

Energia

Iuda D. Goldman vel Lejbman

April 18, 2017

O que é energia?

Antes de descrevermos as variadas formas de manifestação de energia, precisamos primeiro pensar sobre *o que é energia*. Observando a Natureza notamos que há uma lei que se manifesta em *todos* os fenômenos: a *conservação de energia*.

Independentemente do que seja essa grandeza, associamos a ela um número com a estranha propriedade de sempre se conservar. Isso quer dizer que temos algum tipo de Lego que nunca se perde. Se contarmos o número de peças, sempre será o mesmo. Pode ser que alguma vez o número seja menor, mas não porque ele não existe mais. Depois de um tempo vamos encontrá-lo escondido em algum canto do chão ou no meio da mochila. Ou se esse número aumentar: depois de um tempo investigando esta estranha exceção vamos observar que alguém trouxe seu pacote de Lego e juntou ao anterior. Mas aí podemos contar estes dois conjuntos e vemos que sempre terão o mesmo número de peças. Até que um dia que observamos que o número de peças diminuiu. E vemos que outra pessoa pegou algumas dessas peças e colocou em seu jogo de Lego. Agora considerando estes três pacotes, vemos novamente que o número é uma constante.

Até que notamos o seguinte fato: o número de *todas* as peças de Lego sempre será o mesmo. Se diminuir, provavelmente perdemos a peça em algum canto da casa, mas o número é o mesmo. Ou existe alguma outra edição de Lego para onde há um intercâmbio de peças. O que observamos é que nosso desconhecimento de todas as edições lançadas e de todas as peças fabricadas pode levar erroneamente a um número diferente de peças. Só no final do dia sempre vemos que este número se conserva. A peça não pode desaparecer, nem quebrar, nem nada.

Até aqui estamos atuando na fenomenologia do número de peças de Lego. É um *modelo* que observamos e que se mostra tanta consistente com um grande número de observações que consideramos uma *Lei da Natureza*. Isto é energia.

Formas de Energia

Feitas estas considerações, o grande problema consiste em descobrir quais as *forças* ou *energias* estão envolvidas no problema e sua formu-

lação matemática. Estas questões por si são suficientemente complicadas. Vamos agora discutir brevemente a formulação matemática de algumas formas de energia.

Energia Potencial Gravitacional

Como já bem conhecido, a energia potencial gravitacional é

$$E_g = mgh \quad (1)$$

Vamos supor que colocamos um objeto em um determinado lugar e assim que o soltamos ele começa a acelerar. Sem conhecer a natureza da força sendo aplicada, o que podemos deduzir? A unidade de energia, no SI, é $N \cdot m$, ou seja, $\mathbb{F} \cdot \mathbb{D}$, então num primeiro momento é razoável supor que liberada quando o objeto percorre uma distância h sob aplicação dessa força é $E_p = a_0 Fh + b_0$, onde a_0 é uma constante adimensional responsável por escalar (ou calibrar) a intensidade da energia e b_0 uma constante com dimensão de energia, correspondente a *energia intrínseca* armazenada. Vamos escolher um referencial conveniente, de forma que $b_0 = 0$. Então podemos dizer que a forma da energia potencial é

$$E_p = F \cdot h \quad (2)$$

Se considerarmos um deslocamento infinitesimal, a variação da energia será então:

$$dT = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (3)$$

Logo, a variação em um dado percurso será:

$$\Delta T = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$

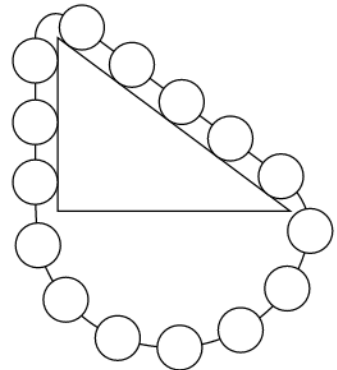
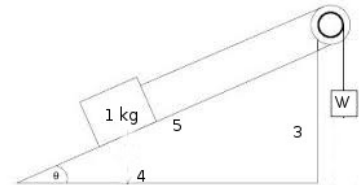
No caso da força gravitacional, temos justamente que

$$\int_{z_1}^{z_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_{z_1}^{z_2} -mgdz = -mg(z_2 - z_1) \quad (5)$$

Vamos agora usar o problema conhecido por epitáfio de Stevinus para, através de argumentos de conservação de energia, deduzir qual a massa de um bloquinho para segurar outro de 1 kg num plano inclinado (figura 1).

Podemos então substituir esse problema por uma cadeia de bolinhas (figura 2). É claro que a parte não apoiada no plano se autosustenta. Então, a parte de 3 bolinhas, está equilibrando a de 5!. Ou seja, o peso tem que ser $3/5\text{ kg}$.

Este tipo de problema deu origem ao que chamamos de trabalho virtual e é aplicável em inúmeras situações.



Energia no Corpo Humano

Pode ser demonstrado numericamente que o consumo do corpo humano, em repouso, é de $\approx 100 \text{ W}$ *consumo basal*. Uma quantia da ordem de 20 W corresponde ao consumo do cérebro humano, valor este que se mantém aproximadamente constante, independentemente da atividade física exercida.

Já numa caminhada com algum vigor, o consumo energético é da 360 kcal em 1 h . Isto é equivalente a 100 cal/s ou 420 W . Como o rendimento do corpo humano é da ordem de 25% , o *trabalho útil* é da ordem de 105 W , que é basicamente o trabalho devido ao deslocamento do centro de gravidade e do atrito.

Claro, como o problema da conservação de energia, devemos verificar se todos os blocos estão sendo levados em consideração. Por exemplo, existem perdas de calor por irradiação, condução e convecção que elevam este valor. Para se ter uma idéia, o corpo irradia da ordem de 500 W/m^2 . Claro, o isolamento através de roupas diminui constantemente estes valores de dissipação energética. Esta perda de energia por irradiação permite justamente a detecção por sensores de infravermelho, que é usado não só nos detectores utilizados pelos policiais, como nos aparelhos de reconhecimento facial e corporal, como o *Kinect*.

De qualquer forma, trabalho mais intenso e exposição ao frio exigem suplementos alimentares. A ONU recomenda uma dieta de $\approx 1800 \text{ kcal/dia}$.

Mamíferos de grande porte apresentam semelhanças energéticas com seres humanos. No caso de peixes o consumo varia, principalmente devido a variação de oxigênio dissolvido na água: a 10 m de profundidade temos da ordem de 100 mg/L de oxigênio, valor este semelhante ao presente em montanhas de 5000 m de altitude. Num certo sentido, *incas* respiravam quantidades de oxigênio semelhantes a de tubarões a 10 m do nível do mar.

A reserva energética de animais é constituída principal de lipídeos, que são longas cadeias de ácidos carboxílicos. Estes se convertem em carboidratos (glicose), numa cadeia de inúmeras etapas. A oxidação dos lipídeos é o que fornece energia para o organismo. Proteínas também são consumidas, principalmente em grandes intervalos sem consumo de alimentos. Como exemplos de liberação energética, temos para gorduras $\approx 9 \text{ kcal/g}$ e para proteínas $\approx 4 \text{ kcal/g}$.

O oxigênio entra no corpo humano via respiração e é transportado pela hemoglobina (figura 3).

Voltando ao cérebro, lembrando que ele consome da ordem de $\approx 20 \text{ W}$ e possui $\approx 10^{11}$ neurônios, temos que o consumo médio por neurônio é $\approx 1,6 \times 10^9 \text{ eV/neurônio} \approx 1 \text{ GeV/neurônio}$.

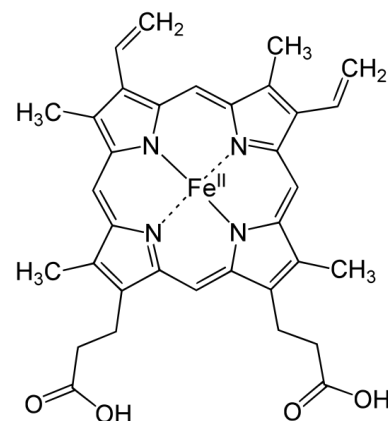
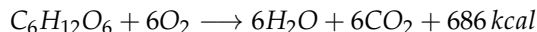


Figure 1: Estrutura da molécula da hemoglobina.

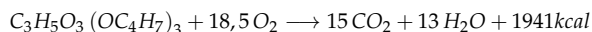
Por fim, vamos considerar a energia liberada pelo principal processo de oxidação no organismo, o da glicose.



Dado que ocorre a liberação de 686 kcal/mol de glicose, teremos a liberação de $3,81 \text{ kcal/g}$.

Problemas

- Um molécula grama de glicose, $C_6H_{12}O_6$, libera $0,686 \times 10^6 \text{ cal/mol} \cdot \text{g}$ na combustão. Pergunta-se:
 - Tomando $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$, qual o valor em *Joules/g*?
 - Qual o valor por molécula, em *eV*, considerando que $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ e $N_A = 6 \times 10^{23}$ átomos?
 - Convencionou-se tomar a energia basal como 100 W . Qual a necessidade de consumo de glicose em 1 dia?
- Qual a quantidade de oxigênio necessária para a combustão de 18 g de glicose:
 - Em g?
 - Em Litros, nas condições ambientes? $t = 27^\circ\text{C}$, $T = 273 + t$, $P = 10^5 \text{ Pa}$, $R = 8,31 \text{ J/K}$, $PV = nRT$
- Qual a quantidade de CO_2 liberada na utilização de 500 g de glicose pelo organismo?
- Na oxidação da gordura



são liberadas 1941 kcal por mol de gordura.

- Quais as massas moleculares das quatro moléculas envolvidas na reação?

Para essa reação, calcule:

- o valor calórico;
 - a energia liberada por litro de O_2 ;
 - o número de litros de O_2 consumido por grama de gordura;
 - o número de litros de CO_2 produzido por grama de gordura;
 - o quociente respiratório ($\mathcal{R}$).
- Os salmões que desovam no Lago Stuart, nos EUA, partem do Oceano Pacífico, nadando cerca de 1000 km contra a correnteza do Rio Fraser. Eles se deslocam apenas $2,1 \text{ km}$ em uma hora devido à correnteza do rio, mas sua velocidade efetiva é cerca de $4,2 \text{ km/h}$. Nadando com essa velocidade, um salmão absorve cerca de $0,5 \times 10^{-3} \text{ kg/h}$ de O_2 para cada quilo de sua massa. Durante essa viagem eles não se alimentam. A energia liberada pela oxidação de gordura e de proteína é $3,3 \text{ kcal}$ por grama de O_2 usado.
 - Calcule a energia total metabolizada por um salmão de 3 kg nessa viagem.
 - Suponha que os salmões, ao nadarem, oxidem 2 g de gordura para cada grama de proteína oxidada. As energias contidas em 1 g de gordura e em 1 g de proteína são, respectivamente, 9 kcal e 4 kcal . Quantos gramas de gordura e de proteína são gastos nessa viagem?
 - Que percentagem de seu peso é perdida por um salmão de 3 kg ?

6. O Sol libera energia a uma taxa de aproximadamente $3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Na Terra, o fluxo incidente I_e será de aproximadamente $1,4 \text{ kW/m}^2$. Neste problema iremos investigar se existem outros planetas no sistema solar que poderiam suportar algum tipo de vida baseada em água como encontrada na Terra. Considere um planeta orbitando a uma distância d do Sol (e considere que d_e é a distância da Terra em relação ao Sol). Nessa distância o fluxo de energia do Sol é $I = I_e (d_e/d)^2$, já que ele cai com o inverso do quadrado da distância.

Vamos considerar o raio R deste planeta e supor que ele absorve uma fração α da energia solar incidente, refletindo o resto de volta ao espaço. O planeta intercepta um disco de luz solar de área πR^2 , então absorverá uma potência total de $\pi R^2 \alpha I$. O raio da Terra é da ordem de 6400 km .

O Sol está brilhando há muito tempo, mas a temperatura da Terra tem sido estável: o planeta está em equilíbrio estável. Para isso acontecer, a energia absorvida tem que ser reirradiada de volta ao espaço tão rápido quanto absorve. Como a taxa que um corpo radia depende da temperatura, podemos usar a temperatura média do planeta a partir da fórmula

$$\text{flux de calor irradiado} = \alpha \sigma T^4$$

Nesta fórmula σ vale $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (constante de Stefan-Boltzmann). Esta fórmula fornece a taxa de perda de energia por unidade de área de um corpo negro (no caso, a Terra). Não é necessário entender a derivação da fórmula, como sim suas unidades.

- (b) Utilizando esta fórmula, encontre a temperatura média na superfície terrestre e compare com o valor atual de 289 K .
 - (c) Utilizando esta fórmula, encontre quão distante do Sol um planeta do tamanho da Terra pode estar, em função de d_e e ainda ter temperatura acima da de congelamento.
 - (d) Utilizando esta fórmula encontre quão próximo do Sol um planeta do tamanho da Terra pode estar, em função de d_e e ainda ter temperatura abaixo da de vaporização.
 - (e) Procure as distâncias das órbitas dos planetas do Sistema Solar. Quais deles são candidatos a vida baseada em água, utilizando este critério simplificado?
7. Em 1858 J. Waterston encontrou um jeito de estimar o tamanho molecular a partir de propriedades macroscópicas dos líquidos, através da comparação entre a tensão superficial e o calor latente de vaporização.

A tensão superficial da água, Σ , é o trabalho por unidade de área necessária para criar mais superfície livre. Para defini-lo, imagine um bloco quebrando ao meio. Os dois pedaços terão duas novas superfícies. Seja Σ o trabalho necessário para criar estas novas superfícies, dividido pela área total. Isto é análogo para a tensão superficial da água.

O **calor latente de vaporização** da água, Q_{vap} é a energia por unidade de volume que precisamos colocar na água (um pouco abaixo do ponto de ebulição) para convertê-la completamente em vapor (um pouco acima do ponto de ebulição). Ou seja, o calor latente de vaporização é a energia necessária para separar cada molécula uma das outras.

Imagine um líquido como uma matriz cúbica de N moléculas por centímetro em todas as direções. Cada molécula tem uma força de interação fraca com seus seis vizinhos. Suponha que seja necessário uma energia ϵ para quebrar uma dessas ligações químicas. Então a vaporização completa de 1 cm^3 de líquido necessita que todas as ligações químicas sejam quebradas. A energia correspondente será $Q_{vap} \times (1 \text{ cm}^3)$.

Em seguida considere uma molécula da *superfície* do fluido. Ela terá apenas cinco ligações químicas - o vizinho mais próximo acima da molécula não está presente (suponha uma interface fluido-vácuo). Então, para criar mais área superficial é necessário que se quebre algumas dessas ligações químicas. A energia necessária para isso, dividida pela área adicional criada, é Σ .

- (b) No caso da água, $Q_{vap} = 2,3 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$, com $\Sigma = 0,072 \text{ J/m}^2$. Estime N .
- (c) Assumindo que as moléculas formam um pacote fechado, estime aproximadamente o diâmetro molecular.
- (d) Que estimativa para o número de Avogadro você obtém?
8. Um ciclista da *Tour de France* se alimenta muito. Se a alimentação diária total foi queimada e convertida em calor liberaria 8000 kcal . Pelas três ou quatro semanas de corrida a variação de seu peso é desprezível, menos de 1%. Então, a entrada e saída de energia tem que se igualar.
- Vamos primeiro analisar o trabalho mecânico feito pelo ciclista. Uma bicicleta é incrivelmente eficiente. A perda de energia por fricção interna, incluindo os pneus, pode ser desprezada. O gasto energético contra a resistência do ar é significativo, da ordem de 10 MJ por dia. A cada dia o ciclista corre por 6 horas.
- (b) Compare as 8000 kcal consumidas com os 10 MJ de trabalho realizado. Algo está faltando! A energia restante poderia se desviar devido a mudança de altitude durante a corrida? Independentemente de como responde em (a), vamos supor que em um particular dia de corrida não há variação de altitude, então devemos procurar em outro lugar para onde foi a energia restante. Nós desprezamos outra parte da equação de energia: o ciclista perde *calor*. Parte dele é irradiada. Outra parte esquenta o ar quando ele inspira. Mas a maior parte vai para outro lugar.
- O ciclista *bebe muita água*. Ele não precisa desta água para seu metabolismo - ele está produzindo água quando queima o alimento. Em vez disso, boa parte da água sai de seu corpo como vapor. A energia térmica para vaporizar a água aparece no problema anterior.
- (c) Quanto água deveria ser consumida para que o gasto energético se equilibre? É razoável?
- Agora vamos voltar para os 10 MJ de trabalho mecânico realizado pelo ciclista em um dia.
- (d) A resistência do ar para uma força como essa é uma força em sentido contrário ao movimento e com magnitude $f = Bv^2$, onde B é uma constante. Medimos B através de um túnel de vento e obtivemos $1,5 \text{ kg/m}$. Se simplificarmos o problema, supondo que durante um dia de corrida o ciclista percorre com velocidade constante, qual é esta velocidade? É razoável?