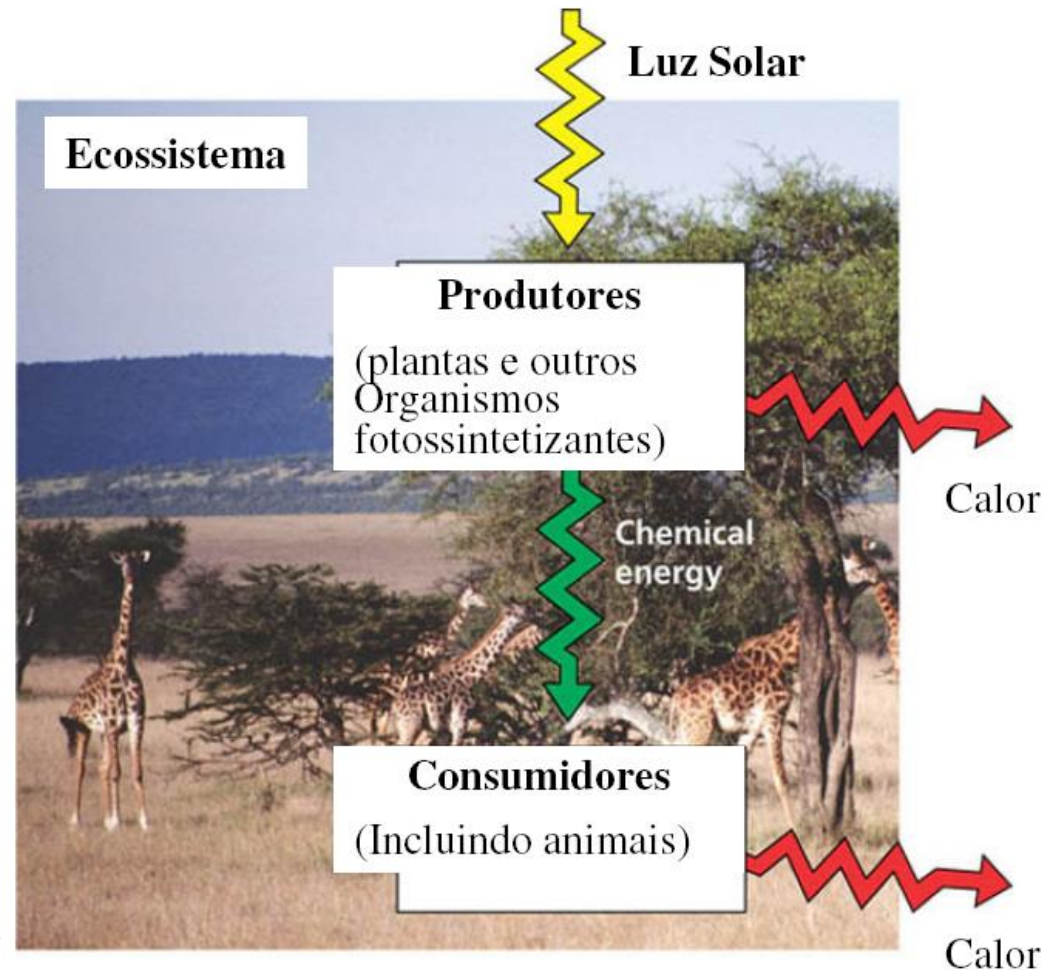
A dinâmica de um ecossistema:

- 1) **ciclo dos nutrientes;**
- 2) **fluxo de energia da luz solar** para os produtores e consumidores.

Produtores são as plantas e outros organismos (convertem a luz em energia química) e consumidores são organismos como os animais que alimentam-se dos produtores ou consumidores.

Fotossíntese

Prof. Dr.



Conservação da Energia nos Seres Vivos

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W$$

Calor trocado com o meio ambiente

Trabalho Externo realizado pelo corpo

Eficiência com que o corpo humano realiza trabalho

$$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta E}$$

Potência Média com que o corpo realiza trabalho

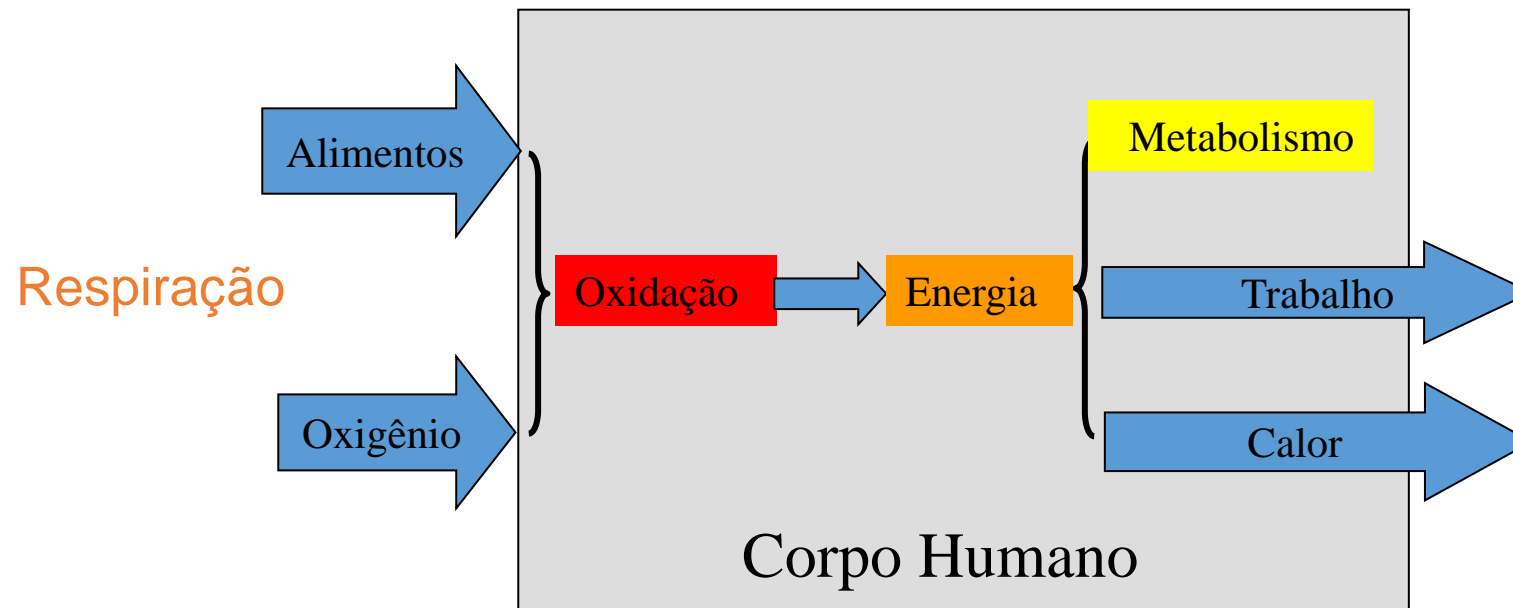
$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \bar{P}$$

Energia e Seres Vivos

Energia nos seres vivos

Taxa Metabólica (metabolic rate) – É a taxa de consumo energético total do organismo em suas atividades vitais

Taxa metabólica basal – TMB - (basal metabolic rate - BMR) – É a taxa metabólica de uma pessoa em repouso.



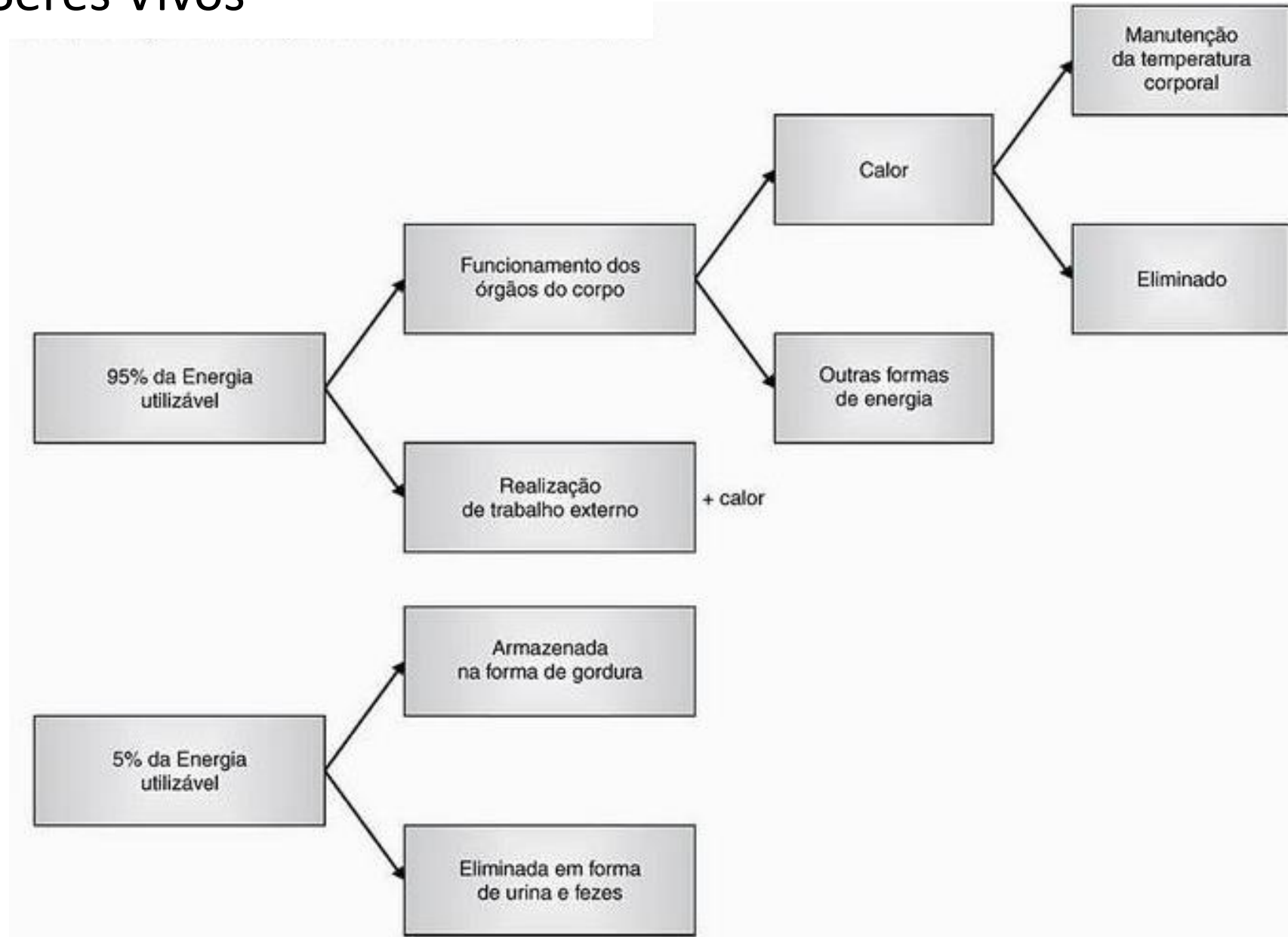
Energia e Seres Vivos



Energia típica de alguns constituintes dos alimentos.

	$E_v \times 10^3$ (J/litro)	$E_{qc} \times 10^7$ (J/kg)	E_g (kcal/g)
Carboidratos	22,2	1,71	4,1
Proteínas	18,0	1,72	4,1
Gorduras	19,7	3,89	9,3
Dieta típica	20,1 – 20,9	—	—

Energia e Seres Vivos



Energia e Seres Vivos

Tabela 1: Valor calórico de alguns alimentos em kcal/g

Carboidratos	4,1 (v. médio)
Proteínas	4,1 (v. médio)
Gordura	9,3 (v. médio)
abacate	1,67
Açúcar	4,00
Amendoim torrado	5,73
Arroz	1,09
Batata cozida	0,93
Big-mac	2,98
Cerveja	0,42
Chocolate	5,28
Corn flakes	3,93
Frango assado	1,60
Leite integral	0,64
Maçã	0,58
Manteiga	7,20
Ovos	1,63
Toucinho	9,30
Uvas	2,90
Vinho	0,85

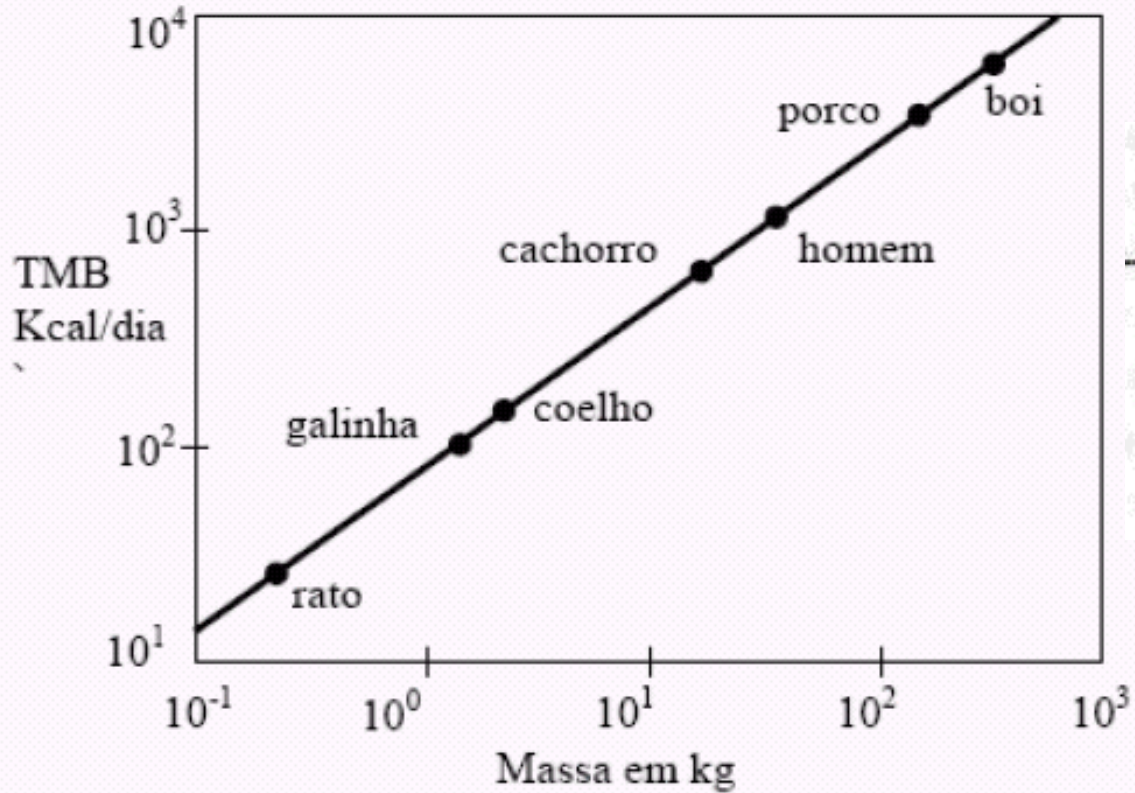
Energia para manutenção do funcionamento de órgãos
 25% → esqueleto e coração
 19% → cérebro
 10% → rins
 27% → fígado e baço

Tabela 2 : Taxa metabólica e consumo de oxigênio de alguns órgãos (em repouso)

Órgão	Potência consumida em repouso		Consumo de O ₂ (ml/min)	Porcentagem da TMB
	kcal/min	W		
Fígado e Baço	0,33	23	67	27
Cérebro	0,23	16	47	19
Esqueleto	0,22	15	45	18
Rim	0,13	9	26	10
Coração	0,08	6	17	7
Outros	0,23	16	48	19
total	1,22	85	250	100

Se você ingeriu 2500 kcal em um dia, em repouso, quanto desse consumo se transformou em gordura?
 1g de gordura = 9kcal

Energia e Seres Vivos



Razão de metabolismo Basal (TMB/massa)

Animal	Massa (kg)	RMB [kcal/(d · kg)]
Cavalo	441	11,3
Porco	128	19,1
Homem	64,3	32,1
Cão	15,2	51,5
Camundongo	0,18	212

Energia e Seres Vivos

	Massa (kg)	Razão média no consumo de O ₂ (ml/min)	Potência consumida TMB (kcal/min)	Potência por kg (kcal/min) /kg RMB	Contribuição como % da TMB
Fígado e baço	—	67	0,33	—	27
Cérebro	1,40	47	0,23	0,16	19
Músculos esqueléticos	28,00	45	0,22	$7,9 \times 10^{-3}$	18
Rim	0,30	26	0,13	0,43	10
Coração	0,32	17	0,08	0,25	7
Restante	—	48	0,23	—	19
	—	250	1,22	—	100

TMB: Taxa de Metabolismo Basal; RMB: Razão de Metabolismo Basal

Energia e Seres Vivos

Tabela 4 : Consumo de energia e oxigênio

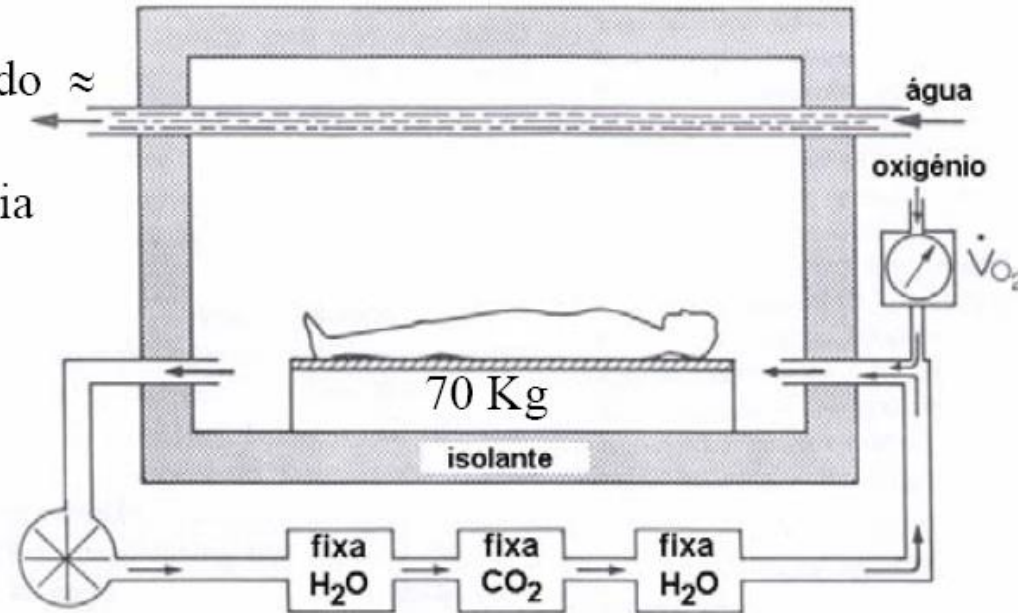
Atividade	Potência consumida		Consumo de oxigênio (litros/min).
	Kcal/min	W	
Dormindo	1,2	83	0,24
Sentado em repouso	1,7	120	0,34
Andando devagar	3,8	265	0,76
Passeando de bicicleta (12km/h)	5,7	400	1,14
Tremendo	6,1	425	1,21
Nado de peito	6,8	475	1,36
Subindo escada (116degr./min)	9,8	685	1,96
andando de bicicleta (20km/h)	10	700	2,00
Correndo de bicicleta profissionalmente	26,5	1855	5,30

Energia e Seres Vivos

À despesa energética de um indivíduo (1) em repouso físico e mental, (2) em jejum há 10-18 h (3) e num ambiente com temperatura agradável chama-se **taxa de metabolismo basal (BMR)**.

Como medi-la?

Calor
libertado \approx
1700
Kcal/dia



O₂
consumido
 \approx 16 moles
/ dia
(350 L)

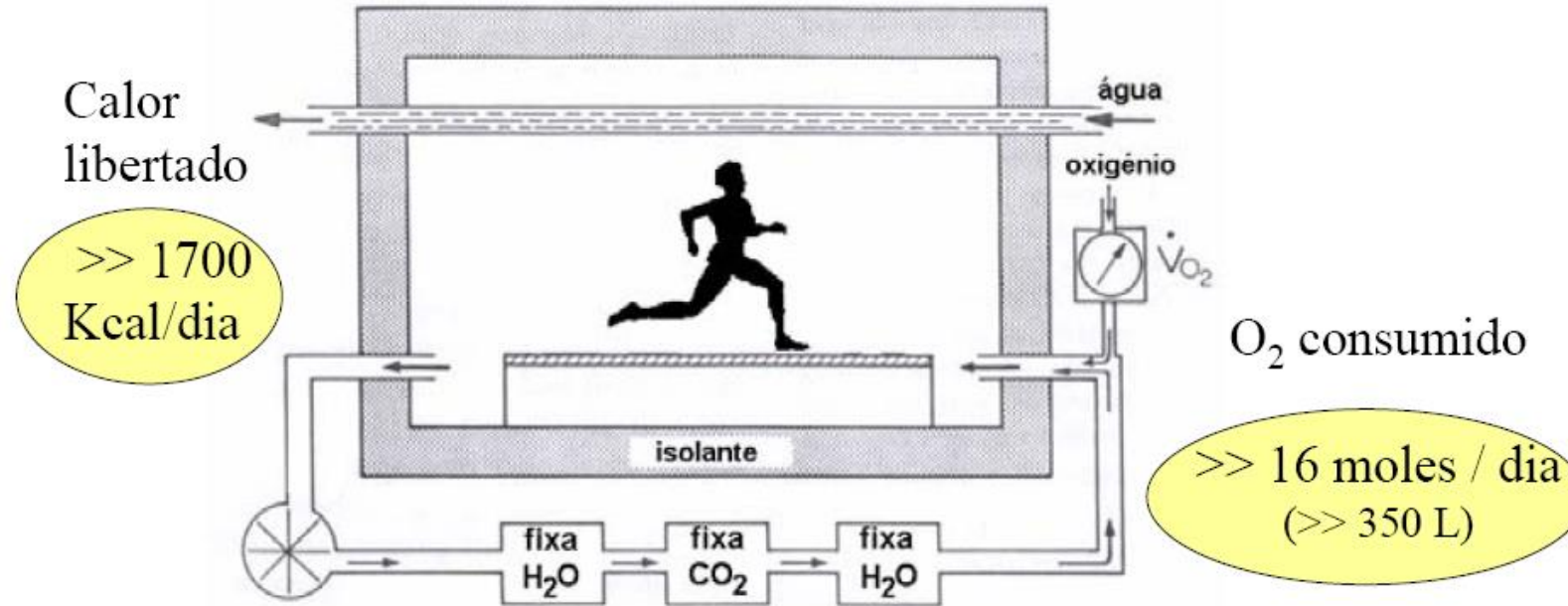
Porque é que, ao contrário do automóvel, o ser vivo continua a libertar calor e a consumir O₂ quando está parado?

Energia e Seres Vivos



Energia e Seres Vivos

Que acontece à **despesa energética** quando um indivíduo aumenta a sua **actividade física**?



A maioria dos indivíduos têm uma **taxa metabólica máxima** (máximo esforço físico durante um período curto de tempo) que é $\approx 10 \times$ BMR.

A despesa energética tem assim um 2º componente:
despesa energética = BMR

+ **despesa energética associada à actividade física voluntária**

Energia e Seres Vivos

$$\eta = \frac{W_u}{W_t} = \frac{P_u}{P_t}$$

Eficiência – É a fração útil da energia total utilizada. A tabela abaixo dá a eficiência energética (em %) de algumas atividades do corpo humano e de algumas máquinas. Por definição,

Qual a eficiência de um atleta que ingere 3000 kcal em alimentos e realiza $2,5 \times 10^6$ J de trabalho útil?

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Eficiência energética média em % de algumas atividades e de algumas máquinas	
Corpo	
Andar de bicicleta	20
Nadar na superfície	2
Nadar submerso	4
Empurrando alguma coisa	3
Motor a vapor	17
Motor a gasolina	38
Usina nuclear	35
Usina a carvão	42

Energia e Seres Vivos – Troca de Calor

Radiação

Convecção

Evaporação

Radiação - Lei de Stefan-Boltzmann

$$P = \epsilon \sigma T^4 A$$

$$\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Para o corpo humano:

$$\epsilon \approx 1$$

$$P_e - P_a = K_e A \epsilon (T_p - T_a)$$

$$K_e \approx 5,0 \frac{kcal}{m^2 h K}$$

Energia e Seres Vivos – Troca de Calor

Radiação

Convecção

Evaporação

Perda de calor por convecção:

$$\Delta P_c = K_c A (T_p - T_{ar})$$

A: área do corpo exposta

$$K_c \approx 2,5 \frac{kcal}{m^2 h K}$$