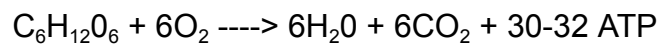


Metabolismo energético é o nome que se dá ao conjunto de reações químicas (ou processos fisiológicos) que ocorrem em organelas especiais: mitocôndrias e os cloroplastos. Essas reações podem envolver a quebra de moléculas para obtermos a energia acumulada nessas moléculas, que chamamos de **reações catabólicas**; ou podem envolver a síntese de moléculas que acumulam energia, que chamamos de **reações anabólicas**. Dessa forma, estamos falando sobre a respiração celular, que ocorre no citoplasma e nas mitocôndrias, e é uma reação catabólica; de fermentação, que ocorre no citoplasma e também é uma reação catabólica; e de fotossíntese, que acontece nos cloroplastos e é uma reação anabólica.

Respiração celular é a síntese de ATP (“moeda energética das células”) a partir de nutrientes (em geral a glicose) em ambiente aeróbico, isto é, na presença de oxigênio. Essa respiração celular está expressa na seguinte equação:



(a quantidade de ATP varia conforme a eficiência da mitocôndria)

Atenção!

1) na respiração sistêmica, isto é, que envolve a troca de gases nos pulmões, o gás oxigênio entra pela inspiração e o gás carbônico sai pela expiração. Na respiração celular é diferente – o oxigênio que entra na célula é utilizado para produzir água, e a glicose é utilizada para produzir gás carbônico. Você entenderá melhor esse processo ao longo deste resumo.

2) a respiração celular ocorre em três etapas (**veja ilustração da mitocôndria!**): a glicólise, em que ocorre a quebra da glicose no citoplasma; o ciclo de krebs, em que os produtos da glicólise passam por várias reações, na matriz mitocondrial, até formar gás carbônico; e a cadeia respiratória, na qual os elétrons gerados nas etapas anteriores são transferidos entre diversas enzimas até serem capturados pelo oxigênio para formar água.

3) ATP significa adenosina tri fosfato. Adenosina é uma adenina (uma base nitrogenada) ligada a uma ribose, que se liga a três fosfatos. Por que ela é considerada uma moeda energética? Essa ligação é bastante instável. Toda vez que o fosfato mais externo é arrancado da ligação, ocorre: transformação da molécula de ATP em ADP + liberação de um fosfato + liberação de energia contida naquela ligação. Esse consumo de ATP ocorre toda vez que a célula precisa de energia, por exemplo: para fazer um transporte ativo, para fazer uma contração muscular, para fagocitar etc. Por isso, a molécula de ATP é considerada uma “moeda energética”, pois ela libera energia na medida em que ela é quebrada.

A **Glicólise** é a quebra da molécula de glicose no citoplasma. A equação desta etapa no diz que a glicose, para ser quebrada, consome: $2 \text{ ATP} + 2$ fosfatos inorgânicos + 2 NAD^+ (molécula transportadora de elétrons) + 2 ADP . E, como resultado dessa quebra da glicose, são produzidos: 2 ácidos pirúvicos + $4 \text{ ATP} + 2 \text{ NADH}$. Como foram gastos 2 ATP para quebrar a glicose, o saldo de ATP nessa primeira etapa é de 2 ATP (e não de 4 ATP!).

Vamos entender como essa reação acontece?

Neste esquema simplificado, a molécula de glicose, presente no citoplasma, está representada por essas seis bolinhas (seis átomos de carbono).

- I- Como ela é uma molécula bastante estável, ela necessita de 2 ATP para ser quebrada ao meio. Cada ATP entrega um fosfato à molécula de glicose, mas logo em seguida, em decorrência da eletronegatividade, a molécula se rompe, gerando 2 moléculas com três átomos de carbonos e um fosfato cada, as quais vão receber mais um fosfato (proveniente da sua alimentação!). Os elétrons liberados durante a quebra, por sua vez, são carregados pelo NAD, tornando-se NADH.
- II- Depois, ocorre a remoção dos fosfatos em cada molécula de três carbonos pela molécula de ADP para produção de ATP.
- III- Finalmente, teremos no final da reação, 2 moléculas de ácido pirúvico (com três carbonos).

O Ciclo de Krebs, de maneira muito simplificada, é a quebra dos ácidos pirúvicos na matriz mitocondrial. A equação desta etapa no diz que os ácidos pirúvicos, para serem quebrados, consomem: $8 \text{ NAD}^+ + 2 \text{ FAD}^+$ (transportadores de elétrons), e que a quebra desses ácidos pirúvicos produz $6 \text{ CO}_2 + 8 \text{ NADH}^+ + 2 \text{ FADH}^+ + 2 \text{ ATP}$.

Vamos entender como essa reação acontece?

Neste esquema simplificado, a molécula de ácido pirúvico, presente no citoplasma, está representada por essas três bolinhas (reparem que estamos falando de um ciclo para cada molécula de ácido pirúvico com três átomos de carbono cada!).

- I- Ainda no citoplasma, a molécula de ácido pirúvico sofre uma descarboxilação, auxiliada por uma molécula chamada coenzima A.

Ao mesmo tempo, os elétrons liberados em decorrência dessa quebra, são carregados por um NAD^+ , tornando-se NADH .

- II- A molécula de dois carbonos ligada à coenzima A, chamada acetilCo-A, entra no Ciclo de Krebs. Rapidamente a Co-A é eliminada. Ao mesmo tempo, o ácido oxalacético, que existe dentro da mitocôndria, se junta à molécula de acetil, formando um composto de seis carbonos, o ácido cítrico.
- III- A molécula de seis carbonos sofre uma descarboxilação e os elétrons liberados são carregados por um NAD^+ , tornando-se NADH .
- IV- A molécula de cinco carbonos também sofre uma descarboxilação e os elétrons liberados são carregados por um NAD^+ , tornando-se NADH . Porém, como este último carbono apresentava uma ligação bastante estável, essa nova molécula de quatro carbonos precisa ser amparada por um fosfato inorgânico.
- V- O fosfato é capturado por uma molécula de GDP (semelhante ao ADP), que se torna GTP e mais tarde essa GTP vai virar ATP.
- VI- Com a saída do fosfato, a molécula de quatro carbonos ficou instável, e para se estabilizar, moléculas de NAD e FAD capturam os elétrons sobranes.

O que o Ciclo de Krebs nos diz é que a glicose que queimamos durante qualquer atividade que demande energia (correr, estudar, dançar, dormir) está sendo liberada, via Ciclo de Krebs, na forma de gás carbônico (lembra que eu falei sobre isso no início deste resumo?) Para cada molécula de glicose de seis carbonos, serão liberadas seis moléculas de CO_2 .

A **cadeia respiratória** ocorre nas cristas mitocondriais e é o processo pelo qual os elétrons são usados para bombear H^+ (Hidrogênios que perderam elétrons, portanto, prótons) e produzir muito ATP.

Vamos entender como ocorre essa etapa?

- I- Os NADH^+ produzidos durante a glicólise e o Ciclo de Krebs vão doar elétrons para a cadeia transportadora de elétrons, composta por diversas enzimas. A primeira enzima ao, receber o hidrogênio e os elétrons, fica negativamente carregada, atraindo os hidrogênios presentes na matriz, porém os elétrons saltam de nível e o

hidrogênio é bombeado para o espaço intermembrana (lembrem da metáfora dos elétrons como um peixe ensaboador!).

- II- Os elétrons então alcançam a segunda enzima e novamente os hidrogênios livres na matriz são atraídos por esta enzima (para ficarem estáveis), porém os elétrons saltam novamente de nível e o hidrogênio é bombeado para o espaço intermembrana.
- III- Os elétrons alcançam a terceira enzima, mas dessa vez reagem com o gás oxigênio proveniente da inspiração. O oxigênio ao migrar para a matriz, reage com os hidrogênios livres e forma água (lembra que eu falei sobre isso no início deste resumo?). Essa produção de água é muito importante, pois evita a queda do pH na mitocôndria (hidrogênios estavam sendo constantemente bombeados para o espaço intermembrana, lembra?), e esse ajuste de pH garante a manutenção do Ciclo de Krebs.
- IV- Devido ao bombeamento de prótons, é natural que ocorra uma diferença de concentração entre a matriz e o espaço intermembrana. Como a célula busca sempre o equilíbrio, os hidrogênios livres voltam à matriz por meio da enzima ATP Sintase. Toda vez que um próton passa por essa enzima, ela gira feito uma turbina, e é este giro que libera energia suficiente para juntar, na matriz, ADP + fosfato inorgânico, formando ATP.

Vamos então ao **saldo final da respiração celular!**

- A Glicólise gerou: 2 ATPs
- O Ciclo de Krebs gerou: 2 ATPs (1 ATP por cada molécula de ácido pirúvico)
- A Cadeia respiratória, para a qual são enviados os elétrons produzidos nas fases anteriores (via moléculas transportadoras de elétrons - NAD e FAD) e na qual são produzidas moléculas de ATP via enzima ATPsintase) gerou:

$$2 \text{ NADH} \times 2,5 = 5 \text{ ATPs (Glicólise)}$$

$$8 \text{ NADH} \times 2,5 = 20 \text{ ATPs (Ciclo de Krebs)}$$

$$2 \text{ FADH}_2 \times 1,5 = 3 \text{ ATPs (Ciclo de Krebs)}$$

Total: 32 ATP.

A **Fermentação** é o processo pelo qual ocorre síntese de ATP na ausência de gás O₂ (ambiente anaeróbio). Este processo é 15X menos

energético, ocorre no citoplasma, e pode ser de dois tipos: fermentação alcoólica e fermentação láctica.

Na fermentação alcoólica, realizada por leveduras, a quebra do ácido pirúvico produz etanol e CO_2 . Na fermentação láctica, realizada por bactérias, vermes e pelos nossos músculos, a quebra do ácido pirúvico produz ácido láctico.

Reparem que nos dois tipos de fermentação os elétrons carregados pelos NADH são capturados, de maneira que a molécula torna a ser NAD^+ . Logo, a fermentação devolve para o citoplasma as moléculas NAD^+ para exercerem sua função de transportadora de elétrons em futuras reações de glicólise. A natureza é perfeita!

A **Fotossíntese** é a síntese de carboidratos a partir de gás carbônico e água com uso de energia luminosa. Como resíduos dessa reação, são produzidos gás oxigênio e água. A fotossíntese ocorre em duas etapas – (veja **ilustração do cloroplasto!**): a **etapa fotoquímica (ou fase clara)** e a **etapa química (fase escura)**.

Reparem que a fotossíntese é o **processo inverso e complementar** à respiração celular, na qual ocorre a produção de água, dióxido de carbono e muita energia (na forma de ATP) a partir da quebra dos carboidratos na presença do gás oxigênio.

A **etapa fotoquímica ou fase clara** acontece nos tilacóides e consiste na quebra da água pela ação da luz (fotólise), e na síntese de $\text{NADPH} + \text{ATP} +$ gás oxigênio.

Vamos entender como essa reação acontece?

- I- Esta ilustração representa a membrana de um tilacoide. Essas duas primeiras estruturas (da esquerda pra direita) são chamadas de fotossistema II e fotossistema I. Na parte superior dos fotossistemas, ou seja, na face voltada para o estroma, nós temos os chamados complexos de antena, que são estruturas repletas de pigmentos, ou seja, moléculas sensíveis à luz. Esses pigmentos são a clorofila A, clorofila B e carotenoides. Isso significa que quando a luz incide sobre essas estruturas, esses pigmentos absorvem energia, os seus elétrons ficam excitados e começam a se deslocar por essa cadeia transportadora de elétrons.
- II- Os elétrons da clorofila B, no FS II, percorrem por compostos intermediários (entre os fotossistemas) e são capturados pelo NADP (que vira NADPH). Ao passar pelos compostos intermediários bombeiam prótons para dentro do tilacoide, e esses prótons, devido

a diferença de concentração osmótica, retornam para o estroma pela ATP sintase, gerando energia para produzir ATP. Como ocorre produção de ATP mediada pela luz, esse processo é chamado **fotofosforilação acíclica**. A luz que incide sobre o FS II também quebra a molécula de água (fotólise), gerando oxigênio, prótons e, principalmente, elétrons. Essa fotólise é fundamental para repor os elétrons no FS II, caso contrário, a fotossíntese seria interrompida. O oxigênio, como eu disse no início da aula, é um resíduo dessa reação.

- III- Os elétrons da clorofila A, no FS I, percorrem os compostos intermediários, bombeiam prótons (que retornam para o estroma via ATP sintase gerando energia para formação de ATP) e retorna ao FS I. Neste caso, ocorre a chamada **fotofosforilação cíclica**.

A **etapa química ou fase escura** é representada principalmente pelo ciclo das pentoses, que é justamente o contrário do ciclo de Krebs: no ciclo de Krebs os compostos derivados da quebra da glicose com três carbonos entram num ciclo que libera CO₂. No ciclo das pentoses, o CO₂ entra num ciclo que vai formar um composto de três carbonos. A cada dois ciclos, temos duas moléculas de três carbonos, que ao se juntarem, produzem a molécula de glicose (com seis carbonos).

Vamos entender como essa reação acontece?

No estroma o CO₂ atmosférico é capturado e reage com a enzima Ribulose difosfato, originando vários compostos intermediários, dentre os quais o último é o Aldeído fosfoglicérico ou PGAL. O PGAL é uma molécula com 3 carbonos, considerada o primeiro glicídio da fotossíntese, mas como é uma molécula muito instável, ela precisa reagir com outra molécula PGAL, gerando finalmente a glicose, com 6 carbonos. Reparem que esse ciclo consome os ATP e os NADPH produzidos na fase clara, ao mesmo tempo que devolve ADP e NADP para os tilacoides, permitindo a manutenção das fotofosforilações.

A **quimiossíntese** é a síntese de compostos orgânicos a partir de reações de oxidação (como fonte de energia) realizadas por algumas bactérias e arqueas. As bactérias em questão são as sulfobactérias, as ferro bactérias e as nitrobactérias, que ao oxidarem o enxofre, o ferro e o nitrogênio, respectivamente, produzem carboidratos.

Reparem, seguindo a ilustração, que:

1- a oxidação desses elementos inorgânicos, gera energia, prótons e elétrons.

2- a quimiossíntese também opera mediante um ciclo de carbonos, que requer: captura de CO₂ atmosférico, consumo de ATP (formado a partir da energia liberada durante a reação de oxidação), prótons e elétrons (doados pela molécula de NADPH). Neste ciclo, também são formados vários compostos carbonados, dos quais o último deles é o PGAL.

FIM!