



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física



GUIA DE ORIENTAÇÃO PARA PROFESSORES: OS CONCEITOS DE TRABALHO, ENERGIA E PSEUDOTRABALHO NO ENSINO MÉDIO

Leandro Fernandes Batista

Material instrucional associado a dissertação de Mestrado de Leandro Fernandes Batista apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador(es):

Antônio Carlos Fontes dos Santos

Lúcia Helena Coutinho

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2017

1- INTRODUÇÃO

Este guia foi planejado para professores de Física do Ensino Médio com o objetivo de orientá-los a desenvolver uma nova abordagem dos conceitos de energia e trabalho a fim de promover um ensino mais coerente com a vivência dos estudantes e prepará-los para debater criticamente os fenômenos energéticos que os cercam.

Professor de Física do Ensino Médio, nós sabemos que os conceitos de trabalho e energia são indispensáveis aos estudantes e que são trabalhados ao longo dos três anos do ciclo escolar, entretanto, com esse guia não queremos exigir uma didática específica para tratar desses conceitos, mas sim apresentar novos conceitos e alternativas de ensino que facilitem o aprendizado do estudante.

Para sua compreensão, esse guia pretende tratar do seguinte:

- A limitação do Teorema da Energia cinética.
- Como ocorre a transferência de energia em sistemas?
- A primeira Lei da Termodinâmica como verdadeira identidade das relações de energia.
- O trabalho realizado por forças internas.
- O Teorema do Pseudotrabalho.
- Outras formas de energia: Energia química, biológica, Entalpia e Energia Livre de Gibbs.

Ressaltamos ao leitor que os tópicos acima serão abordados a seguir como forma independente, isto é, serão trabalhados em seções separadas.

1.1 – A limitação do Teorema da Energia Cinética

Após desenvolver os conceitos de trabalho e energia com os estudantes, é tradicional dos professores continuar com a metodologia de definir o Teorema da

Energia Cinética. Nesse momento é preciso ter cuidado e ciência da limitação do próprio teorema. Algumas bibliografias enunciam o teorema da seguinte forma:

“A variação de energia cinética de um corpo entre dois instantes é medida pelo trabalho da força resultante entre os instantes considerados.”

Matematicamente o enunciado acima pode ser vislumbrado como:

$$E_C - E_{C0} = \tau_R$$

$$\frac{m.V^2}{2} - \frac{m.V_0^2}{2} = F_r \cdot \Delta S. \quad (1.1)$$

Em que F_r é a resultante das forças, V_0 é a velocidade inicial, V é a velocidade após percorrer o deslocamento ΔS e m é a massa.

A expressão matemática do Teorema da Energia Cinética é constantemente abordada no Ensino Médio, sendo que é típico ser demonstrado por professores através da Equação de Torricelli. O desenvolvimento feito é:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S$$

$$\frac{m}{2}(V^2) = (V_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S) \cdot \frac{m}{2}$$

$$\frac{m.V^2}{2} = \frac{m.V_0^2}{2} + m \cdot a \cdot \Delta S$$

$$\frac{m.V^2}{2} - \frac{m.V_0^2}{2} = F_r \cdot \Delta S.$$

Em relação a essa prática desenvolvida com os estudantes em sala de aula devemos ter cuidados, pois a forma como se conduz a abordagem do teorema pode levar a conclusões falhas, fazendo com que o teorema não possa ser aplicado.

A primeira observação que deve ser feita é que a Equação de Torricelli é válida para o caso de aceleração constante, enquanto o Teorema da Energia Cinética não se limita apenas a movimentos uniformemente variados. Logo, ao propor a demonstração a partir da equação de Torricelli estamos induzindo o estudante a limitar a aplicação do teorema a casos exclusivos de movimentos com aceleração constante.

Outro ponto a que se deve ter cuidado é em relação ao trabalho da força resultante que segundo o teorema é a responsável pela modificação da energia cinética de um corpo. A principal intenção em reproduzir o teorema conforme mostrado anteriormente é criar a ideia de que são agentes externos os responsáveis pelas modificações energéticas internas em um corpo. Ocorre que nem sempre a variação de energia interna em um corpo é fruto de um trabalho realizado por uma força externa. Para compreender melhor o quanto é delicado tratar desse assunto com os estudantes, considere a seguinte questão que foi retirada da prova do ENEM no vestibular de 2015:

(ENEM-2015) Uma análise criteriosa do desempenho de Usain Bolt na quebra do recorde mundial dos 100 metros rasos mostrou que, apesar de ser o último dos corredores a reagir ao tiro e iniciar a corrida, seus primeiros 30 metros foram mais velozes já feitos em um recorde mundial, cruzando essa marca em 3,78 segundos. Até se colocar o corpo reto, foram 13 passadas, mostrando sua potência durante a aceleração, o momento mais importante da corrida. Ao final desse percurso, Bolt havia atingido a velocidade máxima de 12 m/s.

Supondo que a massa do corredor seja igual a 90kg, o trabalho total realizado nas 13 primeiras passadas é mais próximo de:

A) $5,4 \times 10^2$ J B) $6,5 \times 10^3$ J C) $8,6 \times 10^3$ J D) $1,3 \times 10^4$ J E) $3,2 \times 10^4$ J

De acordo com o gabarito oficial do ENEM a questão deve ser resolvida a partir do Teorema da Energia Cinética. Ao aplicar o teorema na questão encontramos:

$$\tau_{Resultante} = \Delta E_{Cinética}$$

$$\tau_R = E_C - E_{C0}$$

$$\tau_R = \frac{m.V^2}{2} - \frac{m.V_0^2}{2}$$

$$\tau_R = \frac{90.12^2}{2} - \frac{90.0^2}{2}$$

$$\tau_R = \frac{90.144}{2} - 0$$

$$\tau_R = 6480 J$$

$$\tau_R = 6,5 \times 10^3 J$$

Note que o objetivo da questão do ENEM é usar o contexto, mas, no entanto, não aborda o fenômeno físico de forma adequada. No caso da questão enunciada e seu desenvolvimento, percebe-se o vício do emprego do Teorema da Energia Cinética sem perceber a sua real extensão.

Observe que a questão pede o trabalho total, mas no enunciado não são citadas as forças que agem sob o atleta durante a fase de corrida. A princípio, um estudante pode citar que as forças externas que atuam sobre o atleta são: Peso, Normal, Atrito e Resistência do ar, mas note que nenhuma delas realiza trabalho. Certamente um dos erros mais frequentes nesse vestibular e outros problemas similares é considerar que a força de Atrito realiza trabalho e seja a responsável pela variação de energia cinética. Contudo nesses mesmos problemas devemos observar que o ponto de aplicação da força não realiza deslocamento e por consequência não há como realizar trabalho. Logo, se o atrito não é o responsável por “dar” energia ao atleta, então como podemos explicar a variação de energia cinética?

A incoerência retratada no exercício decorre da aplicação equivocada do Teorema da Energia Cinética, que não pode ser usado em casos particulares de fenômenos físicos. No caso do Bolt existe a particularidade de ele possuir grau de liberdade e sua energia de movimento poder ser explicada através de transformações energéticas que ocorrem internamente no seu corpo. Dessa maneira, perceba que é o trabalho realizado por forças internas de Bolt que promovem a variação de energia cinética do centro de massa do atleta, mas note também que parte do trabalho realizado por essas forças promovem a variação da energia cinética das demais partes constituintes de Bolt (braços e pernas, por exemplo). Em outras palavras,

podemos resumir que o Teorema da Energia Cinética não pode ser aplicado neste fenômeno, pois o trabalho total é exclusivamente devido a forças internas (não mensuráveis na questão) e estas causam uma variação de energia cinética total no atleta (centro de massa + partes móveis).

A questão do ENEM centrada em um fenômeno cotidiano deve realçar o questionamento do leitor sobre quando devemos ou não devemos aplicar o Teorema da Energia Cinética. Primeiramente devemos compreender que o teorema está limitado a ser aplicado a partículas ou corpos rígidos que podem assumir o comportamento de partículas dentro do fenômeno retratado. Isso significa que quando tratamos o fenômeno com um sistema ou corpo extenso (como o caso de Bolt) o teorema deve ser revisto e complementado.

Para que não haja falhas no processo de ensino e aprendizagem, sugerimos que antes de o professor lidar com o desenvolvimento do teorema seja feita a seguinte diferenciação dos conceitos de partículas e sistemas de partículas com a finalidade de aplicar a forma correta dos conhecimentos físicos aos fenômenos naturais do cotidiano.

- 1) Partícula:** É uma abstração feita para representar um único ente que, em virtude do fenômeno, tem dimensões desprezíveis, isto é, suas dimensões não influenciam na descrição do fenômeno. A partícula, por ser um elemento único, não interage com partes internas com o propósito de não alterar o fenômeno que será estudado.

- 2) Sistema de partículas:** Um sistema de partículas é definido como um conjunto de entes que compõe uma região e se separa do restante do universo pelas suas fronteiras. Desta forma, um sistema pode interagir com agentes externos através das bordas do espaço que compreendem, e podem interagir internamente entre as partículas que constituem o sistema.

Ao estabelecer essa diferença para o aluno, ele se torna consciente de que a dinâmica aplicada a uma partícula não é semelhante à aquela aplicada a um corpo sólido ou sistema de partículas. Ao tratar de fenômenos que envolvam sistemas é preciso modificar as leis físicas aplicadas a uma partícula.

1.2 – Como lidar com a transferência de energia em sistemas?

Após estabelecer a diferença e conceituar partículas e sistemas devemos nos preocupar em como devemos abordar as situações físicas de nosso interesse. No caso de um sistema, aconselhamos como primeiro passo para solução do problema a identificação do fenômeno dentro do fenômeno analisado e, posteriormente, a classificação dele como sistema isolado ou sistema não isolado.

Por vezes o primeiro passo pode não ser simples devido as vastas características que um sistema pode assumir. Para facilitar a compreensão do leitor e do estudante, sugerimos como exemplo as seguintes qualidades para a identificação de um sistema:

- Um único objeto;
- Dois objetos interagindo;
- Uma coleção de vários objetos interagindo;
- Um objeto deformável, tal como uma bola de borracha ou uma amostra das moléculas de um gás;
- Um objeto girando, tal como uma roda;
- Uma região do espaço, possivelmente deformável, tal como o volume de um cilindro de motor de automóvel acima do pistão.

O importante é perceber que as qualidades citadas anteriormente e usadas para identificar um sistema não são únicas, mas que são fundamentais para o estudante compreender que os sistemas podem assumir múltiplas formas de acordo com o fenômeno que se deseja analisar. Logo, um sistema pode ser, por exemplo, o corpo humano em movimento, como no caso do Bolt quando mencionamos a questão do ENEM.

Embora esteja claro que um sistema não tenha uma forma definida, suas dimensões são relevantes para os problemas que envolvem a transferência de energia. Todo sistema tem como característica o fato de possuir fronteiras cuja função é separar a região interna do meio externo. Note, com isso, que a partir da superfície escolhida para ser a fronteira que segrega as regiões, a região interna poderá se comportar de forma diferente de acordo com a sua composição. Assim, a forma como

a energia é distribuída ao ser transmitida para região interna irá depender das particularidades que cada sistema possui.

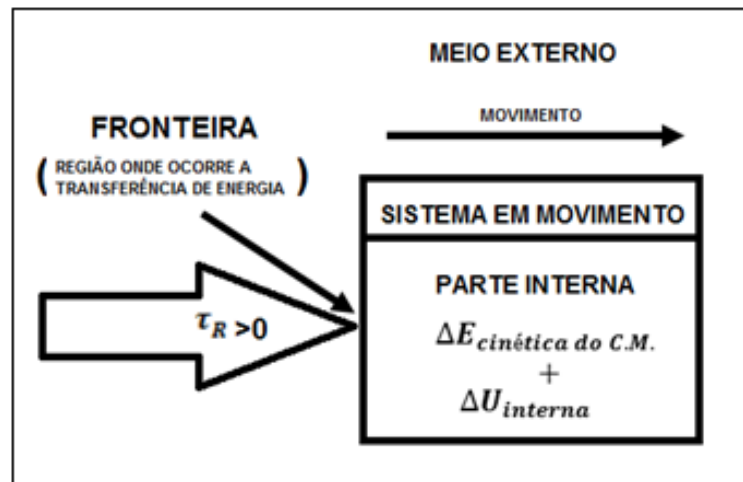
Os mecanismos que envolvem a transferência de energia entre o meio externo e a parte interna de um sistema são mais complexos de analisar se comparados ao caso de uma partícula. Ao se considerar o caso de transmissão de energia para uma partícula não é necessária a preocupação com a região interna, pois quando a energia é recebida de um agente externo na forma de trabalho, a partícula por definição não pode interagir com outras partículas. Portanto, para conservar a energia que recebeu, só resta alterar seu estado de movimento. Assim, o Teorema da Energia Cinética pode ser aplicado na forma como é convencionalmente visto, pois o trabalho realizado por uma força externa faz com que toda energia seja integralmente convertida em energia cinética para translação da partícula.

Para tratar dos processos energéticos que envolvem sistemas de partículas é preciso considerar o estado desse conjunto. Isso significa que a primeira abordagem deve ser identificar a natureza do fenômeno e assim de forma apropriada escolher os limites que separam a parte interna e o meio externo. Uma vez que o sistema tenha sido identificado, é importante determinar se o mesmo será classificado como isolado ou não isolado.

O que irá diferenciar se um sistema será classificado como isolado ou não isolado é a entrada ou saída de energia através da superfície que o delimita. No caso de sistemas isolados a principal característica é a conservação da energia dentro do sistema. Ao dizer que a energia é conservada dentro do sistema, não estamos afirmando que a mesma se mantém de forma imutável, pelo contrário, o processo é dinâmico e a energia poderá se converter em várias modalidades de modo a manter sempre a sua quantidade constante.

Nos sistemas não isolados, há passagem de energia do meio externo para o interno (ou vice-versa) fazendo com que as partículas que constituem a parte interna modifiquem o seu estado de movimento. Em outras palavras, no caso de uma força externa realizar trabalho, a energia irá fluir através da fronteira modificando a energia cinética de cada partícula que pertence à região interna. Diferentemente do caso de uma partícula, a energia recebida na forma de trabalho pelo sistema faz com que internamente cada partícula adquira energia de movimento em direções aleatórias. Importante frisar que para casos em que existem inúmeras partículas em movimento

dentro do sistema, o conveniente é tratar o fenômeno em relação ao seu centro de massa. Ao fazer isso, percebe-se do ponto de vista macroscópico que o centro de massa translada e assim qualquer observador no meio externo irá atribuir ao objeto uma energia cinética. Em contrapartida, do ponto de vista microscópico sabe-se que não é toda energia vinda do meio externo que será transformada em energia de movimento para o centro de massa. Assim, podemos concluir que nestas situações o Teorema da Energia Cinética não poderá ser aplicado e que a energia transferida para o interior do sistema será convertida em outras modalidades de energia, como, por exemplo, energia térmica ou química. Podemos compreender todo mecanismo que envolve a transferência de energia em sistema a partir da figura abaixo.



1.3 – A primeira Lei da Termodinâmica como verdadeira identidade das relações de energia

Um outro ponto que deve ser esclarecido com o propósito de não comprometer o conceito de trabalho e energia é a identificação do Teorema da Energia Cinética como uma expressão que não é essencialmente uma verdadeira identidade das relações de energia.

O Teorema da Energia Cinética pode ser desenvolvido de modo mais geral e sem limitá-lo ao caso clássico do movimento uniformemente variado a partir da Segunda Lei de Newton. Para vislumbrar esse desenvolvimento podemos considerar o movimento unidimensional de uma partícula na direção do eixo x, que sofre a ação

de uma força $F(x)$ entre os intervalos x_1 e x_2 . Nesta situação, podemos calcular o trabalho da seguinte forma:

$$\tau_r = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx. \quad (1.2)$$

Caso a força $F(x)$ seja a resultante das forças que atuam sobre a partícula, podemos escrever a Segunda Lei de Newton como:

$$F(x) = m \cdot a = m \frac{dv}{dt}. \quad (1.3)$$

Substituindo o valor da força na equação do trabalho pela Segunda Lei de Newton teremos:

$$\begin{aligned} \tau_r &= \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \\ \tau_r &= \int_{x_1}^{x_2} m \frac{dx}{dt} dv. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Como $v = \frac{dx}{dt}$, teremos:

$$\begin{aligned} \tau_r &= \int_{v_1}^{v_2} m v dv = m \int_{v_1}^{v_2} v dv \\ \tau_r &= \frac{m \cdot v_2^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\tau_r = \Delta E_c.$$

É importante o leitor observar que apesar de o desenvolvimento estabelecer um vínculo entre a energia cinética e trabalho por meio de equações dinâmicas, não se pode cometer o equívoco de aplicar o teorema sem alguns cuidados com as suas restrições. A forma como o teorema foi elaborado a partir de equações da dinâmica

terá sempre aplicabilidade a corpos que possam se comportar como partículas durante o fenômeno, e assim sua aplicação a sistemas não poderá ser feita.

A razão pela qual existem restrições ao seu uso decorre primeiramente das premissas estabelecidas para sua dedução. Ao tratar o desenvolvimento a partir da proposição da força resultante, perde-se a informação da atuação das forças no fenômeno. Pela definição de força resultante, entende-se que é um modelo físico em que as forças atuantes num sistema são substituídas por uma única que cause os mesmos efeitos. Contudo, ao se generalizar todas as forças do sistema a uma única para calcular o trabalho, implicitamente é perdida a informação sobre o deslocamento de cada força. Ocorre que por vezes não é trivial mensurar o deslocamento criado por uma força, o que torna difícil o cálculo do trabalho. Em sistemas, por exemplo, que possam sofrer deformações por ações de forças externas, não é garantido que o deslocamento produzido pela força seja igual ao deslocamento do centro de massa do sistema, entretanto a variação de energia cinética sofrida pelo centro de massa requer informações sobre o deslocamento do centro de massa.

O segundo problema que o leitor precisa se ater é que a expressão que relaciona trabalho e energia não pode ser deduzida a partir da dinâmica. Ao trocar a ênfase do fenômeno e vislumbrá-lo como um sistema é necessário reconhecê-lo não mais pelos conhecimentos da dinâmica, mas sim aplicar as leis da termodinâmica.

Quando se propõe analisar a transferência de energia em objetos ou sistemas em que suas partes podem interagir internamente, é necessário introduzir o conceito de energia interna. A partir de definições apropriadas de trabalho e energia interna é possível articular a Primeira Lei da Termodinâmica e chegar ao Princípio da Energia Cinética.

Importante salientar que o estado de um objeto ou sistema pode sofrer transformações de acordo com alterações internas que são medidas pelo valor de suas variáveis intrínsecas, chamadas de variáveis de estado. Dessa forma, ao estudar a evolução de um sistema, é importante conhecer grandezas como a temperatura, pressão, volume, densidade, composição, organização no campo gravitacional, polarização magnética e elétrica. Toda alteração que ocorre nas variáveis de estado indica um processo de transformação que está alterando a energia interna do sistema.

Ao trabalhar casos mais simples de sistemas, como o modelo do gás ideal ensinado no Ensino Médio, o estudante toma conhecimento de que a energia interna

do gás é função da temperatura. Isso significa que todo processo que altere a temperatura provocará mudança na energia interna. Para exemplificar, considere o caso de compressão volumétrica de um gás em recipiente numa transformação isobárica. Neste exemplo, o professor quer ensinar ao aluno que a redução do espaço onde o gás está contido facilita o aumento da agitação térmica e isso por sua vez faz elevar a temperatura e modificar a energia interna no sistema. Um detalhe sutil nesse caso é que a energia transmitida para o interior do sistema é fruto de um agente externo.

Do ponto de vista conceitual, é essencial perceber que existe um vínculo dinâmico entre essas partes, e que além disso se pode medir a quantidade de energia trocada pelo meio externo e recebida pelo interior do sistema. Em outras palavras, o vínculo estabelece uma relação direta entre as duas regiões, isto é, toda energia que entra no sistema por meio de trabalho é convertida em energia interna. Assim, concluímos que há conservação entre a quantidade fornecida por meio de trabalho e armazenada no sistema como energia interna. É a partir dessa sequência de raciocínios que obtivemos a ideia primitiva de conservação da energia (enunciada como Primeira Lei da Termodinâmica). Assimilada a ideia de conservação, pode-se também fazer o estudante entender que para o estado de equilíbrio de um gás, o mesmo não pode sofrer transformações energéticas repentinas a fim de aumentar ou diminuir a energia interna sem o auxílio de agentes externos. É importante ressaltar também que no caso específico da compressão do gás, a energia entra no sistema através de trabalho (não é necessariamente o único meio) realizado sobre o sistema e que esse trabalho transfere tanta energia ao sistema quanto for a variação de volume (compressão de volume) sofrida a partir de uma força aplicada. Por último, perceba que todo raciocínio discutido nesse parágrafo a respeito das transformações energéticas envolvendo o gás, envolve a peculiaridade de não poder ser deduzido matematicamente, mas pode ser abordado e explicado por induções através da observação direta do fenômeno.

Se no exemplo anterior houvesse a troca do modelo gasoso por um objeto que pudesse sofrer deformações (compressão ou expansão) seria intuitivo pensar em um desenvolvimento semelhante. Apesar do caso retratado pelo gás reproduzir modelo mais simples para análise de sistemas, pode-se de forma análoga obter resultados satisfatórios em relação a corpos que sofram qualquer tipo de deformação. Se por

hipótese um corpo com características de sistema sofre a ação de uma força cujo objetivo é comprimir (“esmagar”) o objeto, então é esperado que esta força deforme a região que distingue as partes interna e externa. Em outras palavras, a deformação efetuada comprime a superfície, obrigando-a a adentrar no sistema, e assim por consequência, diminuir o volume interno.

Semelhantemente ao modelo do gás ideal, é razoável afirmar que com a redução do espaço interno, a agitação térmica aumente, e logo aumente também a energia interna. A diferença entre as duas proposições, é que na última a variação da energia interna precisa ser interpretada como a soma de todas as modalidades de energia que estão presentes no interior do sistema. Como estamos tratando de um sistema mais complexo do que em relação ao modelo do gás ideal, devemos perceber que as características intrínsecas ao sistema afetam a evolução (comportamento) do mesmo. Conforme dito anteriormente, existem grandezas de estado, além da temperatura, que são necessárias para analisar a evolução do sistema. Dentre essas grandezas, pode-se destacar a composição do sistema como fundamental para determinar sua evolução. Diversos materiais de composições distintas, ao serem esmagados por uma força de mesma intensidade, não irão causar transformações energéticas iguais no sistema. Materiais que são mais resistentes sofrem menor variação volumétrica e, portanto, a energia transmitida para o interior do sistema e convertida em energia interna é menor do que em comparação a materiais menos resistentes. Além disso, por se tratarem de sistemas com composições diferentes, a forma e a organização interna do mesmo, faz com que a energia transmitida pelo agente externo seja recebida e partilhada de forma diferente em cada sistema.

Ainda em relação ao exemplo anterior, tem-se num caso mais notório que a força feita com o objetivo de pressionar o objeto possa forçar o mesmo a se deformar e entrar em movimento. Nesse caso, a interpretação do fenômeno é semelhante à descrita na seção anterior quando discutimos sobre sistemas. Sendo assim, é correto afirmar que a energia cinética que o objeto adquiriu para se movimentar é uma das parcelas da energia que foi partilhada no interior do sistema a partir do trabalho realizado pela força externa. O trabalho realizado pela força contribui para a variação de energia cinética total do sistema de partículas, ou seja, isso significa que por se tratar de um sistema composto internamente de inúmeras partículas, devemos interpretar o fenômeno em relação ao seu centro de massa. Com base nos

conhecimentos de Mecânica que discutem os movimentos relativos, temos que no referencial do observador a energia cinética total do objeto será a soma da energia cinética relativa ao centro de massa (que o próprio observador enxerga o objeto se deslocar) com a energia cinética das partículas no seu movimento relativo ao centro de massa. Logo, é incorreto afirmar que a energia cinética do centro de massa, com a qual um observador vê o objeto se deslocar, é igual em quantidade à energia que foi transferida por trabalho.

Para outros casos de sistemas, é importante salientar que transferência de energia por meio de trabalho não é o único mecanismo de compartilhar energia entre as regiões externa e interna. A energia pode fluir entre as fronteiras que separam as duas regiões também através da transferência de calor. Calor e trabalho não são variáveis de estado de um sistema, mas são grandezas que as alteram e conseqüentemente mudam sua energia interna. No caso específico do calor isso ocorre, por exemplo, quando há diferença de temperatura entre as duas regiões separadas pela fronteira. O calor é transferido sempre entre duas regiões em que há diferença de temperatura. Neste caso, o calor fluirá da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Sendo assim, se consideramos que existe diferença de temperatura entre a parte interna e o ambiente externo, isso significa que a energia entrará ou sairá do sistema por meio de calor, e conseqüentemente fará com que a temperatura aumente ou diminua a fim de se chegar ao equilíbrio térmico. Em decorrência da variação da temperatura que ocorre no sistema devido à troca de calor, temos que a energia interna também se modificará. Ressalta-se que na maioria dos exercícios de mecânica as transformações são adiabáticas e, sendo assim, não há transferência de energia na forma de calor.

Para facilitar a compreensão e exemplificar o que foi dito, considere um bloco que é empurrado por meio de uma força de módulo F num plano horizontal com atrito, cujo módulo vale F_{at} . Considerando os deslocamentos relativos ao centro de massa, ao aplicar o Teorema da Energia Cinética tem-se:

$$(F - F_{at}) \cdot \Delta S_{cm} = \Delta \left(\frac{m \cdot v_{cm}^2}{2} \right). \quad (1.6)$$

Note que se em certo momento modularmos a força que empurra o bloco de modo que essa se iguale à força de atrito, teremos um trabalho total nulo, mas ainda

assim existirá movimento e energia cinética. Para que o bloco se mantenha sempre com a mesma velocidade (e assim sempre com a mesma energia cinética) é necessário que a força que empurra o bloco não pare de agir, e tenha intensidade sempre igual à força de atrito. Neste ponto, fica evidente que a força de módulo F realiza trabalho, e que essa quantidade é convertida em energia cinética, mas o que acontece com a quantidade $F_{at} \cdot \Delta S_{cm}$?

A quantidade $F_{at} \cdot \Delta S_{cm}$ não satisfaz a definição de trabalho, segundo a termodinâmica, porque a força de atrito que atua sobre a base do bloco não sofre um deslocamento ΔS_{cm} , mas sofre deslocamentos que não existem meios de se saber. Logo, o leitor pode concluir que a equação (A.6) não corresponde a uma identidade energética válida, embora seja uma relação dinâmica correta.

Neste momento queremos chamar a atenção para a abordagem apropriada desses fenômenos que deve ser feita a partir da 1ª Lei da Termodinâmica. Para tratar desse sistema devemos primeiramente identificá-lo como o conjunto formado pelo bloco e o plano. Posterior a isso podemos empregar a 1ª Lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q + \tau. \quad (1.7)$$

No nosso fenômeno podemos considerar que durante o processo não haja transferência de calor (processo adiabático, $Q = 0$) e que toda modificação energética no sistema seja fruto do trabalho realizado pela força de módulo F . A quantidade de energia transferida para o sistema devido ao trabalho desta força é dada por $\tau = F \cdot \Delta S_{cm}$ e seu recebimento muda duas componentes energéticas do sistema. Uma delas é a energia térmica interna denotada por ΔU_t e a outra é a energia cinética denotada por ΔE_c . Logo, se pode reescrever a Primeira Lei da Termodinâmica da seguinte forma:

$$\Delta U_t + \Delta E_c = 0 + F \cdot \Delta S_{cm}$$

Ou ainda:

$$\Delta U_t + \Delta \left(\frac{m \cdot v_{cm}^2}{2} \right) = F \cdot \Delta S_{cm}. \quad (1.8)$$

Repare que a equação encontrada anteriormente se assemelha com o Teorema da Energia Cinética, sendo diferente apenas pela adição do termo ΔU_t . De fato, caso fizéssemos $\Delta U_t = 0$ então isso significaria que não existiriam mais interações internas, e o sistema passaria a ser visto como uma partícula. Logo é importante observar que o Teorema da Energia Cinética é resultado da derivação da Primeira Lei da Termodinâmica.

Ainda em relação à equação anterior, pode-se fazer a seguinte mudança a fim de evidenciar a energia interna térmica:

$$\Delta U_t = F \cdot \Delta S_{cm} - \Delta \left(\frac{m \cdot v_{cm}^2}{2} \right). \quad (1.9)$$

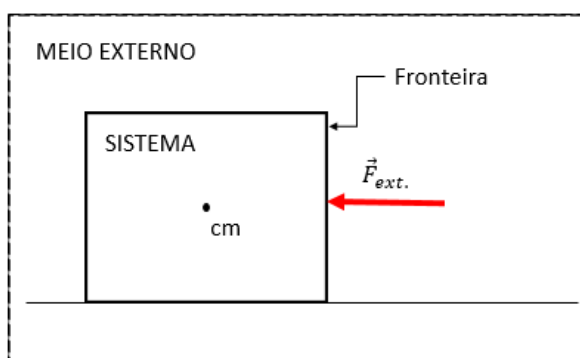
Ao colocar a equação dessa forma, é percebido que a mudança da energia térmica interna do sistema bloco e plano é igual ao trabalho realizado pela força externa F menos a variação de energia cinética do centro de massa do bloco. Se o deslocamento é feito com a velocidade constante, isto é, sem variação de energia cinética, todo trabalho realizado por F é convertido em energia térmica interna, aumentando, conforme se vê experimentalmente, a temperatura do sistema formado pelo plano e bloco.

1.4 – O Trabalho realizado por forças internas

A abordagem feita nas seções anteriores tem o objetivo de instruir o professor a tratar dos conceitos de trabalho e energia bem como o Teorema da Energia Cinética de forma mais clara e abrangente. Entretanto queremos chamar a atenção que somente compreender a limitação de tais conceitos não irá ajudar a solucionar problemas físicos do cotidiano. Para assimilar o conhecimento por inteiro é importante que o leitor se dê conta que existem outros conceitos (ferramentas) que podem ser úteis para construir um processo de ensino e aprendizado mais próximos da realidade do estudante. Um dos conceitos que podem ser debatidos em sala é em relação a forças de natureza externa ou interna ao sistema. Nesse contexto, podemos definir:

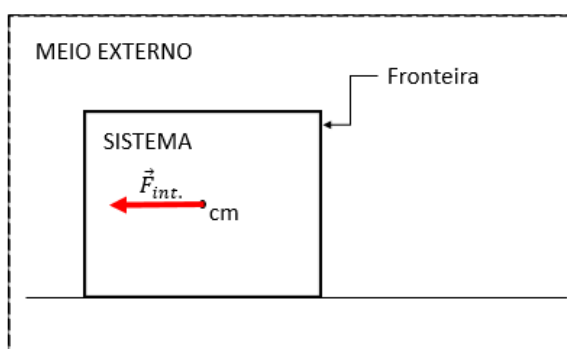
1) Forças externas

São interações feitas por corpos que estão no ambiente externo sobre o sistema, isto é, são ações feitas por corpos que se encontram do lado de fora da região delimitada pelas fronteiras do sistema.



2) Forças internas

São interações que ocorrem no ambiente interno, ou seja, são ações decorrentes de agentes (partículas) que estão localizados no lado de dentro da região delimitada pelas fronteiras do sistema.



Importante para a sequência da metodologia, é identificar no fenômeno que será estudado se há a presença de forças externas e/ou internas no sistema. Quando tomamos ciência do problema que iremos investigar e reconhecemos que ele está sujeito a ação de forças internas, então é correto presumir que estas forças possam realizar deslocamentos e conseqüentemente realizar trabalho e modificar a energia cinética do sistema. Essa percepção nos leva a retornar ao conceito de trabalho total,

na forma como surge no Ensino Médio, com a finalidade de incluir o trabalho realizado por forças internas como uma parcela que contribui para o trabalho total ($\tau = \tau_{ext} + \tau_{int}$). Com base nessa premissa é oportuno reescrever a Primeira Lei da Termodinâmica, de forma que destaque o trabalho realizado por forças internas e externas no sistema:

$$\Delta U = Q + \tau,$$

$$\Delta U = Q + \tau_{ext} + \tau_{int}. \quad (1.10)$$

A equação (A.10) tem grande significado físico, porque confirma que a energia de origem interna a um sistema pode não somente ser modificada por agentes externos (calor e trabalho externo), como também por trabalhos de forças internas. Para uma melhor compreensão desse conceito, considere um sistema hipotético que possa sofrer deformações e no qual podemos desprezar a transferência de energia na forma de calor entre as fronteiras que delimitam o sistema ($Q = 0$). Considere ainda que para esse sistema hipotético toda energia interna ΔU corresponda à energia cinética total do sistema (ΔE_c), ou seja, a energia que se manifesta internamente é a soma das energias cinéticas, sendo um referente ao centro de massa (ΔE_c^{cm}) e a outro referente ao movimento relativo das demais partículas que compõem o sistema em relação ao centro de massa (ΔE_c^{int}). Logo, para o fenômeno idealizado poderemos compreender o processo de transferência de energia da seguinte maneira:

$$\Delta E_c = \tau_{ext} + \tau_{int},$$

$$\Delta E_c^{cm} + \Delta E_c^{int} = \tau_{ext} + \tau_{int}. \quad (1.11)$$

Importante perceber que a expressão (A.11) complementa a concepção de trabalho total explorado no Ensino Médio, visto que a partir da relação anterior percebemos que a expressão do trabalho total (lado direito da equação) é generalizada de modo a contemplar, além dos trabalhos realizados por forças externas, o produzido por forças internas também.

Note também que a generalização da equação (A.11) nos permite vislumbrar três casos especiais e distintos para a equação. Esses casos são:

$$\text{Particularidades da equação do Trabalho total } (\tau) \left\{ \begin{array}{l} 1^\circ) \Delta E_c = \tau_{ext} \\ 2^\circ) \Delta E_c = \tau_{int} \\ 3^\circ) \Delta E_c = \tau_{ext} + \tau_{int} \end{array} \right.$$

O uso de qualquer uma das três equações derivadas da equação do trabalho total irá depender das características do sistema envolvidos no problema. A primeira equação ilustrada na figura ($\Delta E_c = \tau_{ext}$) é a de mais notória compreensão, pois se trata do Teorema da Energia Cinética. Conforme já discutimos, a primeira equação somente pode ser empregada quando o tratamento para fenômeno for para o caso de uma partícula.

A segunda e a terceira equações ilustradas não são vistas durante as aulas de Física do Ensino Médio, mas julgamos importante serem abordadas, pois ao usufruir de sua compreensão muitos fenômenos físicos do dia a dia se tornam mais fáceis de serem interpretados. A característica em comum das duas equações é que devem ser empregadas quando estamos lidando com um fenômeno que é considerado um sistema. Particularmente, no caso da segunda equação podemos afirmar que seu uso estará atrelado a um sistema que possui grau de liberdade ou possui autonomia para se deformar. Para ilustrar como abordar tais tipos de sistemas, podemos retomar a questão do ENEM que foi proposta no capítulo anterior. O objetivo da questão é encontrar o trabalho total, e para isso o enunciado induz o seu cálculo a partir da aplicação do Teorema da Energia Cinética. Note que conforme mencionamos no outro parágrafo, o sistema composto por Usain Bolt tem autonomia de movimento, e por isso podemos entender que toda energia de movimento de Bolt provém da realização de trabalho de forças internas. Usufruindo da Primeira Lei da Termodinâmica, e sabendo da existência de forças internas, podemos identificar a inconsistência na proposta da questão. Para vislumbrar essa dubiedade, podemos considerar o sistema como o atleta, e assim escrever a Primeira Lei da Termodinâmica:

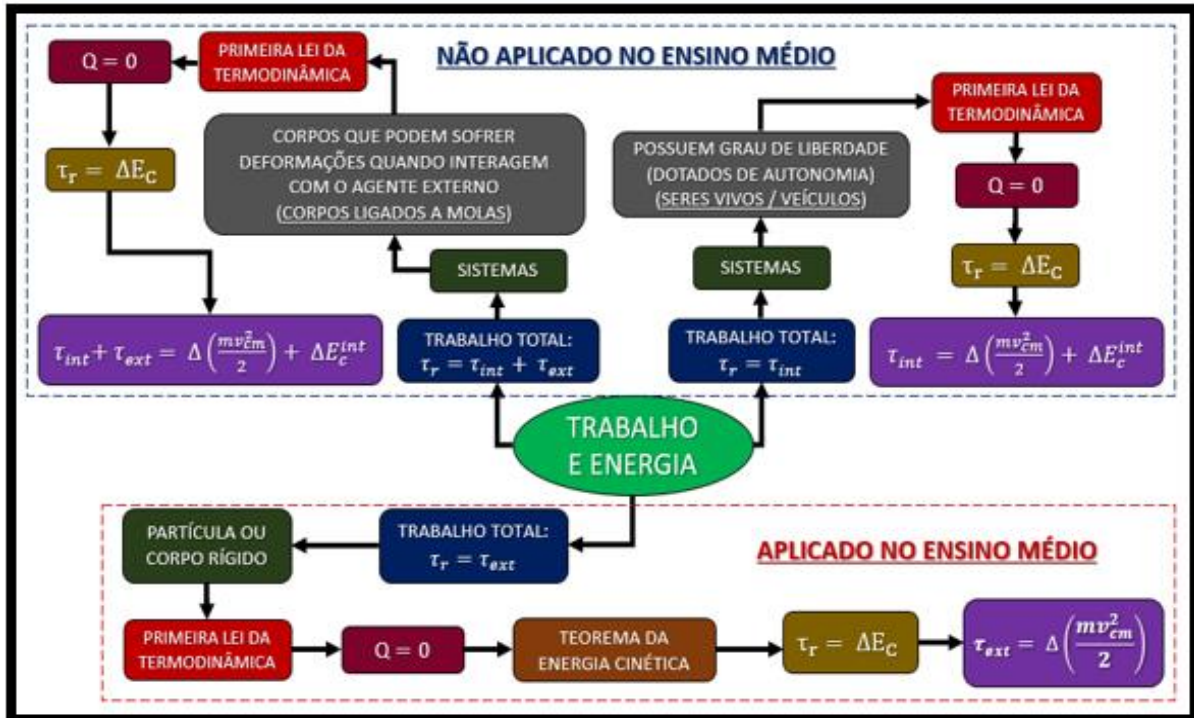
$$\Delta U = Q + \tau_{ext} + \tau_{int},$$

$$\Delta U = \tau_{int}. \quad (1.12)$$

Conforme era esperado, a variação da energia interna do sistema é consequência do trabalho realizado por forças que atuam dentro do próprio sistema. Em particular, o trabalho realizado por forças internas modificará todas as modalidades de energia que constituem a energia interna do sistema.

Para o caso da terceira equação, o seu uso está condicionado a particularidades do sistema no qual existem trabalhos sendo realizados por forças internas e externas. Diferentemente do que foi visto no último caso, a maior parte dos sistemas que recebem energia devido a trabalhos internos e externos não possuem grau de liberdade. Apesar de não possuírem autonomia para escolher como irão se movimentar, esses sistemas precisam ser deformáveis para que seja notada a presença de trabalho interno. Ao mesmo tempo, como não possuem liberdade de movimento, é preciso que agentes externos interajam com o sistema a fim de movimentá-lo, e conseqüentemente realizam trabalho. Tais sistemas não são triviais e de fácil identificação no dia a dia, mas podemos citar como ilustração um sistema composto por duas massas interligadas por uma mola. Quando uma força externa passa a agir e deslocar o sistema, percebemos que o centro de massa irá acelerar enquanto as massas irão oscilar em relação ao centro de massa devido à força elástica (força interna). Neste caso o trabalho total, composto por trabalho interno e externo, é responsável por toda a mudança na configuração, energia cinética e na energia vibracional do sistema.

Podemos sintetizar todos os conceitos que foram abordados nessa seção através de um diagrama que facilitará a compreensão e ajudará a organização de todo conhecimento proposto. Tal diagrama pode ser usado pelo professor como instrumento didático que auxilie os estudantes.



1.5 – Introduzindo o conceito do Teorema do Pseudotrabalho

Para o leitor que não está familiarizado com o Teorema do Pseudotrabalho ou Teorema do Centro de massa, podemos vislumbrá-lo a partir da integração da Segunda Lei de Newton ($\sum F_{ext} = m \cdot a_{cm}$) para um sistema de partículas em que as forças externas estão aplicadas no centro de massa.

$$\sum F_{ext} = m \cdot a_{cm} \quad (1.13)$$

Integrando ambos os lados em relação à posição do centro de massa (r_{cm}) encontraremos a seguinte relação:

$$\int \left(\sum F_{ext} \right) \cdot dr_{cm} = \int \left(m \frac{dv_{cm}}{dt} \right) \cdot dr_{cm},$$

$$\int \left(\sum F_{ext} \right) \cdot dr_{cm} = \Delta \left(\frac{mv_{cm}^2}{2} \right),$$

$$\tau_{ps} = \Delta \left(\frac{mv_{cm}^2}{2} \right). \quad (1.14)$$

Aparentemente a equação acima (Teorema do Pseudotrabalho) se assemelha ao Teorema da Energia Cinética, contudo é necessário ter atenção aos passos que resultaram nessa equação. Para se alcançar essa relação foi feita a operação de integração em relação ao centro de massa, porém não é necessariamente verdade que o deslocamento sofrido pelo centro de massa seja igual ao deslocamento que a força produz. Essa desigualdade em relação aos deslocamentos se tornará evidente quando o sistema que está sendo estudado for classificado como deformável.

Visto que o deslocamento do centro de massa de um sistema não possui a obrigatoriedade de ser o mesmo deslocamento do ponto onde a força é aplicada, podemos concluir que o termo do lado esquerdo da equação (τ_{ps}) não pode ser definido como trabalho de uma força, e por esse motivo o identificamos como um pseudotrabalho (Teorema do Pseudotrabalho). Caso o ponto de aplicação da força tenha feito um deslocamento dr enquanto o centro de massa tenha feito um deslocamento dr_{cm} , de modo que $dr_{cm} \neq dr$, então teríamos:

$$\int (\Sigma F_{ext}) \cdot dr_{cm} \neq \int (\Sigma F_{ext}) \cdot dr,$$

$$\tau_{ps} \neq \tau_{ext},$$

pseudotrabalho \neq trabalho.

Como os deslocamentos são considerados diferentes em cada integral, conclui-se que o pseudotrabalho não é numericamente igual ao trabalho. Essa desigualdade será verdadeira para todo sistema que possa sofrer deformações ao longo de seu deslocamento. Entretanto, o pseudotrabalho poderá ser numericamente igual ao trabalho, e assim corresponderá ao Teorema da Energia Cinética, quando o deslocamento do centro de massa for igual ao do ponto de aplicação da força, ou seja, somente ocorrerá quando o fenômeno analisado tiver a característica de corpos rígidos.

Ainda em relação ao Teorema do Pseudotrabalho, é importante notar que o termo $\Delta\left(\frac{mv_{cm}^2}{2}\right)$ não é a energia cinética total do sistema, mas é uma forma eficaz de se medir a energia cinética do centro de massa. Logo, o Teorema do Pseudotrabalho é uma ferramenta muito útil para auxiliar o estudante a compreender (medir) a energia cinética de translação do sistema e por este motivo que o princípio também é conhecido como Teorema do Centro de Massa.

1.6 - Explorando outras formas de energia: Energia química, biológica, Entalpia e Energia Livre de Gibbs.

Outro recurso que pode ser usado pelo professor com forma de almejar a compreensão da concepção de energia dos estudantes é conciliar os conhecimentos de energia que estão incorporados na Biologia e na Química.

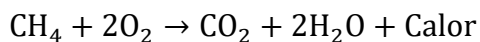
Devemos lembrar que o tema energia não é um conhecimento exclusivo da física, ou seja, o conceito de energia está incorporado em conhecimento da Biologia e da Química a qual também são importantes para compreensão de fenômenos do dia a dia, tal como as transformações energéticas que ocorrem no corpo humano.

Como forma de instruir o professor de Física a conciliar seus conhecimentos físicos sobre energia com os da Química e da Biologia, sugerimos a seguir as definições de energia química e biológica como ferramenta que auxilie na resolução de problemas.

1) O conceito de energia química

A energia química energia química pode ser compreendida como a modalidade de energia que se manifesta durante as reações químicas. Uma vez que foram estabelecidos previamente os conceitos de energia potencial e energia elétrica, então podemos conceituar a energia química como a responsável por manter o equilíbrio de coesão e existência das moléculas, pois cada molécula possui uma energia potencial (de natureza elétrica) que depende da posição relativa entre os átomos que a constituem.

Para compreender melhor esse processo vamos analisar a reação química a seguir que ocorre na queima do gás metano (CH_4).



Note que de acordo com nossa metodologia que se consideramos o sistema toda matéria envolvida na reação química, então ao fim do processo há liberação de energia na forma de calor para o meio externo (a energia só pode entrar ou sair de um sistema por meio de trabalho ou calor). A queima do metano libera uma energia equivalente a 55000 J/g, pois a quantidade de energia (química) armazenada nos reagentes ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$) é maior que a necessária para manter o equilíbrio das moléculas de dióxido de carbono e água nos produtos.

Com este exemplo queremos ilustrar um processo dinâmico de transmissão de energia. Perceba que ao fim da reação (nos produtos) há liberação de energia na forma de calor. Sabemos que a energia não pode ser criada, então a energia liberada na forma de calor, é uma prova e ao mesmo tempo facilita a compreensão do estudante de que existe em cada molécula uma energia armazenada que pode se modificar a partir das reações químicas.

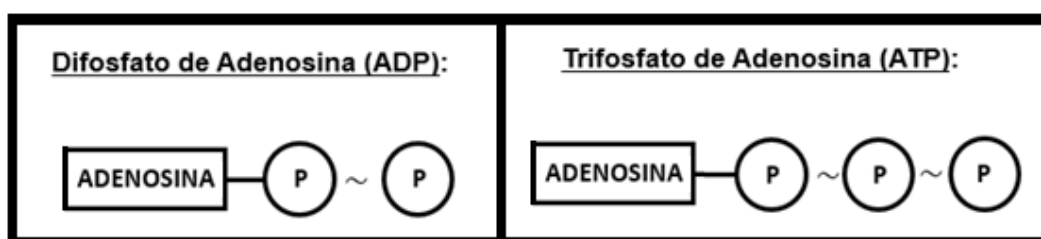
2) Energia biológica

A energia biológica possui definição idêntica à energia química, a diferença é que o emprego do conceito de energia biológica está atrelado a reações químicas que ocorrem em sistemas biológicos.

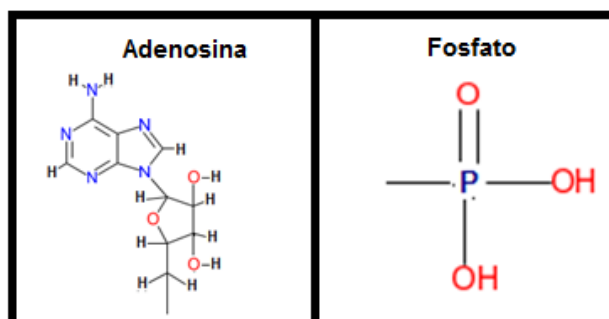
A sustentação de qualquer forma de vida depende das reações químicas que ocorrem no interior de cada Ser Vivo, pois são através delas que é possível obter energia para desempenhar as atividades motoras. A obtenção de energia para desempenhar essas atividades está atrelada ao processo metabólico na qual podemos entender de forma simplificada que há conversão de energia obtida através dos nutrientes (química) em trabalho muscular (mecânica). Cada nutriente (alimento) ingerido por um Ser Vivo é composto por inúmeras moléculas ricas em carbono (C), hidrogénio (H), oxigénio (O) e no caso das proteínas e aminoácidos, nitrogénio (N). A energia das ligações moleculares dos nutrientes é liberada quimicamente no interior das células e, em seguida, armazenada sob a forma de um composto altamente energético chamado de *Trifosfato de Adenosina* (ATP). Assim, por meio da energia

química fornecida através da quebra do ATP, cada Ser Vivo pode usufruir desta energia para gerar calor e aproveitá-la para locomoção (energia mecânica).

Para compreender mais detalhadamente o que foi descrito anteriormente, vamos analisar os processos de transferência de energia realizados através de algumas reações químicas básicas. Uma dessas reações muito importante para o nosso propósito é a reação que envolve as moléculas de *Difosfato de Adenosina* (ADP) e de *Trifosfato de Adenosina* (ATP), que são representadas da seguinte maneira:



A representação na forma estrutural da Adenosina e do grupamento fosfato são:



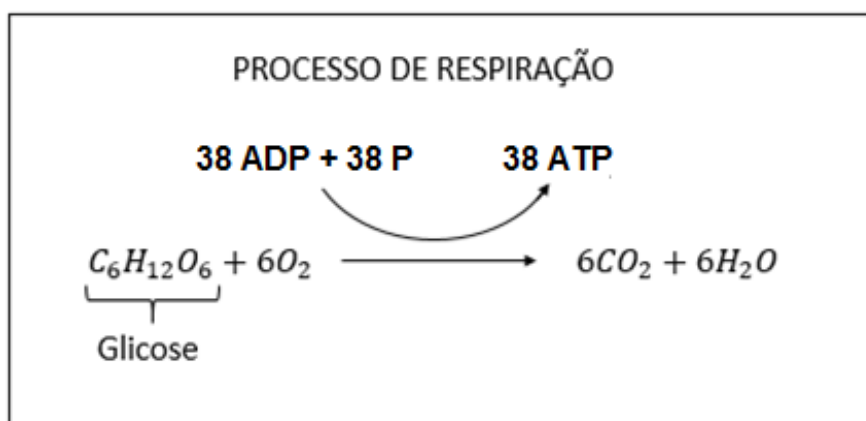
Cada ligação entre um grupamento de fosfato (P ~ P, P ~ P ~ P) consegue armazenar uma grande quantidade de energia química. Logo, é por esse motivo que essas moléculas possuem destaque no processo de transferência de energia química em sistemas biológicos. Analisando atentamente os processos químicos que ocorrem nos sistemas biológicos, as moléculas de ATP podem perder um grupamento fosfato transformando-se assim numa molécula de ADP, conforme a reação a seguir:



A reação ilustrada acima ocorre continuamente em sistemas biológicos. Para que as moléculas de ATP sejam quebradas em ADP é preciso a presença de água para que ocorra a reação de hidrólise. Após as moléculas de ATP reagirem com as moléculas de água, dá-se origem aos produtos acima ($ADP + P$). A estabilidade das moléculas de ADP e do fosfato requer uma energia potencial menor em relação às moléculas de ATP nos reagentes. Logo, o excedente da energia (67J/g) se torna uma “energia livre” para ser aproveitada pela célula para realização de algum trabalho.

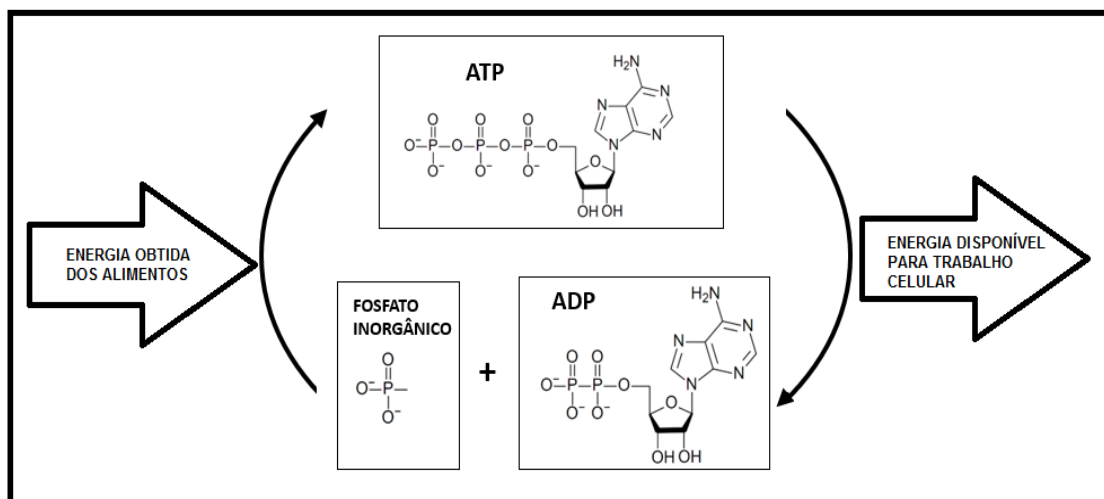
Importante também destacar outro processo relevante de conversão de energia que ocorre em sistemas biológicos fundamental para que o processo descrito anteriormente seja possível, e para o equilíbrio das quantidades de ADP e ATP.

Ocorre que a ligação da Adenosina Difosfato com o Fosfato é reversível, ou seja, isso significa que toda vez que é necessária energia para qualquer trabalho na célula, ocorre a conversão de ATP em ADP e fosfato, contudo, além desse processo há o processo reverso na qual o ADP se liga ao fosfato “recarregando” a quantidade de ATP no organismo. Para os animais e maioria dos microrganismos, a produção de ATP se deve a reação da glicose (“energia provinda dos alimentos”) com as moléculas de O_2 por intermédio do processo de respiração celular. Para vislumbrar esse processo observe o esquema a seguir:



Perceba que se a quebra de ATP em ADP e fosfato libera energia, então para formar moléculas de ATP através de moléculas de ADP e fosfato é necessário energia para que a reação ocorra. Para as moléculas de ADP e fosfato adquirirem esta energia destacamos dois processos. Primeiramente é necessário a glicose obtida no organismo através da alimentação. O segundo processo depende da respiração

celular. As moléculas de glicose ao reagirem com o gás oxigênio obtido através da respiração formam os produtos CO_2 e H_2O com liberação de energia. A energia liberada nessa reação é usada formar ATP através do ADP e do fosfato presente no organismo. A partir desse ponto todo o ciclo se repete, conforme ilustração a seguir.



3) Outras energias: Entalpia e Energia livre de Gibbs

Quando aprofundarmos a discussão sobre a transferência, conversão e uso da energia em sistemas biológicos é importante esclarecer que estamos entrando em uma área da bioquímica chamada de Bioenergética. Embora a princípio este tema seja amplo e complexo para ser tratado no ciclo escolar, ainda assim podemos usufruir de alguns conceitos da Biologia, Química e Física necessários para a compreensão bioenergética que são compartilhados no Ensino Médio através de alguns conhecimentos que pertencem ao currículo. Em outras palavras, podemos nos orientar em conhecimentos da Química e Física explorados no Ensino Médio, como por exemplo a Entalpia, Energia Livre de Gibbs e Termodinâmica, para compreender as transformações energéticas envolvendo as reações químicas que ocorrem em sistemas biológicos.

Para obtermos uma discussão mais profunda das relações energéticas nesses sistemas é preciso estabelecer também um elo entre a energia química e a Termodinâmica, ou seja, precisamos conciliar a energia que se manifesta através das reações químicas com as leis da Termodinâmica. Logo, para atingir esse objetivo

precisamos definir duas outras formas de energia que serão mais apropriadas do ponto de vista termodinâmico e químico. As formas de energia a qual nos referimos são a Entalpia e a Energia Livre de Gibbs, e podemos defini-las da seguinte forma:

- **Entalpia (H):**

Podemos definir a entalpia como uma energia característica de cada substância que se manifesta na forma de calor quando ocorrem reações químicas ($Q = \Delta H$). Em outras palavras, damos o nome de entalpia ao calor liberado ou absorvido por um sistema quando há uma transformação isobárica.

É importante salientar que assim como fazemos com a energia interna, não há como mensurar a energia em cada substância, e assim sendo é apropriado trabalharmos com a variação de entalpia (ΔH) durante a reação química. Isso significa que para nossa abordagem o ΔH representará a diferença de entalpia entre os reagentes e os produtos. Logo, como consequência dessa definição, podemos também compreender como é o fluxo de energia do sistema durante as reações químicas e o meio externo. Para isso podemos analisar as duas hipóteses ($\Delta H < 0$ e $\Delta H > 0$) possíveis para o ΔH . No caso de $\Delta H < 0$ (reação exotérmica), teremos a entalpia do produto menor que a do reagente e conseqüentemente isso significa que há liberação de energia na forma calor para o meio externo. Para se ter um exemplo, reações com $\Delta H < 0$ ocorrem continuamente no corpo humano. De fato, vimos que em sistemas biológicos ocorre continuamente a conversão da glicose até ATP. Neste processo a entalpia após a formação de ATP (produto) é menor que a existente no reagente e sendo assim a reação libera calor que será aproveitado para manter a temperatura corporal em torno de 36 graus Celsius. Já no caso de $\Delta H > 0$ as reações são chamadas de endotérmicas, pois as entalpias dos produtos são maiores que as dos reagentes. Sob essa condição há a absorção de energia do meio externo para que a reação ocorra, como por exemplo na fotossíntese.

Termodinamicamente, podemos expressar a variação de entalpia de um sistema a partir da variação da energia interna e do trabalho da seguinte forma:

$$Q = \Delta U + \tau$$

Como $Q = \Delta H$ e $\tau = P\Delta V$, então:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (1.15)$$

- **Energia livre de Gibbs (G):**

A energia livre de Gibbs (G), também uma grandeza física com bastante relevância na Termodinâmica, é fundamental para compreender os processos químicos que ocorrem nos seres vivos. Dentro do nosso propósito, podemos compreender a energia livre de Gibbs como a quantidade de energia que se torna disponível durante uma reação química e que será aproveitada pelo sistema para a realização de trabalho durante um processo isobárico e isotérmico. Isso significa que quando um sistema sofre uma transformação entre estados, a variação da energia livre de Gibbs (ΔG) é igual ao trabalho trocado entre o sistema e sua vizinhança.

Para a Química e a Biologia, a energia livre de Gibbs se torna relevante, pois é a partir do valor de ΔG (negativo ou positivo) que poderemos afirmar se uma reação ocorre ou não espontaneamente. Quando uma reação química é considerada espontânea, então há a realização de trabalho e conseqüentemente há a redução da energia livre de Gibbs, ou seja, $\Delta G < 0$. Neste caso, o processo também é irreversível, pois o sistema libera energia de forma que ao fim as moléculas ficarão em um nível energético menor e, portanto, mais estável. Já para $\Delta G > 0$ a reação ocorre de forma espontânea, pois para a reação se concretizar é preciso que durante a etapa dos reagentes o meio externo forneça energia extra para que o processo chegue a sua fase final.

Matematicamente, a energia livre de Gibbs pode ser medida a partir da entropia (ΔS) e entalpia (ΔH) do sistema como:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.16)$$

Para finalizar nossa compreensão sobre a energia livre de Gibbs, perceba que da equação anterior podemos interpretar que a energia livre de Gibbs é o saldo das energias usadas durante uma reação. A entalpia corresponde a parcela da energia que foi liberada (calor) para o meio externo enquanto a entropia representa a energia

usada para reorganização das moléculas na transformação química. A energia restante, isto é a “energia livre” dessas atribuições será usada para realização de trabalho.