

Metabolismo energético da célula

COMENTÁRIOS
GERAISREFLEXÕES
SOBRE O ENSINO
DE BIOLOGIA

1 Conceitos gerais

Neste capítulo, vamos estudar a obtenção, a transformação e a utilização da energia necessária à vida, ou seja, o **metabolismo energético da célula**.

Os principais processos envolvidos no metabolismo energético da célula são a **fotossíntese** e a **quimiossíntese**, que produzem matéria orgânica a partir de substâncias inorgânicas simples, e a **respiração aeróbia**, a **respiração anaeróbia** e a **fermentação**, que liberam a energia contida nos alimentos orgânicos.

2 Fotossíntese

A fotossíntese tem esse nome porque é um processo de síntese que exige luz para que se realize (*foto* = luz). A síntese que ocorre é a formação de matéria orgânica (carboidratos), a partir da água e do gás carbônico, havendo necessidade de um pigmento que capte a energia da luz solar: o **pigmento clorofila**. Assim, a fotossíntese somente é realizada pelos seres vivos que possuem células com pigmentos fotossintetizantes, especialmente a clorofila, que é o pigmento verde.

Costumamos dizer *clorofila*, no singular, mas existem alguns tipos de clorofila, principalmente as conhecidas por **a**, **b**, **c** e **d**. Esses tipos diferem um pouco entre si e utilizam diferencialmente certos comprimentos de onda do espectro luminoso, principalmente do azul e do vermelho.



CURIOSIDADE

Os **pigmentos** são constituídos por moléculas que apresentam uma cor, pela reflexão de determinados comprimentos de onda. Um objeto vermelho, por exemplo, contém pigmentos que refletem as ondas cuja frequência e comprimento de onda estão dentro da faixa correspondente à cor vermelha; as demais ondas são absorvidas.

SUGESTÃO
DE ATIVIDADE

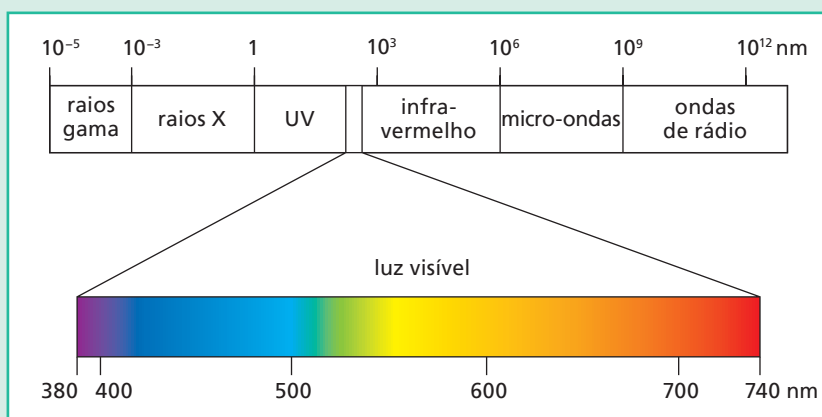
Espectro eletromagnético

O Sol emite luz branca, que pode ser decomposta nas sete cores do espectro visível: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil (índigo) e violeta.

A luz corresponde às ondas eletromagnéticas capazes de estimular nossa visão, permitindo-nos enxergar as cores.

As ondas eletromagnéticas são definidas por sua frequência, medida em hertz (Hz), e seu comprimento de onda, medido em nanômetros (nm). No espectro eletromagnético, a luz visível corresponde a uma faixa que vai de aproximadamente 380 nm (cor violeta) a 740 nm (cor vermelha).

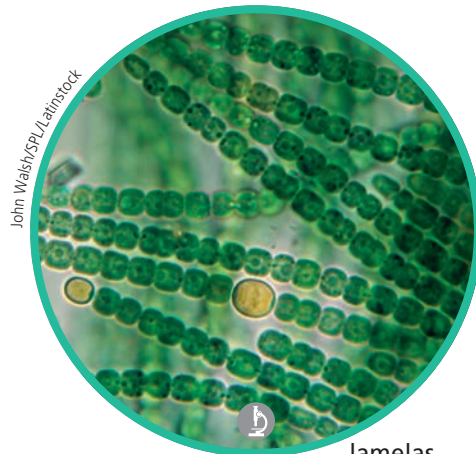
Além das ondas correspondentes à luz visível, o espectro eletromagnético é formado por radiações invisíveis à vista humana: ultravioleta (UV), raios X, raios gama, infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio.



- Planta em crescimento, tendo em seu ápice folhas recém-formadas de cor marrom. A ocorrência dessa cor se deve à **falta de clorofila**, ainda não produzida. As folhas já desenvolvidas possuem células com cloroplastos e são verdes porque a predominância de clorofila reflete os raios luminosos correspondentes a essa cor.

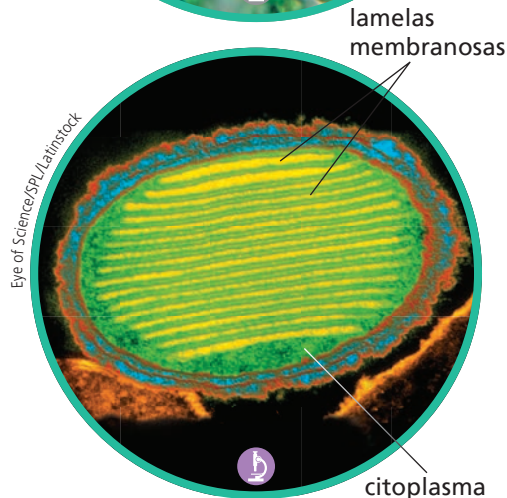


- **Cianobactérias** do gênero *Anabaena*. Esses organismos fotossintetizantes vivem agrupados em colônias filamentosas. Cada célula tem cerca de 2 µm de comprimento.



A hipótese endossimbiótica, que explica a origem de cloroplastos e mitocôndrias, é abordada no capítulo 8.

- **Bactéria fotossintética** (em corte), mostrando as lamelas membranosas no citoplasma. Os pigmentos envolvidos na fotossíntese situam-se nessas lamelas. Esta bactéria (cerca de 2 µm) é encontrada em ambientes lodosos onde a temperatura e a salinidade são elevadas, além da alta concentração de enxofre.



Entre todas as clorofilas, a mais abundante na natureza e que ocorre em praticamente todos os seres fotossintetizantes é a clorofila **a**. Junto com a clorofila **a**, encontramos outros tipos de clorofila e outros pigmentos que captam a energia luminosa e a transferem para a clorofila **a**. São exemplos de pigmentos auxiliares na fotossíntese os carotenoides, de cor amarelada ou alaranjada, pois refletem os comprimentos de onda correspondentes a essas cores.

Afirmamos que *praticamente* todos os seres fotossintetizantes possuem clorofila **a** porque existem exceções: as bactérias fotossintetizantes que possuem um tipo especial de clorofila chamada **bacterioclorofila**, que absorve de forma mais eficiente o comprimento de onda infravermelho, invisível ao olho humano. Tais bactérias pertencem ao reino Monera, mesmo reino das cianobactérias, que realizam fotossíntese, mas não possuem bacterioclorofila. As cianobactérias possuem clorofila **a**, como os demais fotossintetizantes eucariontes, sendo este mais um indício da provável origem dos cloroplastos a partir de simbiose mutualística de eucariontes com cianobactérias ancestrais. Todos os eucariontes fotossintetizantes possuem clorofila **a**.

Nos procariontes, os pigmentos fotossintetizantes situam-se em membranas que formam vesículas ou lamelas concêntricas no citoplasma, mas que não correspondem a organelas membranosas, como plastos, que são característicos dos eucariontes fotossintetizantes.

A estrutura dos cloroplastos foi abordada no capítulo anterior. É com base nos processos que ocorrem nos cloroplastos dos eucariontes que estudaremos as etapas da fotossíntese.



PENSE E RESPONDA

Considere duas plantas de folhas verdes. Uma delas foi submetida à luz vermelha e a outra, à luz verde.

- De que cor as folhas de cada planta seriam visualizadas?
- Se as plantas fossem mantidas sob tal iluminação por uma semana, qual seria o efeito esperado em seu metabolismo?
- Como deveriam ser mantidos os outros fatores abióticos, para cada planta, durante o experimento? Justifique suas respostas.

a) A planta sob luz vermelha pareceria ter folhas pretas, e a planta sob luz verde não teria alteração em sua cor.

b) A luz verde não é absorvida e a planta provavelmente morreria por não realizar fotossíntese.

c) Idênticos para as duas plantas. Desse modo, é possível relacionar os resultados do experimento a apenas uma variável.

2.1 Separando pigmentos

Uma técnica que pode ser usada para separar pigmentos presentes em folhas de plantas é a **cromatografia**. O princípio dessa técnica é o de que pigmentos diferentes, quando dissolvidos em um solvente (como álcool ou éter), movimentam-se com velocidades diferentes em um pedaço de papel.

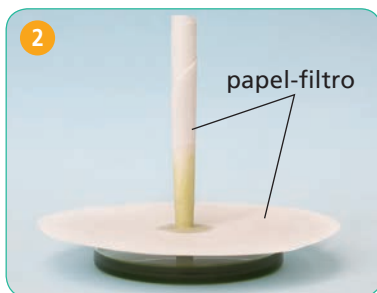
Existem técnicas muito sofisticadas de cromatografia, mas a descrita aqui é das mais simples. Recolhem-se algumas folhas de uma planta, colocando-as em um recipiente onde serão maceradas com um pouco de álcool etílico. Pode-se também remover os pigmentos usando álcool quente, como explicado ao lado.

O líquido obtido é separado em um recipiente, como uma placa de Petri, conforme mostra a imagem 1. Em seguida, utilizamos dois pedaços de papel-filtro (semelhante ao que utilizamos para coar café). Um deles, no qual foi feito um furo no centro, é colocado cobrindo o líquido; o outro é enrolado, formando um cilindro (tubo). Esse cilindro é colocado verticalmente, atravessando o furo, de maneira que a extremidade inferior fique em contato direto com o líquido (representado nas imagens 2 e 3).

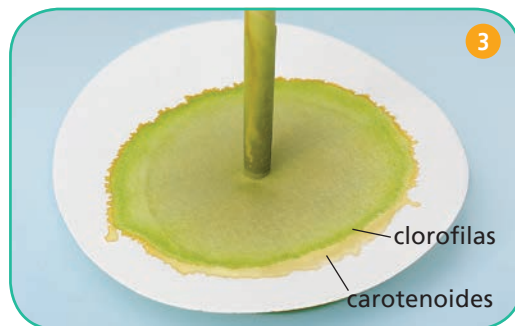
Veja no Manual comentários a respeito da cromatografia.



1 Extrato de folhas verdes.



2 Montagem da cromatografia.



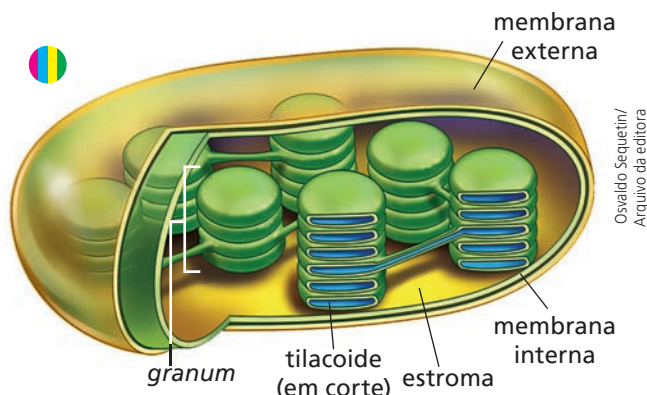
3 Resultado da cromatografia.

O líquido começa a migrar pelo papel-filtro e os pigmentos são separados. Podemos notar uma faixa de pigmentos verdes, que são clorofilas, e uma faixa de pigmentos amarelos, que são carotenoides.

2.2 Etapas da fotossíntese

Podemos, para facilidade de entendimento, dividir os processos químicos da fotossíntese em duas etapas: a que depende diretamente da luz, em que ocorre a **fotólise da água** e a **fotofosforilação**, e a que não depende diretamente da luz, em que ocorre a **formação da matéria orgânica**.

A etapa dependente da luz ocorre nos tilacoides, e a da formação da matéria orgânica ocorre no estroma dos cloroplastos. Reveja a estrutura do cloroplasto na figura ao lado.



^ O **cloroplasto**, com parte removida.

Na página 207, há uma leitura a respeito das plantas que realizam a etapa de síntese da matéria orgânica durante a noite. Diversas espécies nativas do Brasil possuem esse tipo de metabolismo fotossintético.



CURIOSIDADE

Relembrando alguns conceitos de reações químicas, as reações de **análise** (ou decomposição) são caracterizadas pela decomposição de uma substância complexa em duas (ou mais) substâncias mais simples. Essas reações geralmente ocorrem por ação de um agente, como a eletricidade e a luz, por exemplo. Quando o agente é a **eletricidade**, falamos em **eletrólise**; quando é a **luz**, falamos em **fotólise**.

Você se lembra de quando estudou a eletrólise da água no Ensino Fundamental? A planta não faz eletrólise, mas faz fotólise.



RECORDE-SE

Íon

Formado da perda ou do ganho de elétrons por um átomo, não sendo eletricamente neutro. O íon hidrogênio é positivamente carregado, pois surge da perda de um elétron, ou seja, de uma partícula de carga elétrica negativa.

Fotólise da água

A palavra **fotólise** significa “quebra pela luz”, uma referência à primeira etapa da fotossíntese ser desencadeada pela presença dos raios luminosos. Desse processo participa a clorofila.

Em presença de luz, moléculas de clorofila ficam em um estado ativado (ou excitado) e isso desencadeia uma reação química de análise, em que a água (H_2O) é transformada em hidrogênio, decomposto em elétrons (e^-) e íons hidrogênio (H^+), e em gás oxigênio (O_2):



Os elétrons e os íons hidrogênio são “capturados” por compostos transportadores presentes no estroma, conhecidos pela sigla NADP^+ (do nome, em inglês, da substância fosfato de dinucleotídeo de nicotinamida e adenina). Recebendo íons H^+ , esses transportadores passam a ser NADPH e participam da etapa de formação da matéria orgânica.

O gás oxigênio desprende-se para o ambiente já nessa primeira etapa. Dessa forma, os seres fotossintetizantes produzem o gás oxigênio nos diferentes ecossistemas, fato de extrema importância para a preservação da vida na Terra.

Teste da formação de oxigênio na fotossíntese

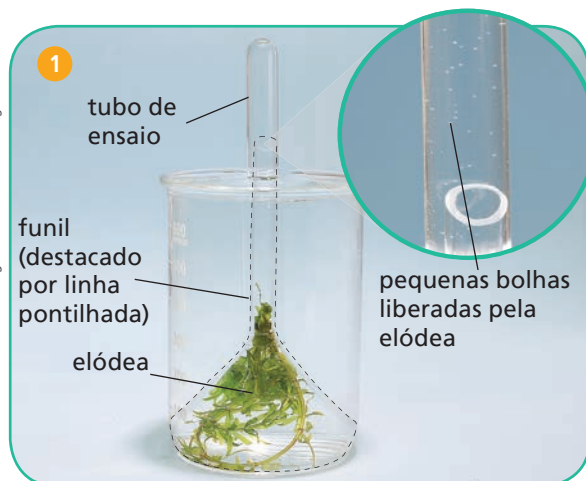
Podemos provar que a planta, ao realizar fotossíntese, libera gás oxigênio para o ambiente. Para isso, fazemos o seguinte:

- › em um recipiente, colocamos água e uma planta aquática, como a elódea;
- › cobrimos a planta com um funil invertido, totalmente mergulhado, de maneira que sua extremidade afilada fique abaixo do nível da água da cuba;
- › enchemos um tubo de ensaio com água e o emborcamos no bico do funil, com cuidado para que não saia água de dentro desse tubo (veja foto 1, ao lado).

Deixando essa preparação exposta à luz por aproximadamente uma semana, vamos notar que a planta começa a liberar pequenas bolhas, facilmente perceptíveis, pois elas sobem na água, acumulando-se na extremidade do tubo de ensaio (veja foto 2).

As bolhas indicam que está sendo liberada uma substância no estado gasoso. Que gás é esse?

Segundo nossa hipótese, o gás que está sendo produzido pela planta é o oxigênio (O_2).



Montagem da demonstração.



Resultado observado após 10 dias.

Caso haja condições para a realização dos procedimentos na escola, veja mais orientações no Manual.

Para testar essa hipótese, verificamos se o gás que se acumulou no tubo é realmente o oxigênio. Para isso, recorreremos a uma de suas propriedades: a de comburente, isto é, uma substância que alimenta a chama.

Um teste, que pode ser feito apenas pelo professor, e tomando cuidados adicionais, como o uso de luva protetora e óculos de proteção, é o descrito a seguir e mostrado na foto 3:

- ▶ retira-se o tubo de ensaio, deixando escorrer a água que está dentro dele. O tubo deve ser mantido com a boca para cima, pois o gás oxigênio é mais denso do que o ar. Dessa forma, evita-se que ele se desprenda muito rapidamente, o que dificultaria a observação;
- ▶ em seguida, seguramos na entrada do tubo um palito de fósforo em brasa;
- ▶ a chama é reavivada ao entrar em contato com o oxigênio.



Thiago Oliver/Acervo do fotógrafo

- ^ Procedimento para testar a **presença de gás oxigênio** no tubo de ensaio. Dependendo da quantidade de gás oxigênio presente, a chama do fósforo pode se acender muito rapidamente e com intensidade. **Por isso, só o professor deve realizar esse procedimento, tomando as devidas medidas de segurança.**

Fotofosforilação

Fotofosforilação significa adição de fosfato (fosforilação) em presença de luz (*foto*). A substância que sofre adição de fosfato inorgânico (Pi) é o **ADP** (adenosina difosfato ou difosfato de adenosina), formando **ATP** (adenosina trifosfato ou trifosfato de adenosina). Esse processo ocorre no estroma do cloroplasto.

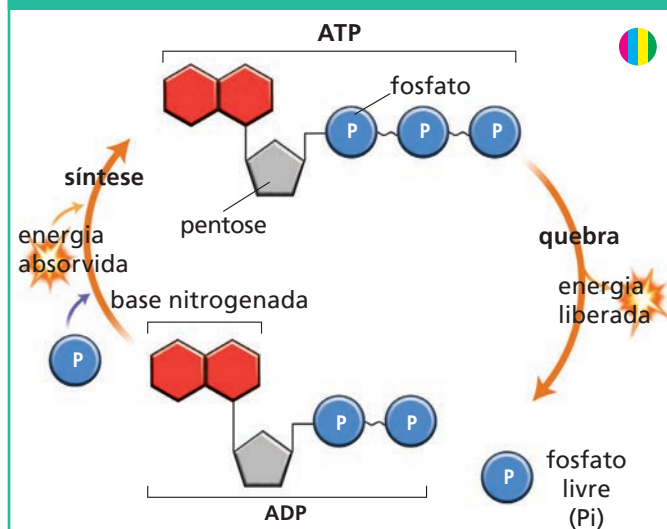


Grande parte da energia liberada na oxidação de moléculas orgânicas, dentro das células, fica armazenada nas moléculas de ATP, que atuam como verdadeiras “moedas energéticas”, a serem gastas em processos celulares.

Como você pode observar na ilustração ao lado, o ATP é formado por adenosina ligada a três radicais fosfato, razão do nome trifosfato de adenosina.

A adenosina ligada a um grupo fosfato corresponde a um nucleotídeo, unidade que forma também os ácidos nucleicos. No caso do ATP, a base nitrogenada é a adenina, que se liga a uma molécula do açúcar ribose, à semelhança do que ocorre no RNA.

Síntese de ATP a partir de ADP



Paulo Cesar Pereira/Arquivo da editora

- ^ Modelo simplificado das **moléculas de ATP e ADP**. Observe que a energia absorvida na síntese de ATP fica armazenada na última ligação fosfato. Quando ocorre a quebra dessa ligação, a energia é liberada.



ATENÇÃO

O **fosfato** é um composto contendo fósforo, cujo símbolo químico é P (do latim *Phosphorus*), e oxigênio (símbolo O). Sua fórmula é PO_4^{3-} . Nas representações esquemáticas das moléculas de ATP, ADP, DNA e RNA, é comum indicar o fosfato pela letra P, do inglês *Phosphate*. Essa é também a origem da sigla ATP, do inglês *Adenosine TriPhosphate*. O fosfato inorgânico é o íon fosfato (PO_4^{3-}) em solução aquosa, representado por P_i .

Cada NADP⁺ transporta 2 elétrons e um íon hidrogênio. Ao final do ciclo de Calvin-Benson, são produzidas moléculas com 3 carbonos, gliceraldeído-3-fosfato (G3P). Para a produção de um G3P, são consumidas 9 moléculas de ATP e 6 NADPH. Fonte: REECE, J. B. et al. *Campbell Biology*, 9. ed. Benjamin Cummings, 2009, p. 186-199.



CURIOSIDADE

O ciclo que leva à formação de matéria orgânica na fotossíntese foi descrito pelos cientistas James Bassham, Andrew Benson e Melvin Calvin, da Universidade da Califórnia (EUA), em artigo científico publicado em 1950. Pelo trabalho receberam o Prêmio Nobel em 1961. Por isso, o processo é conhecido como ciclo de Calvin-Benson ou, ainda, ciclo de Calvin-Benson-Bassham.

Veja o artigo original de Bassham, Benson e Calvin, em inglês, disponível em: <http://www.jbc.org/content/185/2/781.full.pdf+html?sid=9f9acc07-aadd-453a-a298-a5845ded0e0a>. Acesso em: 10 fev. 2016.



SUGESTÃO DE ATIVIDADE



ATENÇÃO

O ATP e o ADP não foram considerados nas equações ao lado, pois o que é produzido na fotofosforilação é consumido na produção de matéria orgânica. Não se esqueça, também, de que o hidrogênio participa das reações da fotossíntese na forma de elétrons e íons hidrogênio (H⁺).

No ATP, a energia fica armazenada especialmente na terceira ligação fosfato, sendo liberada quando essa ligação é quebrada. Com a liberação da energia, o ATP transforma-se em ADP (difosfato de adenosina).

Nos tilacoides, há conjuntos de enzimas organizadas em sequência ou cadeia, ativada na passagem de elétrons de uma enzima para a seguinte. Por isso, cada um desses conjuntos de enzimas é chamado cadeia transportadora de elétrons. A última das enzimas de uma cadeia transportadora de elétrons é a ATP-sintase (ou sintase do ATP), que catalisa a geração de ATP.

Formação da matéria orgânica

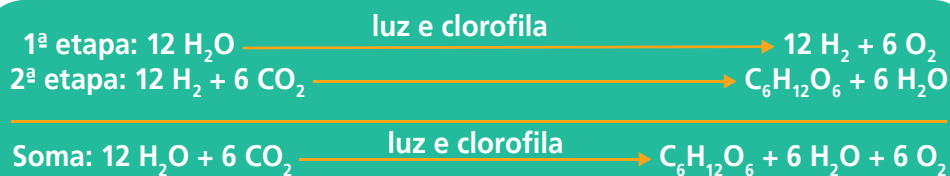
Nesta etapa da fotossíntese, não há necessidade direta de luz ou clorofila: ela se realiza independentemente da presença desses dois fatores, mas precisa da energia armazenada no ATP, produzido na fotofosforilação, e precisa dos hidrogênios provenientes da fotólise da água. Assim, dizemos que essa etapa depende indiretamente da luz.

Dessa etapa, participa o CO₂ do ar atmosférico. As moléculas de gás carbônico, mais os elétrons e íons hidrogênio trazidos pelos transportadores NADPH, participam de um ciclo bastante complexo de reações químicas, que compõem o ciclo de fixação do carbono ou ciclo de Calvin-Benson, nome em homenagem aos pesquisadores que descreveram o processo. Nesse ciclo, que ocorre no estroma, o átomo de carbono presente na molécula de CO₂ é fixado em uma molécula de carboidrato (CH₂O)_n, gerando também como produto moléculas de água. Restam também moléculas de ADP e de NADP⁺, disponíveis no estroma e usadas novamente nas etapas de fotofosforilação e fotólise da água.

A molécula CH₂O sofre **polimerização** imediata, originando açúcares simples, principalmente a glicose (C₆H₁₂O₆). A polimerização é o processo em que moléculas iguais se reúnem e originam uma nova substância constituída por um múltiplo dessas moléculas.

2.3 Visão geral do processo fotossintético

Para termos uma visão geral do processo fotossintético, podemos representar cada uma das fases por uma equação simplificada, e somar essas equações para chegarmos à **equação geral da fotossíntese**:



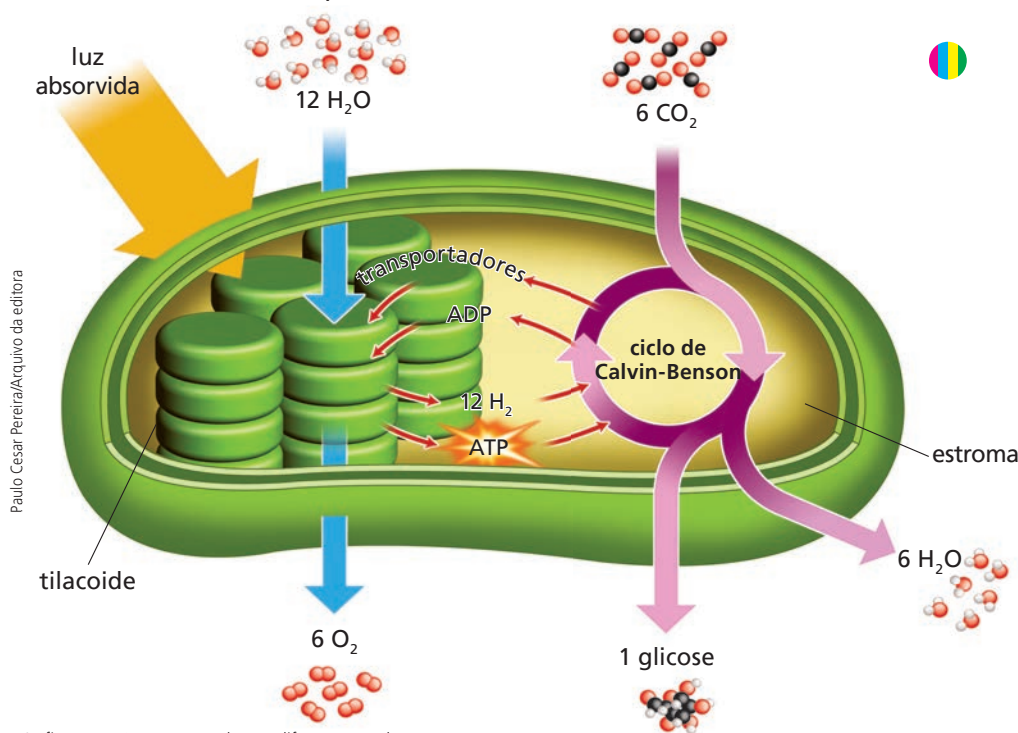
Nessa soma, como 12 moléculas de H₂ aparecem como produto na primeira etapa e como reagentes na segunda etapa, pode-se eliminá-las por simplificação. Depois, é só copiar os reagentes e os produtos que sobraram nas duas equações, ficando:



A partir de açúcares simples, como a glicose, a planta produz os açúcares mais complexos, como o **amido**.

A sacarose é o açúcar comum, encontrado na cana-de-açúcar e é formado pela união de duas moléculas de hexose: uma de glicose e uma de frutose, ambas formadas em decorrência da fotossíntese.

O esquema a seguir ilustra as principais etapas da fotossíntese e o local onde elas acontecem, no cloroplasto.



< Esquema simplificado da **fotossíntese** mostrando suas principais reações e onde ocorrem no cloroplasto.

✓ O **lugol** é uma solução de iodo, de cor amarelada, que permite identificar a presença de amido. Observe pelas fotografias que a cor do lugol (1) torna-se arroxeada no contato com o amido da batata (2).

Teste da presença de amido e sua formação em decorrência da fotossíntese

A presença do amido nas plantas pode ser determinada usando-se uma de suas características: o amido adquire cor azul-violeta em presença de uma solução fraca de iodo (lugol).

É possível também demonstrar a presença de amido em farinhas. Basta colocar um pouco da farinha em uma gota de água misturada com solução fraca de iodo: os grãos de amido tomam imediatamente a cor azul-violeta.

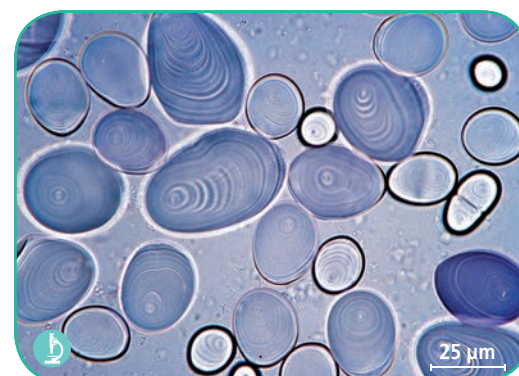
Cada planta produz um grão de amido com forma característica, o que nos permite identificar o tipo de farinha que está sendo observado.

Como podemos comprovar que o amido é produzido em decorrência da fotossíntese? Isso pode ser provado por meio de um procedimento experimental, descrito a seguir, e que pode ser realizado pelo professor:

- cobre-se uma folha, ainda presa à planta, com papel-alumínio ou qualquer outro papel opaco, que impede a passagem de luz;
- passados alguns dias, retiram-se duas folhas da planta – aquela coberta com papel-alumínio e uma descoberta;
- retira-se o papel-alumínio da folha coberta;
- as duas folhas devem ser descoradas em álcool quente.



Fotos: Imagemlatina



ISM/Phototake/Glow Images

^ **Grãos de amido de batata, corados com solução de iodo.** Cada grão contém muitas moléculas de amido, e seu aspecto é diferente para cada espécie de planta.