

Objetivo de Aprendizagem

Descrever as trocas de energia calor e trabalho que ocorrem continuamente no corpo humano;

Programa Sucinto

Energia, calor e trabalho. Metabolismo

Bibliografia

Physics of the Human Body, Herman, Irving P., Springer,
Capítulo 6

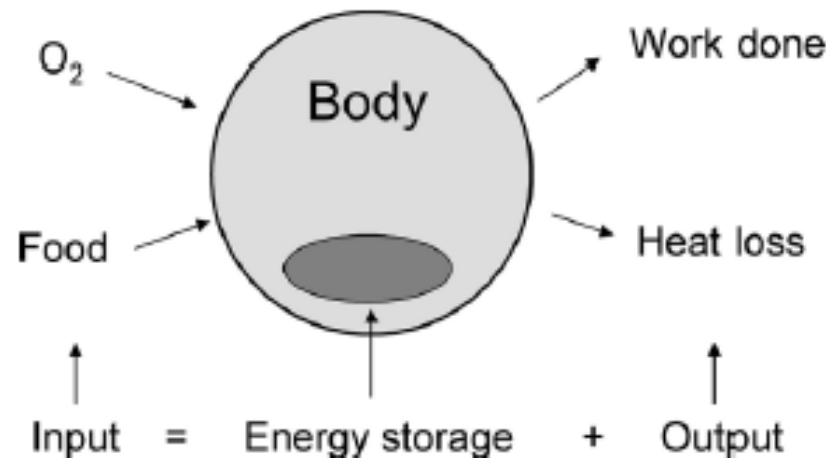
Não podemos funcionar sem energia.

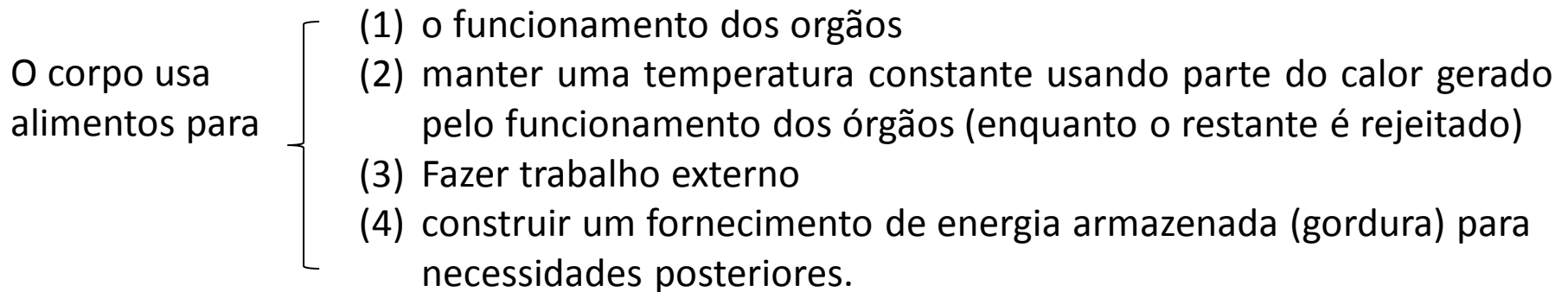
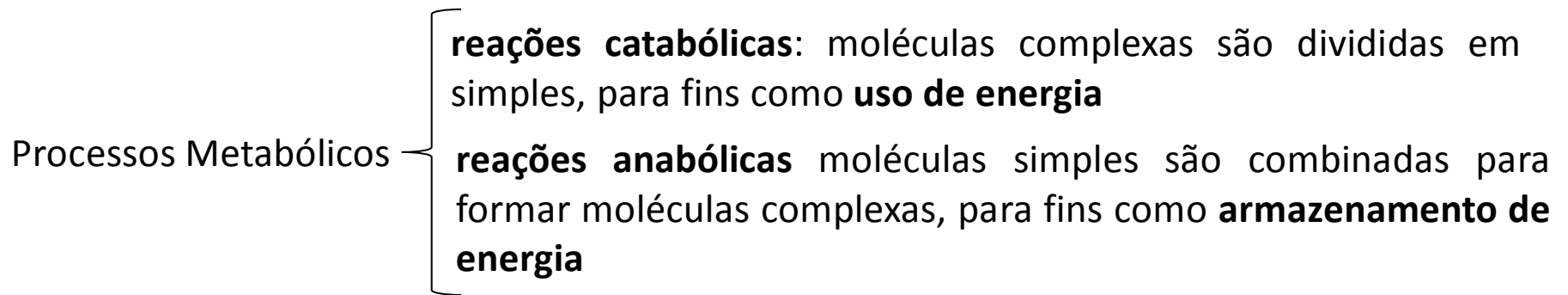
Os processos envolvidos na ingestão, armazenamento e uso de energia pelo organismo são coletivamente chamados de **metabolismo**; a disciplina que descreve essa área às vezes é chamada *bioenergética*.

De um modo mais geral, **metabolismo** é qualquer uso de energia pelo corpo e é a soma de todos os processos químicos executados pelas células para manter o corpo vivo.

Para uma visão completa, precisamos incluir

- a entrada de alimentos e oxigênio no corpo
- o armazenamento de energia
- a perda de energia pelo corpo através da
 - perda de calor
 - trabalho realizado pelo corpo.





5–10% da energia proveniente da ingestão alimentos é excretada nas fezes e na urina

Conservação de Energia e Fluxo de Calor

$$\Delta U = Q_{\text{met}} + Q_{\text{loss}} - W.$$

Este tipo de trabalho é de natureza puramente **mecânica**, como na movimentação e elevação de objetos.

Onde

ΔU é a mudança na energia armazenada

Q representa trocas de calor

W é o trabalho mecânico realizado pelo corpo

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ_{\text{met}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{loss}}}{dt} - \frac{dW}{dt}$$

O fluxo de calor inclui:

- produção de calor pelo metabolismo (Q_{met})
- perdas de calor (Q_{loss}) por radiação, convecção, condução e evaporação.

Q_{met} é chamado de taxa metabólica (MR)

O corpo aumenta sua energia com termos dQ_{met}/dt positivos
perde energia com termos dQ_{loss}/dt negativos.

(A quantidade de calor que flui do corpo é $-dQ_{\text{loss}}/dt$, que é uma quantidade positiva)

Conservação de Energia e Fluxo de Calor

O conteúdo energético dos alimentos é sempre expresso em termos da unidade cal (kcal)

$$1 \text{ caloria (cal)} = 4.184 \text{ joule (J)}.$$

a capacidade calorífica, C , que é a energia (ou mais especificamente, o calor) necessária para elevar a temperatura T de um objeto em 1°C . A capacidade calorífica por unidade de volume ou massa é o calor específico c .

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} \quad C = mc.$$

O calor específico médio do corpo, c_b , é um pouco menor que o da água, c_{water} :

$$c_{\text{water}} = 1.0 \text{ cal/g-}^\circ\text{C} = 1.0 \text{ kcal/kg-}^\circ\text{C} \quad c_b = 0.83 \text{ cal/g-}^\circ\text{C}$$

83 kcal para aumentar a temperatura de uma pessoa de 100 kg em 1°C .

83 kcal <> fatia de pão

Se a maior parte de nossa energia metabolizada se torna calor, porque razão a temperatura do corpo não aumenta em $1,0^\circ \text{C}$ cada vez que comemos e metabolizamos uma fatia de pão ?

<= A razão é a perda de calor pelo corpo

Conservação de Energia e Fluxo de Calor

Lei de Fourier

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -K \frac{dT}{dx} \sim -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

↓
fluxo de
calor

de regiões quentes
para regiões frias

→ A condutividade térmica K descreve como variações de temperatura (ΔT) ao longo do espaço originam fluxo de calor entre regiões diferentes que estão separadas por uma distância Δx .

Se distância bem definida, $d=\Delta x$, entre duas regiões de temperatura diferente, mas uniforme



$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -h \Delta T$$

$$h = K/d$$

Uma consequência da termodinâmica é que os motores que convertem energia química em calor e usam esse calor para trabalhos mecânicos, os chamados **motores de calor**, têm uma eficiência limitada para realizar esse trabalho mecânico útil.

Eficiência máxima de um motor de calor

$$\epsilon = 1 - (T_c/T_h)$$

opera a uma temperatura T_h e rejeita o calor a uma temperatura mais baixa T_c

Conservação de Energia e Fluxo de Calor

Os seres humanos operam internamente a cerca de $T_h = 310\text{K}$ e rejeitam o calor em um ambiente $T_c 293\text{K}$.

$$\epsilon = 1 - (T_c/T_h)$$

Assim a eficiência seria de 5,5% se fossemos motores térmicos

Isso é muito menor do que a eficiência de 25% dos humanos na conversão de energia química em trabalho mecânico.

Isto não é uma contradição, porque usamos a energia química diretamente para realizar trabalho mecânico e não produzimos calor numa etapa intermédia.

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

Existe uma semelhança entre a oxidação metabólica e a combustão (apesar de o corpo não "queimar" seus combustíveis com oxigênio)

A **combustão** corresponde à quantidade máxima de energia disponível na quebra e na reorganização das ligações

A **oxidação metabólica** é um pouco **menos eficiente**

As energias de combustão (entalpias) são obtidas através de calorimetria de “explosão” (“bomb calorimetry”) na qual os materiais são queimados em recipientes de paredes espessas.

Essas energias, libertadas por unidade de massa, são as energias máximas disponíveis e designam-se por energias de calorimetria por explosão

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

A quantidade de energia disponível para o corpo é definida como o valor calórico

O valor calórico é um pouco menor que o valor de energia de combustão devido a perdas durante a digestão,

- 2% para carboidratos
- 5% para gorduras
- 8% para proteínas

Existe uma perda adicional de 17% da energia das proteínas na urina

Define-se ainda o **equivalente calórico** como a energia produzida por litro de oxigénio consumido,

Glucose

O mecanismo de oxidação da glicose é representativo do dos carboidratos



A **energia produzida por unidade de massa** é $686 \text{ kcal}/180 \text{ g glucose} = \mathbf{3,80 \text{ kcal/g}}$

O **equivalente calórico** é

$686 \text{ kcal}/134,4 \text{ L O}_2 = 5,5 \text{ kcal/L O}_2$
(6 mol de $\text{O}_2 = 134,4 \text{ L}$ pois, em condições padrão, 1mol O_2 ocupa 22,4 L)

Na **oxidação metabólica**

1 mol de glucose, 30–32 mol de ADP e 30-32 mol de grupos fosfato, Pi, permitem formar 30-32 mol das moléculas armazenadores de energia : o ATP.

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

Ácido Palmítico

O mecanismo de oxidação do ác. palmítico é representativo da oxidação dos ácidos gordos



A energia libertada é $2397 \text{ kcal} / 256,4 \text{ g} = 9,3 \text{ kcal/g}$

O equivalente calórico é

$$2,397 \text{ kcal} / 515,2 \text{ L O}_2 = 4,7 \text{ kcal/L O}_2$$

$$23 \text{ mol O}_2 \leftrightarrow 515,2 \text{ L O}_2$$

Na oxidação metabólica

1 mol de ác. palmítico permite combinar 106 mol de ambos ADP e grupo fosfato Pi formando-se 106 mol de ATP

Ácidos gordos versus carboidratos

a mesma razão 1:2 entre C e H \rightarrow número igual de moles de CO_2 e H_2O resultantes

menos átomos de oxigénio por C \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} - \text{mais O}_2 \text{ é necessário} \\ - \text{menos massa é consumida por CO}_2 \text{ formado} \\ - \text{as gorduras são moléculas com menor grau de oxidação} \end{array} \right.$

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

A razão de troca respiratória (RER) (ou quociente respiratório (RQ)) é outra maneira de caracterizar os processos metabólicos.

$$\text{RER}=\text{RQ}=(\text{número de moles de CO}_2 \text{ produzido}) / (\text{número de moles de O}_2 \text{ usado})$$

É uma medida de quanto dióxido de carbono é libertado na respiração em relação à quantidade de oxigénio que o organismo precisa absorver pela respiração.

Table 6.2. Average caloric content of food. (Using data from [306])

food	net caloric value (kcal/g)	bomb calorimetry energy (kcal/g)	calorific equivalent (kcal/L O ₂)	CO ₂ production (kcal/L CO ₂)	RER (L CO ₂ /L O ₂)
carbohydrate	4.02	4.10	5.05	5.05	1.0
protein	4.20	5.65	4.46	5.57	0.80
ethanol	7.00	7.10	4.86	7.25	0.67
fat	8.98	9.45	4.74	6.67	0.71

RER is the respiratory exchange ratio.

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

Para perspectivar o valor calórico vamos usar uma unidade padrão: o Donut

Table 6.4. Caloric value of 1 rich frosted Entenmann'sTM donut (in 2005)

18 g fat	× 9 kcal/g	= 162 kcal
29 g carbohydrate	× 4 kcal/g	= 116 kcal
2 g protein	× 4 kcal/g	= 8 kcal
49 g total		= 286 kcal

Aproximadamente 57% das calorias (162 kcal / 286 kcal) são provenientes de gordura

Components and energy (kcal) of edible parts of common foods.

food, serving size	mass (g)	energy (kcal)	carb. ^a (g)	protein (g)	fat (g)	water (%)
grains and cakes						
bread, white, 1 slice	25	67	12	2	1	37
oatmeal, regular, 1 cup prepared	234	145	25	6	2	85
yellow cake, chocolate frosting, 1 piece	64	243	35	2	11	22
cheesecake, 1/6 of 17 oz cake	80	257	20	4	18	46

Components and energy (kcal) of edible parts of common foods.

food, serving size	mass (g)	energy (kcal)	carb. ^a (g)	protein (g)	fat (g)	water (%)
dairy						
milk, whole, 1 cup	244	150	11	8	8	88
butter, salted, 1/4 lb stick	113	813	Tr ^b	1	32	16
cheddar cheese, 1 oz	28	114	Tr	7	9	37
cottage cheese, 4%, 1 cup	225	233	6	28	10	79
ice cream, chocolate, 1/2 cup	66	143	19	3	7	56
eggs, raw, 1 large	50	75	1	6	5	75
meat and fish						
chicken, meat only, roasted 1/2 breast	86	142	0	27	3	65
beef, ground, 79% lean, broiled, 3 oz	85	231	0	21	16	56
salmon, broiled, 3 oz	85	184	0	23	9	62
fruits, vegetables, nuts, and oils						
apple, raw, unpeeled, 1 whole	138	81	21	Tr	Tr	84
apricots, raw, without pits, 1 whole	35	17	4	Tr	Tr	86
apricots, dried, sulfured, 10 halves	35	83	22	1	Tr	31
orange, peeled, 1 whole	131	62	15	1	Tr	87
carrots, raw, 7½ in long	72	31	7	1	Tr	88
potato, baked, with skin	202	220	51	5	Tr	71
French fries, medium portion	134	458	53	6	25	35
peanuts, dry roasted, 1 cup	146	854	31	35	73	2
walnuts, 1 cup chopped	120	785	16	18	78	4
canola oil, 1 cup	218	1,927	0	0	218	0
beverages						
cola, 12 fl oz	370	152	38	0	0	89
beer (regular), 12 fl oz	355	146	13	1	0	92
gin, vodka, whiskey, 86 proof, 1.5 fl oz	42	105	Tr	0	0	64
wine, red, 3.5 fl oz	103	74	2	Tr	0	89

^aCarbohydrate.

^bTrace.

Conteúdo Energético do “Combustível” do Organismo

Energia metabolizável e armazenamento de energia

É necessário definir com precisão a parte da energia dos alimentos

que pode realmente ser usada

A taxa de obtenção de energia metabolizável (ME)

$$d(\text{ME})/dt$$

é

(taxa de ingestão de energia na dieta) - (soma das taxas de perda de energia
nas fezes
na urina
em gás combustível
(ex. metano, CH_4)

Esta é a taxa real de energia que está a ser disponibilizada ao corpo

Energia metabolizável e armazenamento de energia

Com uma dieta de 42% de gordura / 18% de proteína cerca de 89,3% dos alimentos consumidos são tipicamente metabolizáveis

fração do calor da combustão (conteúdo calórico) dos alimentos que é energia metabolizável.

Cerca de 5,8% da energia consumida é perdida nas fezes,

4,5% na urina

0,4% como metano

A energia pode ser retida ou secretada (como leite) pelo organismo sendo quantificada através da entalpia dos tecidos, R (que inclui gordura, proteína e carboidratos).

A taxa à qual a entalpia é retida, dR / dt , é a diferença entre a taxa de entrada de energia metabolizável e a produção de calor através do metabolismo

(A entalpia, ou teor de calor, é a energia térmica máxima que se pode obter a pressão constante)

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d(ME)}{dt} - \frac{dQ_{met}}{dt}$$

(ignora-se a lactação)

Energia metabolizável e armazenamento de energia

- Quando o consumo de alimentos é nulo ($d(ME)/dt = 0$)

$dR/dt < 0$ (a magnitude é o calor do catabolismo dos tecidos do corpo)

- À medida que mais comida é consumida,
 dR/dt aumenta
produção de calor aumenta
(efeito dinâmico ou termogénico específico dos alimentos)

- Quando a retenção de energia é zero ao longo de vários dias
(dR/dt é em média zero)

A energia de entrada ME pela dieta é **a necessária para a manutenção**.

(para maiores valores de ME, a energia é armazenada no corpo)

Energia metabolizável e armazenamento de energia

A tabela seguinte mostra os resultados de experiências calorimétricas para pessoas que estão:

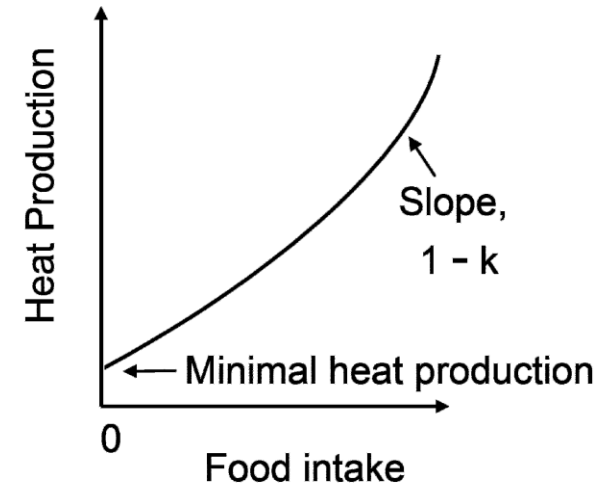
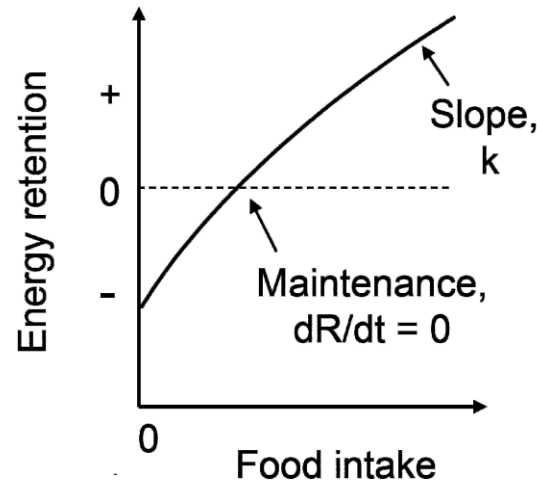
- em jejum (para quem a energia armazenada em proteínas e gorduras é transformada em calor)
- a comer e sem fazer exercício (com resultante armazenamento de gordura corporal)
- a comer e com atividade física (para quem uma pequena quantidade de energia armazenada é transformada em calor, mesmo havendo ingestão adicional de alimentos).

Table 6.7. Calorimetric experiments each averaged over several runs (in kcal/day).
(Using data from [298], from [295])

energy	eating, without exercise	eating, with exercise (bicycle)	fasting
intake energy	2,659	4,340	0
feces energy	107	176	0
urine energy	134	138	105
change in body protein	-16	-57	-463
change in body fat	176	-484	-1,892
heat produced	2,270	4,554	2,187
discrepancy	12	-13	-63

Energia metabolizável e armazenamento de energia

A figura ao lado mostra a retenção de energia e a produção de calor (efeito termogénico) como função do consumo de alimentos



O declive da curva de retenção de energia, k , é

$$k = \frac{dR/dt}{d(ME)/dt}$$

e o declive da curva de produção de calor é $1 - k$

k , também chamado de eficiência da utilização de energia metabolizável, varia com a quantidade de alimento consumido.

Energia metabolizável e armazenamento de energia

Para dietas médias

Abaixo da manutenção, k é 0,90 ; Acima da manutenção, k é 0,75

Para carboidratos

Abaixo da manutenção, k é 0,94 ; Acima da manutenção, k é 0,78

Para gorduras

Abaixo da manutenção, k é 0,98 ; Acima da manutenção, k é 0,85

Para proteínas

Abaixo da manutenção, k é 0,77 ; Acima da manutenção, k é 0,64

- O organismo é mais eficiente no uso de energia armazenada do que a depositar gordura e proteínas.
- As proteínas são metabolizadas com menos eficiência do que os carboidratos e a gordura.

Moléculas para Armazenamento de Energia

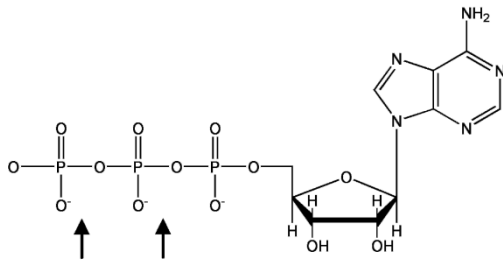
Como o ATP é produzido e usado como fonte de energia

Catabolismo. O ATP, trifosfato de adenosina, é a unidade básica de armazenamento de energia no corpo e permite a liberação rápida de energia.

Por que razão o organismo converte o combustível dos alimentos em ATP e não oxida diretamente os carboidratos, os ácidos gordos e as proteínas?

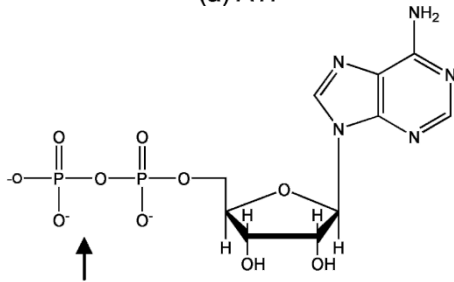
O uso do ATP é mais controlável.

Além disso, a unidade de energia fornecida pelo ATP é suficientemente pequena para ser útil.



(a) ATP

As duas ligações que ligam os grupos fosfato são instáveis e de alta energia; a ligação inter-fosfato mais à esquerda quebra-se na hidrólise do ATP em ADP que é o difosfato de adenosina



(b) ADP



A energia libertada, ou mais precisamente a energia livre, varia de 7 a 14 kcal/mol de ATP, dependendo das condições. Os valores típicos são 12-14 kcal/mol

Moléculas para Armazenamento de Energia

Anabolismo. Após a hidrólise, o ADP precisa ser combinado com um grupo fosfato para reformar o ATP para uso posterior

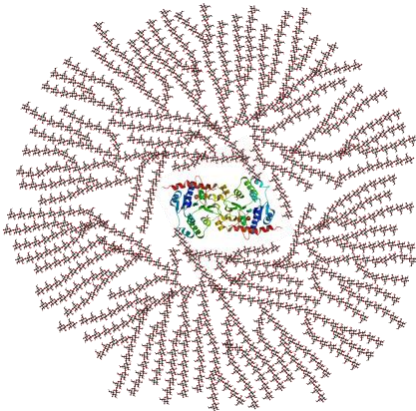
Em média, a cada minuto, cada molécula de ATP é reciclada

Como é que o organismo usa fontes alimentares como a glicose para fazer isso?

R: ocorre por uma série de etapas químicas que podem prosseguir,
numa extensão limitada, **sem oxigénio (glicólise anaeróbica)**
em maior medida, **com oxigénio (metabolismo aeróbico ou respiração)**

É utilizada glicose na corrente sanguínea

ou glicogênio, $(C_6H_{12}O_6)_n$



- um açúcar polimerizado de cadeia ramificada que consiste em moléculas de glicose ligadas entre si por ligações glicosídicas.

- armazenado nas células musculares, onde é usado diretamente, e no fígado, onde é decomposto em glicose por glicogenólise, que é então libertada no sangue para as outras células.

A core protein of glycogenin is surrounded by branches of glucose units. The entire globular granule may contain around 30,000 glucose units

Moléculas para Armazenamento de Energia

No metabolismo aeróbico

os produtos das etapas anaeróbicas são metabolizados (na presença de oxigénio) de modo a completar o metabolismo da glicose

através de uma série complexa de etapas colectivamente denominadas por **ciclo de Krebs** e por **sistema de transferência de electrões (ETS)**

O resultado global é que, no metabolismo aeróbico

1 mol de glicose pode produzir aproximadamente 30 a 32 mol de ATP (dependendo dos detalhes do mecanismo de transporte através da membrana).

Na realidade, 1 mol de carboidratos do glicogénio muscular pode produzir aproximadamente 31-33 mol de ATP

mas é usada energia na formação de glicogénio a partir da glicose

Dos 30 a 32 mol ATP

2 mol são produzidos por processos anaeróbicos

28 a 30 moles adicionais são produzidos quando existe oxigénio suficiente

Moléculas para Armazenamento de Energia

A conclusão é que a hidrólise destes, digamos 30 mol de ATP fornece a partir de glicose

$$30 \text{ mol ATP/mol glucose} \times 14.0 \text{ kcal/mol ATP} = 420 \text{ kcal/mol glucose}$$

Comparando com a energia da combustão de glicose

$$180 \text{ g/mol glucose} \times 3.8 \text{ kcal/g glucose} = 686 \text{ kcal/mol glucose}$$

Isto significa que a eficiência do uso de glicose pelo corpo para formar energia disponível na forma de ATP está entre

$$420 \text{ kcal}/686 \text{ kcal} = 61\% \text{ (30 mol ATP por mol glicose) e}$$

$$448 \text{ kcal}/686 \text{ kcal} = 65\% \text{ (32 mol ATP por mol glicose)}$$

Essa faixa de eficiência de 61 a 65% ocorre nas células musculares.

De qualquer forma, essa eficiência é muito boa, embora não seja perfeita.
(É muito melhor do que a eficiência típica dos motores térmicos que é de 10 a 20%.)

Mas a eficiência geral do uso da glicose no trabalho mecânico é muito menor, devido a outros fatores de eficiência.

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

O ATP é a fonte de energia para o movimento muscular, mas nem sempre é a fonte armazenada localmente.

O corpo possui:

- um mecanismo para usá-lo diretamente
- vários mecanismos, em níveis, para transferir energia de outras moléculas para a formação de ATP (a partir do ADP)

Existem quatro níveis de etapas, cada um dos quais pode

ser usado por **períodos** sucessivamente **mais longos**, embora em **níveis de atividade** sucessivamente **mais baixos**.

Table 6.8. Estimated power and energy available from the body, for a 70 kg man with 30 kg of muscle, assuming 10 kcal/mol of ATP. (Using data from [306])

system	maximum power (moles of ATP/min)	maximum capacity (total moles of ATP)
phosphagen (ATP-PC) system	3.6	0.7
anaerobic glycolysis	1.6–2.5	1.2
aerobic metabolism from glycogen	1.0	90.0

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Etapa 1

Normalmente, existe ATP suficiente nos músculos esqueléticos vivos para fornecer energia para cerca de 8 contrações. Isso pode ser suficiente por cerca de 3 s.

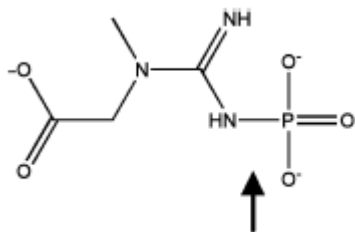
A energia vem de



Etapa 2

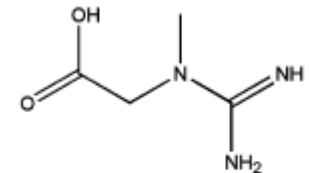
Agora é necessário mais ATP.

É ressintetizado a partir do reservatório local de fosfocreatina (ou fostafo de creatina (Cr)) (PCr) por



(a) PCr

A ligação instável e de alta energia que liga o grupo fosfato em PCr é indicada por uma seta. A enzima que catalisa a quebra de PCr para formar ATP, que é a transferência do grupo fosfato de PCr para ADP para formar ATP, é chamada **creatina quinase**



(b) Cr

Essa reação é fortemente direcionada para a direita porque possui uma constante de equilíbrio >20 . O músculo possui PCr suficiente para fornecer ATP para cerca de 100 contrações (cerca de 8 a 10 s).

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Juntas, as etapas 1 e 2 constituem o sistema **sistema fosfagénico** ou o sistema ATP-PC.

É a fonte do pico de potência mais alto, com cerca de 4 mol de ATP usado por uma pessoa a cada minuto, por curtos períodos de no máximo 8 a 10 s.

O PCr pode ser reformado a partir do Cr e Pi usando o próprio ATP.

Para níveis intensos de exercício, isso pode ocorrer somente após a atividade e geralmente ocorre pelo metabolismo aeróbico.

Etapas 3.

Durante a atividade intensa, as pessoas precisam de ATP rapidamente e não há oxigénio suficiente para o metabolismo aeróbico



Ocorre apenas a glicólise anaeróbica
(a via de Embden–Meyerhof)

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Uma mole de glicose-1-fosfato (obtida a partir de 1 mol de carboidratos do glicogénio) pode converter 3 mol de ADP em ATP.

Nesse processo, 1 mol de ATP é usado para produzir frutose-1,6-difosfato a partir de **frutose-6-fosfato** (que é produzido a partir de glicose-1-fosfato) e 2 mol de ATP são formados em cada uma das duas etapas subsequentes da glicólise, resultando um total de 3 mol de ATP ($= 2 \times 2 - 1$)

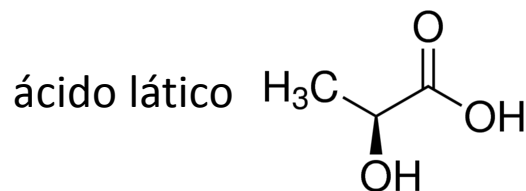
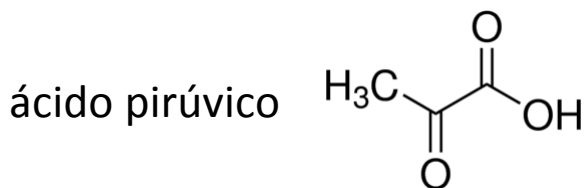
Metabolismo da glicose proveniente do sangue

É necessário 1 ATP para convertê-la em **glicose-6-fosfato**

Produção de 2ATP por molécula de glicose ($= 2 \times 2 - 1 - 1$)

Tudo isso ocorre no fluido intracelular da célula muscular (o citosol)

No final da glicólise anaeróbica, ainda existe energia armazenada nas 2 moléculas de ácido pirúvico ($C_3H_4O_3$) (íões piruvato em solução) formadas a partir de cada molécula de glicose, que são convertidas em 2 moléculas de ácido láctico ($C_3H_6O_3$) (íões lactato em solução) se não puderem ser usados no ciclo de Krebs no metabolismo aeróbico.



Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Adicionalmente, 2 moléculas de NADH são formadas por molécula de glicose na glicólise anaeróbica

A energia dessas moléculas de alta energia também é desperdiçada porque elas só são metabolizadas pelo ETS no metabolismo aeróbico (no entanto, o NADH pode permanecer até que o débito de oxigênio seja recuperado)

A vantagem deste sistema de glicólise anaeróbica ou sistema glicogênio-ác.láctico é

- fornecer um nível médio de potência, $\pm 2,5$ mol de ATP/min, que é aproximadamente 60% do sistema fosfagénico
- disponibilizar energia para cerca de 600 contrações, por um tempo intermédio de $\sim 1,3-1,6$ min

(O pico máximo de potência anaeróbica é de 2,1 hp para homens e 1,7 hp para mulheres. Estes valores diminuem drasticamente após os 25 anos de idade.)

As desvantagens são **ser um processo** ineficiente e produzir ácido láctico, que causa desconforto por acidose e fadiga.

Como a reação piruvato-lactato é reversível:

o ácido láctico da glicólise anaeróbica pode ser convertido para formar piruvato

quando o oxigênio estiver disponível durante a recuperação de exercício físico intenso

principalmente no fígado e não no músculo

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Etapa 4.

Durante o exercício “leve”, há oxigénio suficiente para o metabolismo aeróbico completar a oxidação dos carboidratos.

O metabolismo aeróbico consiste em dois processos complexos, além da glicólise anaeróbica:

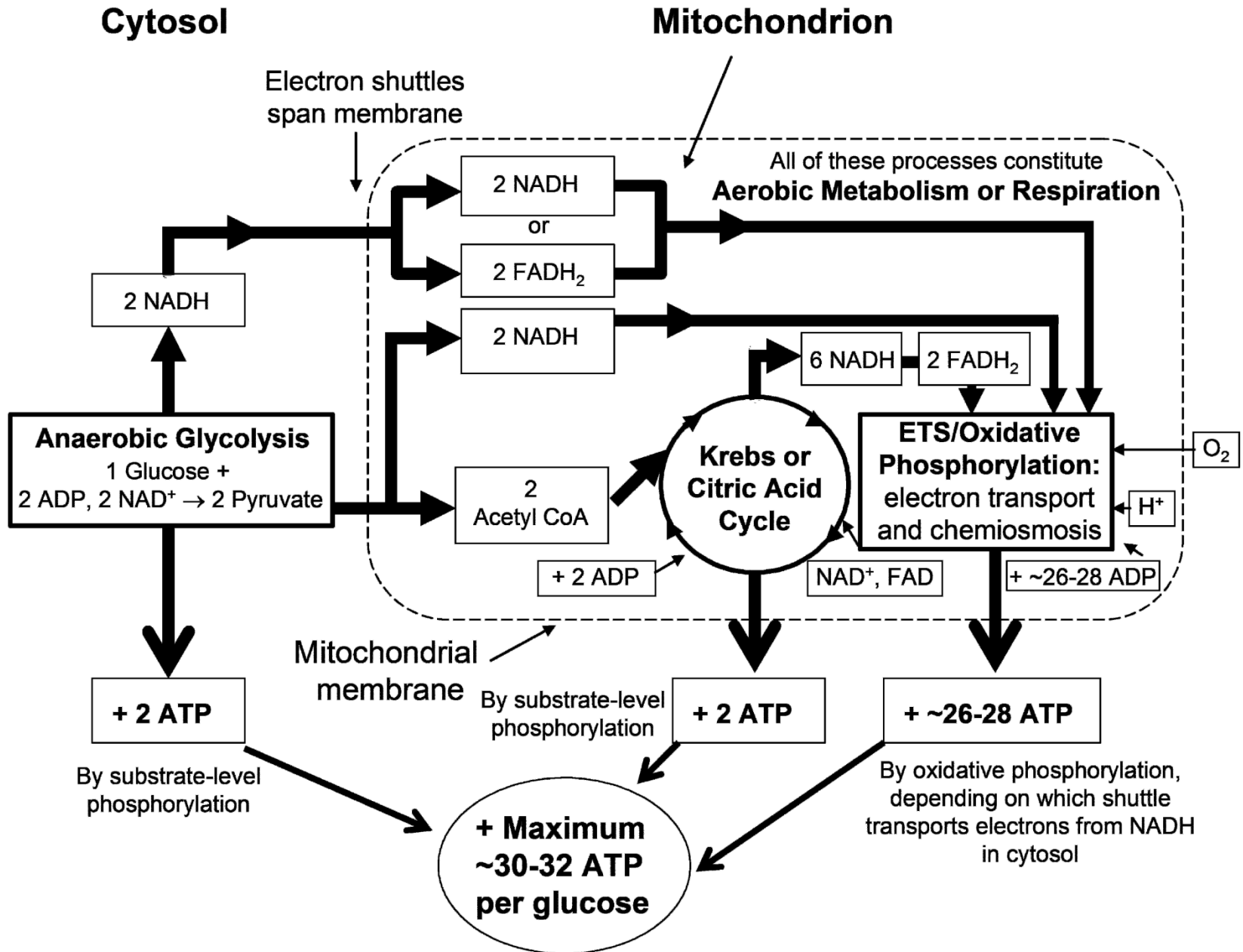
- o **ciclo de Krebs** (também conhecido como ciclo do ácido tricarboxílico (TCA) ou cítrico
- o **sistema de transferência de eletrões (ETS)** (também conhecido como via do citocromo ou fosforilação oxidativa)

Ambos ocorrem na mitocôndria celular

Somente o ETS requer oxigénio diretamente, mas sem oxigénio, mesmo os benefícios do ciclo de Krebs são perdidos devido a reações inversas.

- As 2 mol de NADH da glicólise anaeróbica são transportados através da membrana mitocondrial
- Duas moles de piruvato provenientes da glicólise anaeróbica servem como material de partida para o **ciclo de Krebs**.

Ciclo de Krebs

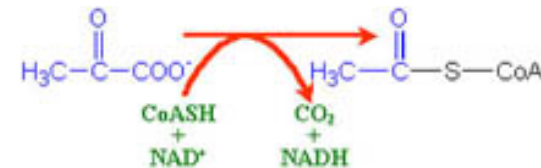


Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Antes de entrar no ciclo de Krebs

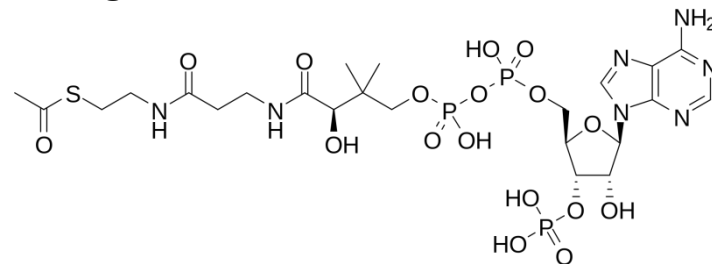
cada piruvato produz uma molécula de acetilCoA
e uma de NADH



Assim 2 acetil CoA e 2 NADH são produzidos por molécula de glicose

No total, para cada piruvato
(pre-convertido em acetiCoA),
o ciclo de Krebs produz

$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ ATP} \\ 3 \text{ NADH} \\ 1 \text{ FADH}_2 \\ 2 \text{ CO}_2 \end{array} \right.$



AcetilCoA

Assim, por para cada mole de glicose, um total de

10 mol de NADH (2 da glicólise + 2 pré-C.Krebs + 2x3 C.Krebs) e 2 mol de FADH₂

entram no ETS, onde são convertidos em ATP e H₂O

Alternativamente, se as 2 mol de NADH da glicólise anaeróbica forem transportada
através da membrana mitocondrial como 2 mol de FADH₂, um total de

de 8 mol de NADH e 4 mol de FADH₂

entram no ETS, onde são convertidos em ATP e H₂O

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Existem várias séries de caminhos alternativos através dos quais essas moléculas de alta energia (NADH e FADH_2) são convertidas em ATP, resultando em:

2.5 ATP por NADH

1.5 ATP por FADH_2

Assim conclui-se que, por cada mol de glicose, resultam $2.5 \times 10 + 1.5 \times 2 = 28$ mol of ATP
ou $2.5 \times 8 + 1.5 \times 4 = 26$ mol of ATP

Existem também as 2 mol de ATP directamente obtidas da glicólise anaeróbia e as 2 mol de ATP formadas directamente do ciclo de Krebs

No global, um total de 30 a 32 mol de ATP é produzido a partir de 1 mol de glicose (dependendo do mecanismo de transporte de NADH na membrana mitocondrial)

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

O ATP também é formado pela oxidação de ácidos gordos e alguns aminoácidos e proteínas.

- No entanto, gorduras e proteínas apenas podem ser metabolizadas na presença de oxigênio
- O papel do metabolismo das proteínas
 - é muito menor durante o repouso
 - não contribui com mais de 5 a 10% do fornecimento total de energia durante o exercício normal

Metabolismo dos ácidos gordos

Cada molécula de ácido gordo é ativada usando 2 moléculas de ATP

é metabolizada em passagens sucessivas através de um ciclo metabólico, **oxidação β** , que ocorre dentro da mitocôndria

dois átomos de carbono são perdidos em cada passagem para produzir

1 acetil-CoA

1NADH + 1FADH₂

restando no final uma molécula de acetil-CoA
(contendo 2 átomos de C do ác. gordo)

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Para o ácido palmítico, que tem uma cadeia de 16 carbonos, existem sete passagens completas

1mole de ácido palmítico produz:	8 mol de acetil-CoA (incluindo a restante após a oxidação β) 7 mol de NADH e 7 mol de FADH_2
----------------------------------	---

Cada mole de acetil-CoA é então oxidado no ciclo de Krebs para dar

{	1 ATP
	3 NADH
	1 FADH_2
	2 CO_2

Assim, para o ácido palmítico, conclui-se que 31 mol de NADH ($8 \times 3 + 7$) e 15 mol de FADH_2 ($8 \times 1 + 7$) entram no sistema ETS.

No global, $2,5 \times 31 + 1,5 \times 15 = 100$ mol de ATP são formados no ETS.

Incluindo as outras 8 mol de ATP que resultam do ciclo de Krebs, são formadas 108 moles de ATP por mole de ácido palmítico.

Descontando as 2 moles de ATP usadas para ativação, uma total de 106 moles de ATP são formadas.

Table 6.9. Estimated energy available from the body (per kg and also, in parentheses, total), for a 70 kg man with 30 kg of muscle, assuming 10 kcal/mol ATP. (Using data from [306])

system	muscular amounts (in mmol/kg muscle ^a) (total)	useful energy (in kcal/kg muscle) (total)
phosphagen (ATP-PC) system		
ATP	4–6 (120–180)	0.04–0.06 (1.2–1.8)
PC	15–17 (450–510)	0.15–0.17 (4.5–5.1)
Total: ATP + PC	19–23 (570–690)	0.19–0.23 (5.7–6.9)
anaerobic glycolysis		
ATP formation	33–38 (1,000–1,200)	0.33–0.38 (10.0–12.0)
aerobic metabolism		
from stored glycogen	13–15 g (400–450)	
ATP formation	2,800–3,200 (87,000–98,000)	28–32 (870–980)

^aUnless otherwise noted.

Table 6.10. Body stores of fuel and energy, for a 65 kg (143 lb) person with 12% body fat. (Using data from [340])

	amount (g)	energy (kcal)
carbohydrates		
liver glycogen	110	451
muscle glycogen	500	2,050
glucose in body fluids	15	62
carbohydrates total	625	2,563
fat		
subcutaneous and visceral	7,800	73,320
intramuscular	161	1,513
fat total	7,961	74,833

Table 6.12. Percent emphasis of energy systems. (Using data from [306, 307])

sport or activity	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
aerobic dance	5	15–20	75–80
baseball	80	15	5
basketball	60	20	20
diving	98	2	negligible
fencing	90	10	negligible
field hockey	50	20	30
football	90	10	negligible
golf	95	5	negligible
gymnastics	80	15	5
ice hockey			
forward, defense	60	20	20
goalie	90	5	5
lacrosse			
goalie, defense, attacker	50	20	30
midfielders, man-down	60	20	20
rowing	20	30	50
soccer			
goalie, wings, strikers	60	30	10
halfbacks or sweeper	60	20	20
stepping machine	5	25	70
tennis	70	20	10
field events, in track and field	95–98	2–5	negligible
volleyball	80	5	15
walking	negligible	5	95
wrestling	90	5	5

Table 6.14. Percent emphasis of energy systems for a range of distances in swimming. (Using data from [306, 307])

swimming	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
50 m	90	5	5
100 m	80	15	5
200 m	30	65	5
400 m	20	40	40
1,500 m	10	20	70

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Um homem saudável, com treino adequado, pode fornecer $\sim 50\text{mL}$ de oxigênio/kg-min

Este sistema aeróbico fornece o menor pico de potência

1 mol ATP/min

($\sim 25\%$ do sistema fosfagénico)

mas por muito tempo

Existe glicogênio suficiente para 10.000 contrações musculares. É útil para atividades de longa distância e resistência.

O glicogênio no músculo é esgotado após várias horas ($\sim 1,5\text{--}4,0$ h) deste nível de atividade.

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

O oxigénio armazenado no corpo é desprezável.

Ele tem de ser continuamente trazido pelos pulmões e transferido para o sangue nas artérias.

O oxigênio é transferido para as células, diminuindo o conteúdo de oxigénio do sangue nas veias.

A taxa de consumo corporal de O_2 , dVO_2/dt é igual ao produto do débito cardíaco (taxa de fluxo sanguíneo, Q_t) e a diferença no conteúdo de oxigênio (pressão parcial de oxigênio) nas artérias e veias, ($p_a - p_v$):

$$\frac{dVO_2}{dt} = Q_t(p_a - p_v)$$

Durante o exercício aeróbico, o dVO_2/dt aumenta linearmente com o Q_t .

O uso máximo de oxigênio e as taxas de fluxo sanguíneo são:

$(dVO_2/dt)_{\text{máx}} \approx 2,8 \text{ L/min}$ e $(Q_t)_{\text{máx}} \approx 19 \text{ L/min}$ para uma pessoa com condição física média

$(dVO_2/dt)_{\text{máx}} \approx 4 \text{ L/min}$ e $(Q_t)_{\text{máx}} \approx 25 \text{ L/min}$ para uma pessoa em boa forma

Moléculas para Armazenamento de Energia

Como o ATP é realmente usado pelo organismo

Os passos metabólicos envolvidos nestes sistemas são todos regulados por um mecanismo de feedback e controle e são seguidos por um passo de recuperação.

A tabela seguinte indica o tempo de recuperação que é necessário para retornar às reservas de energia e de O_2 em repouso e para reduzir o ácido láctico após o exercício físico.

Table 6.16. Recovery times after exhaustive exercise. (Using data from [306])

	minimum	maximum
restoration of phosphagen (ATP + PC)	2 min	5 min
muscle glycogen replenishment	5–10 h	24–46 h
liver glycogen replenishment	unknown	12–24 h
restoration of O_2 in plasma and myoglobin	10–15 s	1 min
duration of fast component of O_2 recovery	3 min	6 min
duration of slow component of O_2 recovery	30 min	1 h
reduction of lactic acid in blood and muscle	30–60 min ^a	1–2 h ^a

^aFaster recovery with exercise and slower recovery with rest.

O exercício anaeróbico é limitado pela tolerância máxima ao ácido láctico, que é de cerca de 2,0 a 2,3 g/kg de músculo, e, portanto, é de 60 a 70 g para 30 kg de músculo.

Pode-se ter uma ideia da etapa de recuperação correndo o mais rápido possível e durante o maior tempo possível. Ficar-se-á a arfar, respirando o ar o mais rápido possível. Isso faz parte da recuperação.