



Transformação de energia na célula

Prof.^a Thaíssa Queiróz Machado

Descrição

Conceitos relacionados à transformação de energia nas células eucarióticas e entendimento das características e funções de organelas atuantes no processo de obtenção de energia.

Propósito

Compreender de que forma as células obtêm energia e como as organelas são estruturadas e funcionam é essencial para o estudo da biologia celular, que é a base das ciências da vida.

Objetivos

Módulo 1

Cloroplastos e a transformação de energia

Identificar as características e as funções dos cloroplastos.

Módulo 2

Mitocôndrias e a transformação de energia

Descrever as características e as funções das mitocôndrias.

Módulo 3

Peroxisomos e o metabolismo celular

Reconhecer o papel dos peroxissomos no metabolismo celular.



Introdução

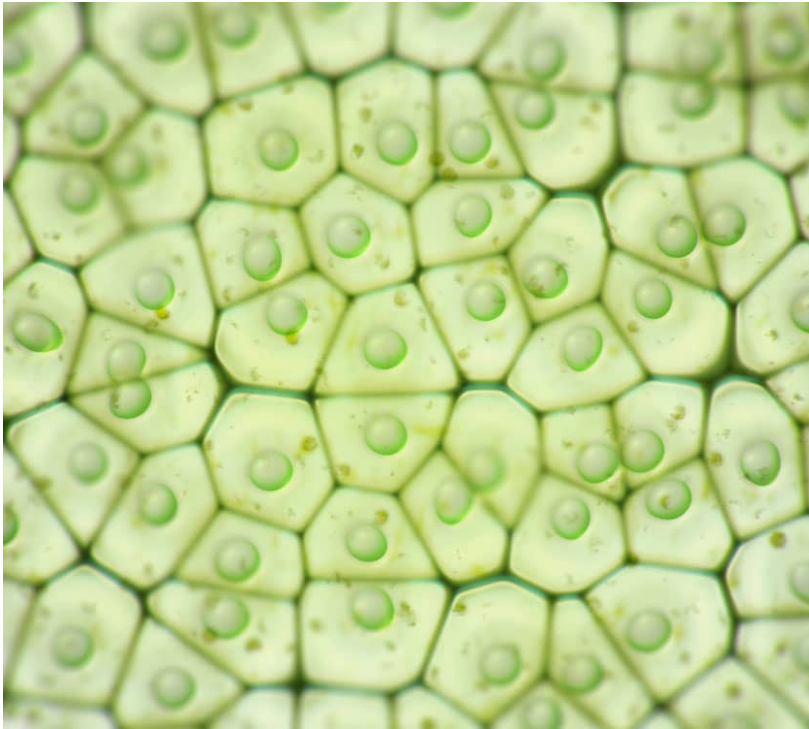
As células são a unidade básica de todos os organismos. Para que a célula sobreviva e realize suas atividades, é necessário que alguns processos sejam executados, entre eles a obtenção e a transformação de energia. Uma célula sem energia é uma célula morta.

Existem diferentes formas de obter e transformar energia, a depender do tipo celular. As células vegetais (das plantas e algas, por exemplo) obtêm energia pelo processo da fotossíntese. Só realizam fotossíntese as células que possuem uma organela chamada cloroplasto. O cloroplasto apresenta uma estrutura especializada que transforma energia luminosa (do sol) em energia química para a célula.

Já as células animais também possuem seu mecanismo de transformação de energia, mas não por meio de fotossíntese. A mitocôndria é a organela capaz de realizar vários processos vitais para as células. No que

diz respeito à energia, as mitocôndrias realizam a respiração celular, um mecanismo com várias etapas que apresenta uma sequência de eventos impressionantes e coordenados.

Neste conteúdo, vamos conhecer as características dos cloroplastos e mitocôndrias, responsáveis pela obtenção e transformação de energia na célula, e entender como tais processos são executados. Além disso, conheceremos outra organela que participa do metabolismo celular, o peroxissomo e suas funções.



1 - Cloroplastos e a transformação de energia

Ao final deste módulo, você será capaz de identificar as características e as funções dos cloroplastos.

Os cloroplastos

Para que as células se mantenham vivas, elas precisam constantemente de ATP (adenosina trifosfato), que é responsável pelo fornecimento de energia. Grande quantidade de energia é produzida por dois tipos de

organelas: as **mitocôndrias**, presentes em quase todas as células animais e vegetais, e os **cloroplastos**, encontrados somente em células vegetais, das plantas e algas.

Organelas

São estruturas localizadas no citoplasma celular e que desempenham funções importantes para garantir o funcionamento adequado da célula.



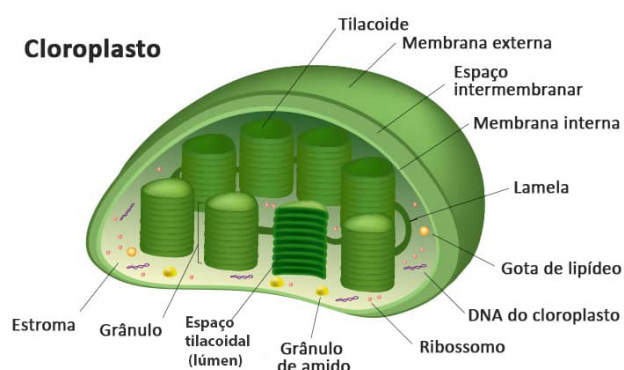
Representação em 3D do cloroplasto.

Os **cloroplastos** estão localizados principalmente nas células das folhas de plantas. São um tipo de plastídio ou plasto, que possuem DNA próprio e têm capacidade de autoduplicação. As células vegetais apresentam características marcantes que as distinguem das células animais: a presença de vacúolos, parede celular e cloroplasto.

O cloroplasto possui pigmento verde em abundância, que é a **clorofila** - responsável pela cor verde das plantas e algas verdes e está diretamente relacionada com o processo de fotossíntese, no qual a energia solar é aproveitada para produzir ATP.

Além da clorofila, os cloroplastos também apresentam pigmentos amarelos e laranjas, os **carotenoides**, mas estes são comumente mascarados nas folhas pela coloração verde predominante da clorofila.

A ultraestrutura dos cloroplastos é considerada complexa. Apresenta geralmente um formato de disco e possui duas membranas de revestimento e um espaço intermembranar entre elas. Dentro dos cloroplastos há um fluido chamado **estroma**, onde estão dispersos vários componentes, como DNA e ribossomos. Além de abrigar estruturas, o estroma executa diferentes vias metabólicas indispensáveis para a célula.



Mergulhado no estroma, encontram-se os **tilacoides**, que são um sistema de membranas que formam estruturas similares a sacos achatados. Na **membrana do tilacoide**, estão as clorofilas, os carotenoides e os complexos proteicos que atuam na cadeia transportadora de elétrons para produção de ATP. O interior dos tilacoides é chamado de **lúmen do tilacoide**. Os tilacoides se organizam no interior do cloroplasto formando colunas semelhantes a pilhas de moedas, chamadas de **grânulo** ou granum.

As membranas que compõem os cloroplastos são: membrana externa, membrana interna e membranas dos tilacoides. Essas membranas delimitam os seguintes compartimentos: o espaço intermembranar, o estroma e o lúmen do tilacoide.

Saiba mais

Outros componentes encontrados no interior dos cloroplastos incluem as **gotas de lipídeos**, pequenos corpos oleaginosos; e os **grânulos de amido**, carboidratos armazenados que só estão presentes quando a célula está realizando ativamente a fotossíntese, enquanto em período prolongado de escuro não estão presentes.

Ainda, os cloroplastos possuem DNA circular próprio e ribossomos. Por conta disso, são considerados semiautônomos por produzirem algumas proteínas. Outra característica interessante do cloroplasto está relacionada à sua habilidade de se autoduplicar, ou seja, originar outro cloroplasto.

Algumas das propriedades dos cloroplastos aqui apresentadas se assemelham às das mitocôndrias, como a dupla membrana e o DNA próprio, o que fez com que cientistas levantassem a hipótese de que cloroplastos e mitocôndrias são organelas que se originaram de uma associação simbiótica (ou seja, interação entre dois organismos). Essa ideia levou à teoria endossimbiótica, que estudaremos ao longo deste conteúdo.



Cloroplastos, mitocôndrias e a teoria da endossimbiose

Confira agora a teoria da endossimbiose que levou ao surgimento dos cloroplastos e das mitocôndrias nas células eucarióticas.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Como vimos, os cloroplastos possuem material genético na forma de DNA circular e este possui características muito similares ao encontrado nas mitocôndrias e nas bactérias. No entanto, o DNA dos cloroplastos é maior e mais complexo se comparado ao da mitocôndria. São encontradas entre 30 a 200 cópias de DNA no interior do cloroplasto.

Por meio do sequenciamento e estudo do DNA dos cloroplastos, foram identificados muitos genes responsáveis pela transcrição de RNA ribossômico e diversos tipos de RNA transportadores. Além disso, o genoma dos cloroplastos é capaz de codificar proteínas ribossômicas, proteínas envolvidas na fotossíntese e também as relacionadas com a expressão gênica, como subunidades de RNA polimerase.

Saiba mais

Apesar da capacidade de produzir proteínas, os cloroplastos não são capazes de fabricar todas as que precisam. A maioria, cerca de 90%, das proteínas dos cloroplastos são sintetizadas pelo genoma contido no núcleo da célula e importadas do citoplasma para o interior do cloroplasto. Esse transporte de proteínas acontece em sítios específicos das membranas dos cloroplastos, por onde as moléculas são capazes de entrar e sair.

Esses sítios de passagem, chamados de complexos transportadores, são importantes para que o cloroplasto consiga importar parte das proteínas e enzimas fabricadas no citoplasma celular (e esse processo demanda gasto de energia). Tanto a membrana interna quanto a membrana externa possuem tais complexos, que são chamados de:

Complexos TIC

São aqueles que se localizam na membrana interna do cloroplasto

Complexos TOC

São aqueles que estão na membrana externa do cloroplasto

Os complexos TIC e TOC são semelhantes ao sistema TIM-TOM que existe nas mitocôndrias e que vamos conhecer mais para frente.

Fotossíntese

É o processo pelo qual as plantas e as algas conseguem fabricar substâncias orgânicas a partir da energia da luz solar.

Como vimos, as células das plantas e algas possuem uma organela chamada cloroplasto com pigmentos em seu interior, como a clorofila – principal pigmento da fotossíntese e que torna as folhas de cor verde.



A clorofila é a responsável por converter a energia luminosa em energia química (junto com outros pigmentos), mas, para isso acontecer, são necessários outros componentes, como o dióxido de carbono e a água. A partir daí, é liberado o oxigênio e são produzidas as substâncias orgânicas.

Atenção!

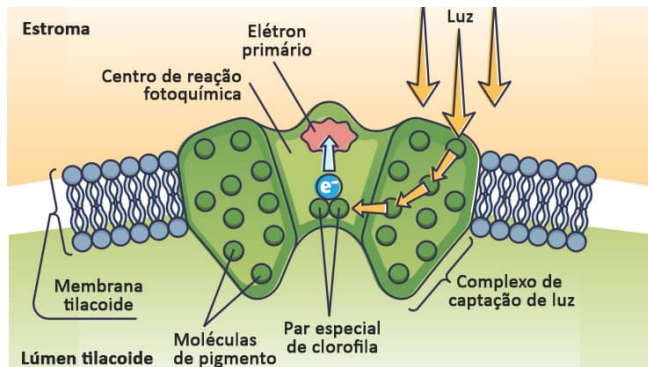
Um aspecto muito importante que diferencia cloroplastos de mitocôndrias é que as mitocôndrias geram energia a partir da quebra de moléculas orgânicas, enquanto os cloroplastos geram energia a partir da luz solar e da água.

A fotossíntese é realizada pelos seres autotróficos (capazes de produzir seu próprio alimento) e ocorre em nível celular, sendo extremamente importante para a cadeia alimentar. Isso porque os seres heterotróficos (que não são capazes de produzir seu próprio alimento) dependem da energia fornecida pelas moléculas orgânicas presentes nos vegetais.

Mas onde exatamente ocorre a fotossíntese?

As membranas e os compartimentos que formam o cloroplasto estão associados às reações fotossintéticas. Dentro dos cloroplastos, estão os grânulos, que possuem tilacoides revestidos pela membrana do tilacoide. Nessa membrana, estão os pigmentos fotossintetizantes, como as clorofilas, que ficam organizadas em um complexo chamado complexo antena, onde ocorre uma das fases da fotossíntese, enquanto a outra fase da fotossíntese ocorre no estroma do cloroplasto.

O **complexo antena** está unido a diferentes proteínas, formando o fotossistema. Os pigmentos fotossensíveis não estão dispersos desordenadamente na membrana do tilacoide, mas sim agrupados nos fotossistemas, que é onde vai ocorrer a conversão da energia luminosa do Sol em energia química.



Basicamente, o processo de fotossíntese pode ser dividido em duas etapas:

Etapa fotoquímica

Também conhecida como etapa clara ou etapa de reações de transferência de elétrons, que ocorre na membrana do tilacoide. Nesta etapa, é captada a luz solar e a água, é liberado o oxigênio e são produzidos ATP (adenosina trifosfato) e NADPH (nicotinamida adenina dinucleótido fosfato). O ATP é a molécula energética, enquanto o NADPH carrega elétrons ricos em energia.

Etapa bioquímica

Também conhecida como etapa escura ou etapa de reações de fixação do carbono, ocorre no estroma do cloroplasto. Nesta fase, os produtos vindos da fase anterior (ATP e NADPH) são utilizados junto com o CO_2 para produzir moléculas orgânicas. Como consequência, o ATP e o NADPH são utilizados nesta etapa e transformados em ADP e NADP que, por sua vez, são liberados e retornarão para a etapa fotoquímica.

Vale destacar que, apesar de as etapas da fotossíntese serem conhecidas como clara e escura, ambas ocorrem durante o dia. Não se engane em pensar que a clara acontece de dia e a escura à noite!

Vamos conhecer em detalhes cada etapa a seguir.

Etapas da fotossíntese

Etapa fotoquímica

Os pigmentos presentes nas membranas dos tilacoides, como as clorofilas e os carotenoides, absorvem os fótons da energia luminosa solar (partículas elementares que compõem a luz). Esses pigmentos são capazes de interagir com os fótons e fazem parte dos fotossistemas.

Os fotossistemas são divididos em dois tipos: **fotossistema I** e **fotossistema II** (nomes dados de acordo com a ordem de descoberta). Vejamos!

Fotossistema I

É capaz de captar energia luminosa com comprimento de onda de até 700 nanômetros.

Fotossistema II

É capaz de captar energia luminosa com comprimento de onda de até 680 nanômetros.

No fotossistema II, os pigmentos fotossensíveis captam a luz solar e ocorre a hidrólise da água, ou seja, a água é quebrada em H^+ e O_2 . Os elétrons resultantes dessa quebra são aproveitados e passam a ser energizados pela energia luminosa. Com isso, no fotossistema II, a energia luminosa é captada e transferida de forma que os elétrons da periferia vão em direção ao centro do fotossistema, onde estão as clorofilas especializadas.

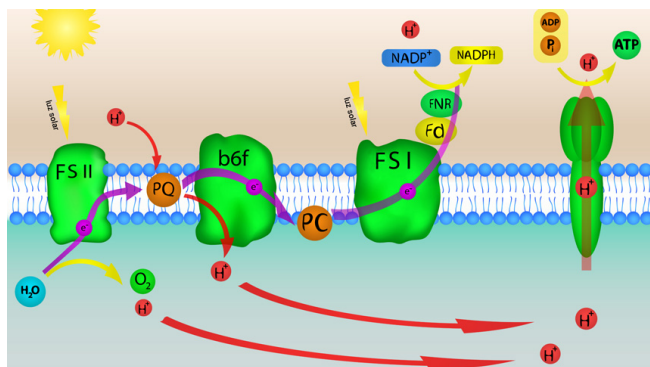
Assim, pigmentos que estão no fotossistema captam a energia luminosa e repassam para o pigmento ao lado, que converge para um centro de reação fotoquímica, que corresponde a um complexo proteico. As clorofilas especializadas convertem esses elétrons ricos em energia e os transferem, por meio de proteínas do citocromo, ao fotossistema I. Esse movimento dos elétrons de um fotossistema para outro leva à geração de ATP. Conforme os elétrons são carregados pelos citocromos, estes vão perdendo energia e, consequentemente, chegam ao fotossistema I com baixa energia. No entanto, os elétrons são energizados novamente no fotossistema I.

Mas como isso acontece?

No fotossistema I, a incidência da luz também energiza os elétrons. Da mesma forma como ocorre no fotossistema II, os elétrons da periferia se deslocam para o centro do fotossistema I e lá são utilizados para formar o NADPH. Lembre-se que o NADPH carrega elétrons energizados.

A fotossíntese consiste em fazer com que a energia de um fóton, que foi passada para o elétron da clorofila, seja repassada até que essa energia ative duas clorofilas contidas no centro da reação fotoquímica (clorofilas especializadas). Assim, as moléculas energéticas podem ser produzidas. Esse processo ocorre na membrana do tilacoide e é considerado acíclico.

Observe, na imagem a seguir, que a energia luminosa é captada e repassada pelos pigmentos até que alcança um par especial de clorofilas no centro de reação.



Processo de captura de energia solar e síntese de NADPH e ATP entre os fotossistemas II e I.

Apesar de a etapa fotoquímica resultar na formação de ATP e NADPH, a quantidade de moléculas energéticas produzidas ainda é pequena. Sendo assim, existe ainda um segundo processo que ocorre nessa etapa para produzir mais moléculas energéticas.

O segundo processo vai produzir bastante ATP e ocorre apenas no fotossistema I. Agora não é necessária a quebra da água (hidrólise), pois os elétrons são energizados com a energia luminosa solar e na sequência são utilizados na produção de ATP. Então, os elétrons são utilizados na formação de ATP e não são inseridos no NADPH. Como consequência, esses elétrons retornam para o fotossistema I. O movimento de retorno dos elétrons completa um ciclo — e é exatamente por isso que esse processo é chamado de processo cíclico.

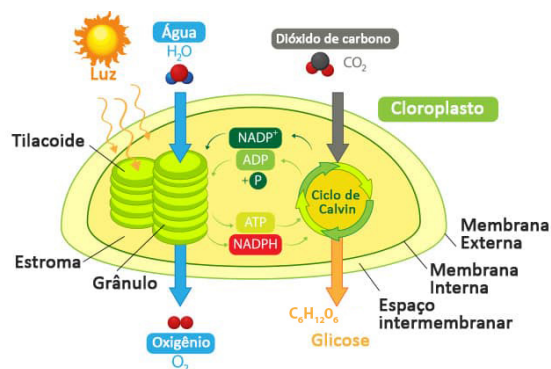
Com isso, entendemos que o fotossistema I atua nos processos acíclico e cíclico, enquanto o fotossistema II atua somente no processo acíclico.

Resumindo

A etapa fotoquímica pode ser entendida como o processo em que a energia luminosa e a quebra da água são utilizadas para produzir ATP e NADPH e liberar O₂. Essas moléculas energéticas (ATP e NADPH) são indispensáveis para a etapa bioquímica.

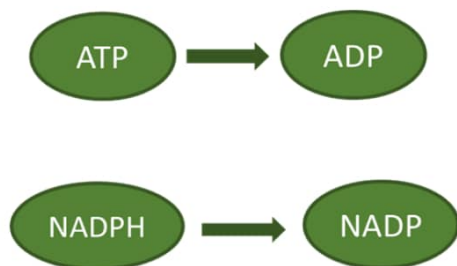
Etapa bioquímica

Ocorre no estroma do cloroplasto e nela ocorrem várias reações químicas. De maneira geral, podemos englobar tais reações em um importante processo chamado ciclo de Calvin. Observe a imagem a seguir:



Ciclo de Calvin na fotossíntese.

No ciclo de Calvin, são utilizados CO_2 , ATP e NADPH (esses dois últimos produzidos na etapa fotoquímica) para produzir a molécula orgânica. O CO_2 entra no ciclo de Calvin e vai se ligar à ribulose com a ajuda de uma enzima denominada rubisco. A partir daí, ocorrem várias reações que demandam gasto de ATP e NADPH, ou seja:



Resumindo

Tem-se, por tanto, a produção da molécula orgânica que possui apenas três carbonos, que se unirá a outra molécula semelhante de três carbonos para produzir uma molécula de glicose. Dessa forma, para produzir uma molécula de glicose, são necessárias duas voltas no ciclo de Calvin.

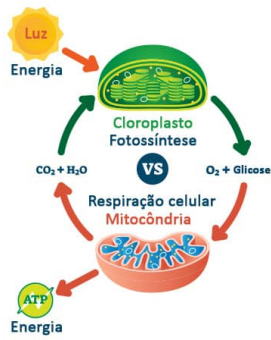
Depois da produção da molécula de três carbonos, o ciclo continua e a molécula de ribulose é formada, podendo se ligar a novas moléculas CO_2 e dar sequência ao ciclo.

Repare que, na etapa fotoquímica, já ocorre a produção de ATP. E na etapa bioquímica, são formadas moléculas orgânicas (glicose), que mais tarde serão utilizadas na respiração celular para produzir mais ATP.

Mas por que isso acontece?

A produção de ATP na etapa fotoquímica não é suficiente para as células e, por esse motivo, ocorre a produção de moléculas orgânicas (glicose) que, durante a respiração celular, produzem mais ATP em

quantidade abundante, suprindo, assim, as necessidades celulares.



Interação entre cloroplasto e mitocôndria nos processos de fotossíntese e respiração celular.

Dessa forma, ressalta-se que, além da fotossíntese, as plantas também realizam respiração celular, sendo esses dois processos fundamentais para obtenção de energia e seu funcionamento.

Em outras palavras, as células vegetais fazem fotossíntese nos cloroplastos, produzindo carboidrato (principalmente sacarose e amido) e liberando O₂. Dentro das células vegetais também existem as mitocôndrias, que utilizam o carboidrato e o O₂ para realizar a respiração celular, o que produzirá ATP em abundância.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

Os cloroplastos são organelas celulares importantes para que as células sejam capazes de desempenhar suas funções, mas não estão presentes em todos os tipos celulares. Em relação aos cloroplastos, assinale a alternativa correta.

- A Os cloroplastos estão presentes em células animais e vegetais, porém não são encontrados em protozoários.
- B Mesmo apresentando DNA próprio, não são capazes de se autoduplicar.
- C A estrutura dos cloroplastos é caracterizada por formato de disco e uma membrana de revestimento.

- D No cloroplasto existe uma abundância de pigmento verde, chamado clorofila, porém esse não é o único pigmento encontrado em seu interior.
- E Os cloroplastos e as mitocôndrias apresentam estrutura semelhante, que, muitas vezes, impossibilita a distinção entre elas.

Parabéns! A alternativa D está correta.

Os cloroplastos são encontrados em células vegetais e em algas verdes, possuem DNA próprio e capacidade de se duplicar. Em seu interior, são encontrados pigmentos, e a clorofila (verde) é o mais abundante. A sua estrutura é marcada pelo formato de disco, dupla membrana e espaço intermembranar. Apesar da semelhança estrutural com as mitocôndrias, é fácil diferenciá-las em razão do formato da membrana interna.

Questão 2

A fotossíntese consiste em um processo indispensável para a sobrevivência das plantas e das algas, que se desenvolve a partir da energia luminosa do Sol e resulta na formação de energia química para as células. Considerando a fotossíntese, assinale a alternativa que a define corretamente.

- A A fotossíntese é um processo de etapa única que converte a luz em energia.
- B O princípio da fotossíntese é fazer com que cloroplastos produzam energia a partir da quebra de moléculas orgânicas.
- C A fotossíntese ocorre nas membranas e nos compartimentos localizados no interior dos cloroplastos.
- D Durante a fotossíntese, são consumidos gás oxigênio e água e produzidos energia e CO_2 .

E

Os pigmentos fotossintetizantes podem ser encontrados espalhados pelo citoplasma celular e também dispersos na membrana tilacoide.

Parabéns! A alternativa C está correta.

A fotossíntese é um complexo processo que envolve várias etapas, cujo fim é produzir energia a partir da luz. Durante esse processo, são utilizados o dióxido de carbono e a água, produzindo energia e liberando oxigênio. A fotossíntese ocorre nos cloroplastos, e os pigmentos fotossintetizantes que participam do processo estão organizados em fotossistemas dentro do cloroplasto.



2 - Mitocôndrias e a transformação de energia

Ao final deste módulo, você será capaz de descrever as características e as funções das mitocôndrias.

As mitocôndrias

São organelas membranosas encontradas no citoplasma da maioria das células eucarióticas. Dessa forma, animais, fungos, protozoários, plantas e algas possuem mitocôndrias, porém existem exceções. Alguns protozoários perderam suas mitocôndrias durante a evolução, como amebas, *Giardia* e *Trichomonas*.

As mitocôndrias apresentam um diâmetro de 0,5 a 1 μm e chegam a ocupar até cerca de 20% do volume do citoplasma celular. São altamente dinâmicas e conseguem se movimentar pela célula, consequentemente, alterando seu formato, dividindo-se ou se fusionando. Para que consigam se movimentar, as mitocôndrias costumam estar associadas ao citoesqueleto tubular.

Em algumas células, como nos neurônios, as mitocôndrias se movem por 1 metro ou mais, e isso ocorre pelo microtúbulo.



Ilustração de corte de uma mitocôndria.

As mitocôndrias também podem se fixar em locais com elevada demanda energética, como ocorre em células musculares, esqueléticas e cardíacas, onde elas se empacotam entre as miofibrilas. Nos espermatozoides, as mitocôndrias podem se acomodar ao redor do flagelo.

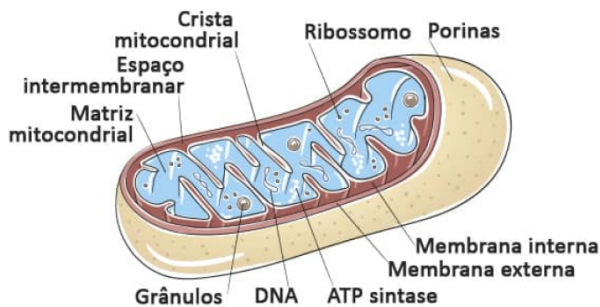
As mitocôndrias foram visualizadas com o microscópio óptico pela primeira vez no século XIX. Possuem duas membranas, uma membrana externa e uma membrana interna, e cada uma delas com funções específicas e delimitadas a locais diferentes.

Vamos analisar separadamente cada uma das partes que compõem as mitocôndrias.

Estruturas das mitocôndrias

Membrana mitocondrial externa

É uma bicamada lipídica que se assemelha à membrana do retículo endoplasmático. É permeável a íons e a pequenas moléculas de até 5 mil daltons, pois possui proteínas transmembranares que formam poros aquáticos na membrana, chamadas de porinas. Além das porinas, existem complexos transportadores nas membranas externas responsáveis por reconhecer sequências sinalizadoras com o intuito de importar proteínas do citoplasma celular para o interior da mitocôndria.



Ultraestrutura da mitocôndria.

Espaço intermembranar

É o espaço ocupado entre a membrana externa e a interna. Possui o mesmo pH e a mesma composição iônica do citoplasma. Neste espaço, existem complexos enzimáticos que transferem o fosfato de um ATP para um GDP, formando um GTP — e, conseqüentemente, um ADP. Porém, o ADP vai para a matriz mitocondrial e será refosforilado. Não se preocupe, entenderemos a dinâmica das moléculas energéticas mais adiante.

Membrana mitocondrial interna

Apresenta uma bicamada lipídica mais fluida e menos permeável. Apesar de a membrana externa apresentar livre permeabilidade para íons e moléculas pequenas, a membrana interna funciona como uma barreira para a difusão desses íons e pequenas moléculas, de forma semelhante à membrana das bactérias.

Saiba mais

Existem íons e metabólitos específicos que conseguem ultrapassar a membrana interna com o auxílio de proteínas transportadoras especiais. Essa permeabilidade restrita é atribuída a um fosfolípido denominado

cardiolipina, que é um fosfolípídeo com quatro cadeias de ácido graxo formado pela junção de duas fosfatidilcolinas.

A fluidez da membrana interna é uma característica essencial para algumas funções da mitocôndria, como a cadeia transportadora de elétrons. Além disso, a membrana interna delimita a matriz mitocondrial e é bastante “pregueada”, de forma que origina as cristas mitocondriais.

A relação proteína/lípídeo que constitui a membrana interna é de 70/30. Essa elevada quantidade de proteínas é decorrente da presença da cadeia transportadora de elétrons e seus componentes, que são proteínas; da presença da ATP sintase; e da presença de muitas proteínas transportadoras que carregam moléculas para dentro e para fora da matriz mitocondrial, já que a membrana é bastante impermeável e necessita de transportadores para executar essa função.

Matriz mitocondrial

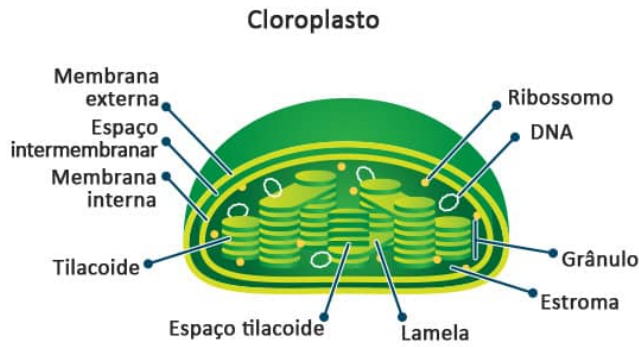
É um coloide concentrado que se dispersa devagar, mesmo quando a membrana é rompida. Possui composição iônica particular, com pH maior que o do citoplasma (aproximadamente 8), pois a cadeia respiratória bombeia prótons para o exterior da mitocôndria o que acarreta sua alcalinização. Vale destacar que esses prótons não são suficientes para tornar o citoplasma celular ácido, porque o seu volume é bem maior. O aspecto coloidal da matriz é decorrente da elevada concentração de macromoléculas, como as proteínas solúveis e os ácidos nucleicos.

Genoma

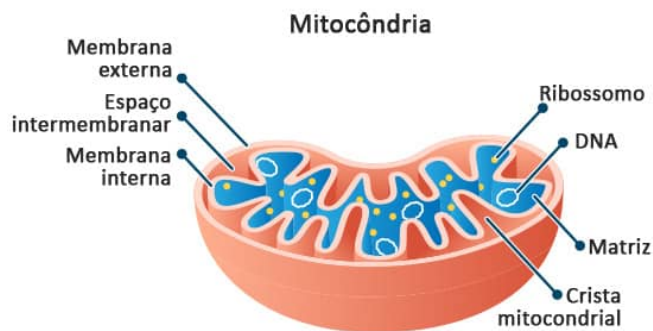
Possui material genético próprio e circular, não apresentando histonas. Em uma mitocôndria existem várias moléculas de DNA iguais espalhadas pela matriz, que são replicadas no interior da organela com sua própria maquinaria. Além da replicação, a transcrição também ocorre por RNA produzido por enzimas próprias, assim como a tradução é realizada por ribossomos próprios da mitocôndria, que são diferentes dos ribossomos citoplasmáticos.

Qual é a diferença entre mitocôndrias e cloroplastos?

Apesar de ambos produzirem energia para a célula e possuírem características estruturais semelhantes, a membrana interna das mitocôndrias apresenta invaginações, que são as cristas mitocondriais. Já os cloroplastos têm sua membrana interna contínua e um sistema de membranas empilhadas, os tilacoides. Além da ausência das cristas na membrana interna, os cloroplastos não possuem citocromos e complexos de ATP sintase, que estão presentes na membrana interna das mitocôndrias.



Estrutura do cloroplasto



Estrutura da mitocôndria.

Respiração celular

As mitocôndrias são responsáveis pela respiração celular. Mas não confunda! Isso não tem nada a ver com a respiração pulmonar. A respiração celular tem como objetivo a produção de ATP, ou seja, é o principal processo de produção de energia abundante para a célula a partir da glicose.

Mesmo sendo possível produzir ATP sem mitocôndrias, por meio de um processo chamado fermentação, o saldo de ATP seria muito baixo (= 2 ATPs). Já que a produção de ATP pela mitocôndria é abundante, de aproximadamente 36 ATPs por molécula de glicose.

Atenção!

A respiração celular só acontece na presença de O_2 . Sem o gás oxigênio, as mitocôndrias não conseguem produzir ATP.

A respiração celular ocorre, resumidamente, em três etapas:

Glicólise

Ocorre no citoplasma celular.

Ciclo de Krebs

Ocorre na matriz mitocondrial.

Cadeia respiratória

Ocorre nas cristas mitocondriais; é a etapa que mais produz ATP.

Vamos agora entender cada etapa detalhadamente.

Glicólise

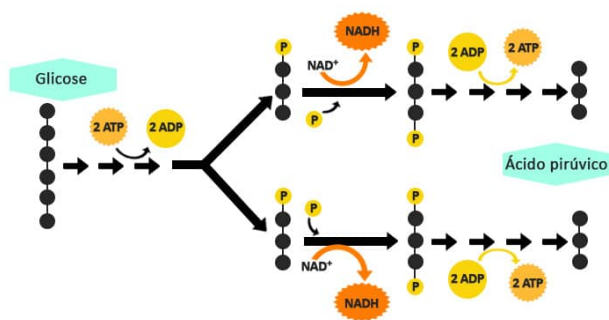
Consiste na quebra da molécula de glicose, que possui seis carbonos. Para realizar essa quebra, é necessário o gasto de dois ATPs. Apesar do objetivo ser a produção de ATP, existem momentos em que é preciso investir ATP.

A quebra da molécula de glicose origina duas moléculas com três carbonos cada, que vão sofrer uma série de reações, resultando na formação de NADH. Este carrega elétrons com muita energia, e será utilizado na última etapa da respiração celular (cadeia respiratória). Como são duas moléculas de três carbonos, logo serão produzidos dois NADH.

As reações nas moléculas de três carbonos continuam e, ao final do processo de glicólise, são produzidas duas moléculas de ATP e dois NADH para cada molécula de três carbonos, que se transformam em dois [piruvatos](#).

Piruvatos

São muito importantes, pois são moléculas que se destinam ao interior da mitocôndria para dar início à segunda etapa da respiração celular (ciclo de Krebs).



Processo simplificado da glicólise.

Dessa forma, a partir de uma molécula de glicose são gastos 2 ATPs, porém produzidos 2 NADH, 4 ATPs e 2 piruvatos. Subtraindo os ATPs gastos no início da glicólise, o saldo será de:

- 2 NADH
- 2 ATPs
- 2 piruvatos

A glicólise ocorre mesmo sem a presença de oxigênio, por isso ela acontece tanto na respiração celular quanto na fermentação. Porém, para que a respiração celular seja realizada de forma completa, é necessária a presença do gás oxigênio.

Ciclo de Krebs

O ciclo de Krebs ocorre na matriz mitocondrial e por meio dele ocorre a oxidação completa da glicose, que nada mais é do que a extração completa da energia da glicose. Veremos agora um processo que antecede um pouco o ciclo de Krebs e é responsável por preparar o piruvato para entrar nesse ciclo.

O piruvato sofre oxidação e isso ocorre da seguinte maneira:

Quando o piruvato perde um carbono na forma de CO_2 , logo a molécula passa a ter dois carbonos (acetil).

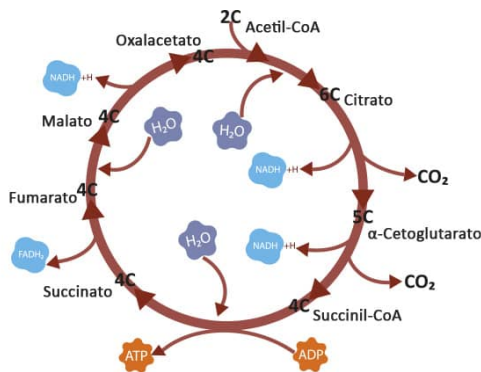


Uma coenzima chamada de coenzima A (CoA) se liga a essa molécula de dois carbonos formando o acetil-CoA, que será utilizado no ciclo de Krebs. Nesse processo de ligação, gera-se um NADH.

Vale lembrar que, nesse processo, foram utilizados os dois piruvatos resultantes de uma molécula de glicose. Considerando os dois piruvatos, temos o saldo de:

- 2 NADH
- 2 acetil-CoA
- Liberação de 2 CO₂

O acetil-CoA produzido entrará propriamente no ciclo de Krebs, conforme podemos ver na ilustração a seguir.



Etapas do ciclo de Krebs.

Vamos entender melhor cada etapa do ciclo de Krebs.

Para iniciar o ciclo de Krebs, uma molécula chamada oxalacetato, que contém 4 carbonos (4C), liga-se ao ciclo de acetil-CoA (2C), formando uma molécula de 6 carbonos chamada citrato (6C). A partir do citrato, começa uma série de reações que resultará em liberação de energia.

O citrato (6C) se transforma em isocitrato (6C), que se transforma em alfa-cetoglutarato (5C). Repare que o alfa-cetoglutarato possui 5 carbonos. Isso indica que um carbono do isocitrato foi quebrado e liberado na forma de CO₂. Além disso, houve a captura de elétrons ricos em energia pelo NADH.

O alfa-cetoglutarato (5C) vai se transformar no succinil-CoA, que possui 4 carbonos. Da mesma maneira, esse carbono é perdido pela liberação de CO_2 e é produzido mais um NADH.

O succinil-CoA (4C) é transformado em succinato (4C) e, nesse processo, acontece algo interessante: a produção de um GTP, que é rapidamente convertido em ATP.

O succinato (4C) é transformado em fumarato (4C) e é formado um FADH_2 , uma molécula que se assemelha ao NADH, ou seja, ela carrega energia.

O fumarato (4C) se transforma em malato (4C), que se transforma em oxalacetato (4C). Nesta transformação, ocorre a produção de mais um NADH.

O oxalacetato se liga a outro acetil-CoA vindo de outra molécula de glicose.

Lembra-se que, no início do ciclo, um oxalacetato se ligou a um acetil-CoA?

Por isso, o processo é um ciclo de reações, já que o oxalacetato do final do processo retorna ao início para retomar as reações.

Vamos resumir o saldo de moléculas que foram produzidas e liberadas no ciclo de Krebs (lembre-se que 2 acetil-CoA entraram no ciclo):

- 6 NADH
- 2 FADH₂
- 2 ATPs
- Liberação de 4 CO₂

Considerando a oxidação do piruvato que antecedeu o ciclo de Krebs mais o saldo do ciclo de Krebs, temos:

- 8 NADH
- 2 FADH₂
- 2 ATPs
- Liberação de 6 CO₂

Não podemos esquecer do processo de glicólise, que aconteceu no citoplasma, onde também houve a produção de energia, com 2 ATPs e 2 NADH. Portanto, temos como SALDO TOTAL até o momento:

- 10 NADH
- 2 FADH₂
- 4 ATPs
- Liberação de 6 CO₂

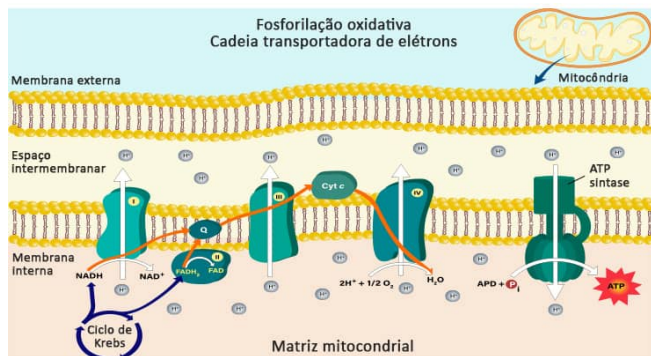
Até esse ponto, você pode reparar que foram produzidas poucas moléculas de ATP, porém foram produzidas outras que carregam elétrons com muita energia: as moléculas de NADH e FADH₂. Na próxima etapa, muito mais energia será produzida com a utilização delas.

Cadeia respiratória

A terceira e última etapa da respiração celular, a cadeia respiratória, também é chamada de cadeia transportadora de elétrons. Ocorre na membrana interna das mitocôndrias, mais precisamente nas cristas mitocondriais. Contudo, alguns processos também ocorrem no espaço intermembranar.

Como vimos, formaram-se moléculas de NADH e FADH_2 e, na cadeia respiratória, os elétrons que essas moléculas carregam serão utilizados para produzir ATP. Sendo assim, para cada NADH, formam-se 3 ATPs; e, para cada FADH_2 , formam-se 2 ATPs.

Lembre-se que, nesta etapa é utilizado o oxigênio (O_2), que atua comoceptor de elétrons, isto é, ele atrai os elétrons graças ao complexo proteico que forma a cadeia respiratória. Durante essa atração, as reações vão ocorrendo.



Cadeia transportadora de elétrons e síntese de ATP.

Vamos entender agora em detalhes:

O NADH, que está repleto de energia, passa pela proteína chamada citocromo e lá libera o elétron. Esse elétron é atraído pelo O_2 , mas para que consiga alcançar o O_2 , é preciso passar pelas proteínas da cadeia.

Conforme os elétrons passam pelas proteínas, os prótons de H^+ são bombeados da matriz mitocondrial para o espaço intermembranar.

Esses prótons precisam retornar do espaço intermembranar para a matriz mitocondrial e o fazem através de uma grande proteína denominada ATP sintase, que girará durante essa passagem.

Quando a ATP sintase gira, ela produz um ATP por meio da junção de uma molécula de ADP com um fosfato (P), formando um ATP.

Para cada NADH, serão bombeados 3 H^+ para o espaço intermembranar. Consequentemente, 3 H^+ retornam para a matriz mitocondrial por meio da ATP sintase, e, assim, serão formadas 3 moléculas de ATP.

Por outro lado, o FADH só consegue bombear 2 prótons H^+ para o espaço intermembranar. Desse modo, apenas 2 H^+ retornarão pela ATP sintase, formando somente 2 moléculas de ATP.

Portanto, temos o seguinte saldo da cadeia respiratória:

- 10 NADH: 30 ATPs
- 2 $FADH_2$: 4 ATPs

Além disso, precisamos acrescentar os 4 ATPs produzidos anteriormente (na glicólise e no ciclo de Krebs) e, então, chegamos a um total de 38 ATPs por molécula de glicose.

Atenção!

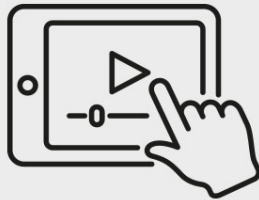
Existem estudos que discutem o saldo total de ATP da cadeia respiratória. Mas, aqui, vamos considerar os valores apresentados acima como resultado final.



Etapa da cadeia respiratória realizada nas mitocôndrias

Confira agora, em detalhes, a etapa final da respiração celular que ocorre nas mitocôndrias.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



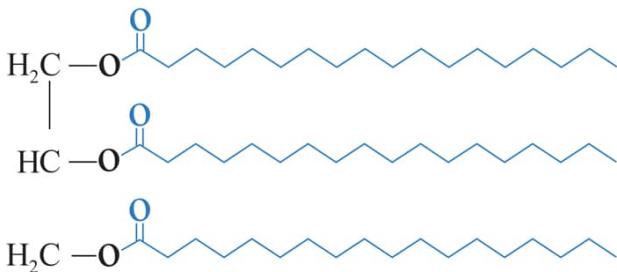
Beta-oxidação de ácidos graxos

Uma outra forma de produção de ATP está na utilização de ácidos graxos, mais especificamente, triglicerídeos.

E o que são os **triglicerídeos**?

Resposta

Os triglicerídeos são lipídeos abundantes nos organismos, são moléculas ricas em energia, constituídos por uma molécula de glicerol e três cadeias de ácidos graxos.



Estrutura da molécula de triglicerídeo.

Com a lipólise, o glicerol é separado dos ácidos graxos, que são moléculas longas de carbono. Na beta-oxidação, ocorre a quebra entre os carbonos para acontecer a liberação de energia e assim produzir ATP.

Para iniciar a beta-oxidação, é preciso que uma molécula de acetil-CoA se una ao ácido graxo e forme o acil-CoA. Aqui é utilizada uma molécula de ATP que terá dois fosfatos quebrados. Quando um ATP perde dois fosfatos, é contabilizado como se houvesse ocorrido o gasto de 2 ATPs.

A beta-oxidação ocorre no interior da mitocôndria, mas a coenzima A não consegue atravessar a membrana interna da mitocôndria. Então, para que o ácido graxo consiga entrar, a coenzima A se separa deste ácido graxo, que irá se ligar a uma outra molécula denominada carnitina, formando assim a acil-carnitina. Esta consegue passar pela proteína de membrana e alcançar o interior da mitocôndria. Dessa forma, a carnitina funciona como um carreador de ácido graxo.

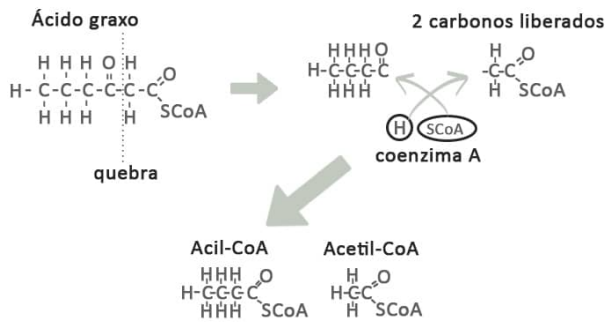
Dentro da mitocôndria, o ácido graxo vai se soltar da carnitina e se ligar a uma coenzima A que já está na matriz mitocondrial. Com a acil-CoA na matriz mitocondrial, a beta-oxidação pode se iniciar.

O ácido graxo entra na beta-oxidação e, a cada volta que esse ácido graxo dá no processo, serão liberados dois carbonos na forma de acetil-CoA.

No início, o ácido graxo vai formar um FADH_2 , depois vai entrar uma molécula de água na reação e, na sequência, ocorrerá a formação de um $\text{NADH} + \text{H}^+$.

Depois disso, o ácido graxo libera dois carbonos na forma de acetil-CoA e uma nova coenzima A vai se ligar ao restante do ácido graxo para recompor o acil-CoA que havia se quebrado e liberado dois carbonos. Logo, esse acil-CoA de agora se apresenta com dois carbonos a menos.

Veja melhor na ilustração abaixo:



Processo de quebra do ácido graxo – beta-oxidação.

Esse processo que acabou de ser apresentado descreve uma volta da beta-oxidação. Como saldo, temos:

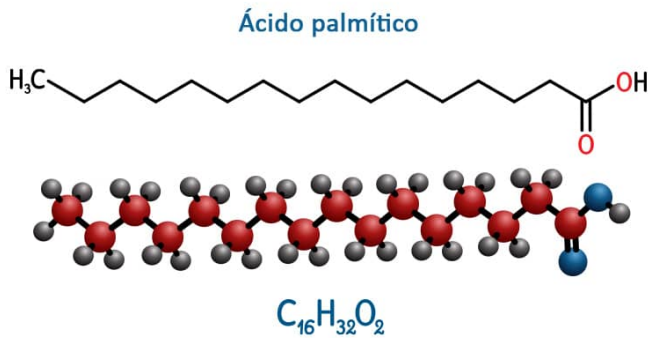
- 1 FADH_2
- 1 $\text{NADH} + \text{H}^+$
- 1 acetil-CoA

Podemos entender que o ácido graxo perde 2 carbonos a cada ciclo da beta-oxidação. Esses ciclos vão ocorrendo de maneira que o ácido graxo vai se “desmontando”. O ácido palmítico, por exemplo, é formado por 16 carbonos. Com um ciclo de beta-oxidação, cai para 14 carbonos, com mais um ciclo para 12, com mais um ciclo para 10, e assim sucessivamente. Vale lembrar que a cada ciclo também são formados 1 FADH_2 e 1 NADH .

Quando se chega à última volta da beta-oxidação, restam 4 carbonos. Sendo assim, formam-se 2 moléculas de acetil-CoA. Na última volta, temos como saldo:

- 1 FADH_2
- 1 NADH
- 1 acetil-CoA

Retornando ao exemplo do ácido palmítico, vamos calcular o saldo desse ácido graxo na beta-oxidação.



Molécula do ácido palmítico.

Considerando os 16 carbonos, são realizadas 7 voltas na beta-oxidação. Mas por que são 7 voltas e não 8?

Porque formam-se 2 acetil-CoA na última volta. Assim, temos:

- 8 acetil-CoA: porque a cada dois carbonos forma-se 1 acetil-CoA.
- 7 NADH: porque são 7 voltas.
- 7 $FADH_2$: porque são 7 voltas.

Notamos que nenhuma molécula de ATP foi formada nesse processo, certo? Então, vamos precisar lembrar o que aprendemos antes, porque todos esses 8 acetil-CoA entrarão no ciclo de Krebs. Esses acetil-CoA serão consumidos pelo ciclo de Krebs e formarão 24 NADH, 8 $FADH_2$ e 8 ATPs. Além disso, não podemos esquecer que NADH e $FADH_2$ também resultarão na formação de moléculas de ATP.



Teoria na prática

Se você entendeu o processo da beta-oxidação, tente responder a esta pergunta: “Se na beta-oxidação os carbonos são quebrados de 2 em 2, o que acontece quando o ácido graxo apresenta um número ímpar de carbonos?”

Mostrar solução ▾

Teoria endossimbiótica

Ao estudar as características morfológicas e funcionais dos cloroplastos, e mitocôndrias, notamos muitas semelhanças entre eles. A teoria da endossimbiose procura explicar como se originaram os cloroplastos e as mitocôndrias.

As bactérias, os cloroplastos e as mitocôndrias apresentam sistemas de membranas relacionados. Com isso, levantou-se a hipótese de que as mitocôndrias e os cloroplastos seriam organelas celulares originadas a partir de bactérias que mantiveram seus mecanismos de conversão de energia.



Lynn Margulis.

A teoria da endossimbiose foi proposta por Lynn Margulis em 1981 e explica a origem das mitocôndrias e dos cloroplastos nas células eucarióticas. Há milhões de anos, só existia organismos unicelulares vivendo nos oceanos, ou seja, organismos compostos por apenas uma célula. Portanto, as mitocôndrias que hoje compõem as células eucariontes eram antes seres de vida livre, caracterizados como procariontes heterotróficos aeróbicos.

O que isso significa?

As mitocôndrias eram organismos sem organelas, que não conseguiam sintetizar seu próprio alimento e precisavam do oxigênio para a produção de energia.

Seguindo essa linha de raciocínio, os cloroplastos também eram seres de vida livre. No entanto, apresentavam uma diferença em relação às mitocôndrias ancestrais, eram organismos procariontes autotróficos, pois conseguiam produzir seu próprio alimento a partir da fotossíntese.

Os organismos procariontes que originaram as mitocôndrias e os cloroplastos entraram em uma outra célula, seja por ingestão ou por parasitismo. Acontece que, com o tempo, essa relação passou a ser mutuamente benéfica, tornando-se uma simbiose obrigatória. Ao longo do processo evolutivo, a célula que abrigou esses seres procariontes se tornou uma célula eucarionte.

Abaixo, podemos ver as possíveis transformações evolutivas que ocorreram com a unificação das células procariontes e eucariontes.

Uma célula que antes era procariótica se transformou em eucariótica. A célula procariótica passou a sofrer invaginações da membrana plasmática que passaram a aprisionar o material genético e, conseqüentemente, a formar o envoltório do núcleo celular.

Assim como o núcleo, as outras organelas celulares (com exceção das mitocôndrias e dos cloroplastos) também surgiram em decorrência da invaginação da membrana plasmática. Por causa dessas invaginações, a célula procarionte já passou para o estado de célula eucariótica em formação, tornando-se uma célula muito maior.

Acredita-se que, no momento em que a célula eucarionte estava em formação, ocorreu o englobamento dos seres procariontes ancestrais das mitocôndrias e dos cloroplastos. Isso provavelmente se deu porque a célula eucariótica em formação ainda era pouco eficiente em produção de energia, isto é, sua produção de ATP ocorria por meio da fermentação (característica própria de uma célula anaeróbica).

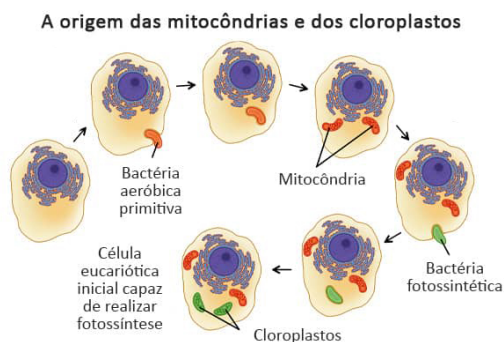
O englobamento do organismo procarionte heterotrófico (mitocôndria ancestral) não foi seguido de digestão, e este passou a viver dentro da célula. Com o tempo, esse ser procarionte se transformou em mitocôndria.

Depois que as células eucariontes em formação já abrigavam as mitocôndrias em seu interior, parte delas englobou organismos procariontes fotossintetizantes (cloroplasto ancestral). Da

mesma maneira, esses organismos não foram digeridos e passaram a viver no interior da célula, transformando-se mais tarde nos cloroplastos.

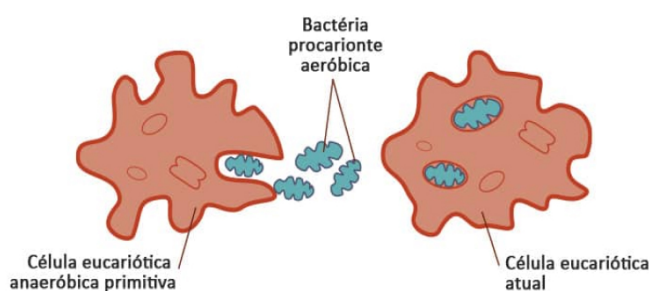
Dessa forma, o grupo de células eucariontes que englobaram apenas as mitocôndrias originaram os animais, ao passo que as células que englobaram as mitocôndrias e, mais tarde, os cloroplastos originaram as plantas e algas.

A célula eucarionte possuindo mitocôndrias e/ou cloroplastos passou a produzir mais energia. Isso porque, como sabemos, a mitocôndria produz energia por meio da respiração celular, enquanto os cloroplastos realizam fotossíntese.



Teoria da endossimbiose.

Agora, conheça algumas evidências que reafirmam a teoria de que as mitocôndrias e os cloroplastos ancestrais eram bactérias primitivas que conseguiram viver em endossimbiose em outra célula.



Englobamento das bactérias primitivas pela célula eucariótica em formação.

Veja:

Dupla membrana



Bactérias primitivas que foram englobadas já possuíam sua membrana, mas, após o englobamento, a membrana da célula que as englobou passou a ser a segunda membrana dos cloroplastos e mitocôndrias (membrana externa). Atente-se para o fato de que a membrana externa dessas organelas é muito semelhante à membrana plasmática.

Capacidade de autoduplicação



Mitocôndrias e cloroplastos são capazes de se duplicar de forma independente, ou seja, duplicam-se sozinhos.

DNA próprio



Mitocôndrias e cloroplastos possuem seu próprio DNA, que é circular e não possui proteínas histonas (proteínas que se associam ao DNA de células eucarióticas). Isso significa que o código genético presente nessas organelas é diferente daquele que a célula eucariótica possui, mas semelhante ao das bactérias atuais.

Ribossomos próprios



Mitocôndrias e cloroplastos produzem suas próprias proteínas, pois possuem ribossomos próprios. Esses ribossomos são semelhantes aos das bactérias e diferentes dos ribossomos das células eucarióticas.

Tamanho similar



Mitocôndrias e cloroplastos têm tamanho muito similar ao das bactérias.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

A célula eucariótica apresenta diversas organelas em seu citoplasma que contribuem para o seu funcionamento ideal. Entre essas organelas, estão as mitocôndrias, classificadas como organelas membranosas que se encontram em praticamente todas as células eucariontes. Tendo em conta as características dessas organelas, assinale a alternativa correta.

- A São organelas estáticas que se mantêm, invariavelmente, fixadas em locais determinados do citoplasma celular.
- B Possuem um tamanho muito pequeno, não possibilitando a sua visualização por meio do microscópio óptico.
- C Apresentam duas membranas constituídas de monocamada lipídica.
- D A membrana externa é impermeável a íons e moléculas pequenas.
- E O espaço intermembranar apresenta o mesmo pH e a mesma composição iônica encontrados no citoplasma.

Parabéns! A alternativa E está correta.

As mitocôndrias são organelas dinâmicas, ou seja, conseguem se deslocar no interior da célula para diferentes locais. Têm tamanho suficiente para serem visualizadas em microscópios ópticos. Possuem duas membranas de revestimento, formadas por bicamada lipídica. A membrana externa é permeável a pequenas moléculas e íons, e o espaço entre as membranas apresenta a mesma composição iônica e o mesmo pH que o citoplasma.

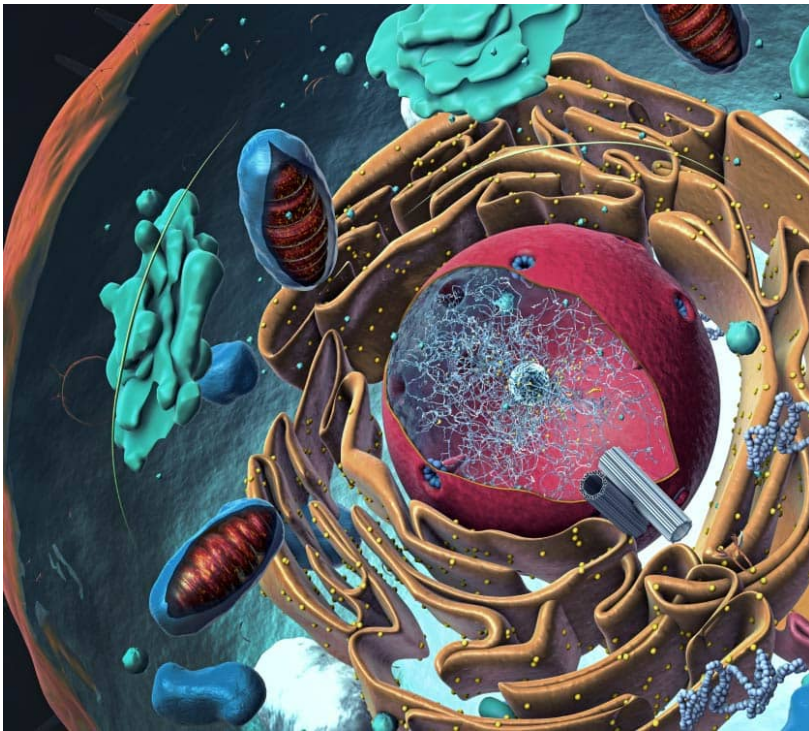
Questão 2

As mitocôndrias são organelas essenciais para o funcionamento de uma célula eucariótica. Elas se apresentam em maior quantidade em determinadas células, como, por exemplo, nos neurônios, nas células do coração e dos músculos. Isso acontece porque essas células demandam maior atividade mitocondrial. A atividade em questão é definida como respiração celular. O processo de respiração celular tem como principal objetivo:

- A Liberar gás carbônico.
- B Liberar oxigênio.
- C Produzir ATP.
- D Realizar fotossíntese.
- E Produzir lipídeos.

Parabéns! A alternativa C está correta.

As mitocôndrias apresentam como função principal a respiração celular. Esse processo objetiva a produção de ATP, para que a célula obtenha energia para viver. A respiração celular acontece a partir da quebra da molécula de glicose, visando a formação de ATP.

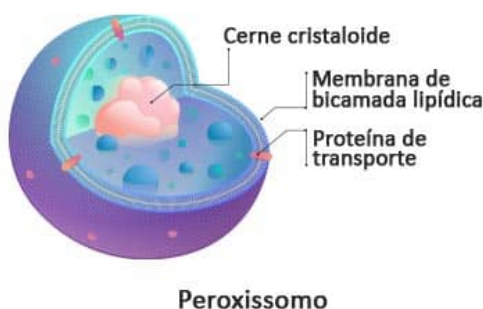


3 - Peroxissomos e o metabolismo celular

Ao final deste módulo, você será capaz de reconhecer o papel do peroxissomo no metabolismo celular.

Os peroxissomos

São organelas citoplasmáticas presentes em todas as células. Apresentam morfologia muito simples, similar a de um lisossomo, sendo delimitados por uma membrana com bicamada lipídica. São pequenos, arredondados e possuem elevada quantidade de enzimas em seu interior.

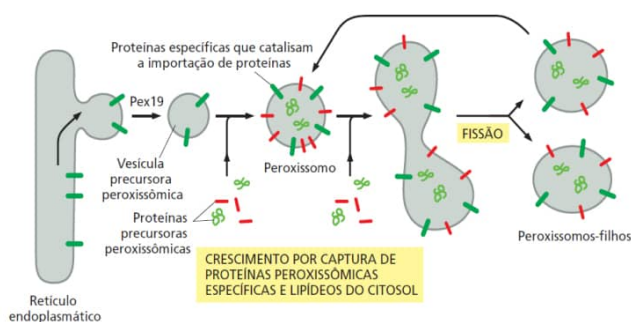


Ultraestrutura de um peroxissomo.

Quando vistos por meio de microscopia de transmissão, é possível observar cristais em seu interior (em razão da alta concentração de enzimas) que são chamados de cerne cristalóide. A principal enzima encontrada no peroxissomo é a catalase, cuja função vamos conhecer a seguir.

A quantidade de peroxissomos na célula e seu tamanho podem variar de acordo com o tipo de célula em que estão localizados e a condição ambiental.

Existem discussões na área científica sobre a possibilidade de um peroxissomo se originar a partir de outro preexistente. Essa origem seria por crescimento e fissão ou por meio de um compartimento especializado do retículo endoplasmático. A seguir, ilustramos um modelo que explica a proliferação e a formação de um novo peroxissomo.



Modelo de proliferação de peroxissomos.

Na ilustração, podemos observar vesículas brotando do retículo endoplasmático. Essas vesículas são precursoras peroxissômicas. As proteínas de membrana como Pex3 e Pex15 também seguem essa via. Algumas proteínas citosólicas específicas empacotam proteínas peroxissômicas no interior dessas vesículas. Na sequência, essas vesículas precursoras podem se fundir entre si ou podem se fundir com peroxissomos já existentes para formar os peroxissomos propriamente ditos.

Na membrana do peroxissomo, existem proteínas translocadoras por onde serão importadas proteínas peroxissômicas produzidas pelos ribossomos. Além da importação das proteínas, também será realizada a importação de lipídeos do citosol que atuam no processo de crescimento do peroxissomo. Posteriormente, a organela já aumentada sofre fissão originando dois peroxissomos filhos.

Os peroxissomos possuem algumas funções importantes, como a beta-oxidação e a detoxificação. São capazes de desintoxicar a célula, de quebrar substratos orgânicos (por exemplo, etanol, fenóis, ácido fórmico, formaldeído) em outras substâncias.

Curiosidade

Sabemos que o fígado é um importante órgão metabólico do corpo humano. É capaz de detoxificar alimentos, bebidas e medicamentos que consumimos. Os hepatócitos do fígado fazem a detoxificação por

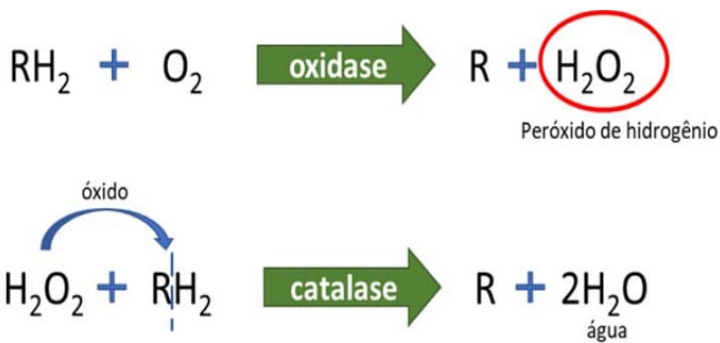
meio de organelas específicas, uma delas é o peroxissomo.

Mas como os peroxissomos realizam a detoxificação?

Enzimas do interior dos peroxissomos, entre elas as oxidases, como o próprio nome sugere, oxidam algumas moléculas. Essas enzimas retiram átomos de hidrogênio de substratos orgânicos e isso acontece por meio de reações oxidativas. Como produto dessas reações, temos o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) que também é conhecido como água oxigenada. E é exatamente por tal motivo que essa organela se chama peroxissomo: ela possui muito peróxido em seu interior.

No entanto, essa molécula de peróxido de hidrogênio é muito reativa, isto é, possui um oxigênio que quer ser liberado. Dessa forma, o peróxido de hidrogênio oxida outros substratos orgânicos roubando hidrogênio deles. Com isso, o substrato é quebrado e, conseqüentemente, inativado. Com esse sequestro de hidrogênio dos substratos, formam-se moléculas de água (H_2O). A principal enzima que atua na inativação do substrato oxidando-os e formando água é a catalase.

Resumindo, a função do peroxissomo é oxidar substratos orgânicos com a intenção de inativá-los.



Reações de detoxificação.

Curiosidade

Você já colocou água oxigenada sobre algum ferimento em sua pele? Viu que a água oxigenada borbulha? Isso acontece porque a catalase, que antes estava dentro do peroxissomo, é liberada e agora está na pele. Quando colocamos a água oxigenada sobre o ferimento, a catalase atua na decomposição da água oxigenada, liberando O_2 . Por isso, vemos a formação de bolhas de oxigênio.

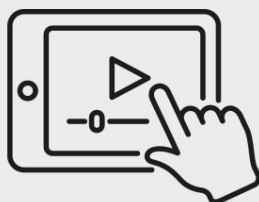




Detoxificação através dos peroxissomos

Confira agora o processo de detoxificação realizado pela organela peroxissomo.

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Glioxissomos

Agora vamos conhecer quem são os glioxissomos?

Assim como as células animais possuem os peroxissomos, as células vegetais apresentam, digamos, um peroxissomo especial denominado glioxissomo. Podem ser encontrados nas folhas e nas sementes em germinação, por exemplo. Sua morfologia e suas funções são semelhantes às do peroxissomo.

Assim como os peroxissomos, os glioxissomos realizam beta-oxidação de ácidos graxos. Contudo, além das funções peroxissomais, eles possuem duas enzimas exclusivas: a isocitratoliase e a malato sintetase. Essas enzimas compõem o ciclo do glioxilato, que tem a função de obtenção de energia.

Entenda o funcionamento desse ciclo:

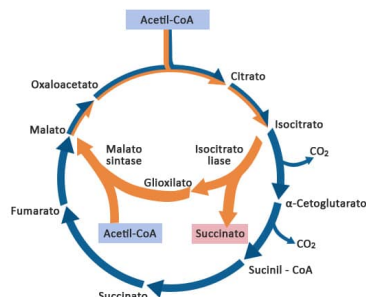
A enzima isocitratoliase é responsável por quebrar o isocitrato em succinato e glioxalato. O succinato pode ser levado até a mitocôndria para então entrar no ciclo de Krebs (ou ciclo do ácido cítrico).

Uma vez no ciclo de Krebs, o succinato se transforma em malato, que é levado ao citoplasma da célula e convertido em oxalacetato. Então, esse oxalacetato faz parte da via da gliconeogênese.



Por outro lado, a enzima malato sintetase vai promover a condensação do glioxalato (obtido a partir da quebra realizada pela enzima isocitratolise) com acetil-CoA, formando malato.

Vale destacar que esse ciclo ocorre somente em células vegetais. As células animais não são capazes de converter ácidos graxos em carboidratos.



Ciclo do glioxilato.

Saiba mais

O glioxissomo possui enzimas que quebram ácidos graxos e formam intermediários utilizados na síntese de açúcar por meio da gliconeogênese. As plantas bem jovens utilizam como fonte de energia os açúcares formados a partir de gordura, até que cresçam e se tornem maduras o suficiente para produzir energia pela fotossíntese.

Integração entre peroxissomos e outras organelas

Várias funções desempenhadas pelos peroxissomos dependem de sua interação com outras organelas celulares. A cooperação entre peroxissomos e demais organelas relaciona-se, por exemplo, com o metabolismo lipídico.

Agora estudaremos as interações que ocorrem entre peroxissomos e mitocôndrias, cloroplastos e retículo endoplasmático.

Tanto as mitocôndrias quanto os peroxissomos atuam em várias vias metabólicas, por exemplo, a beta-oxidação e o metabolismo de espécies reativas de oxigênio.

Relembrando

No processo de beta-oxidação, os ácidos graxos vão se desmontando com a saída de dois átomos de carbono por vez. Essa dupla de carbonos, origina acetil-CoA. A acetil-CoA formada é transportada para o citosol da célula e lá é utilizada em outras reações — ou a acetil-CoA pode entrar na mitocôndria para participar do ciclo de Krebs. Dessa forma, a acetil-CoA produzida por um peroxissomo pode entrar na mitocôndria e participar do ciclo de Krebs.

Nas células animais, a mitocôndria também realiza a beta-oxidação. Entretanto, nas células vegetais e nos fungos, essas reações de oxidação de ácido graxo são completamente dependentes dos peroxissomos.

Atenção!

Os peroxissomos e as mitocôndrias possuem atividades muito interligadas, de forma que um defeito no peroxissomo pode acarretar estresse oxidativo na mitocôndria. Em contrapartida, uma atividade maior da catalase pode melhorar o desempenho das funções mitocondriais.

Outras organelas que interagem com os peroxissomos são os cloroplastos. Ao realizarem a fotorrespiração, os cloroplastos produzem uma molécula chamada glicolato. Esse glicolato passa para o peroxissomo e lá é convertido em glicina. A glicina, por sua vez, vai para as mitocôndrias, onde são produzidos CO_2 e serina. A serina retorna ao peroxissomo, onde origina a glicina, que volta para o cloroplasto na forma de glicerato. Repare que ocorre uma série de reações resultantes da interação entre peroxissomos, cloroplastos e mitocôndrias. Existem questionamentos sobre as vantagens dessas reações, já que consomem bastante energia.

Os peroxissomos e as mitocôndrias estão normalmente próximos ao retículo endoplasmático e, por esse motivo, compartilham várias proteínas. Além disso, os peroxissomos interagem com o retículo endoplasmático cooperando para a formação de plasmalogênios, que são fundamentais para as células nervosas. Os plasmalogênios são os fosfolípídeos mais abundantes na mielina, estrutura que envolve os axônios dos neurônios. Uma deficiência de plasmalogênios pode acarretar sérias anomalias. Isso justifica o fato de que problemas nos peroxissomos podem provocar doenças neurológicas.

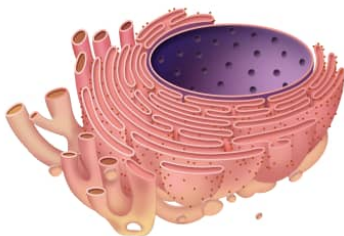


Ilustração do retículo endoplasmático.

Endereçamento e transporte de proteínas para os peroxissomos

Para iniciarmos o estudo sobre o transporte de proteínas para os peroxissomos, é preciso saber que todas as proteínas são importadas diretamente do citoplasma para os peroxissomos. Dessa forma, esse transporte não depende de vesículas e é muito importante para os peroxissomos, pois, como sabemos, é uma organela que não possui material genético e ribossomos próprios.

Algumas proteínas entram nos peroxissomos no momento de brotamento de vesículas precursoras do retículo endoplasmático; outras proteínas são importadas diretamente do citosol. Para que essas proteínas se direcionem corretamente, elas precisam ter uma sequência sinal.

O que é a sequência sinal?



É uma sequência específica de três aminoácidos (serina-lisina-leucina) que estão na porção terminal das proteínas. Ela funciona como um sinal de importação da proteína para o interior dos peroxissomos. É dessa maneira que uma proteína que está no citosol e possui a sequência sinal consegue entrar no peroxissomo.

Na superfície do peroxissomo, existem receptores específicos que vão reconhecer a sequência sinal da proteína. Diversas proteínas participam do processo de importação das proteínas do citosol – são chamadas de peroxinas.

Um complexo contendo pelo menos seis peroxinas formam uma proteína translocadora que se localiza na membrana do peroxissomo. O poro formado pelo translocador é dinâmico e isso faz com que proteínas de diferentes tamanhos sejam transportadas, mesmo que dobradas. Sendo assim, a sequência sinal é reconhecida e, em seguida, entra no peroxissomo pelo translocador.

A **peroxina Pex5** é um receptor de importação solúvel que reconhece a sequência sinal. A Pex5 acompanha a proteína até que ela chegue ao interior do peroxissomo. Depois que a proteína é interiorizada para o lúmen peroxissomal, a Pex5 se solta e retorna para o citosol. Esse mecanismo possibilita que uma peroxina transporte a proteína para o interior do lúmen do peroxissomo.

O funcionamento correto do transporte para os peroxissomos é de extrema importância.

Exemplo

A síndrome de Zellweger é uma doença humana, hereditária e consiste em um defeito na importação de proteínas citosólicas para o interior dos peroxissomos, em razão de uma mutação no gene que codifica a proteína Pex5 ou Pex7 (forma moderada da doença). Por existir um comprometimento grave nesse transporte, os peroxissomos ficam “vazios” e isso acarreta anomalias no cérebro, no fígado e nos rins. Essas anomalias levam o indivíduo a óbito logo após o nascimento.

Falta pouco para atingir seus objetivos.

Vamos praticar alguns conceitos?

Questão 1

Os peroxissomos são organelas envolvidas por membrana que estão no citoplasma de células eucarióticas. A proliferação dessas organelas ainda é alvo de discussões, mas existem explicações que afirmam sua origem por crescimento e fissão. Considerando essas formas de proliferação, assinale a alternativa correta.

- A As vesículas precursoras dos peroxissomos brotam a partir das mitocôndrias.
- B As proteínas peroxissômicas entram na vesícula precursora por difusão pela membrana.
- C Somente lipídeos são importados para o interior das vesículas precursoras peroxissômicas.
- D As proteínas Pex3 e Pex15 compõem o interior (lúmen) do peroxissomo.
- E Durante o crescimento da organela, ocorre a fissão originando dois peroxissomos filhos.

Parabéns! A alternativa E está correta.

As vesículas precursoras dos peroxissomos brotam a partir do retículo endoplasmático. Essas vesículas possuem duas proteínas na sua membrana, Pex3 e Pex15. Além disso, as vesículas importam

para o seu interior, por meio de proteínas translocadoras, proteínas e lipídios. Com o desenvolvimento e crescimento do peroxissomo, essa organela cresce e sofre fissão dando origem a dois peroxissomos filhos.

Questão 2

O processo de importação de proteínas para o interior dos peroxissomos envolve algumas etapas. Sobre isso, leia as afirmativas e em seguida assinale a alternativa correta.

- I. Um complexo com três peroxinas formam uma proteína translocadora.
- II. O canal formado pelo translocador é estático, ou seja, as proteínas só conseguem passar desenroladas por ele.
- III. Para importar uma proteína, sua sequência sinal precisa ser reconhecida por receptores específicos da membrana do peroxissomo.
- IV. Pex5 é um receptor solúvel de importação capaz de reconhecer a sequência sinal.

- A As afirmativas I e II estão corretas.
- B As afirmativas II e III estão corretas.
- C As afirmativas I e III estão corretas.
- D As afirmativas III e IV estão corretas.
- E As afirmativas II e IV estão corretas.

Parabéns! A alternativa D está correta.

A sequência sinal é reconhecida por receptores da membrana do peroxissomo e isso faz com que a proteína consiga ser importada. Um complexo com pelo menos seis peroxinas constituem uma proteína translocadora. O canal formado por essa proteína translocadora é dinâmico, o que possibilita o transporte de proteínas mesmo dobradas. PEX5 é um receptor solúvel que reconhece a sequência sinal de proteínas e permite que elas sejam importadas para o lúmen do peroxissomo.

Considerações finais

Como vimos, as células obtêm sua energia por meio de processos tais como fotossíntese, respiração celular e beta-oxidação. Várias organelas estão envolvidas nesses mecanismos e são fundamentais para que eles aconteçam.

As mitocôndrias, ao realizarem a respiração celular, adquirem várias moléculas de ATP que são extremamente energéticas para a célula. Por meio dos cloroplastos, as células vegetais são capazes de fazer a fotossíntese e assim alcançam as suas moléculas energéticas.

Vimos também que é possível obter energia da gordura, mediante a quebra dos ácidos graxos por meio da beta-oxidação, que ocorre tanto nas mitocôndrias quanto nos peroxissomos.

Conhecemos ainda a morfologia, a estrutura e a organização molecular dessas organelas. Assim, o estudo da transformação de energia celular se deu de forma completa e integrada, uma vez que entendemos os processos e as organelas efetoras.



Ouçá agora um bate-papo sobre perguntas relacionadas à temática.

Para ouvir o *áudio*, acesse a versão online deste conteúdo.



Referências

ALBERTS, B. *et al.* **Biologia molecular da célula**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Biologia moderna**. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

LIMA, T. F. O. de; DUARTE D. A.; Sá A. L. B. **Mitocôndria revisada**. Revista Eletrônica Acervo Saúde, v. 2, p. 94-107, 2018. Consultado na internet em: 08 out. 2021.

MOREIRA, C. **Cloroplasto**. Revista de Ciência Elementar, v. 3, n. 3, p. 161, 2015. Consultado na internet em: 08 out. 2021.

SWALLISON, J. M. S.; FERRARI, C. K. B. **Metabolismo mitocondrial, radicais livres e envelhecimento**. Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia, v. 14, n. 3, p. 441-451, 2012. Consultado na internet em: 08 out. 2021.

Explore +

Confira as indicações que separamos para você!

Leia o artigo **Mitocôndria revisada**, de Tiago Ferreira Oliveira de Lima, Diego Andreazzi Duarte e André Luís Braghini Sá, e perceba como os autores explicam as mitocôndrias.

Consulte o artigo **Metabolismo mitocondrial, radicais livres e envelhecimento**, de Wallison Junio Martins da Silva e Carlos Kusano Bucalen Ferrari. Os autores correlacionam o metabolismo mitocondrial com o envelhecimento.

Consulte o resumo **Cloroplasto**, de Catarina Moreira. Trata-se de uma breve descrição, com a ilustração de um cloroplasto.