

**ENERGIA EM
SISTEMAS BIOLÓGICOS**

Capítulo 4

DF-UFSCar

Profa. Dra. Ignez Caracelli

A energia se define na forma mais simples, como a capacidade de produzir trabalho. Há diferentes tipos de energia: potencial, cinética térmica, elétrica, radiante, entre outras. Existem também diferentes tipos de trabalho, como o mecânico, o elétrico, o osmótico. As transformações de energia de um tipo a outro e a eficiência da *conversão de energia em trabalho* são de importância central.

Um físico quando se depara com uma mudança física ou química se pergunta:

- que forças proporcionaram a mudança?
- porque a mudança chegou até um determinado ponto?
- seria possível prever essa mudança?

Todas estas perguntas são básicas, porque cada processo físico ou químico é o resultado de uma força e a força por sua vez, é o produto da troca de energia.

Assim, vemos que todos os processos físicos ou químicos são o resultado da aplicação, troca ou transformação de energia.

Todos os princípios da física e da química se cumprem no mundo biológico. A forma básica de analisar os processos que ocorrem na matéria inanimada é também a forma de analisar o comportamento dos organismos vivos. *Bioenergética* é o termo usado para referir-se ao estudo das transformações de energia nos organismos vivos.

I. CADEIA ALIMENTAR E FLUXO DE ENERGIA

A rede alimentar está formada por vários tipos de organismos. Em primeiro lugar, temos os *produtores*, aquelas células que podem utilizar as formas mais simples de compostos de carbono oriundas do meio ambiente, tais como CO₂. Depois temos uma seqüência de *consumidores*, que se alimentam dos produtores, seguida de um série de consumidores. Finalmente completando o ciclo estão os *desintegradores*, as bactérias e fungos que provocam a decomposição e putrefação dos consumidores mortos e que deste modo se dissolvem, voltam ao solo e posteriormente à atmosfera, nas formas mais simples de carbono.

Exemplo: um animal morando em uma floresta - encontramos uma hierarquia de organismos, chamada de *cadeia alimentar ou trófica*, que provê ao animal a energia e os materiais necessários à sua vida. Esta cadeia pode começar com as células fotossintéticas das plantas verdes, que fazem a conversão de CO₂ em material celular novo. A planta verde pode ser consumida por larvas, sapos ou pássaros, que podem ser consumidos pelo animal.

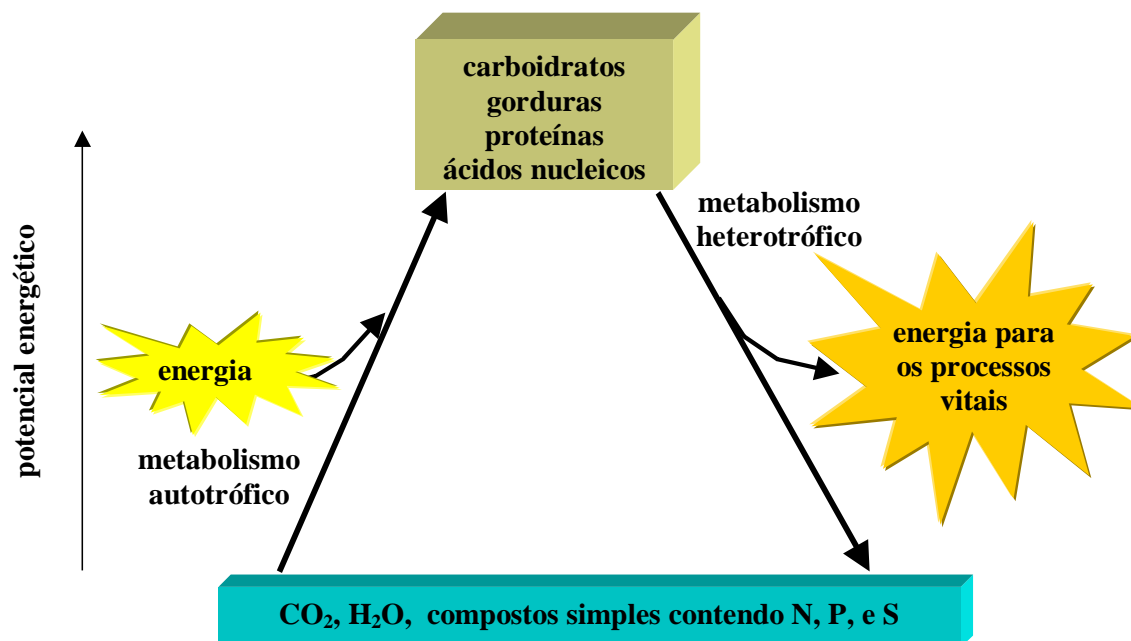


Figura 1 - No metabolismo autotrófico as reações ocorrem no sentido de passar de moléculas com um átomo de carbono a moléculas com mais carbonos, com consumo energia (processo endoergônico). No metabolismo heterotrófico passamos de moléculas de 6 carbonos como na glicose a moléculas de um átomo carbono, e se dá com liberação de energia (processo exoergônico).

Os organismos vivos podem se classificar em dois grandes grupos segundo sua posição na cadeia alimentar: autotróficos ou heterotróficos. Os organismos *autotróficos* (o termo significa que podem se autoalimentar) são os que podem utilizar formas mais simples de carbono, tais como CO_2 , a partir dos quais elaboram todos os seus componentes celulares. Os produtores situados na base da cadeia alimentar são *autótrofos*; entre eles encontram-se várias bactérias e algas bem como plantas superiores. Os organismos *heterotróficos* (que se alimentam de outros), por outro lado, geram energia a partir de moléculas simples de carbono como o CO_2 , e requerem formas mais complexas: moléculas orgânicas como glicose. Os *consumidores* e *desintegradores* da cadeia alimentar são *heterótrofos* e dependem dos autótrofos para gerar os nutrientes complexos que necessitam.

Examinemos agora a cadeia alimentar e investiguemos as fontes de energia para cada série de organismos. Ao fazê-lo, encontraremos que a grande maioria dos organismos autotróficos produtores obtém sua energia da luz solar, a qual utilizam para converter o CO_2 em materiais celulares mais complexos mediante a *fotossíntese*. Assim, a maior parte dos produtores são autotróficos fotossintéticos. Mas quando examinamos as camadas sucessivas de consumidores, verificamos que nenhuma delas tem a capacidade de utilizar energia luminosa. Ainda mais, a maior parte deles obtém a energia que necessitam mediante a combustão de moléculas orgânicas complexas, tais como glicose, obtidas a partir dos produtores que eles consomem. Neste processo, que requer oxigênio e que se chama *respiração*, a molécula simples e pequena de CO_2 é o produto final. A células heterotróficas, portanto, obtém energia mediante a degradação de moléculas nutrientes complexas e as transformam em suas formas mais simples.

Em cada nível da cadeia alimentar, se consome energia para realizar diversas classes de trabalho biológico, tal como a síntese de material celular novo a partir de precursores mais simples, o movimento de

materiais contra gradientes e o trabalho de contração ou movimento. Entretanto, em cada nível da rede alimentar, encontramos perdas por degradação de tal modo que cada vez que ocorre um processo físico ou químico, há uma conversão incompleta de energia de uma classe em outra. Como resultado, parte da energia aproveitável produzida por um série de organismos, é dissipada no meio e portanto, não é utilizada para realizar trabalho. Somente uma pequena fração da energia solar absorvida pelos produtores na etapa básica da cadeia alimentar alcança sempre a camada superior dos últimos consumidores. À medida que estes últimos consumidores morrem e seus tecidos são degradados a produtos orgânicos simples pelos desintegradores, a energia de novo se perde e se dissipa no meio. Em definitivo, o fluxo de energia que parte do sol e que corre através da cadeia alimentar biológicas se dispersa finalmente no meio.

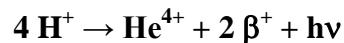
Examinemos agora as três fases principais no fluxo de energia biológica:

1. fotossíntese
2. respiração
3. realização de trabalho biológico

II. ENERGIA SOLAR E FOTOSSÍNTESE

A luz solar visível, fonte de toda a energia biológica, é uma forma de energia eletromagnética ou radiante, que em última instância, surge da energia nuclear.

Na elevada temperatura do Sol, (vários milhões de K), uma parte da enorme energia encerrada no núcleo dos átomos de hidrogênio, é liberada à medida que estes últimos se convertem, em átomos de hélio (He) e pósitrons (β^+ - uma partícula como o elétron mas com carga positiva) mediante a fusão termonuclear.



Neste processo, se libera um *quantum de energia* $h\nu$ na forma de radiação gama. O quantum de energia está representado pelo termo $h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação gama. Depois de uma série completa de reações, nas quais a radiação gama é absorvida pelo pósitrons, grande parte da energia da radiação gama é emitida na forma de fótons ou quantuns de energia luminosa. As reações da fusão nuclear que ocorrem no sol, são em última instância, a fonte de toda a energia biológica na Terra.

Em geral, tendemos a associar o termo fotossíntese com o mundo visível das plantas superiores: pastos, cultivos de plantas e árvores. Mas esses organismos fotossintéticos macroscópicos realmente não constituem senão uma pequena fração de todos os organismos conhecidos capazes de realizar fotossíntese. Se estima que 90% da fotossíntese que ocorre sobre a Terra é realizada por um sem número de diversas classes de microorganismos, entre os quais se encontram as bactérias, algas, diatomáceas e dinoflagelados.

Um outro erro comum em torno a fotossíntese das plantas superiores, é supor que todas as células de uma planta superior são capazes de realizar fotossíntese. As células das raízes, dos talos e frutos das plantas superiores são incapazes de realizar fotossíntese: são heterotróficas e portanto, se parecem com as células animais. Somente as células que possuem o pigmento verde de clorofila podem realizar a fotossíntese. Por outro lado, na escuridão, quando não se dispõe de energia solar, inclusive estas células funcionam como heterotróficas: devem oxidar parte de sua glicose, às custas de oxigênio, para obter energia na escuridão.

A fotossíntese consiste na absorção da energia radiante pela clorofila e outros pigmentos, seguida da conversão da energia luminosa absorvida em energia química, e a utilização dessa energia química para a redução do CO₂ absorvido da atmosfera para formar glicose. Na maior parte dos organismos fotossintéticos, em particular as plantas superiores, o oxigênio molecular é outro produto final importante, mas em outras, tais como as bactérias fotossintéticas, não se forma oxigênio. A forma mais simples da equação global para a formação fotossintética da glicose e oxigênio a partir do CO₂ e água nas plantas superiores é



onde o símbolo ΔG (energia livre de Gibbs) representa a quantidade mínima de energia útil que deve ser proporcionada pela luz solar absorvida para que seja possível a formação de 1 mol de glicose a partir de 1 mol de CO₂ e outro de água, em condições padrão.

A grande quantidade de energia necessária para que ocorra a fotossíntese é fornecida pela energia luminosa captada pela clorofila das folhas. A equação fotossintética pode voltar a ser escrita de modo que se indique que a fonte de energia são os quantuns luminosos:



Esta equação nos dá somente uma visão global do processo fotossintético: não nos diz nada acerca do mecanismo ou caminho pelo qual a reação ocorre. Realmente, a fotossíntese nas células das plantas é um processo muito mais complexo do que a aparência desta equação pode sugerir. Muitos processos intermediários devem ocorrer para que seja possível a produção fotossintética da glicose a partir de CO₂ e água, cada um dos quais é catalisado por uma enzima diferente.

A glicose não é o único produto da fotossíntese. Durante o processo outros compostos de carbono das células vegetais também são sintetizados, tais como celulose, proteínas e lipídeos. Todas estas substâncias, ricas em energia química são utilizadas posteriormente como fonte de energia pelos organismos heterotróficos, ou seja, pelos consumidores que se alimentam das plantas verdes.

III. RESPIRAÇÃO NAS CÉLULAS HETEROTRÓFICAS

A fase seguinte no fluxo de energia biológica é a utilização da energia dos carboidratos, gorduras e proteínas produzidas na fotossíntese pelos organismos heterotróficos, que oxidam estes materiais por meio do oxigênio. Realmente os organismos heterótrofos necessitam os produtos complexos da fotossíntese por diversas razões. Em primeiro lugar, necessitam a energia química que podem obter da quebra das estruturas complexas de alta energia de moléculas tais como a glicose. Mas os heterótrofos necessitam também de complexos compostos de carbono, tais como a glicose, como unidades estruturais para a síntese de seus próprios componentes celulares, já que são incapazes de utilizar CO₂ para este fim.

Entre os heterótrofos estão incluídos todos os organismos do reino animal, muitas bactérias e fungos, assim como muitas células do reino vegetal. Mas, ainda que pudéssemos pensar que os grandes animais do mundo biológico macroscópico são os heterótrofos predominantes na biosfera, nada pode estar mais longe da realidade. Estima-se que mais de 90% de todo o oxigênio consumido por todos os heterótrofos é utilizado por microorganismos invisíveis do solo e do mar.

A maior parte das células heterotróficas utilizam o oxigênio que tomam da atmosfera para oxidar glicose e outros nutrientes dando origem a produtos finais estáveis, CO_2 e H_2O . Entretanto, alguns heterótrofos são incapazes de utilizar oxigênio: degradam a glicose em compostos mais simples, tais como o ácido láctico, na ausência de oxigênio, no processo chamado de *fermentação*. Os produtos da fermentação, tais como o ácido láctico, são posteriormente oxidados a CO_2 e H_2O por outros organismos heterotróficos, em particular aqueles que usam, oxigênio. As células do mundo heterotrófico levam a cabo a oxidação completa dos nutrientes orgânicos produzidos pelos autótrofos até convertê-los no produto final, CO_2 . O processo global, mediante o qual as moléculas de alimentos são oxidadas por células heterotróficas às custas de oxigênio, recebe o nome de *respiração*.

A equação química para a oxidação da glicose durante a respiração é



Vemos imediatamente que esta equação é a inversa da correspondente à fotossíntese. Por outro lado, observamos a combustão completa de um mol de glicose produz um máximo de 686 kcal de energia química útil. Este não é necessariamente o rendimento real de trabalho realizado pela célula heterotrófica: constitui somente o valor teórico máximo de energia que pode ser produzida pela combustão de um mol de glicose.

Ainda que a equação química da respiração pareça simples, não nos diz nada acerca dos mecanismo ou do caminho seguido pela respiração nas células heterotróficas. De fato, há mais de 70 reações químicas consecutivas na oxidação da glicose nas células heterotróficas.

IV. TRABALHO BIOLÓGICO

Consideramos agora a última grande fase do fluxo de energia biológica: isto é, a utilização da energia química para produzir diferentes classes de trabalho celular. Todos os organismo vivos devem utilizar trabalho de uma classe ou outra, simplesmente para manter-se vivos em um meio ambiente que é essencialmente hostil. Alguns organismos tais como vertebrados superiores, podem realizar trabalho contra o meio ambiente para torná-lo menos hostil, enquanto que outros, tais como bactérias, superam os efeitos de um meio ambiente hostil multiplicando-se rapidamente. Há basicamente três tipos de trabalho que os organismos vivos realizam: trabalho químico, trabalho de concentração e trabalho mecânico.

Todas as células realizam *trabalho químico*, não somente durante o crescimento ativo, mas também para manter-se. Os compostos macromoleculares das células, tais como proteínas, ácidos nucleicos, lipídeos e polissacarídeos são sintetizados continuamente a partir de unidades estruturais pequenas mediante a ação de enzimas. Estes processos recebem em conjunto o nome de biossíntese. A *biossíntese* ocorre não somente durante o crescimento de um organismos, quando há a formação de um material celular novo, mas também em organismo maduros que não se encontram em fase de crescimento. Neles os hidratos de carbono, as proteínas e os lipídeos são constantemente sintetizados e degradados, de tal modo que a velocidade de formação de novas moléculas está exatamente compensada pela velocidade de degradação das antigas. A maior parte dos componentes moleculares das células vivas se encontram em um *estado estacionário dinâmico*.

Sempre que uma estrutura grande, ordenada é construída a partir de unidades dispostas ao acaso, seja uma macromolécula, ou uma parede de tijolos, necessita-se energia. Para construir uma macromoléculas de proteína, devem ser unidos, na seqüência correta, centenas de moléculas de aminoácidos devem unir-se através de uma ligação peptídica por ação de enzimas específicas. Para construir uma molécula de polissacarídeo, tal como celulose ou amido, as moléculas devem unir-se através de ligações glicosídicas. A equação global para a biossíntese de tais macromoléculas pode ser escrita em forma generalizada como segue

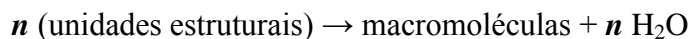


Tabela 1 - O trabalho químico de biossíntese -

Tipos de ligações para união de unidades estruturais.

Macromolécula	Unidade estrutural	Tipo de ligação	+ΔG/ligação (kcal/mol)
proteína	aminoácido	peptídica	~5,0
ácido nucleico	mononucleotídeo	fosfodiéster	~5,0
polissacarídeo	monossacarídeo	glicosídica	~3,0

Tais reações biossintéticas, que ocorrem com perda de água, à medida que as unidades estruturais se unem, são altamente endoergônicas no meio aquoso de uma célula, ou seja, são reações "*montanha acima*".

O segundo tipo de *trabalho celular* é aquele necessário para *transportar* e *concentrar* substâncias; com freqüência, mas de um modo menos preciso, se denomina trabalho osmótico. Esta classe de trabalho não é tão evidente para nós quanto o trabalho mecânico de contração ou de biossíntese implicado no crescimento das células, mas é de igual importância no funcionamento celular. As células devem acumular certas substâncias essenciais a partir do meio, seja como íons, tal como o potássio ou nutrientes, tal como a glicose, de modo que sua concentração intracelular pode ser muito maior que a do meio exterior à célula. Por outro lado, substâncias não desejadas ou nocivas à célula podem ser excretadas, ou seja, podem ser ativamente bombeadas para o exterior da mesma, mesmo quando a concentração externa da substância seja muito maior que a interna. Tais movimentos de moléculas contra gradientes de concentração não ocorrem espontaneamente, já que as moléculas de soluto normalmente tendem a dispersar-se em todo o espaço disponível a elas. O termo *transporte ativo* se aplica a este tipo de movimento, dependente de energia, das moléculas de soluto contra a sua tendência a dispersar-se. Por meio da ação de *bombas* de transporte ativo situadas em suas membranas, as células podem manter seu meio constante e ótimo para a vida, mesmo que o meio externo tenha uma composição química muito diferente. Além disso, através dos mecanismos de transporte ativo, as células podem extrair, também do meio ambiente, moléculas nutrientes vitais para elas, ainda que elas se encontrem em concentrações muito baixas em seu interior. A atividade elétrica de muitas

células também é o resultado do trabalho osmótico, que intervém no mecanismo de excitação e da condução de impulsos nas células nervosas e musculares.

Finalmente, é de domínio comum que a maior parte dos organismos podem realizar *trabalho mecânico*. O trabalho mais destacado é o realizado pela contração do músculo esquelético nos animais superiores que pode ser facilmente observado e medido. Entretanto, tais processos contráteis não são mais que refinamentos de uma propriedade mais geral de quase todas as células de exercer forças musculares de tração por meio de filamentos contráteis. Por exemplo, durante a divisão das células superiores, as fibras contráteis da célula são responsáveis pela separação dos cromossomas no núcleo e da divisão do material citoplasmático. As estruturas móveis tais como cílios e flagelos também realizam trabalho mecânico de propulsão. É interessante destacar que o trabalho mecânico realizado pelos organismos vivos está baseado na energia química, enquanto que as máquinas feitas pelo homem para realizar trabalho mecânico, com as quais estamos familiarizados, trabalham, em sua maioria, com energia térmica ou elétrica.

Estes três tipos de trabalho realizados pelos organismos vivos conduzem, em definitivo, à dissipação de energia e sua dispersão no meio ambiente. Devido a que existe degradação em cada um dos muitos passos consecutivos na conversão de energia biológica, uma grande fração da energia, originalmente capturada da luz solar pela célula de planta verde, se perde no meio ambiente na forma de calor. Por exemplo, quando o homem levanta pedras para construir um muro, realiza trabalho mecânico sobre seu meio ambiente: com o tempo, entretanto, o muro pode cair e seus constituintes se desordenariam no meio ambiente. O trabalho realizado na biossíntese e na manutenção dos eletrólitos intracelulares se dissipa também quando as células morrem e seus conteúdos se dispersam no meio ambiente. No fluxo de energia no mundo biológico, portanto, temos uma inevitável e irreversível degradação da energia. A energia útil proveniente da luz solar se converte parcialmente em energia química. O fluxo de energia no mundo biológico é unidirecional e irreversível, posto que uma vez que a energia se dispersa, nunca pode voltar a produzir trabalho biológico.

V. O CICLO DA MATÉRIA NO MUNDO BIOLÓGICO

Acompanhando o fluxo de energia (Figura 2) através do mundo biológico, existe um fluxo de matéria (Figura 3).

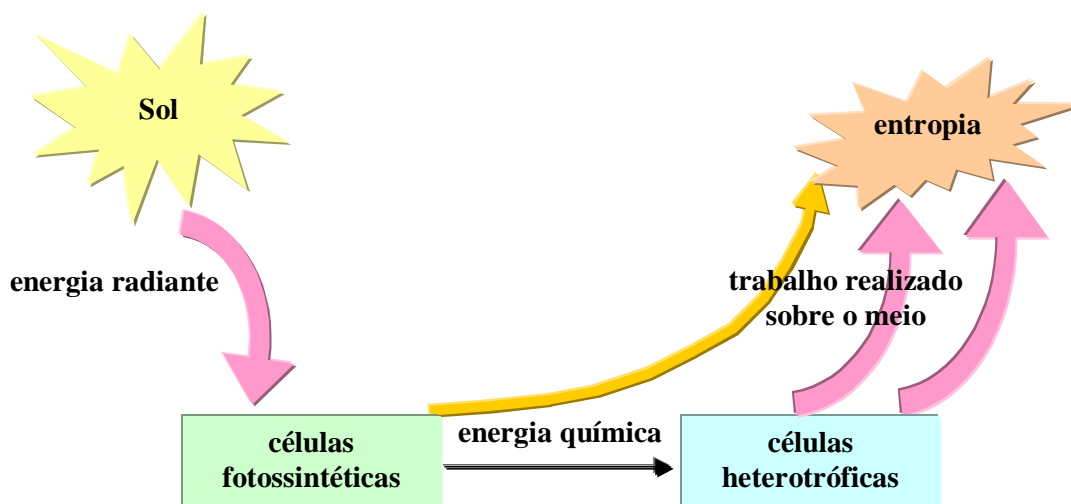


Figura 2 - Fluxo de energia através da biosfera

Durante a respiração as células animais tomam oxigênio e nutrientes orgânicos de seu meio ambiente e devolvem CO_2 e H_2O . As plantas, por sua vez, extraem CO_2 e H_2O de seu meio ambiente, a partir dos quais fabricam novo material celular, devolvendo oxigênio à atmosfera. Por outro lado, existe também, um ciclo constante para o nitrogênio disponível. As plantas obtêm nitrogênio do solo na forma de nitratos, que convertem em amônia e depois em aminoácidos. Os aminoácidos sintetizados se convertem de novo em amônia, o qual volta ao solo e é convertido em nitrato pelas bactéria nitrificantes. O CO_2 , o O_2 , o N e a H_2O , sofrem assim um ciclo contínuo entre os mundos animal e vegetal. O mundo das células fotossintéticas e o mundo das células heterotróficas vivem em simbiose entre si, uma simbiose tanto de matéria como de energia.

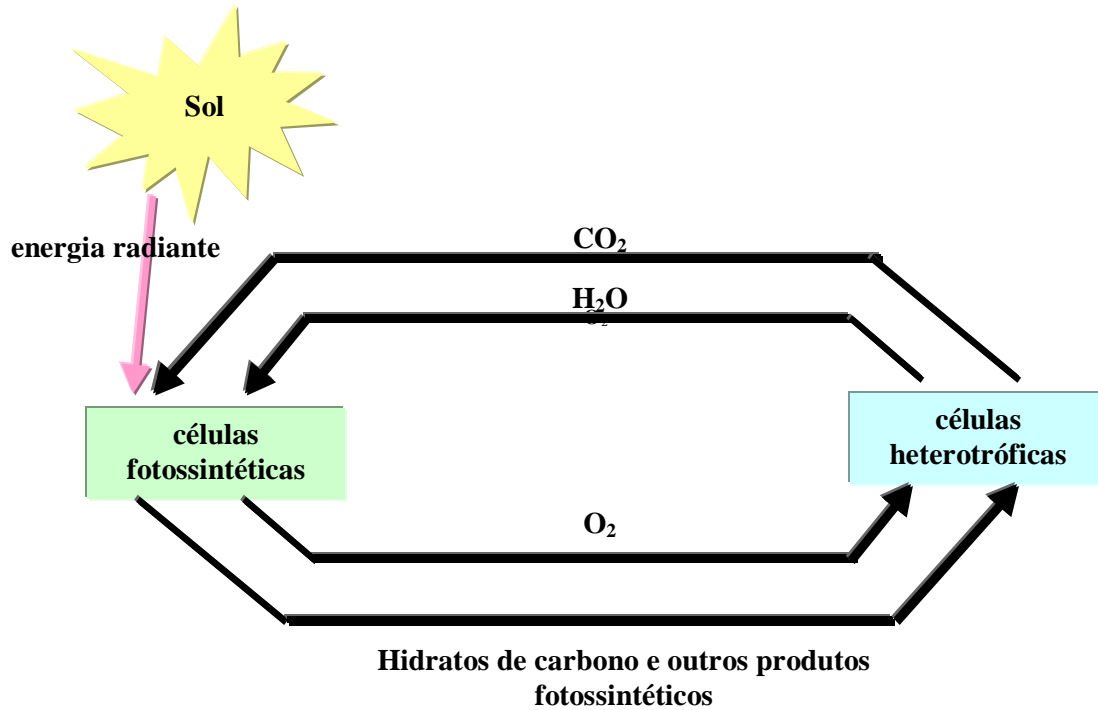


Figura 3 - Fluxo de matéria. Ciclo do carbono e do oxigênio

O transportador da energia química procedente da oxidação das moléculas de alimentos, seja aeróbica ou anaeróbica, para os processos ou reações da célula que não ocorrem espontaneamente e que somente podem realizar-se mediante fornecimento de energia é o ATP (trifosfato de adenosina ou adenosina-trifosfato).

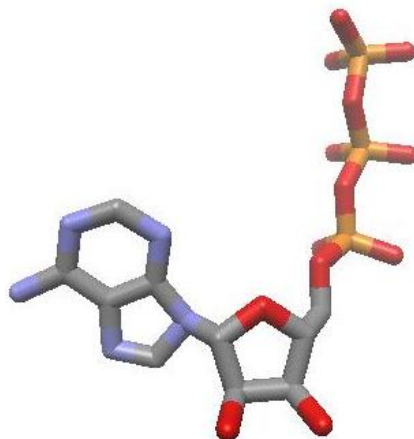


Figura 4 - A molécula de ATP

VI. CONVERSÕES DE ENERGIA

A energia é necessária para a ocorrência de vários processos. Além da necessidade de energia, ela deverá estar disponível na forma adequada. Os organismos vivos elaboraram meios para transformar a energia. O ouvido humano pode perceber as mais delicadas diferenças de timbre e harmônicos das notas musicais, mesmo que as quantidades de energia sônica que perturbam o ar sejam muito pequenas. O olho humano responde ante variações extremamente pequenas de energia luminosa. Com frequência, os dispositivos biológicos sensíveis à energia, são muito superiores em sensibilidade e eficiência aos instrumentos feitos pelo homem, mesmo os feitos na era eletrônica.

Mas, há outros modos menos óbvios e mais sutis, segundo os quais a energia é utilizada e transformada pelos organismos vivos. Por exemplo, se necessita energia para criar a grande complexidade que caracteriza a forma de um organismo vivo e a grande diversidade morfológica das diferentes espécies de vida. Os organismos vivos são ricos em informação, a qual pode ser considerada como uma forma de energia. Como veremos depois, no capítulo referente à termodinâmica, todos os átomos e moléculas no universo tendem a buscar um estado mais disperso ou desordenado, com o menor conteúdo de energia: isto é, tendem a buscar um estado de máxima entropia.

Tabela 2 - Transformações energéticas

Transformação	Órgão Transformador
energia química em elétrica	cérebro, nervos, nariz, língua
energia química em mecânica	músculo
energia química em osmótica	rins e todas as membranas celulares
energia química em radiante	órgão luminescente do vaga-lume
energia luminosa em química	cloroplasto
energia luminosa em elétrica	olho
energia hidrostática em elétrica	ouvido interno
som em elétrica	ouvido