

CAPÍTULO 5

O fluxo energético da vida

Daniel Caligari

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c5>

Resumo

Este capítulo tem o objetivo de popularizar conceitos fundamentais da bioquímica, explicando de forma clara e acessível como os seres vivos captam, armazenam e utilizam a energia. Utilizando analogias do cotidiano — como usinas solares e hidrelétricas —, o texto descreve o fluxo energético biológico, desde a captação da luz solar pelos organismos fotossintetizantes até a conversão dessa energia nas ligações químicas das moléculas orgânicas (combustíveis). Aborda-se também o papel dos cloroplastos, o funcionamento da enzima ATP sintase e a importância do ATP como "moeda energética" universal que viabiliza o trabalho celular e a biossíntese da vida. O foco é demonstrar, para o público geral, a alta complexidade e eficiência da infraestrutura energética biológica.

Palavras-chaves: Fluxo Energético; Fotossíntese; ATP; Bioquímica; Metabolismo.

Abstract

This chapter aims to popularize fundamental biochemistry concepts by explaining in a clear and accessible way how living beings capture, store, and utilize energy. Using everyday analogies — such as solar power plants and hydroelectric dams —, the text describes the biological energy flow, from the capture of sunlight by photosynthetic organisms to the conversion of this energy into the chemical bonds of organic molecules (fuels). It also addresses the role of chloroplasts, the function of the ATP synthase enzyme, and the importance of ATP as the universal "energy currency" that enables cellular work and the biosynthesis of life. The focus is to demonstrate, to the general public, the high complexity and efficiency of the biological energy infrastructure.

Key words: Energy Flow; Photosynthesis; ATP; Biochemistry; Metabolism.

1. Do que as coisas que existem são feitas?

É importante termos na ponta da língua noções básicas sobre: do que as coisas que existem são feitas (estamos falando tanto de você que está lendo quanto de uma pedra, poeira ou qualquer outra coisa que ocupa algum lugar no espaço). As “coisas que existem fisicamente” nós chamamos tecnicamente de matéria: o que ocupa espaço e possui massa. Do que é feita? Uma boa analogia para começarmos é imaginar a matéria como um “agregado”, “aglomerado” ou uma sopinha de pequenas partículas, porém que pode chegar a um nível altíssimo de organização, com ligações totalmente específicas entre si. Quanto mais partículas iguais ou uma mistura delas estiverem juntas, maior a massa dessa matéria. A propósito, estas pequenas partículas são realmente muito, muito pequenas, e dessas todos já ouvimos falar: são os átomos.

Agora o assunto começa a ficar interessante pois a conexão que estes átomos estabelecem um com os outros é a chave para a possibilidade da subida no nível de complexidade da vida. Ligações fortes entre os átomos formam as moléculas, existindo infindáveis possibilidades. Se tudo é feito de átomos, tudo é feito de moléculas. Temos agora dois níveis de organização (átomos – moléculas) bem definidos. Apesar de ser importante recapitular sobre átomos e moléculas, a informação relevante destes dois parágrafos é que as moléculas guardam em si uma outra coisa que ainda não falamos, mas que é a base para que as coisas – que existem – aconteçam (sair da possibilidade para a realidade, sair do estado de potência para o estado de ação): a energia.

A energia em certos casos fica guardada em uma molécula como uma “mola comprimida”. Precisou de um tanto de energia para juntar um átomo com outro e formar uma molécula, por isso se esta ligação for quebrada, uma quantidade proporcional de energia será liberada. E é mesmo como uma mola esticando rapidamente após soltar, sendo que a energia que se aplica ao comprimir a mola se torna potencial e depois cinética – ou chame de movimento – quando a mola é solta. Trabalhamos sem perceber um outro conceito fundamental: a energia é conservada, ela muda de estado, forma, lugar, aspecto, mas continua tendo a mesma quantidade total.

Os seres vivos sempre “souberam” disso e todo o fluxo energético da vida utiliza a energia presente nas moléculas orgânicas para viabilizar absolutamente

todos os processos biológicos. Para facilitar o entendimento, as moléculas orgânicas de que falo são combustíveis no sentido mais puro da palavra. Pense que o gás da sua cozinha é composto por moléculas orgânicas que possuem energia armazenada (potencial) em sua composição. Dizemos que ela é “orgânica” quando é uma molécula com estrutura de carbono (um dos átomos da qual falamos anteriormente) e geralmente originada a partir de moléculas que de origem biológica. O gás butano que sai no fogão da sua casa possui quatro carbonos ligados entre si com alta estabilidade. Estas ligações possuem elétrons compartilhados com altíssimo nível de energia. Para separar um carbono do outro é necessário uma outra molécula (gás oxigênio O_2 , o mesmo que respiramos) que possui a capacidade de desfazer esta ligação entre os carbonos. Neste nosso exemplo o O_2 tem uma verdadeira atração e necessita adquirir um carbono do butano – tecnicamente o que ele quer mesmo são os elétrons de alta energia que fazem parte da ligação entre dois carbonos. Quando ocorre esta reação o oxigênio se junta com um carbono e parte da energia que estava armazenada na ligação rompida é liberada como calor e energia luminosa (eletromagnética). Esta lógica vale para caracterizar o conceito de combustível e podemos replicar este exemplo com virtualmente todos os combustíveis conhecidos do nosso cotidiano como gasolina, etanol e outros.

Dentre os combustíveis que a vida utiliza, os principais são muito bem conhecidos pelo público em geral, pois sempre estão nas nossas refeições, exatamente devido ao fato de que estes também são os nossos combustíveis. Estamos falando de três tipos de moléculas principais: açúcares, gorduras e proteínas. Os açúcares não são apenas os doces, mas estamos falando de carboidratos como o amido do arroz, do milho, celulose, e o açúcar que usamos na cozinha. Estas moléculas são compostas de carbono, hidrogênio e oxigênio, e as ligações presentes entre os átomos dos carboidratos possuem energia armazenada e é usada pelos organismos para obtenção de energia rápida. As gorduras são moléculas com grande quantidade de energia armazenada, compõe grande parte dos nossos alimentos e é utilizada energeticamente como uso secundário (estocagem). As proteínas também podem ser utilizadas como fonte de energia de modo indireto e o nosso corpo, por exemplo, utiliza em situações de escassez. É válido lembrar que estamos tratando apenas do

aspecto energético destas moléculas pois seria impossível em um único livro discutir sobre todas as outras funções e utilizações que estas moléculas possuem no contexto biológico. Esse detalhe não é só importante, mas também intrigante e superinteressante. De fato, a vida utiliza as mesmas moléculas em funções que vão desde o uso como combustível, como ruas celulares (microtúbulos), como “carros” para locomoção nestas ruas (cinesinas), como geradores em “usinas” (ATP sintetases), como máquinas que realizam funções específicas em uma linha de produção industrial (enzimas). Mas isto é assunto para outro livro.

2. A energia que liga o sistema da vida vem de uma grande usina estelar

A próxima pergunta a ser respondida para entendermos o fluxo da energia da vida é: de onde vem a energia que está armazenada nas moléculas? Como estas moléculas são produzidas se é necessário energia para que as ligações entre os carbonos de um açúcar, por exemplo, sejam estabelecidas? Em outras palavras: de onde vem a energia para “apertar a mola”?

Vamos responder estas questões iniciando com um breve detalhamento da lei da conservação de energia que foi citado no primeiro tópico. De acordo com esta lei a energia de um sistema – neste caso vamos encarar como um sistema o nosso universo – é constante, não aumenta, não diminui, apenas muda de forma. Tendo isso em mente, todo o sistema da biosfera obtém energia a partir da transformação da energia da luz solar em energia química. Trocando em miúdos, a energia que vem do sol é transformada em energia armazenada em ligações químicas pelos organismos vivos que realizam a fotossíntese. Esse processo é um caso aparte e com certeza muito interessante. Já voltamos a ele, primeiro vamos lidar com o fato de que tudo (em termos energéticos) vem do sol e processar esta informação de modo mais detalhado.

A usina primária que abastece o fluxo de energia da vida é o sol. É uma usina de fusão nuclear que consome hidrogênio devido à grande pressão que estes átomos estão lá dentro, fazendo com que um átomo de hidrogênio se funda com outro gerando um novo átomo. Veja que neste caso é diferente da energia armazenada em moléculas orgânicas, que entre um átomo e outro existe uma

ligação que carrega esta energia potencial. O sol funde dois átomos em um único átomo: um novo átomo, o conhecido gás hélio (He). Esta fusão é a mesma de uma bomba de fusão atômica, e libera uma quantidade de energia absurdamente grande. Esta energia é liberada pelo sol em diversas formas, uma delas é a na forma de energia luminosa, que contém ondas eletromagnéticas (um tipo de onda estudada na física) com diversos níveis de energia (ondas com frequências baixas, como a luz infravermelha e radiações altas como o raio-X, além de todas as frequências do espectro observável que geram as cores do arco-íris). A luz por ter um caráter de onda-partícula, viaja em pacotes que são partículas de energia luminosa que chamamos na academia de fótons, que contém um certo nível de energia consigo.

Como a vida capta e transforma a energia solar em energia química

Aqui começamos a falar da questão mais intrigante para mim, e que me motivou a escolher este tema: o fato de os seres fotossintetizantes como plantas, algas e outros organismos produzem o seu próprio combustível. Assim como uma placa fotovoltaica converte a energia luminosa em energia elétrica, os seres fotossintetizantes convertem a energia luminosa em energia química. O sistema da fotossíntese parece mesmo com um sistema de captação de luz ou uma antena parabólica, e o início de tudo está em um complexo de proteínas e moléculas fotossensíveis (pigmentos como clorofila) que damos o nome de complexo antena. Vamos nos situar: estamos falando de algo que ocorre nas células vegetais (sim, isso é microscópio, é uma placa microscópica), especificamente dentro delas em um compartimento chamado “cloroplasto”. Este compartimento possui uma membrana que delimita a parte interna e é precisamente nesta membrana (chamada tilacóide) que está localizado o complexo antena. Imagina que este complexo possui muitas proteínas e pigmentos organizados de um modo a concentrar o máximo de luz solar e o máximo de frequências possíveis (pigmentos vermelhos absorvem ondas com menor frequência, por exemplo) em um único ponto. Parece mesmo com um jogo de espelhos que você mira no sol e é concentrado em um ponto específico desejado. Aquele lugar esquenta porque a energia da luz foi concentrada em um ponto. Este ponto no complexo antena é chamado de centro de reação. Deste

modo, os fótons ao incidirem sobre a membrana tilacóide são captados por todas as moléculas fotossensíveis, sendo a energia destes fótons é parcialmente absorvida e o mesmo, com menos energia, é transmitido por um caminho concêntrico, de um captador até o outro, até esse fóton chegar ao centro da reação. Neste ponto, onde toda a energia é concentrada, estão presentes as famosas moléculas de clorofila, que são proteínas que absorvem o fóton. A energia do fóton é utilizada para excitar elétrons nesta proteína, que ficam energizados e são transferidos para outras moléculas: os aceptores de elétrons – que são como capacitores que são carregados e descarregam em momentos e lugares específicos. São moléculas que podem “pegar” elétrons com alta carga energética proveniente da clorofila e literalmente transportar para outras regiões, outras moléculas, outras vias e reações. Tecnicamente podemos citar alguns aceptores: NADH^+ , NADPH , FADH_2^+ , dentre outros que participam deste processo.

O outro destino dos elétrons energizados que saem das clorofilas são os transportadores de elétrons. Estes não são como baterias ou capacitores, mas como cabos de alta tensão. Estes “cabos” são proteínas específicas que se localizam ao longo da membrana, ao redor dos complexos antena. Elas não utilizam esta energia em outro lugar como os aceptores, mas na própria membrana tilacóide. O que eles fazem? Ao receber os elétrons altamente energizados do centro da reação este elétron é então repassado para o próximo transportador, gerando pontos de transmissão de energia ao longo do percurso na membrana. Como todo fio de alta tensão libera calor como perda da energia ao transmitir de um ponto ao outro, quando um transportador passa um elétron para outro, parte da energia é utilizada para transferir um próton (H^+) que se localiza fora da membrana tilacóide para dentro da membrana (no estroma, a parte mais interna do cloroplasto. Esse processo necessita de energia pois a quantidade de H^+ é muito maior internamente, então o próton não passa espontaneamente para dentro. A membrana interna gera uma verdadeira barragem que impede a passagem de H^+ para dentro, mas com a energia da transmissão dos elétrons pelos transportadores é possível, com trabalho, bombear estes para dentro mesmo contra o gradiente de concentração. Vamos falar da hidrelétrica daqui a pouco.

Outro ponto importante é o papel da água no processo da fotossíntese e é o motivo pelo qual as plantas precisam tanto de água para realizar esta função: a água age como um doador de elétrons para repor o elétron perdido pela clorofila a receber a energia luminosa. Quando a luz bate na molécula de água no centro de reação ocorre um processo de quebra (fotólise) da molécula, gerando hidrogênio (chamamos de próton ou H^+ , pois está sem o seu elétron) e uma molécula do gás oxigênio, exatamente os constituintes da água (lembra-se da sigla: H_2O ?), além de um elétron que entra no lugar do elétron perdido pela clorofila quando recebeu a luz solar. O oxigênio gerado no processo é o oxigênio que dizemos que as plantas liberam na atmosfera. Viu como um evento bioquímico altamente complexo pode ser observado simplesmente ao respirar?

Mas, e o próton (H^+) que foi gerado na fotólise? Este fica dentro do estroma e se junta aos outros H^+ bombeados para dentro a partir dos transportadores citados acima. Falamos muito sobre usinas, energia, mas ainda não entramos em um sistema idêntico a uma hidrelétrica que funciona dentro dos cloroplastos: Daí para frente podemos considerar a analogia de uma hidrelétrica: os prótons que se acumulam dentro do estroma possuem o mesmo tipo de energia que um rio represado por uma barragem.

A água quer passar pela barragem pois tem uma energia potencial dada pela gravidade tentando empurrá-la para baixo. Quando abrimos uma passagem pequena, a água passa por ela com muita energia cinética (movimento da água). Nestas passagens, as usinas hidrelétricas colocam turbinas que transformam o movimento da água em energia elétrica ao rodar as turbinas e, junto com elas, rodar geradores de eletricidade. Sim, é um pouco constrangedor pois parece mesmo que copiamos tudo: nas “barragens” da fotossíntese, canais são abertos e, de fato, possui uma proteína motora que mais parece uma turbina que gira (literalmente ela gira conforme a passagem dos H^+). A força potencial do H^+ querendo sair devido a grande concentração deles em relação ao lado de fora da “barragem”, somada ao fato de que só tem o canal com a sua turbina para sair, temos uma energia suficiente para carregar as moedas de troca da vida: o ATP. A ATP sintetase é a proteína que gira no canal e liga um fosfato inorgânico (um átomo de fósforo ligado com 4 oxigênios) com uma molécula de ADP (que é o cartão ou ficha descarregada), gerando a ficha carregada, o cartão

carregado, a bateria carregada, como queiram chamar. Este é o ponto nevrálgico do aproveitamento energético. Imagina que todas as máquinas que funcionam dentro das células, fazendo qualquer trabalho, só consiga funcionar com uma ficha carregada de energia. Esta ficha é o ATP. O ATP é uma molécula que possui muita energia armazenada e pode ser utilizada em “máquinas” que possuem o encaixe para que ele chegue e libere a energia armazenada especificamente para a realização de um trabalho, no local correto, na reação correta, na quantidade correta. Tudo economicamente regulado.

3. O processo de fabricação dos combustíveis, das peças, das estruturas e das próprias máquinas das linhas de produção das fábricas da vida.

Finalmente, agora sabemos como as plantas captam a energia da luz e armazenam em formato químico, de modo que esteja em baterias utilizáveis nas linhas de produções da vida. O próximo passo é descobrir como os combustíveis – as moléculas complexas e cheias de energia com os açúcares – e as outras estruturas como máquinas, paredes e peças são construídas, e como o processo de fabricação utiliza a energia armazenada nas baterias. Não menos importante, falaremos de modo superficial sobre como os organismos que não produzem os combustíveis a partir da energia solar (como nós) utilizam os combustíveis para produzir seus próprios ATPs se alimentando dos combustíveis produzidos pelas plantas e respirando o oxigênio também produzido por elas. Isto é necessário pois os organismos que não fazem fotossíntese não podem utilizar diretamente os combustíveis obtidos quando se alimentam, pois o funcionamento das máquinas internas de uma célula, como as nossas, também dependem do mesmo tipo de ficha: o ATP. Estamos querendo dizer que não é possível que uma molécula de glicose, mesmo que tenha grande quantidade de energia em suas ligações químicas, seja utilizada como uma ficha que possibilita o uso desta energia para rodar seus maquinários internos. Isto por dois motivos principais: o primeiro é que se toda a energia da glicose for liberada de uma vez é possível que a célula aqueça até fritar. O outro motivo é que a glicose não é uma ficha universal que cabe em todas as máquinas, o ATP é.

Primeiro vamos elucidar como as plantas produzem o seu próprio alimento utilizando as baterias energéticas carregadas com a luz solar. Esse

processo chamamos de biossíntese e cada tipo de molécula possui rotas metabólicas específicas, com reações distintas e custo energético diferente. Por exemplo: a síntese de sacarose (o açúcar de cozinha) que é um carboidrato de alto valor energético e de uso rápido possui um conjunto de reações que realizam a junção de uma molécula de glicose com uma de frutose, formando um dissacarídeo (um açúcar composto por 2 tijolinhos, ou monômeros). Para esta reação ocorrer a planta necessita já ter de antemão moléculas de glicose e frutose, uma enzima (uma máquina especialista em utilizar a energia do ATP para possibilitar que as reações impossíveis de acontecerem aconteçam em tempo hábil) e claro: o ATP. Do mesmo modo, a síntese de proteínas possui uma rota – infinitamente elaborada – que lê a informação dos genes e traduz na linguagem das proteínas (uma proteína é um polímero formado por blocos de aminoácidos, cada proteínas tem uma sequência específica deles). Para isso são gastos muitos ATPs.

Mas, além desses exemplos, precisamos falar da fonte primária de combustível após as baterias estarem carregadas com a energia solar: o primeiro combustível que todas as plantas sintetizam é obtido em um ciclo chamado de “Ciclo de Calvin”. Neste ciclo, uma molécula intermediária chamada ribulose (um açúcar de 5 carbonos) sempre tem que existir de antemão, e aquele CO_2 que ouvimos falar que as plantas captam, limpando o ambiente, é exatamente o CO_2 que, com a ajuda de uma enzima importantíssima para a vida (chamada rubisco), é ligado na ribulose, gerando como produto um açúcar de 6 carbonos. Esse carbono adicionado era inorgânico, e agora faz parte de uma molécula orgânica, e a energia armazenada nesta ligação já é uma outra forma de aproveitamento da energia solar, tanto para a própria planta funcionar no que diz respeito aos seus outros processos moleculares internos, como também para os organismos que se alimentarão desta planta utilizar esta energia em seus processos de geração de ATP. Baseado nesta primeira molécula de 6 carbonos e em alguns outros passos que não convém aprofundar neste escopo, todas as outras macromoléculas, gorduras, açúcares complexos, nucleotídeos podem ser sintetizadas. No próximo capítulo, iremos elaborar um pouco mais sobre como tanto as plantas como os animais e virtualmente todos os seres vivos quebram as moléculas de açúcar – e outras – liberando CO_2 e utilizando a energia

presente nessas ligações rompidas para, novamente, carregar aceptores de elétrons e, agora nas mitocôndrias, utilizar esta energia para fazer a hidrelétrica da mitocôndria funcionar, o que é análogo a hidrelétrica dos cloroplastos na fotossíntese, com um fluxo de H^+ fazendo as turbinas (ATP sintases) girar e produzir ATPs.

4. Referências

AMABIS, José Mariano; MARTHO, Gilberto Rodrigues. **Biologia: Biologia das células: volume 1**. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2015.

NELSON, David L.; COX, Michael M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.

PETCHEY, Sara; TREAGUST, David; NIEBERT, Kai. Improving University Life Science Instruction with Analogies: Insights from a Course for Graduate Teaching Assistants. **CBE—Life Sciences Education**, v. 22, n. 2, ar24, 2023. DOI: 10.1187/cbe.22-07-0142.

TRUJILLO, Caleb M.; ANDERSON, Trevor R.; PELAEZ, Nancy J. A Model of How Different Biology Experts Explain Molecular and Cellular Mechanisms. **CBE—Life Sciences Education**, v. 14, n. 2, ar20, 2015. DOI: 10.1187/cbe.14-12-0229.

Autores

Daniel Caligari

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá