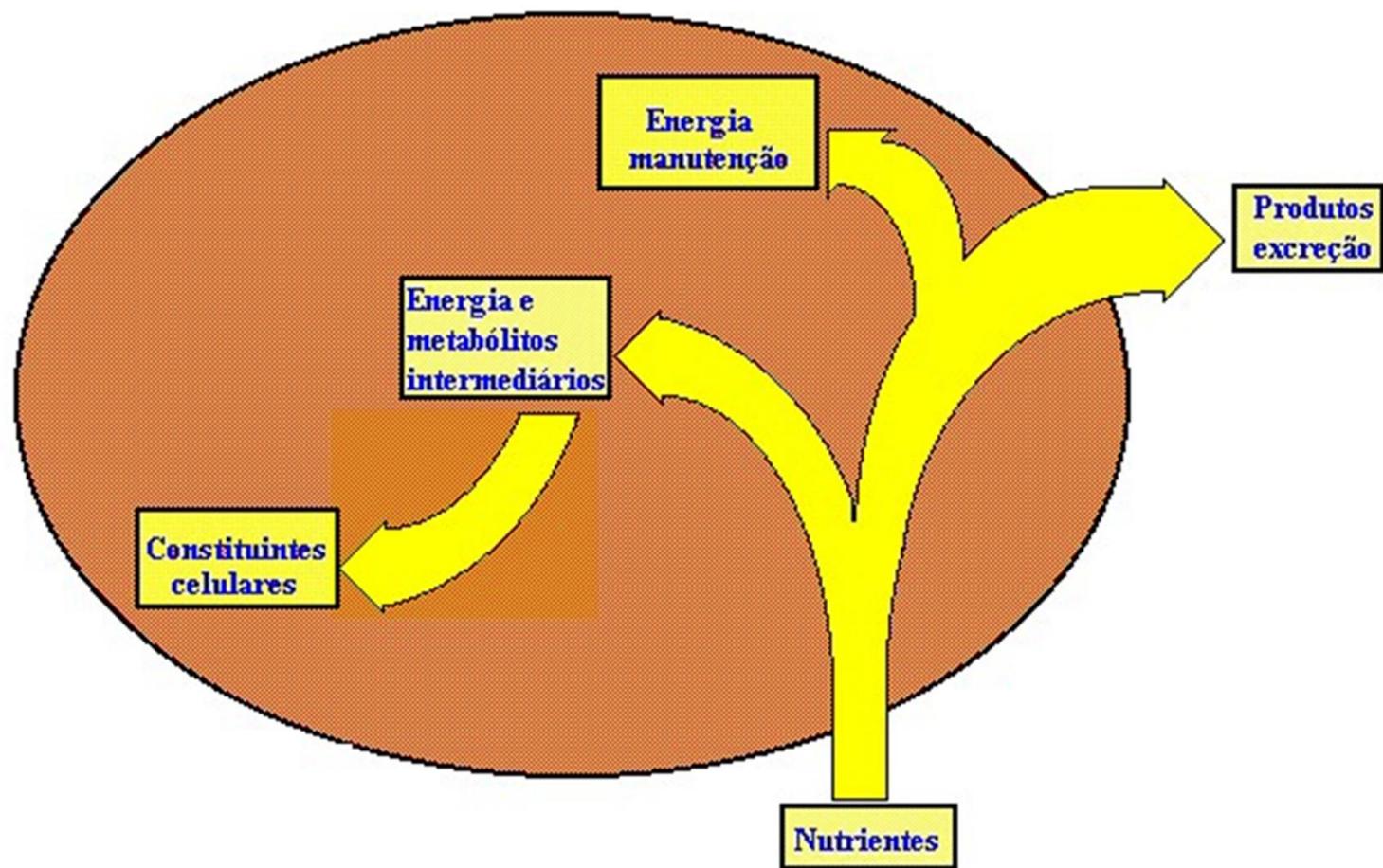


Diversidade Metabólica



Envelope

Pili
Proteins

Outer membrane
Proteins
Phospholipids
Lipopolysaccharide

Capsule
Complex polysaccharide

Wall
Peptidoglycan

Periplasm
Proteins

Cell membrane
Proteins
Phospholipids

Flagella
Proteins

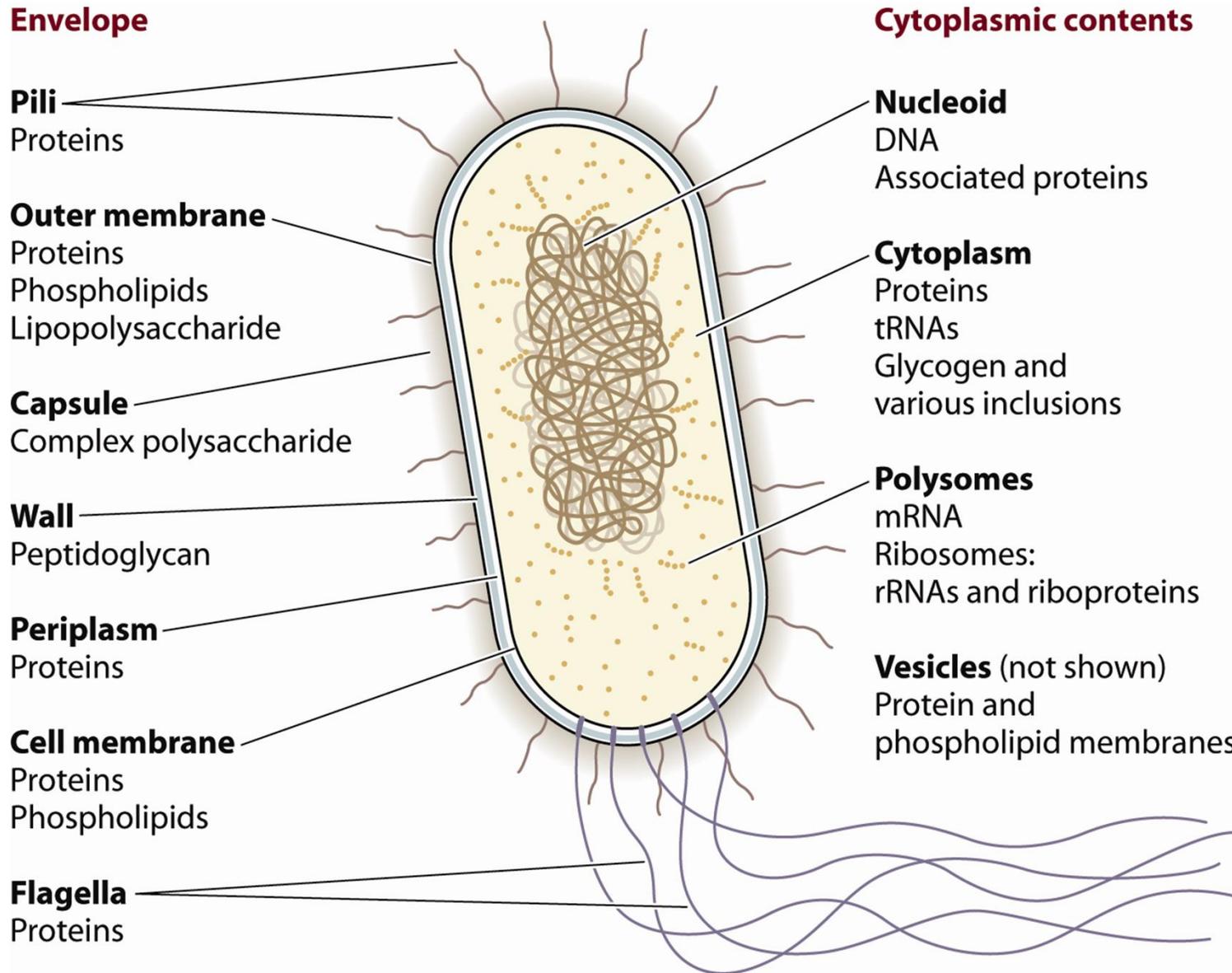
Cytoplasmic contents

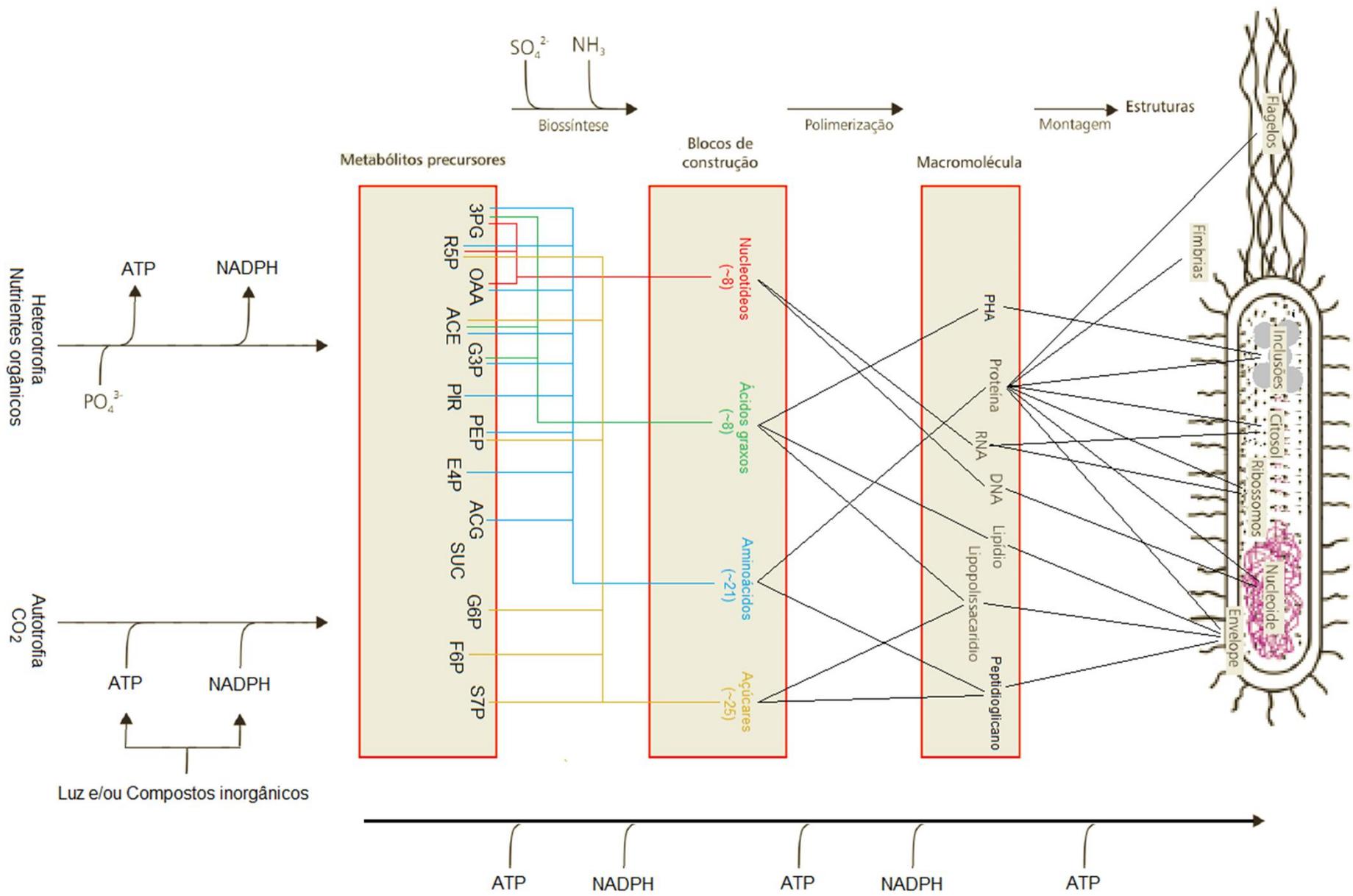
Nucleoid
DNA
Associated proteins

Cytoplasm
Proteins
tRNAs
Glycogen and
various inclusions

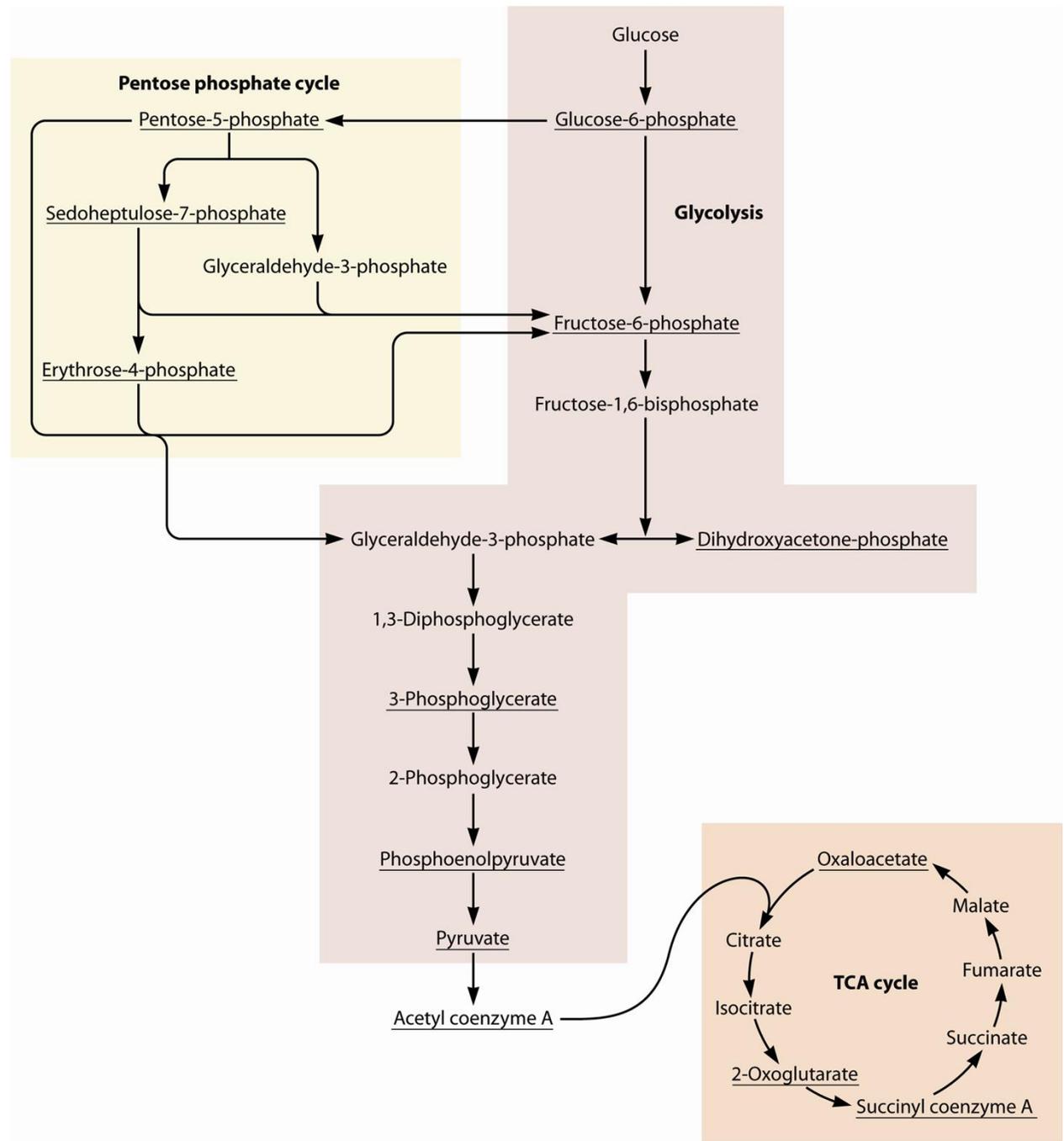
Polysomes
mRNA
Ribosomes:
rRNAs and riboproteins

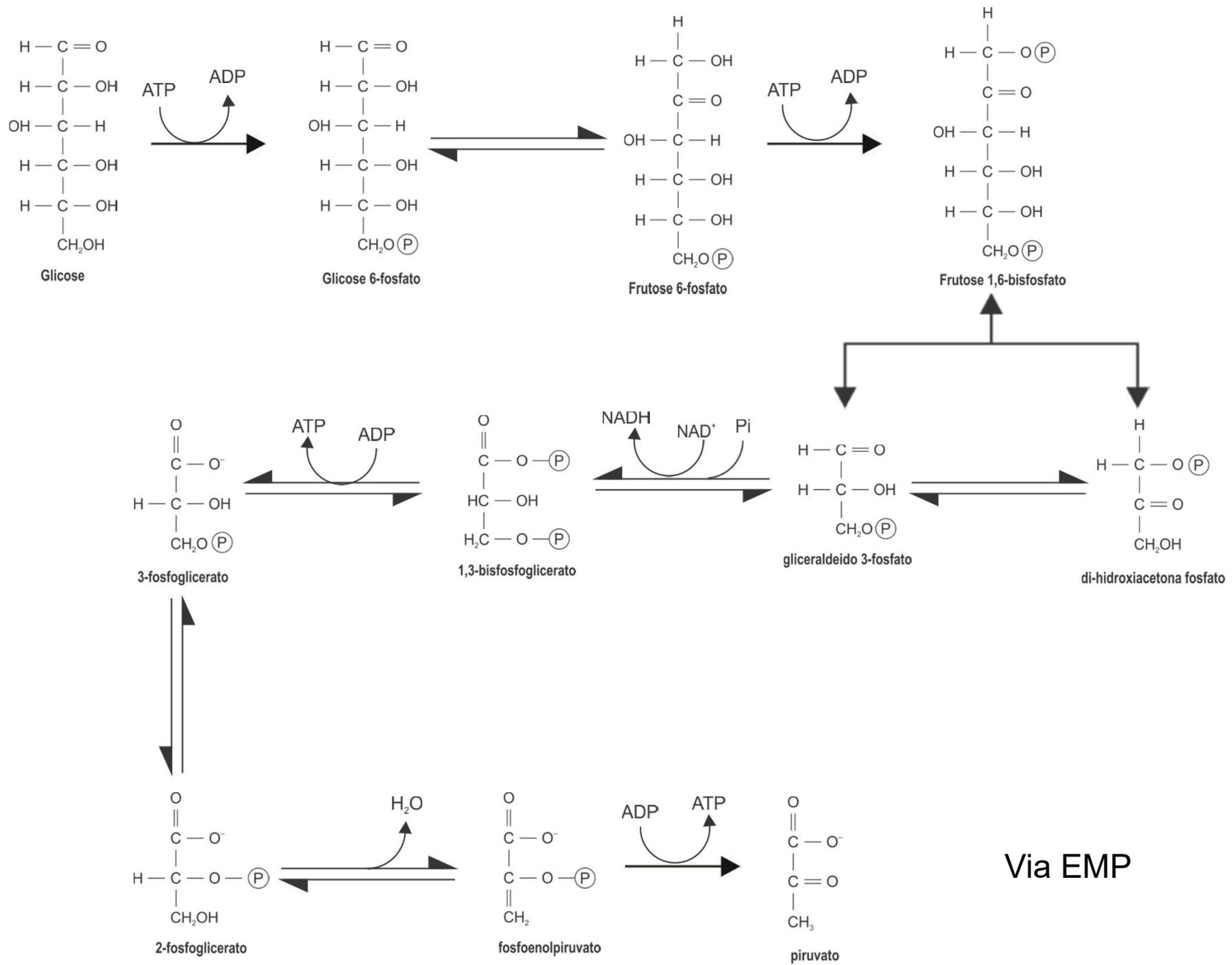
Vesicles (not shown)
Protein and
phospholipid membranes



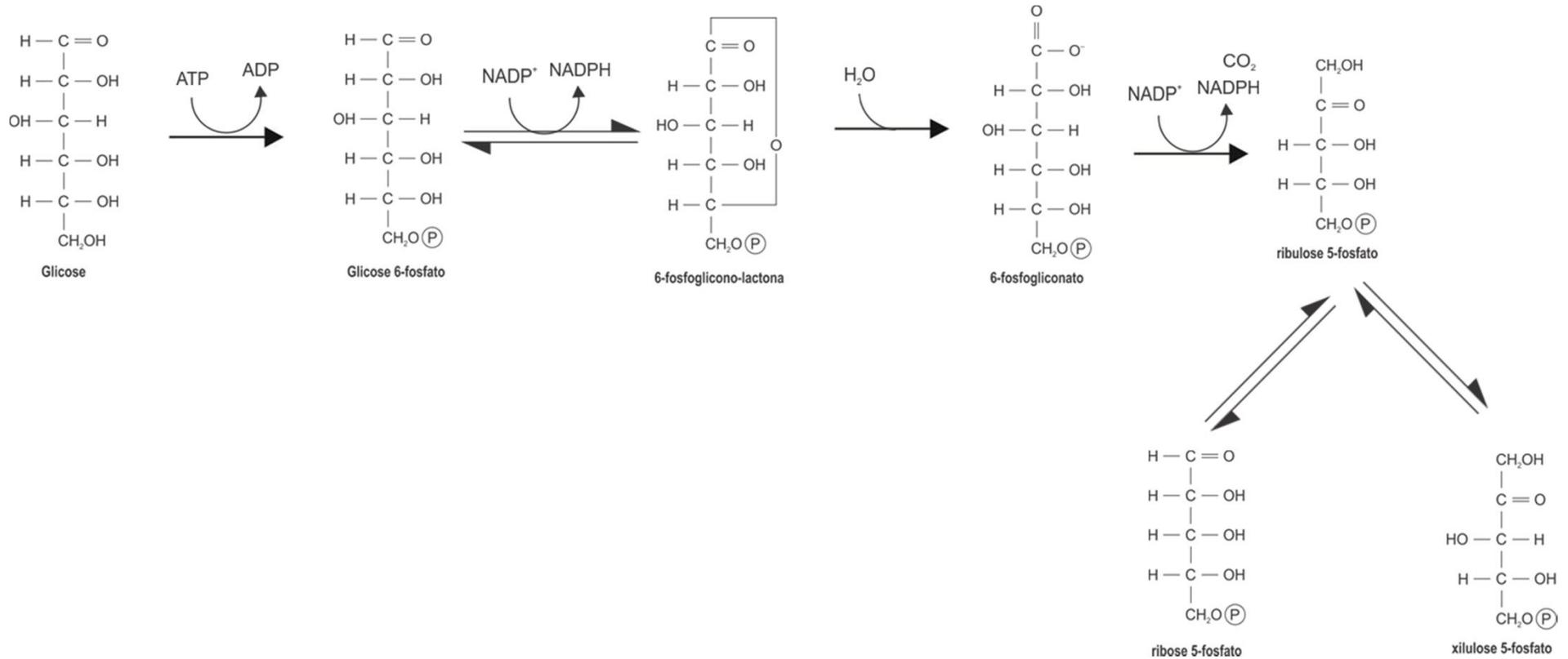


Metabolismo Central

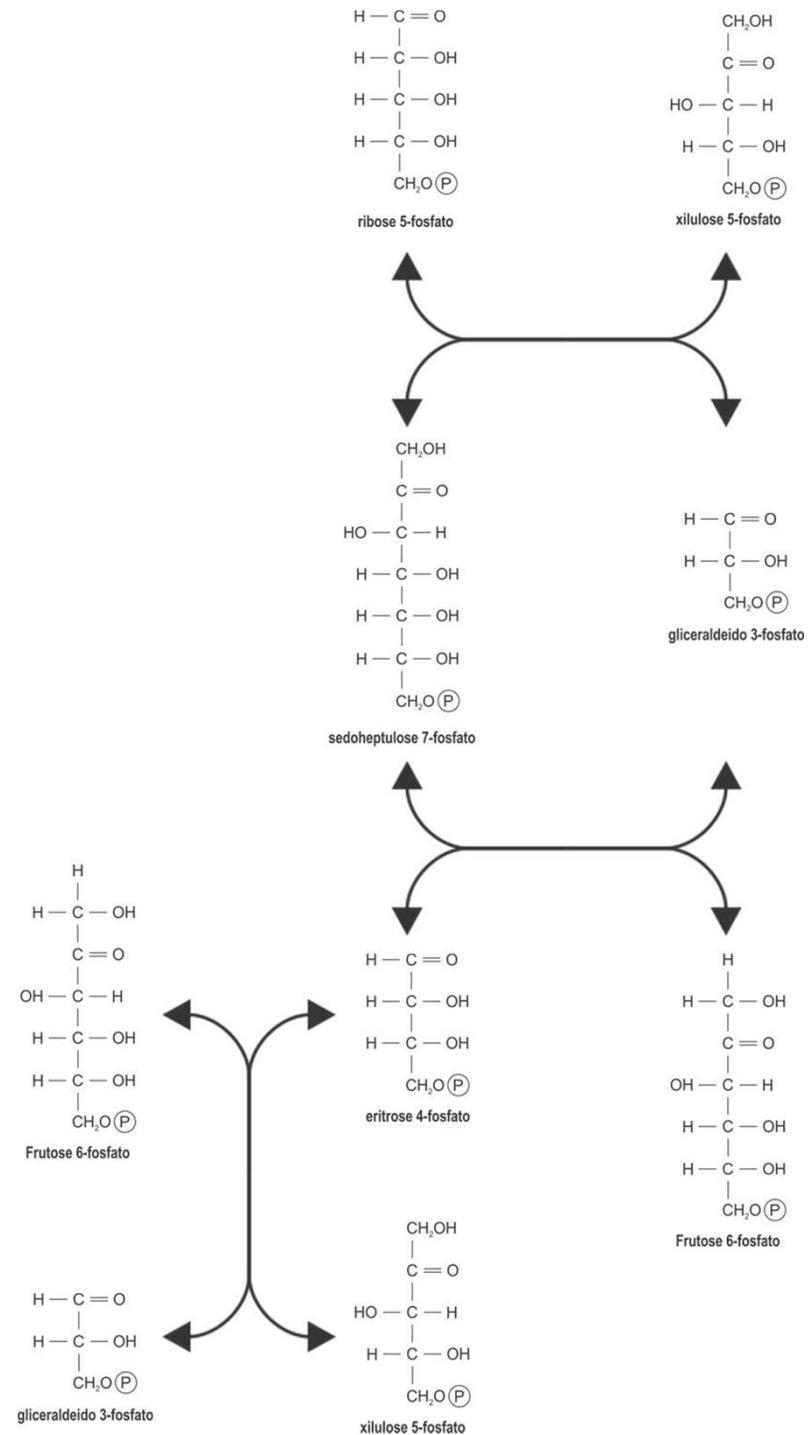




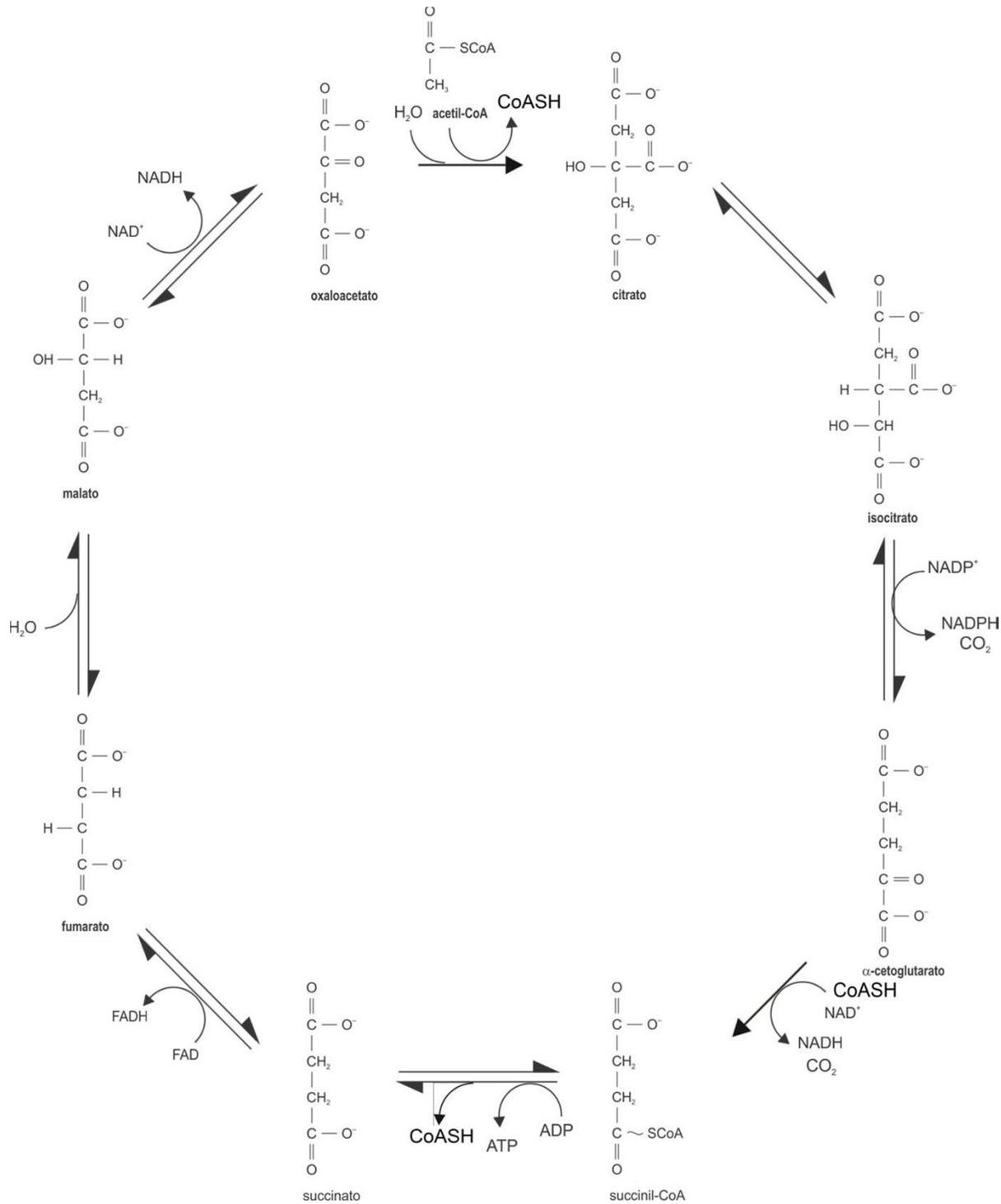
Via das pentoses - Fase oxidativa - Isomerizações



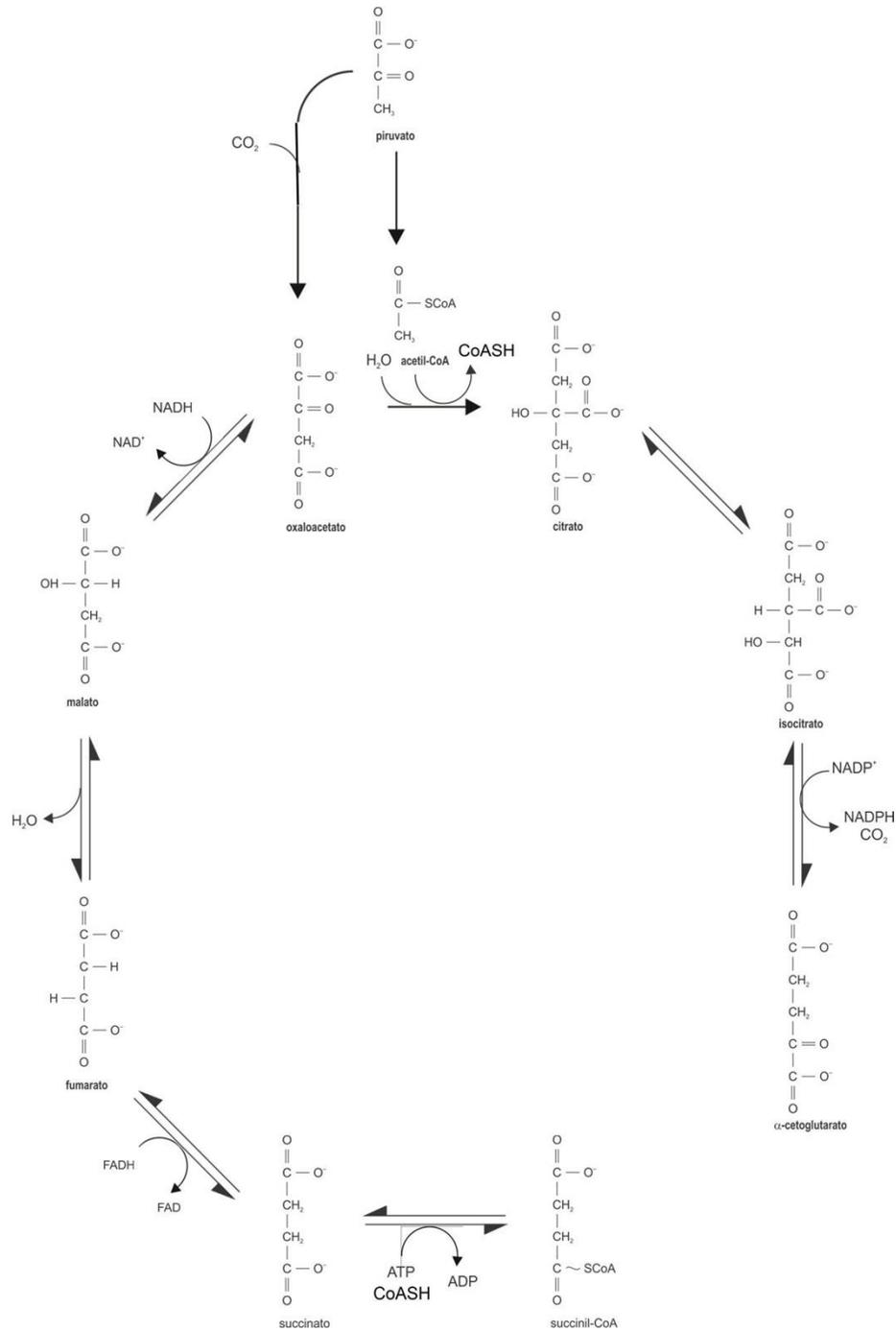
Via das pentoses – transcetolases - transaldolases

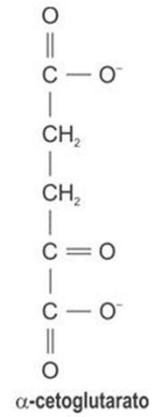
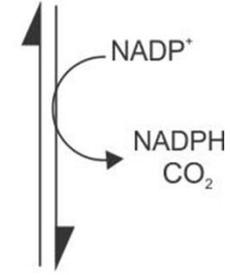
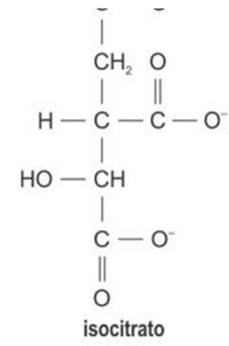
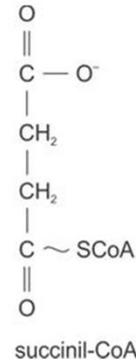
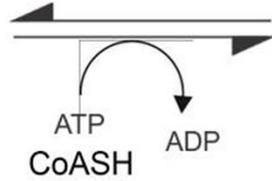
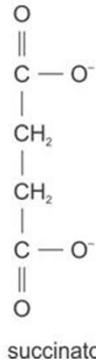
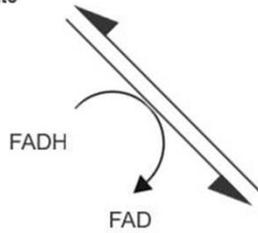
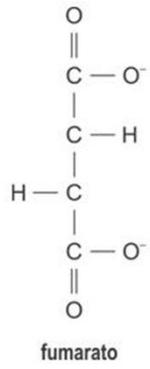
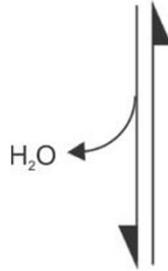
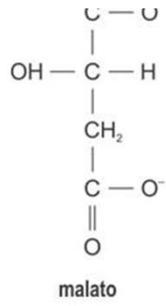


Ciclo de Krebs



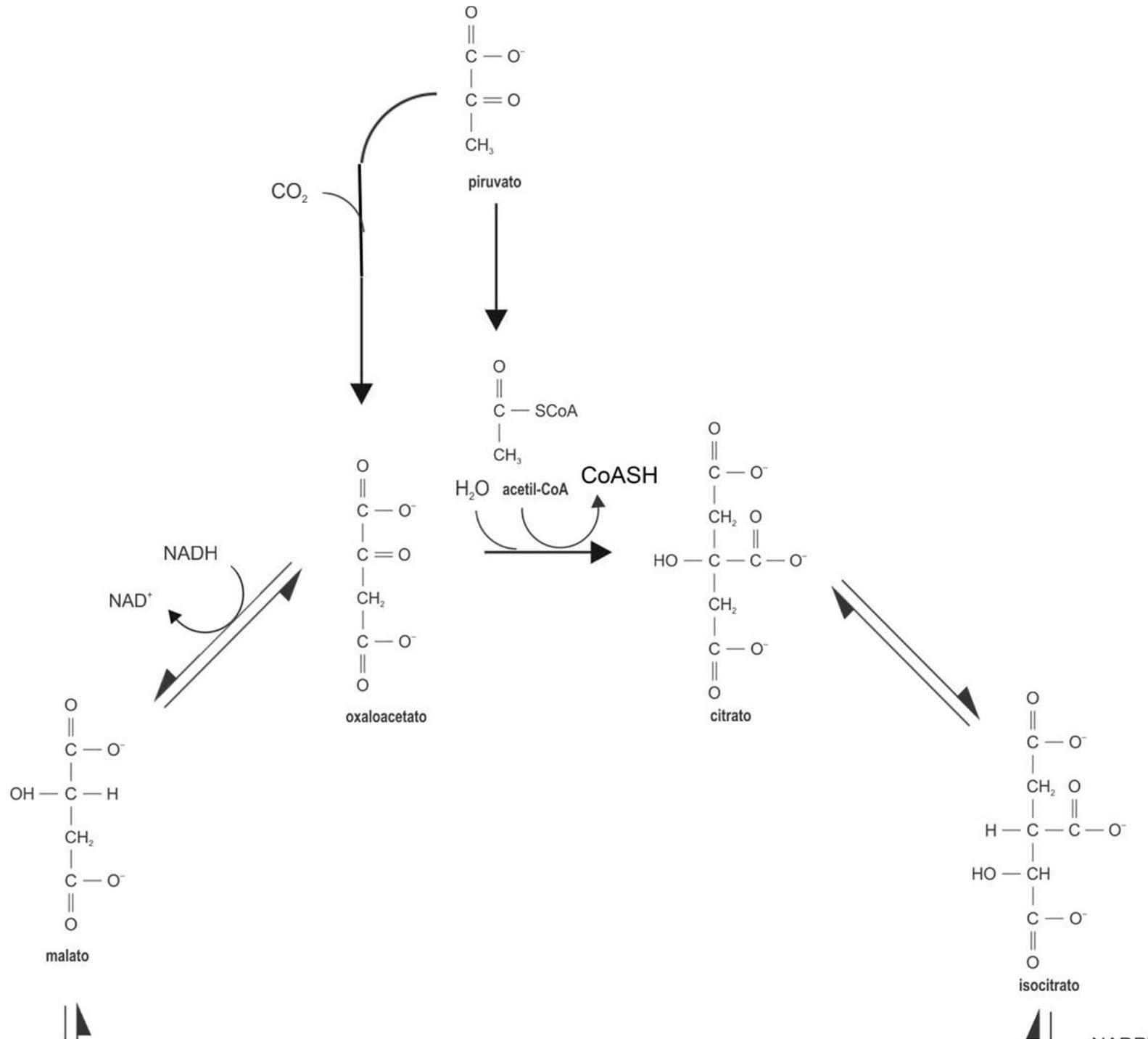
Ramos oxidativo e redutor

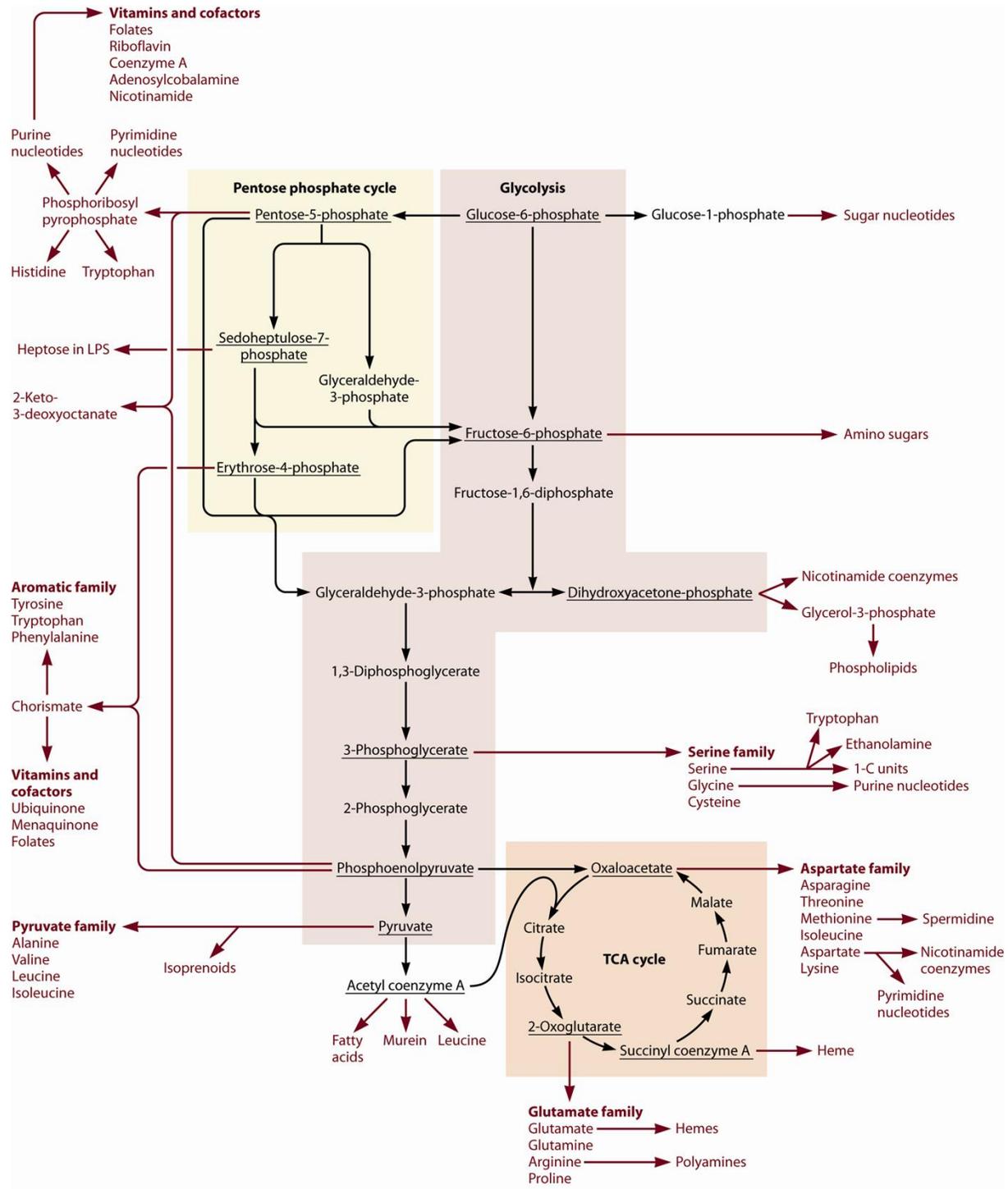




DS
/O e
or

s
e
r





Cadeia de transporte de eletrons

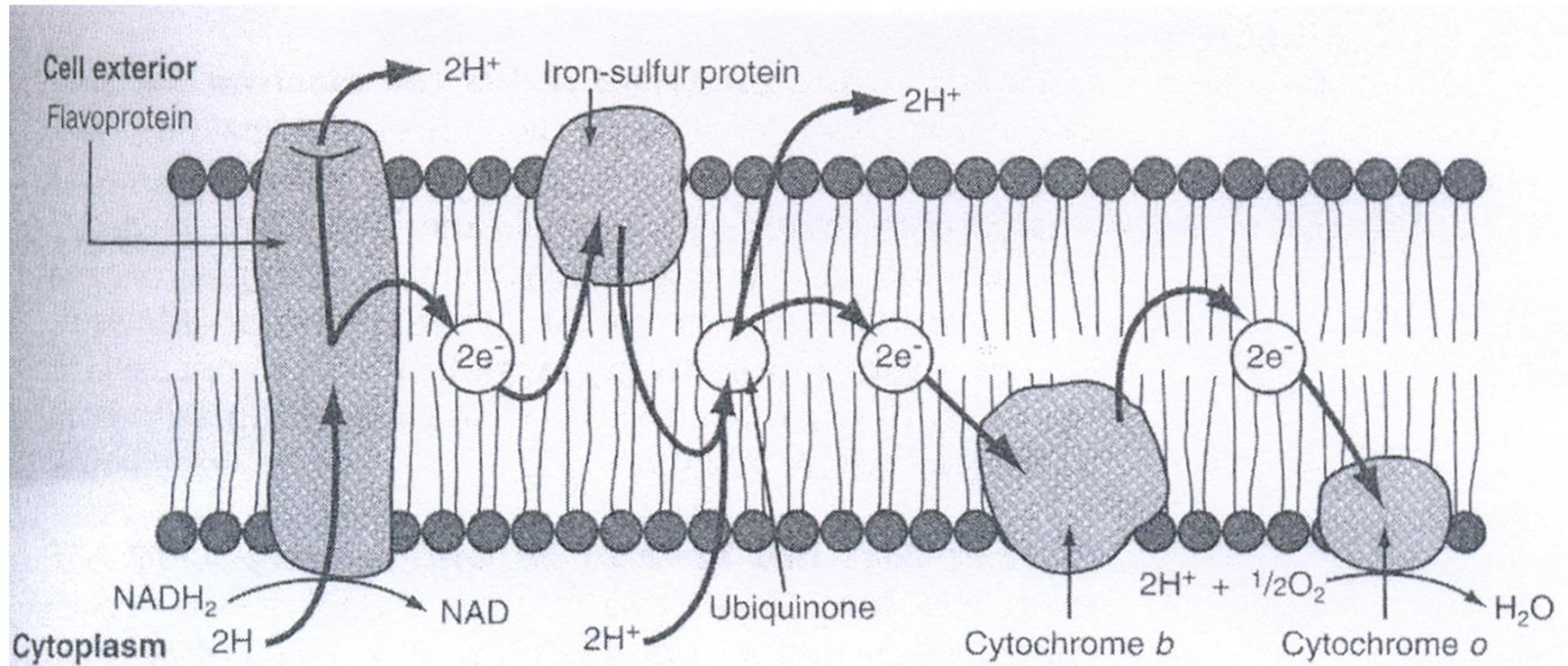


FIGURE 4.2 *The electron transport chain. Abbreviations: NAD, nicotinamide adenine dinucleotide;*

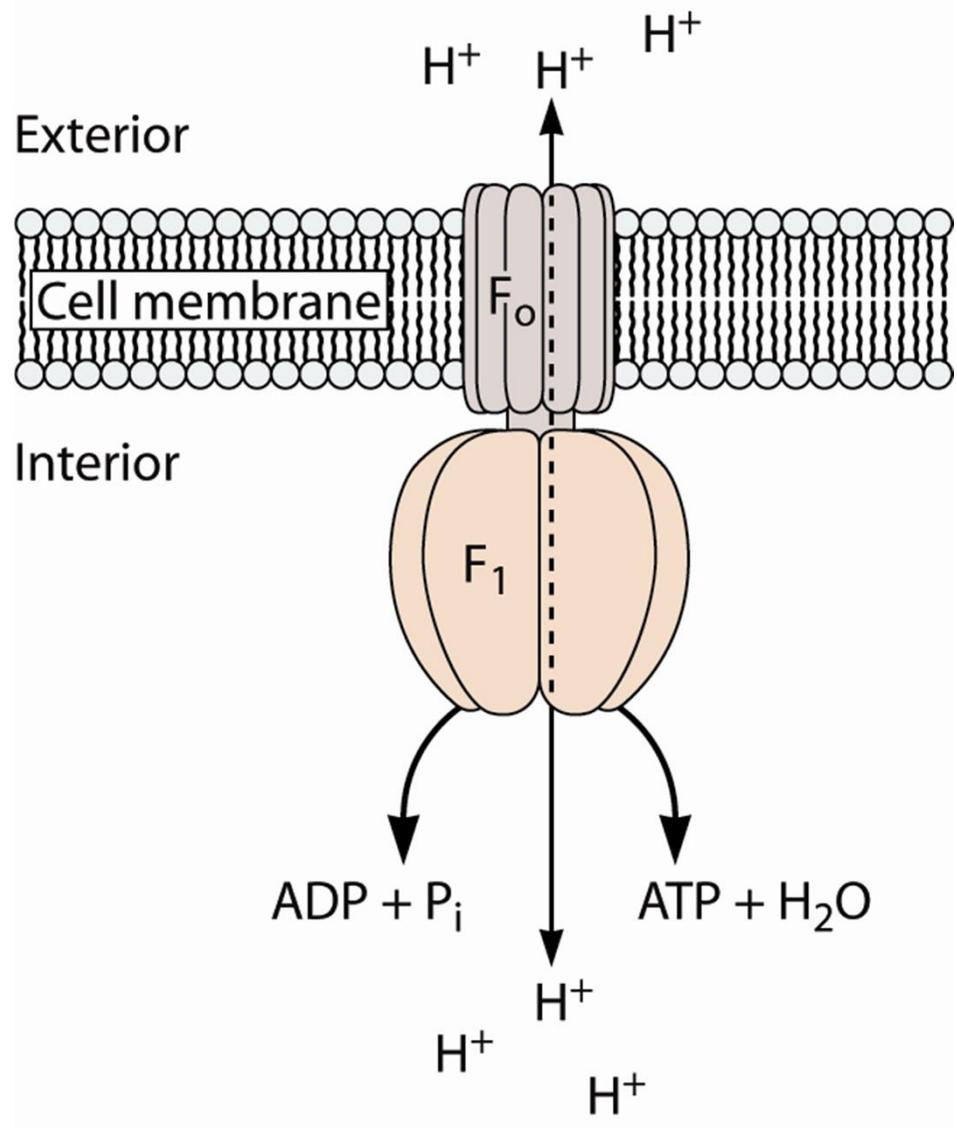
Cadeia de transporte de eletrons

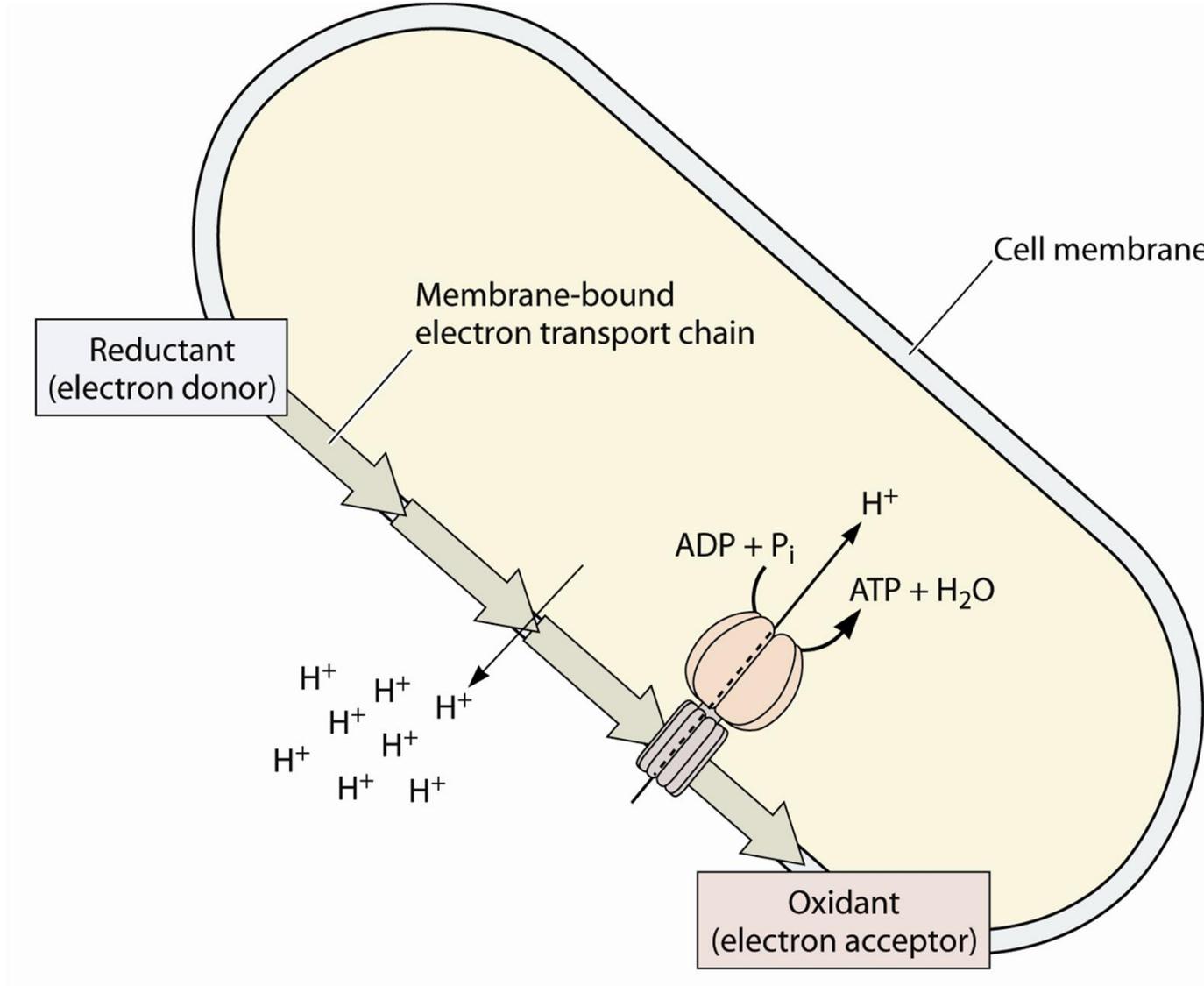
Quadro 8.2 Potenciais de óxido-redução padrão dos componentes da cadeia de transporte de elétrons

Par oxidado/reduzido	E°' (volts)
NAD ⁺ /NADH	- 0,32
FMN/FMNH ₂	- 0,30*
FAD/FADH ₂	- 0,18**
CoQ/CoQH ₂	+ 0,04
Citocromo b (Fe ³⁺)/citocromo b (Fe ²⁺)	+ 0,06
Citocromo c ₁ (Fe ³⁺)/citocromo c (Fe ²⁺)	+ 0,23
Citocromo c (Fe ³⁺)/citocromo c (Fe ²⁺)	+ 0,25
Citocromo a (Fe ³⁺)/citocromo a (Fe ²⁺)	+ 0,29
Citocromo a ₃ (Fe ³⁺)/citocromo a ₃ (Fe ²⁺)	+ 0,55
O ₂ /H ₂ O	+ 0,82

*O valor refere-se à coenzima ligada à NADH desidrogenase.

**O valor refere-se à coenzima livre; quando ligada a proteínas, seu valor varia entre 0,0 e +0,3, dependendo da proteína.





FERMENTAÇÃO

FERMENTAÇÃO

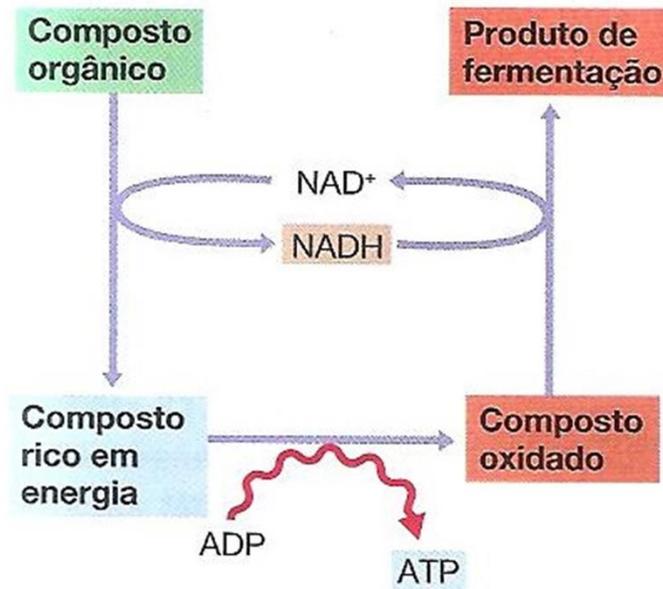
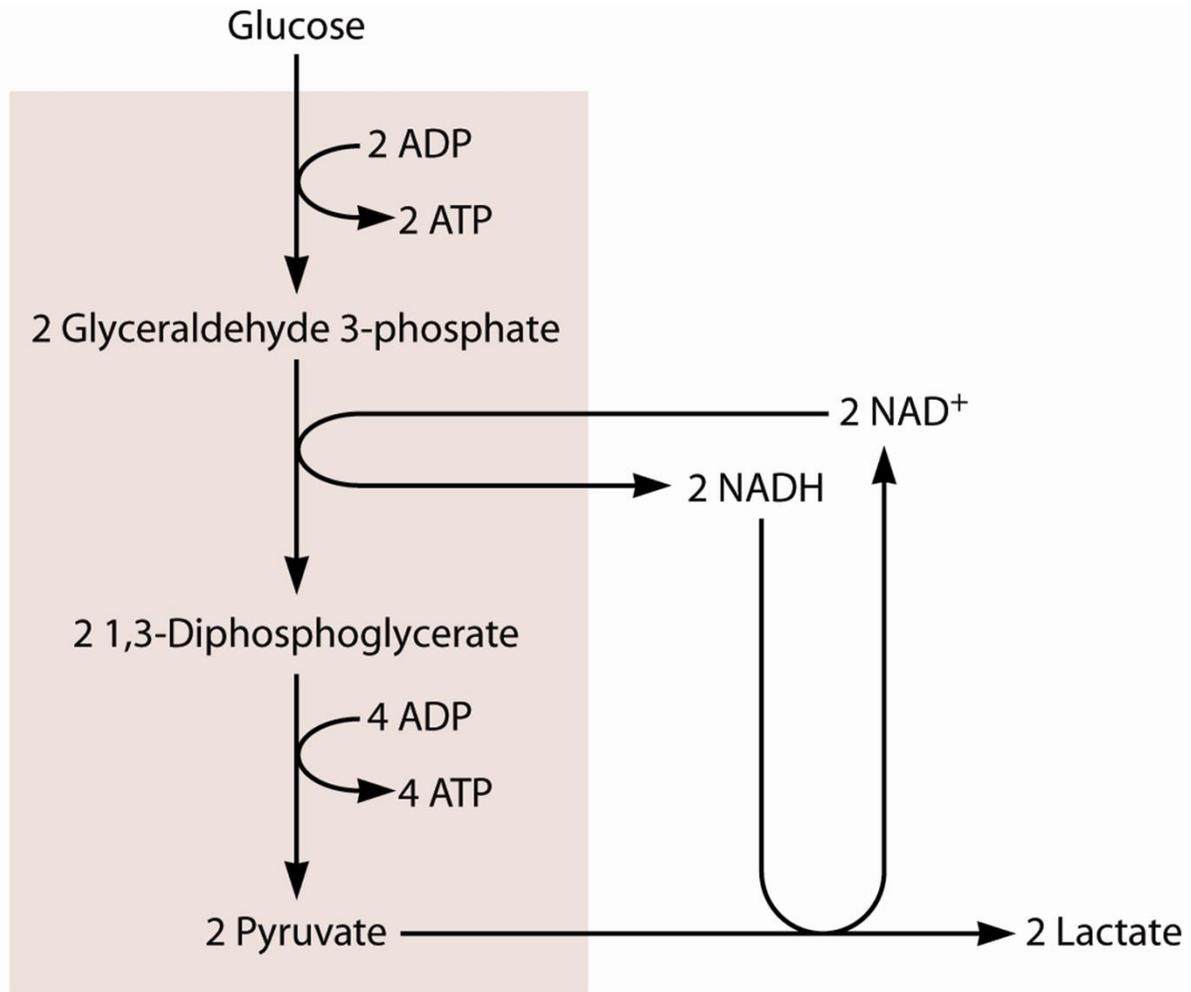
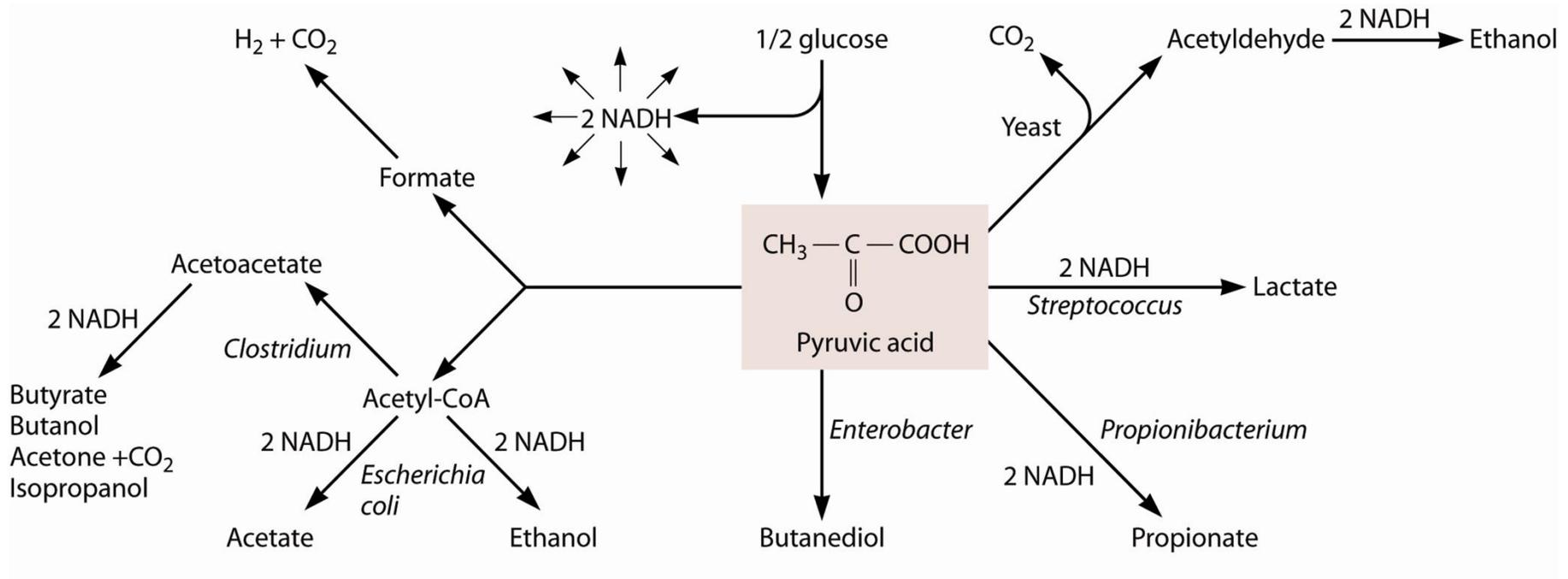


Figura 21.1 Os fundamentos da fermentação. O produto da fermentação é excretado pela célula, e apenas uma quantidade relativamente pequena do composto orgânico original é utilizada na biossíntese.

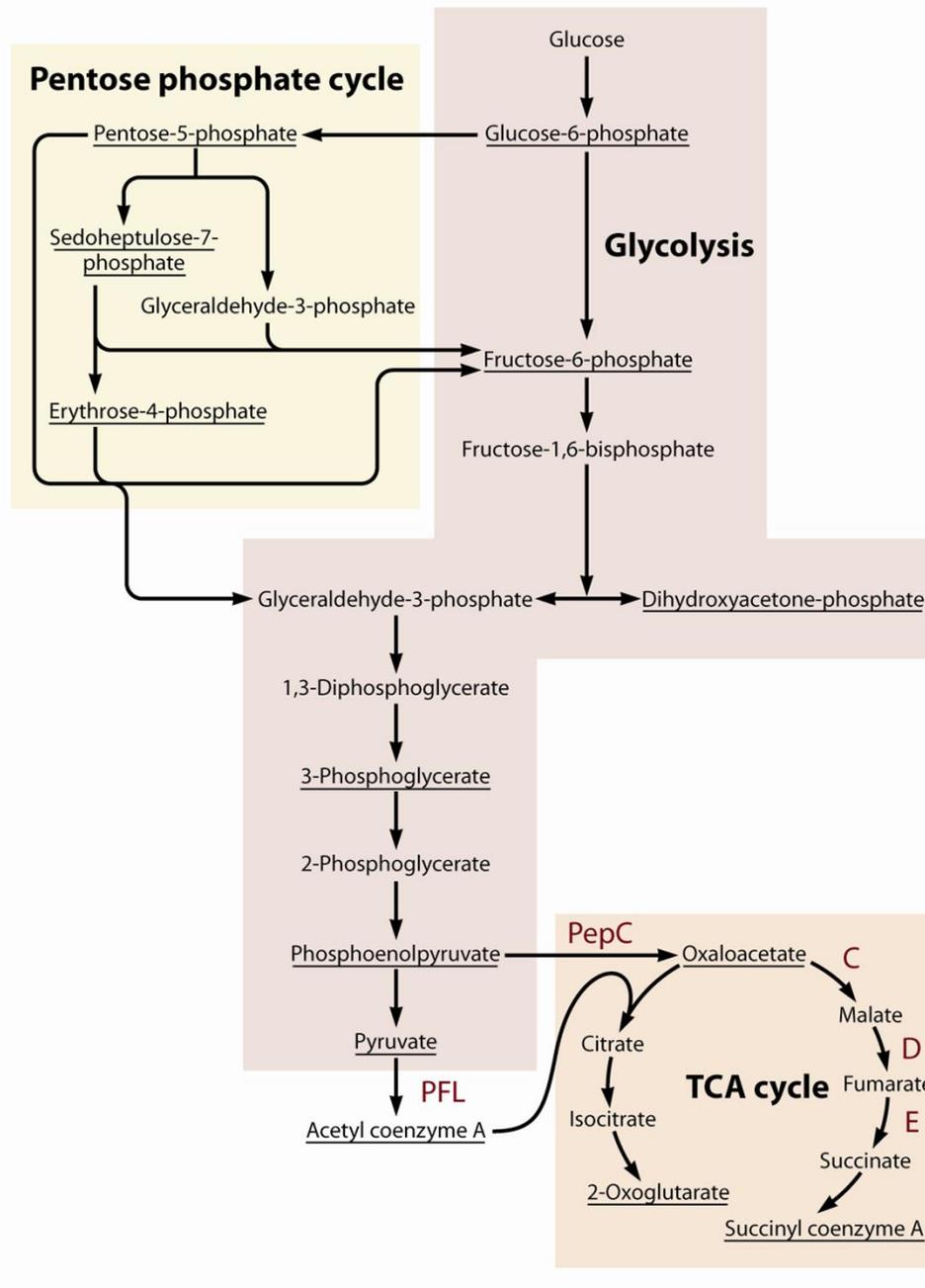
FERMENTAÇÃO



FERMENTAÇÃO



B



RESPIRAÇÃO ANAERÓBIA

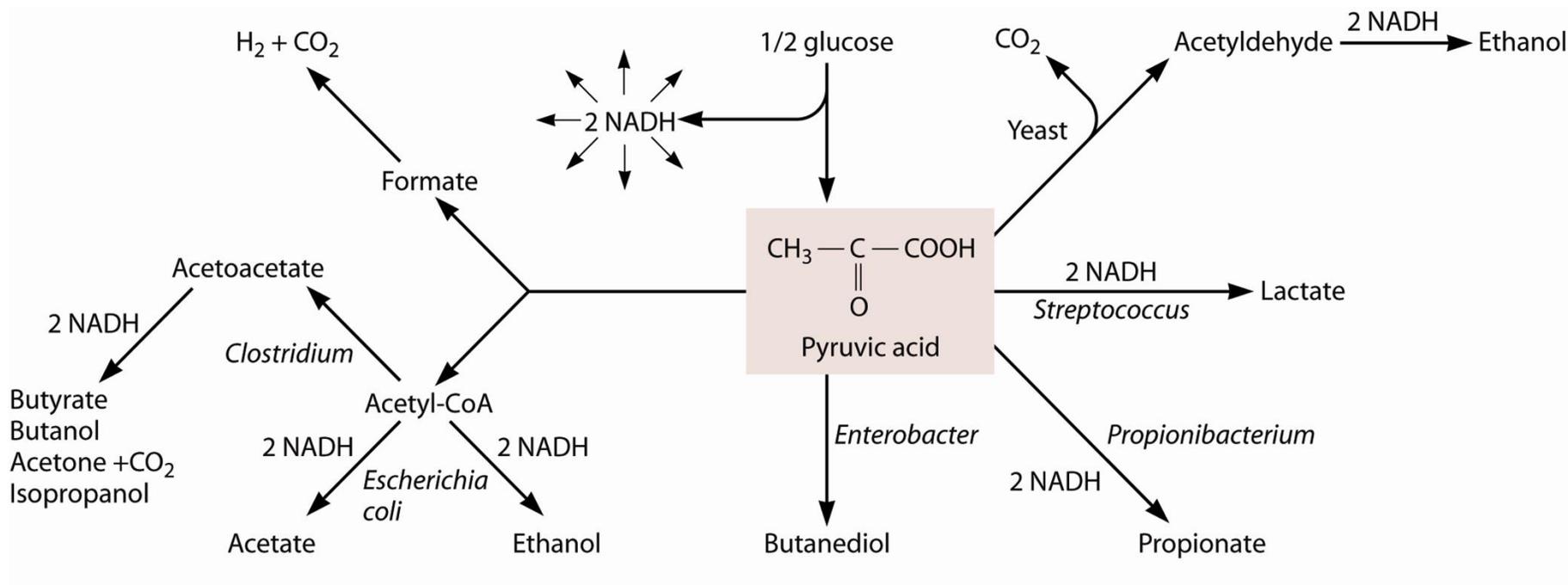


Table 6.3 Compounds that can serve as electron acceptors in anaerobic respiration, replacing oxygen

Organic compounds	Inorganic compounds
Fumarate	Nitrate (NO_3^-)
Dimethylsulfoxide (DMSO)	Nitrite (NO_2^-)
Trimethylamine <i>N</i> -oxide (TMAO)	Nitrous oxide (N_2O)
	Chlorate (ClO_3^-)
	Perchlorate (ClO_4^-)
	Manganic ion (Mn^{4+})
	Ferric ion (Fe^{3+})
	Gold (Au^{3+})
	Selenate (SeO_4^{2-})
	Arsenate (AsO_4^{3-})
	Sulfate (SO_4^{2-})
	Sulfur (S^0)

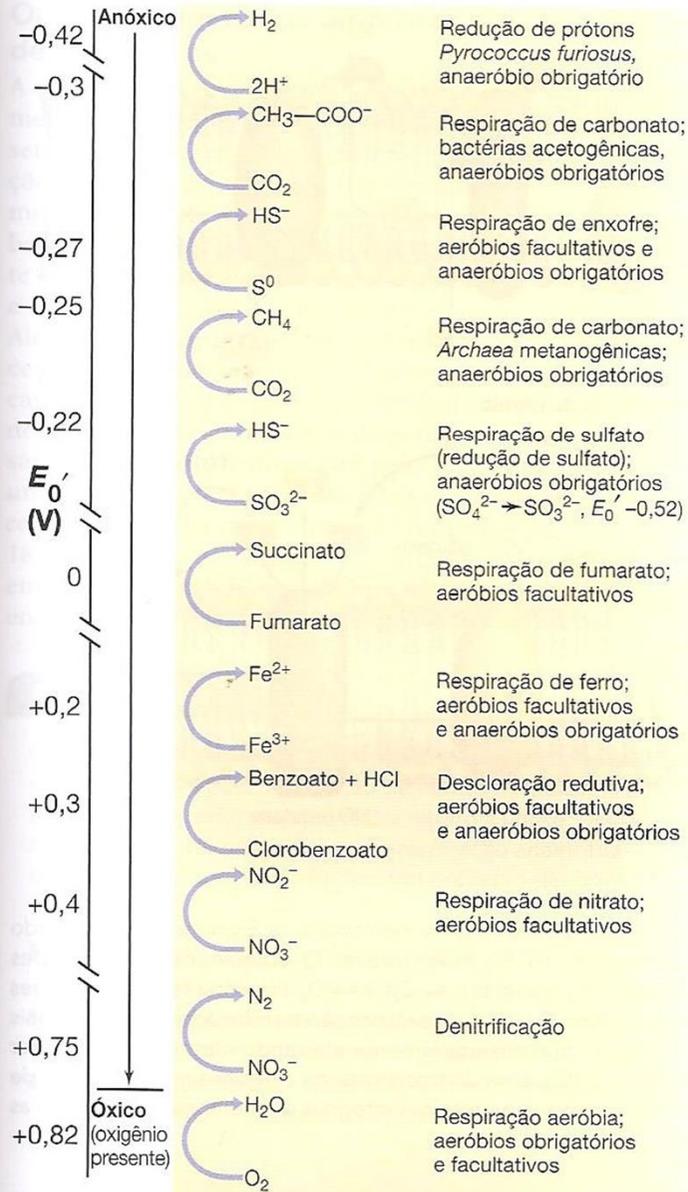


Figura 21.12 Principais formas de respiração anaeróbia. Os pares redox estão ordenados, daqueles com E_0' mais eletronegativo (no topo) para aqueles com E_0' mais eletropositivo (base). Ver Figura 5.10 para comparar como as produções de energia dessas respirações anaeróbias variam.

QUIMIOLITOTRÓFICOS

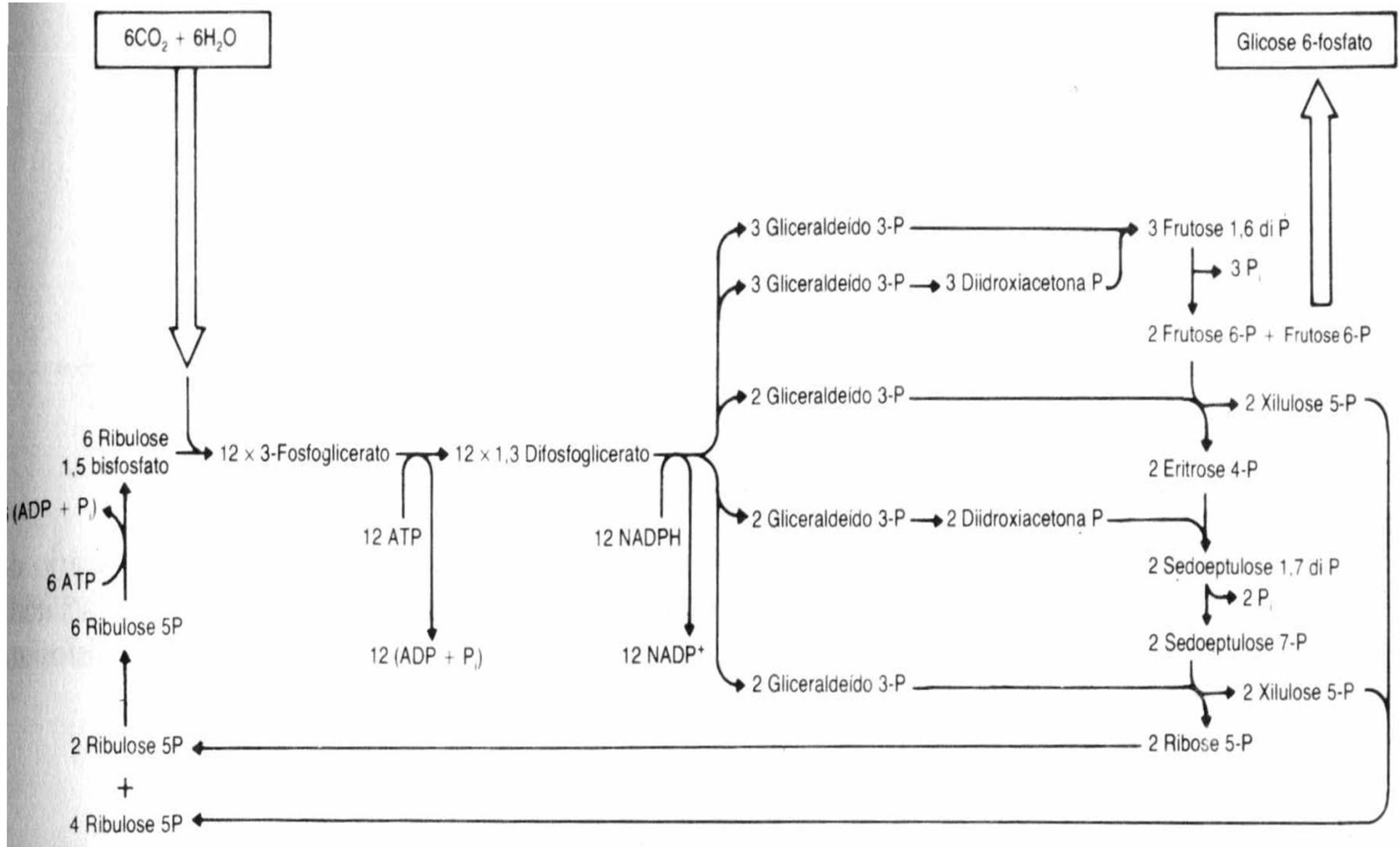
Table 6.4 Inorganic compounds that can serve as electron donors for chemoautotrophs

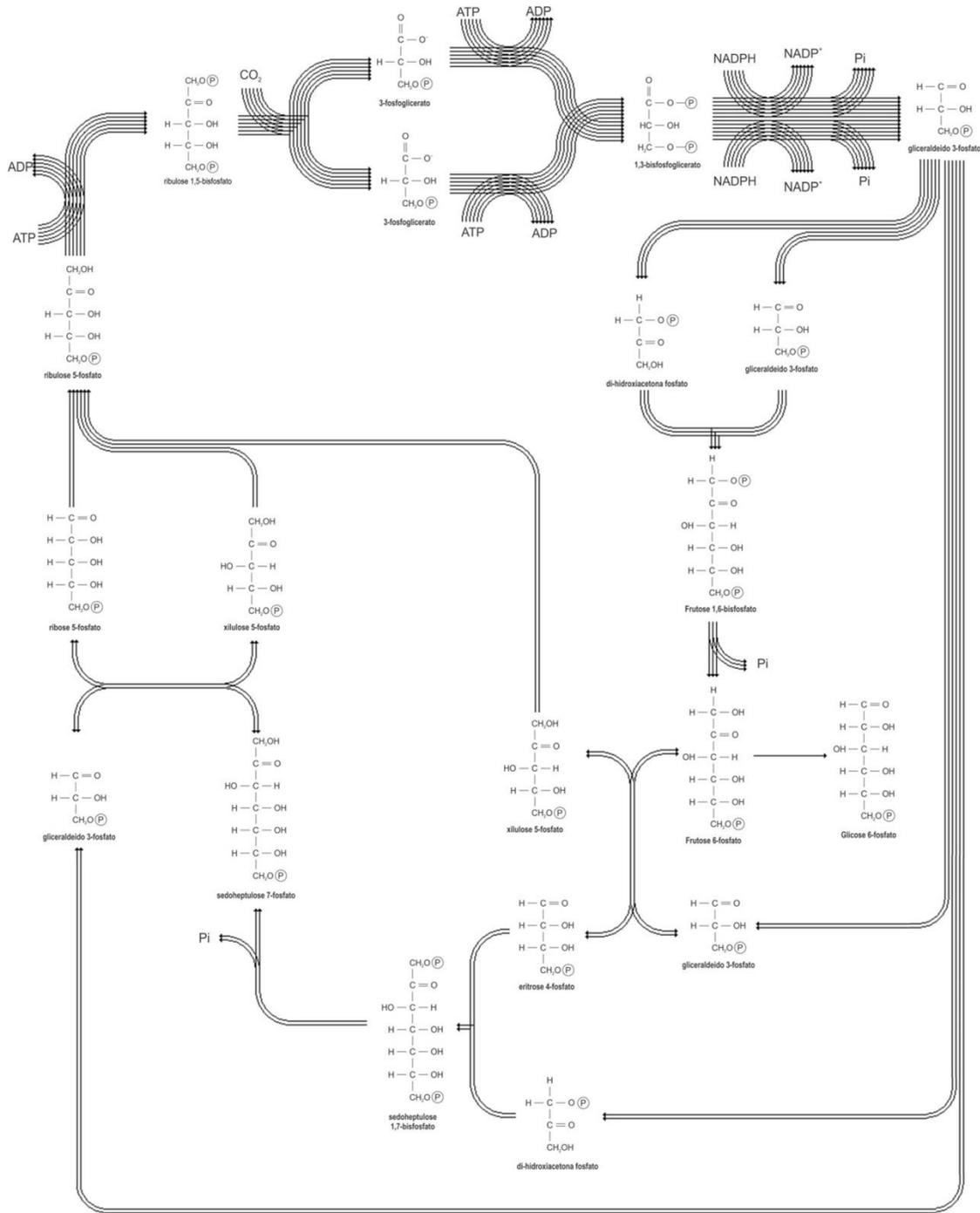
Compound	Biological processes
NH_4^+	Ammonia-oxidizing bacteria, by producing nitrite, mediate the first step of nitrification, the process, occurring principally in soil, by which ammonia is rapidly converted to nitrate (see Chapter 18).
NO_2^-	Nitrate-oxidizing bacteria, by producing nitrate, mediate the second step of nitrification.
H_2	The ability to oxidize hydrogen for chemoautotrophic growth is widespread among bacteria—both gram positive and gram negative—and archaea. Most such prokaryotes are also capable of chemoheterotrophic growth, i.e., they are facultative chemoautotrophs, sometimes referred to as mixotrophs.
Fe^{2+}	Ferrous-ion-oxidizing bacteria—called iron bacteria—are widespread in acid aquatic environments, where Fe^{2+} can persist without being spontaneously oxidized. They are found in streams, bogs, and some marine environments. They are noticeable in such locations by the clumps of iron oxide that they form.
Mn^{2+}	Most iron bacteria are also capable of chemoautotrophic growth at the expense of manganous ion.
$\text{H}_2\text{S}, \text{S}^0, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	Chemoautotrophs that oxidize reduced sulfur compounds are also widespread in nature. They are the primary producers for the elaborate biological communities that exist near hydrothermal vents in the ocean floors. Because H_2S is spontaneously oxidized by O_2 , bacteria that utilize it are located in regions where their sources of H_2S and O_2 diffuse in from opposite directions.

Cadeia de transporte de eletrons

Alguns Pares Redox de Importância Biológica e seus Potenciais de Oxidorredução Padrão	
<i>Par Redox</i>	E° (V)
$2\text{H}^+/\text{H}_2$	-0,41
NAD^+/NADH	-0,32
S^0/HS^-	-0,27
CO_2/CH_4	-0,24
$\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$	-0,22
Piruvato/lactato	-0,19
Fumarato/succinato	+0,03
Ubiquinona ox/red.	+0,11
Citocromo aa3 ox/red	+0,39
$\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$	+0,43
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	+0,77
$\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$	+0,82

Ciclo de Calvin





Ciclo de Calvin

Ciclo de Calvin

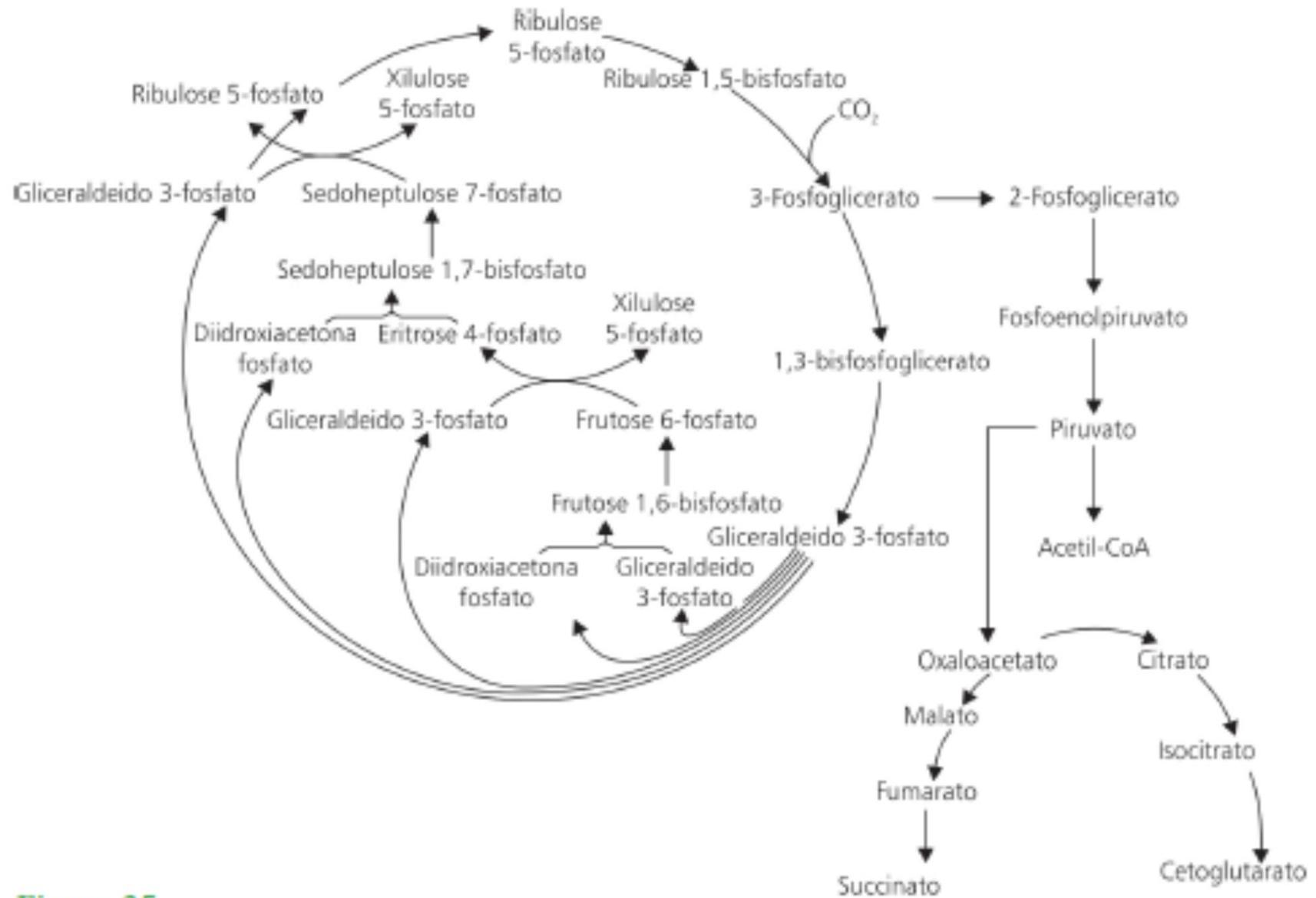


Figura 25

Table 6.10 Pathways of CO₂ fixation other than the Calvin cycle

Pathway	Key reaction	Distribution
Reductive TCA cycle	Fixes CO ₂ by running the TCA cycle backwards; instead of releasing two molecules of CO ₂ , it fixes two.	<i>Chlorobium</i> and certain other photoautotrophic bacteria; some hydrogen-oxidizing bacteria
Hydroxypropionate pathway	Fixes CO ₂ via two reactions in which acetyl-CoA and propionyl-CoA are CO ₂ acceptors; in a cyclic series of reactions, acetyl-CoA is regenerated.	<i>Chloroflexus</i> , a photoautotrophic bacterium
Acetyl-CoA pathway ^a	Fixes CO ₂ in a fermentation in which H ₂ is used to reduce CO ₂ and ultimately form acetate	<i>Desulfobacterium autotrophicum</i> , certain clostridia, and other acetogenic bacteria and archaea

^aCoA, coenzyme A.

Como obter NADPH – cte reversa

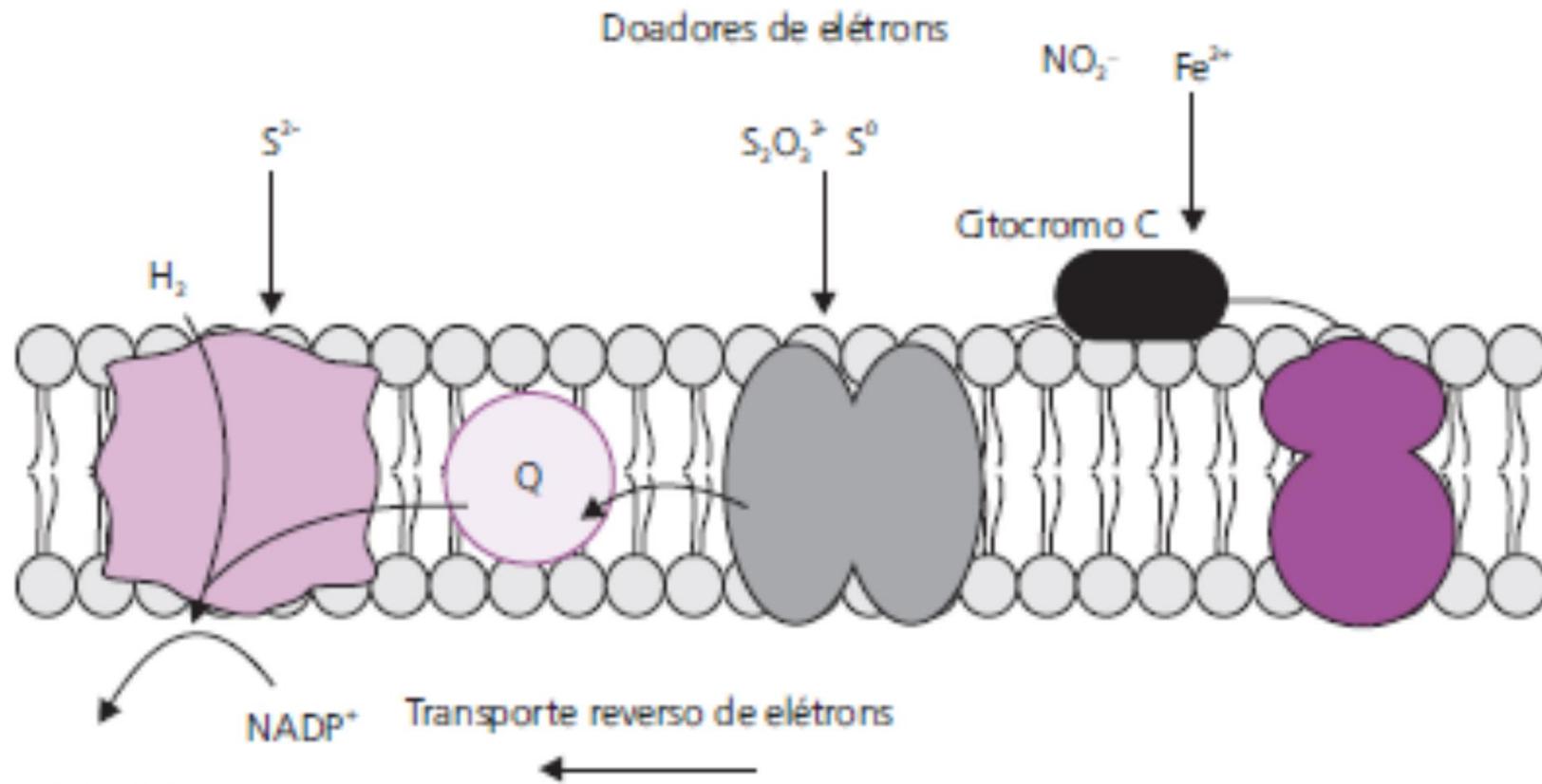


Figura 27

Tabela 20.1 Rendimento energético da oxidação de diferentes doadores inorgânicos de elétrons^a

Doador de elétrons	Reação quimiolitotrófica	Grupo de quimiolitotróficos	E_0' do par (V)	$\Delta G^{0'}$ (kJ/reação)	Número de elétrons/reação	$\Delta G^{0'}$ (kJ/2 e ⁻)
Fosfito ^b	$4 \text{HPO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow 4 \text{HPO}_4^{2-} + \text{HS}^-$	Bactérias do fosfito	-0,69	-91	2	-91
Hidrogênio	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Bactérias do hidrogênio	-0,42	-237,2	2	-237,2
Sulfeto	$\text{HS}^- + \text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{S}^0 + \text{H}_2\text{O}$	Bactérias do enxofre	-0,27	-209,4	2	-209,4
Enxofre	$\text{S}^0 + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	Bactérias do enxofre	-0,20	-587,1	6	-195,7
Amônio ^c	$\text{NH}_4^+ + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	Bactérias nitrificantes	+0,34	-274,7	6	-91,6
Nitrito	$\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$	Bactérias nitrificantes	+0,43	-74,1	2	-74,1
Ferro ferroso	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \frac{1}{4}\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Bactérias do ferro	+0,77	-32,9	1	-65,8

^aDados calculados a partir dos valores de E_0' do Apêndice 1; os valores do Fe^{2+} são aqueles considerando-se pH 2, enquanto os demais, considerando-se pH 7. Em pH 7, o valor para o par $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ é de aproximadamente +0,2 V.

^bExceto no caso do fosfito, todas as reações são apresentadas acopladas ao O_2 comoceptor de elétrons. O único oxidante conhecido de fosfito forma um par com o SO_4^{2-} , comoceptor de elétrons.

^cO amônio também pode ser oxidado, utilizando NO_2^- comoceptor de elétrons, por organismos anamox (Seção 20.13).

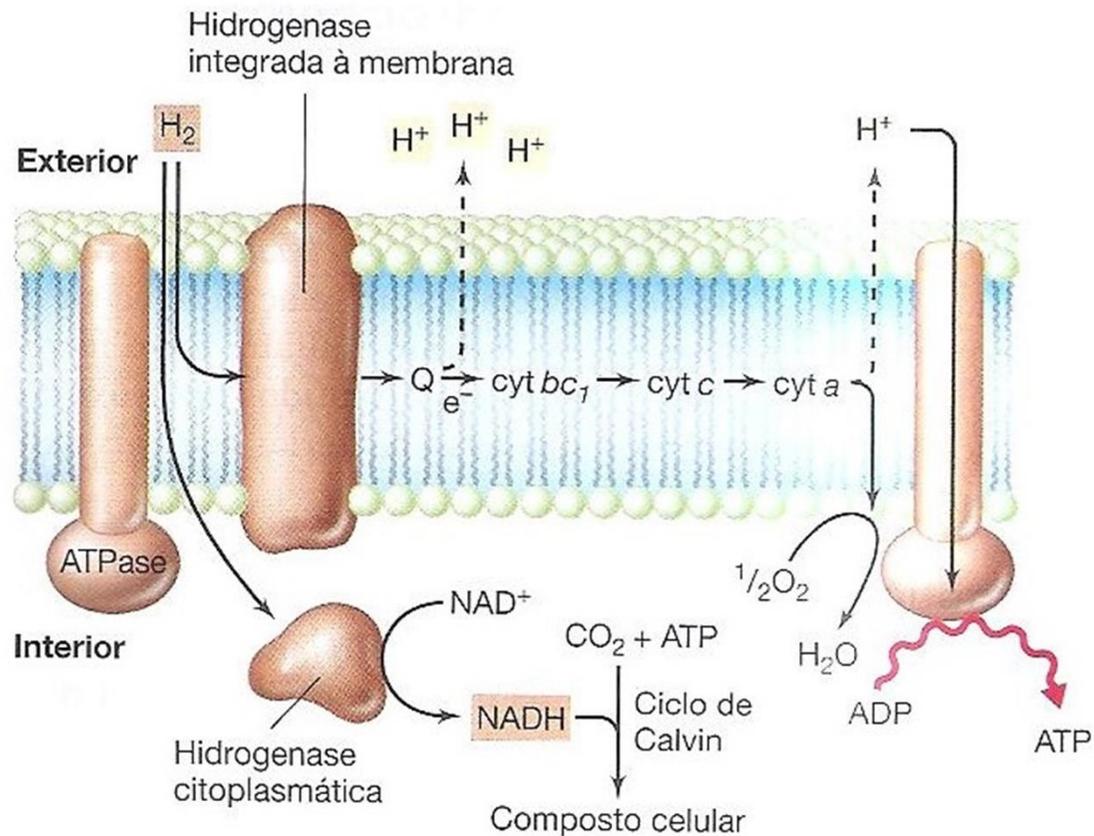


Figura 20.25 Bioenergética e função das duas hidrogenases de bactérias aeróbias do H₂. Em *Ralstonia eutropha* existem duas hidrogenases; a hidrogenase ligada à membrana está envolvida na energética, enquanto a hidrogenase citoplasmática gera NADH para o ciclo de Calvin. Algumas bactérias do H₂ apresentam apenas a hidrogenase ligada à membrana e nestes organismos o poder reductor é sintetizado por meio do fluxo reverso de elétrons, a partir de Q para NAD⁺, originando NADH. Cyt, citocromo; Q, quinona.

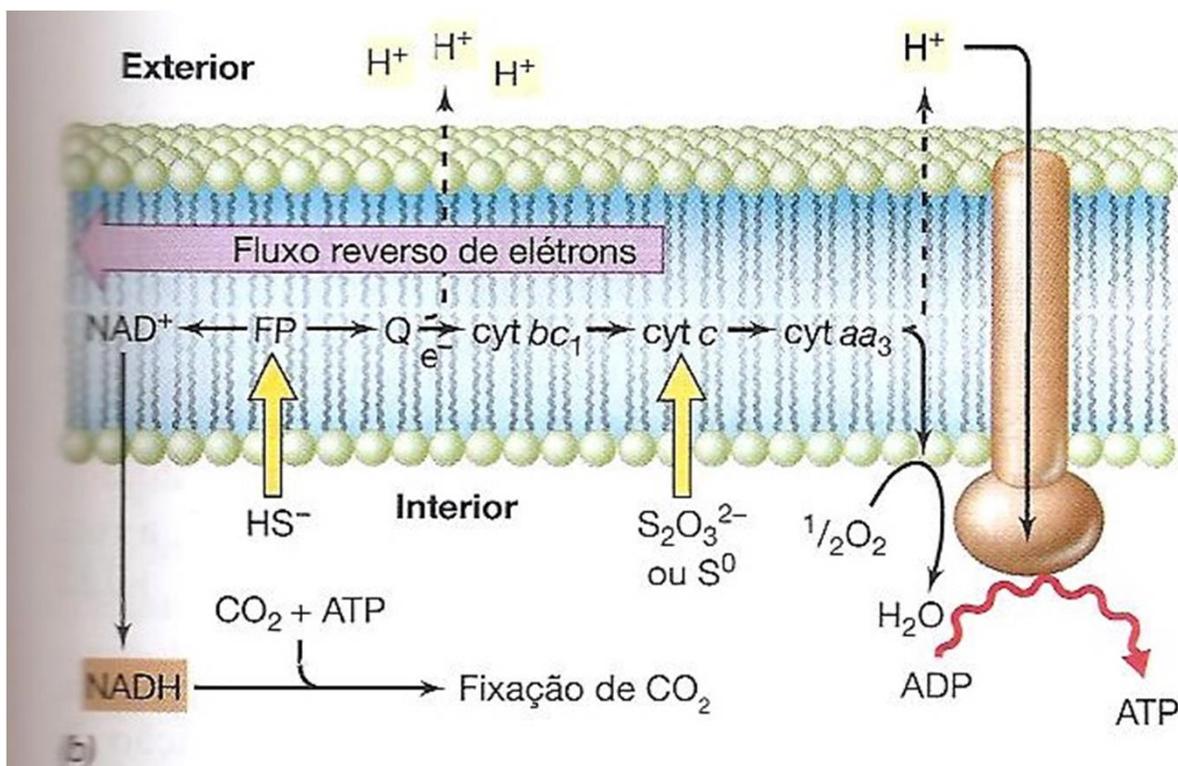


Figura 20.27 Oxidação de compostos reduzidos de enxofre, por quimiolitotróficos do enxofre. (a) Etapas da oxidação de diferentes compostos. São conhecidas três vias distintas. (b) Elétrons de compostos sulfurados são introduzidos na cadeia de transporte para promover uma força próton motiva; os elétrons do tiosulfato e enxofre elementar são introduzidos em nível do citocromo c . O $NADH$ deve ser formado pelas reações do fluxo reverso de elétrons, uma vez que os doadores de elétrons apresentam E_0' mais eletropositivo que $NAD^+/NADH$. Cyt, citocromo; FP, flavoproteína; Q, quinona. Ver, na Figura 21.15, a estrutura de APS.

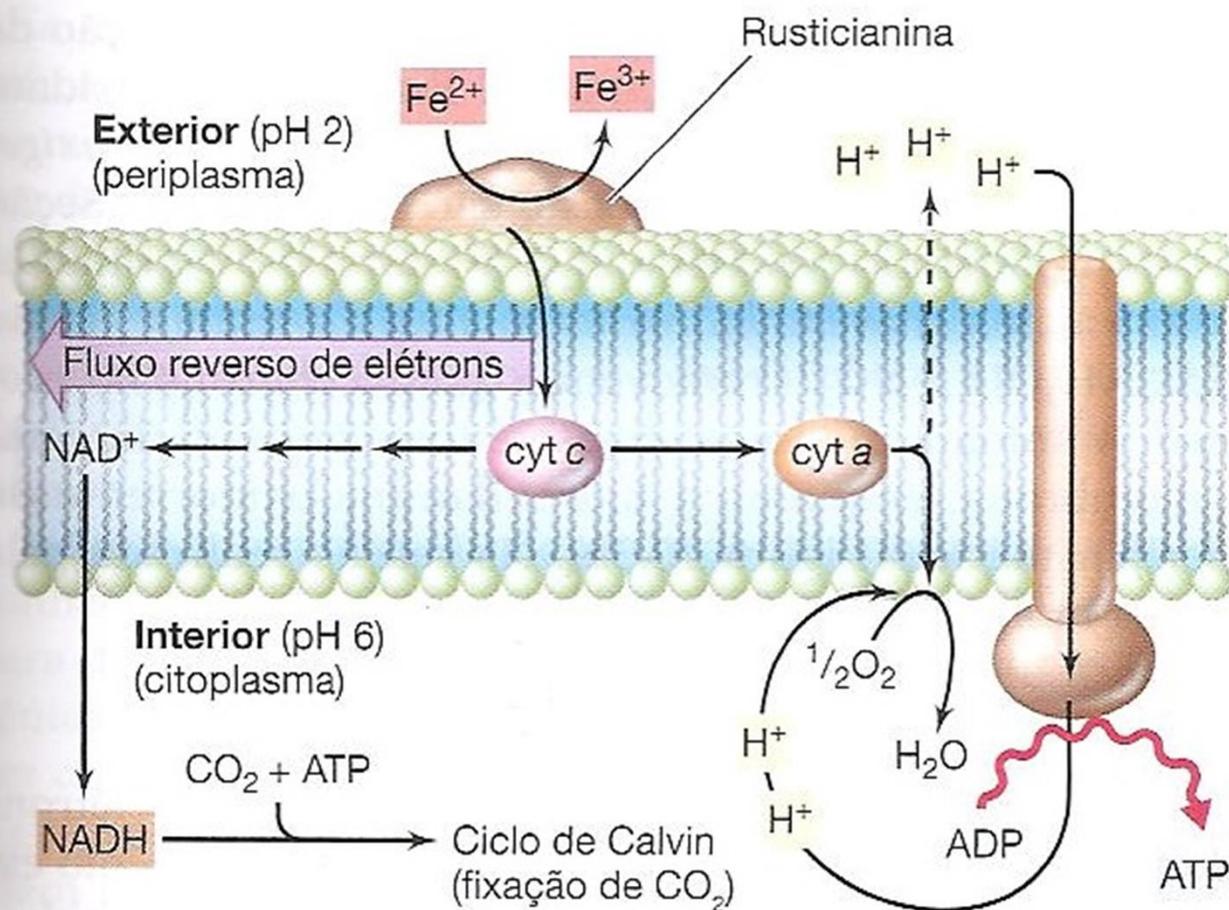


Figura 20.30 Fluxo de elétrons durante a oxidação de Fe^{2+} pelo acidófilo *Acidithiobacillus ferrooxidans*. A proteína periplasmática contendo cobre, rusticianina, é o aceptor imediato de elétrons do Fe^{2+} . A partir deste ponto, os elétrons são transferidos ao longo de uma pequena cadeia transportadora, que resulta na redução de O_2 a H_2O . O poder redutor que dirige o ciclo de Calvin é oriundo do fluxo reverso de elétrons. Observe o acentuado gradiente de pH (~4 unidades) através da membrana.

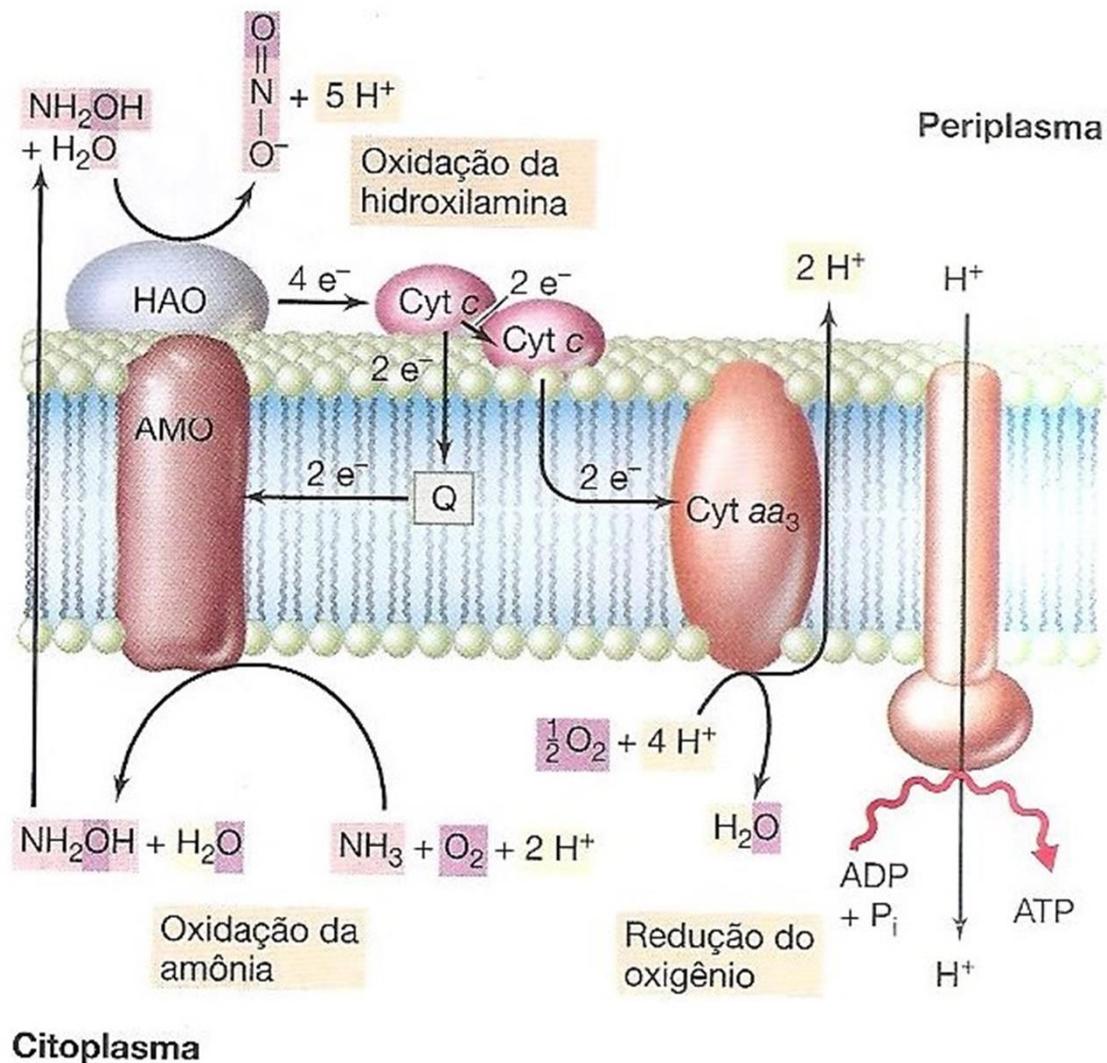


Figura 20.32 Oxidação da amônia e fluxo de elétrons em bactérias oxidantes de amônia. Os reagentes e produtos desta série de reações encontram-se destacados. O citocromo c (Cyt c) no periplasma é uma forma diferente do Cyt c presente na membrana. AMO, amônia mono-oxigenase; HAO, hidroxilamina oxidoredutase; Q, ubiquinona.

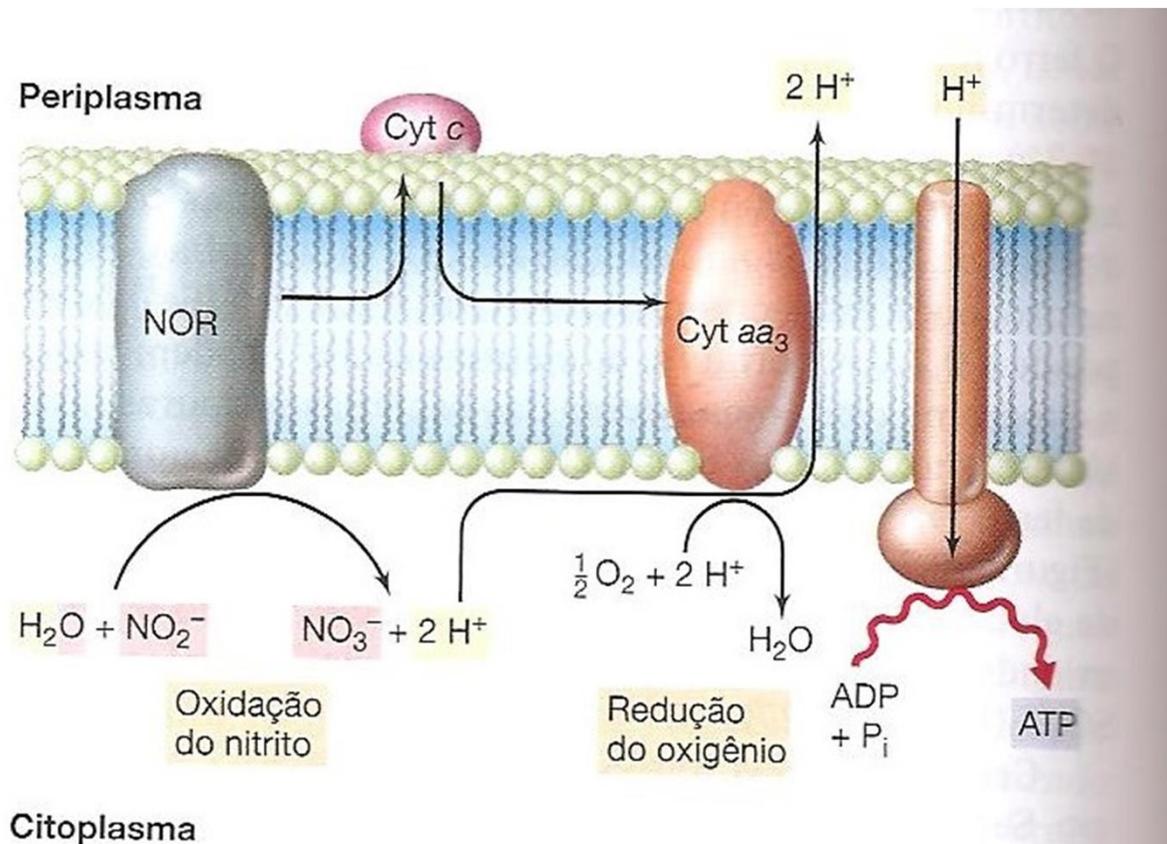


Figura 20.33 Oxidação do nitrito a nitrato por bactérias nitrificantes. Os reagentes e produtos desta série de reações encontram-se destacados para o acompanhamento da reação. NOR, nitrito oxidoreductase.

FOTOSSÍNTESE

Fotossíntese - anoxigênica

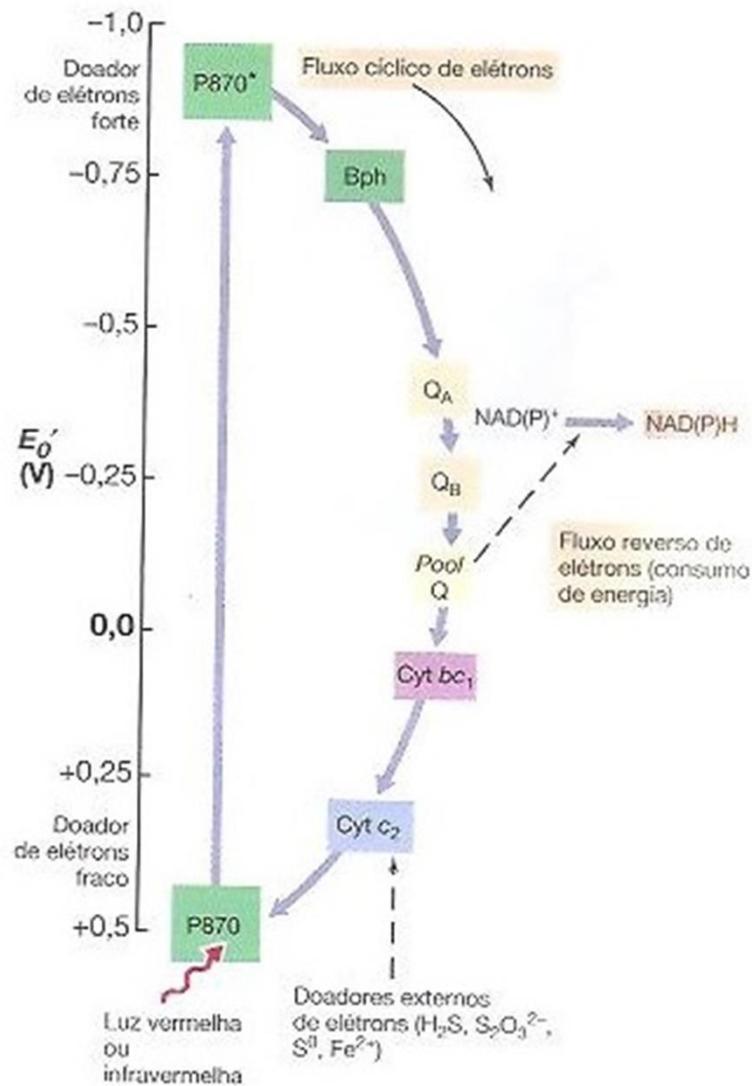


Figura 20.14 Fluxo de elétrons na fotossíntese anoxigênica de uma bactéria púrpura. Uma única reação luminosa ocorre. Observe como a energia luminosa converte um doador fraco de elétrons, P870, em um doador muito forte de elétrons, P870*, e que, após esse evento, as etapas restantes no fluxo de elétrons fotossintéticos são muito similares àsquelas observadas no fluxo de elétrons respiratórios (Figura 5.20). Bph, bacteriofeofitina; Q_A , Q_B , quinonas intermediárias; Pool Q, conjunto de quinonas na membrana; Cyt, citocromo. Compare esta figura com as Figuras 20.15 e 20.19.

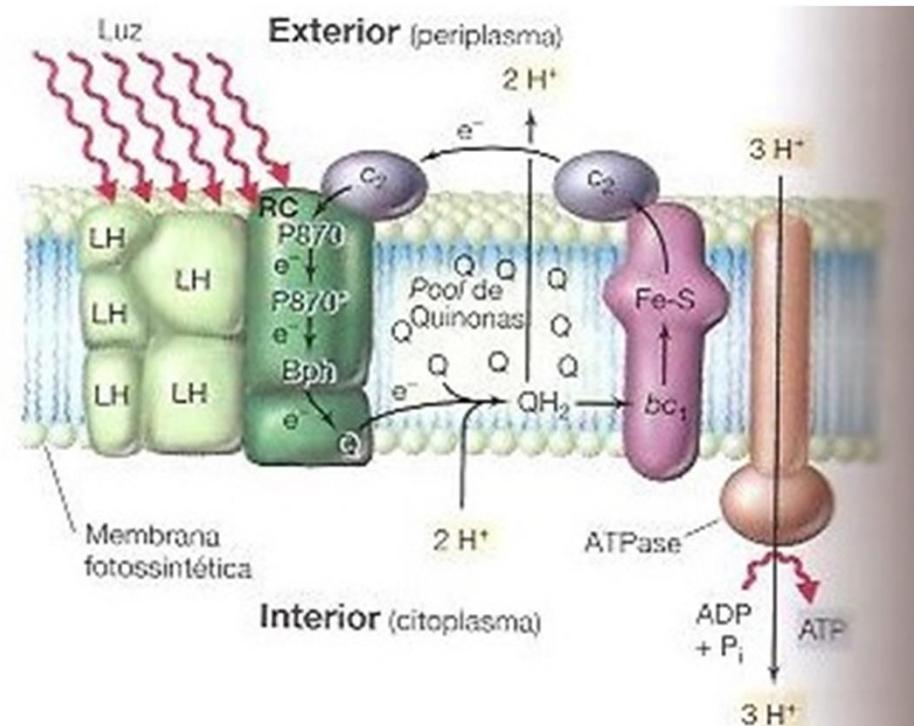


Figura 20.15 Organização dos complexos proteicos no centro de reação de uma bactéria púrpura. O gradiente de prótons gerado pela luz é utilizado na síntese de ATP pela ATP sintase (ATPase). LH, complexos de bacterioclorofila captadores de luz; RC, centro de reação; Bph, bacteriofeofitina; Q, Quinona; FeS, proteína contendo ferro e enxofre; bc_1 , complexo citocromo bc_1 ; c_2 , citocromo c_2 . Para uma descrição sobre o funcionamento da ATPase, ver Figura 5.21.

Fotossíntese - anoxigênica

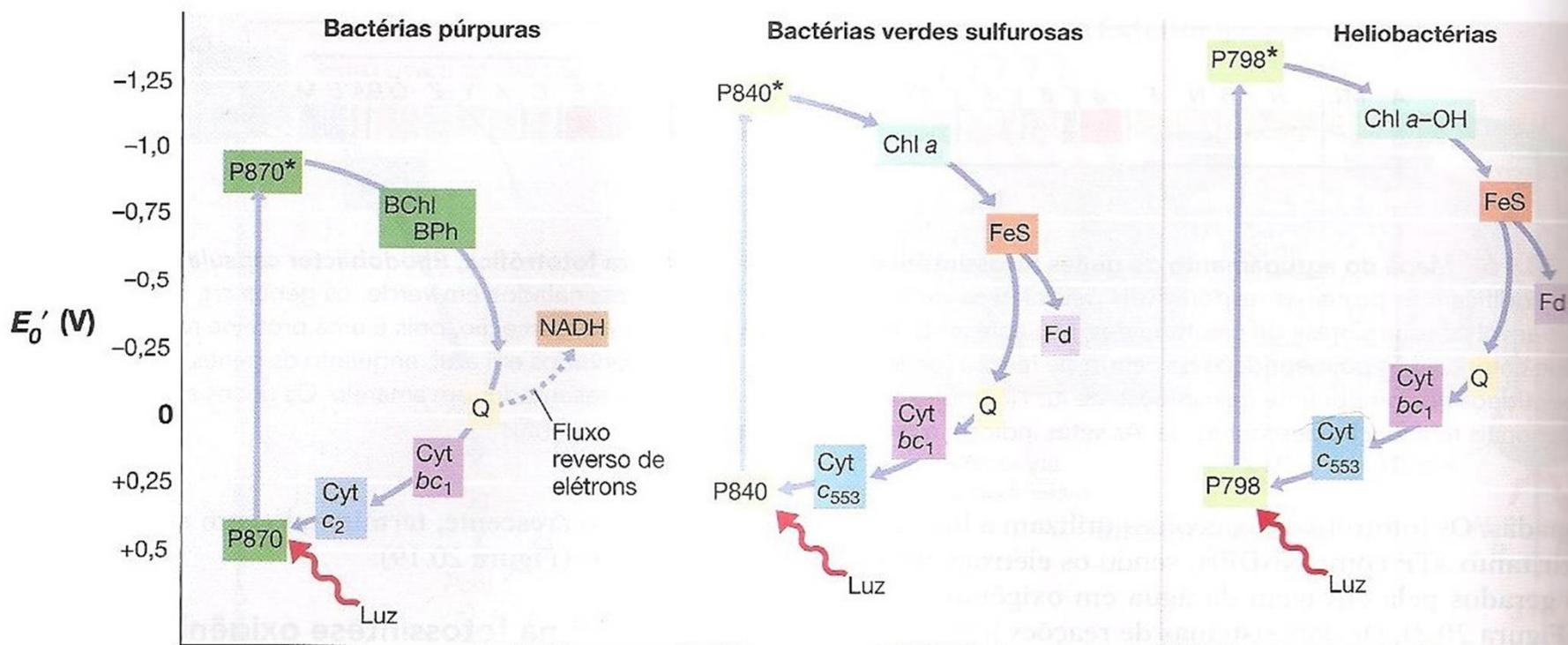


Figura 20.18 Fluxo de elétrons em bactérias púrpuras, bactérias verdes sulfurosas e heliobactérias. Observe que, nas bactérias púrpuras, o fluxo reverso de elétrons é necessário à produção de NADH, uma vez que o aceptor primário (quinona, Q) tem potencial mais positivo que o par NAD^+/NADH . Nas bactérias verdes e heliobactérias, a ferredoxina (Fd), cujo E'_0 é mais negativo do que aquele do NADH, é produzida por reações dirigidas pela luz. Nas bactérias verdes, a ferredoxina, e não o NADH, é o poder redutor para a autotrofia (Figura 20.24a). Bchl, Bacterioclorofila; Bph, Bacteriofeofitina. P870 e P840 são os centros de reação das bactérias púrpuras e verdes, respectivamente, consistindo em Bchl a. O centro de reação das heliobactérias (P798) contém a Bchl g e o centro de reação de *Chloroflexus* é similar ao das bactérias púrpuras. Observe a presença de clorofila a nos centros de reação das bactérias verdes e heliobactérias.

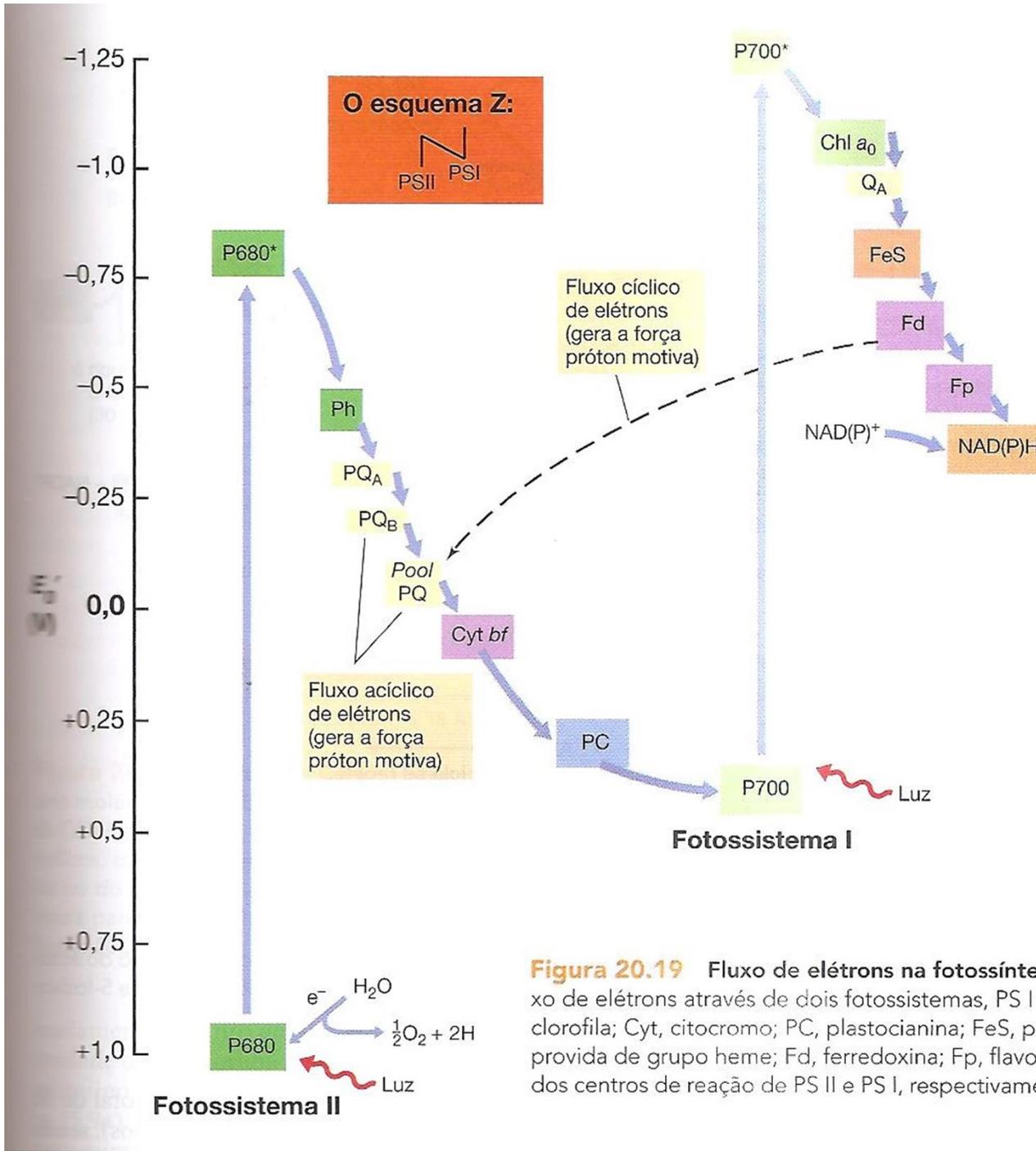
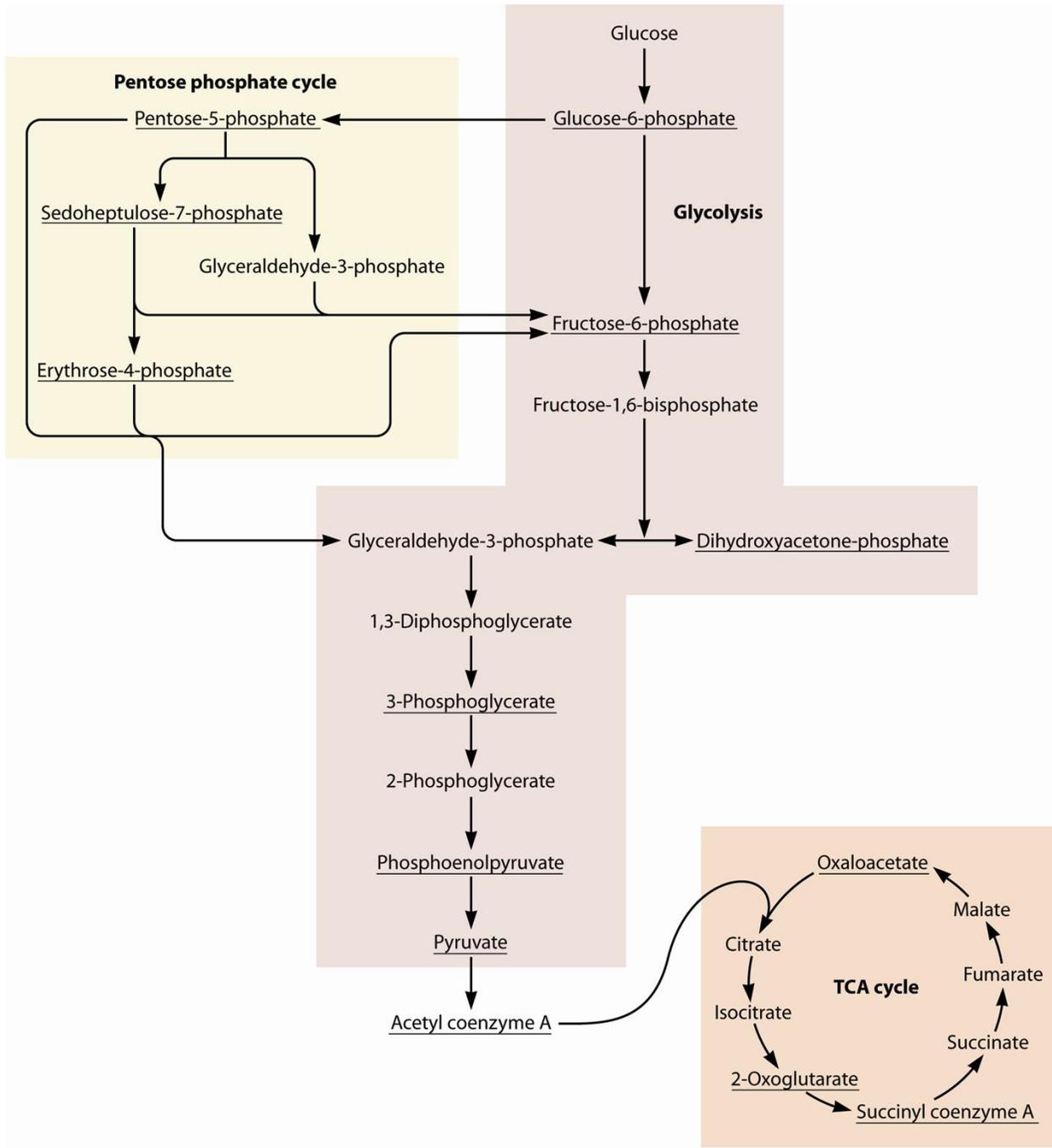


Figura 20.19 Fluxo de elétrons na fotossíntese oxigênica, o esquema "Z". O fluxo de elétrons através de dois fotossistemas, PS I e PS II. Ph, Feofitina; Q, quinona; Chl, clorofila; Cyt, citocromo; PC, plastocianina; FeS, proteína contendo ferro e enxofre, desprovida de grupo heme; Fd, ferredoxina; Fp, flavoproteína; P680 e P700 são as clorofilas dos centros de reação de PS II e PS I, respectivamente. Compare com a Figura 20.14.

Table 6.6 Properties of photosynthetic prokaryotes

Group	Electron donor	Chlorophyll type(s)	Example(s)
Oxygenic			
Cyanobacteria	H ₂ O	Chlorophyll <i>a</i> and phycobilins	<i>Synechococcus</i> spp., <i>Oscillatoria</i> spp., and <i>Nostoc</i> spp.
Anoxygenic			
Purple nonsulfur bacteria	Many substrates, including H ₂ , alcohols, organic acids, and Fe ²⁺	Bacteriochlorophylls <i>a</i> and <i>b</i>	<i>Rhodobacter</i> spp. and <i>Rhodopseudomonas</i> spp.
Purple sulfur bacteria	Reduced sulfur compounds, (H ₂ and also certain acids	Bacteriochlorophylls <i>a</i> and <i>b</i>	<i>Cromatium</i> spp.
Green sulfur bacteria	Reduced sulfur compounds (H ₂ S and S ₂ O ₃ ²⁻)	Bacteriochlorophylls <i>c</i> , <i>d</i> , and <i>e</i>	<i>Chlorobium</i> spp.
Heliobacteria	Lactate, other organic, acids	Bacteriochlorophyll <i>g</i>	<i>Heliobacillus</i> spp.

RESPIRAÇÃO AERÓBIA



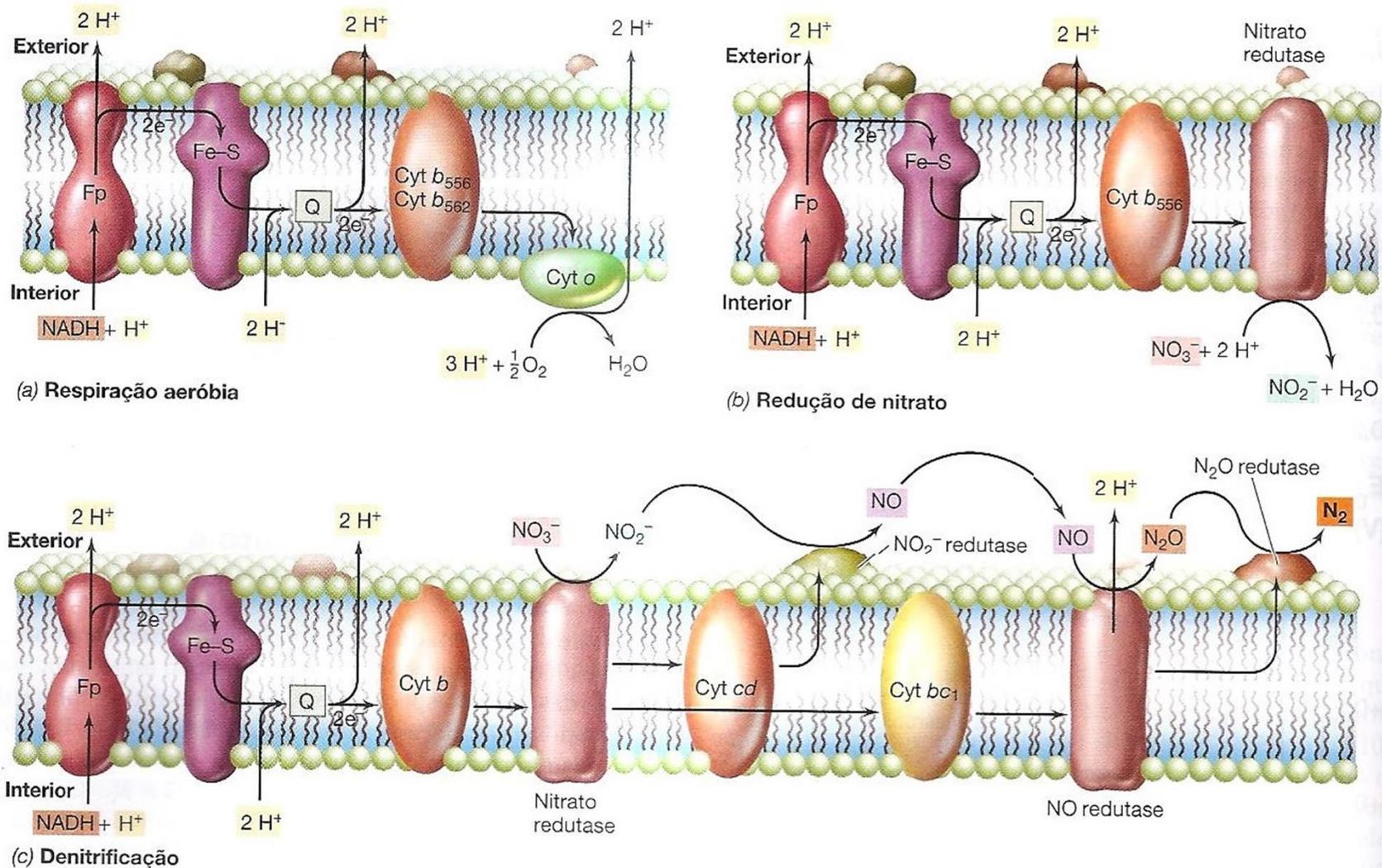


Figura 21.14 Respiração e respiração anaeróbia. Os processos de transporte de elétrons na membrana de *Escherichia coli* quando (a) O_2 ou (b) NO_3^- é utilizado como aceptor de elétrons e NADH é o doador de elétrons. Fp, flavoproteína; Q, ubiquinona. Em condições de alta concentração de oxigênio, a sequência de carreadores é $\text{Cyt } o$ (do inglês, cytochrome) $b_{562} \rightarrow \text{Cyt } o \rightarrow \text{O}_2$. Em condições de baixa oxigenação (não apresentada), a sequência é $\text{Cyt } b_{556} \rightarrow \text{Cyt } d \rightarrow \text{O}_2$. Observe como mais prótons são translocados para cada dois elétrons, já que a oxidase terminal aeróbia ($\text{Cyt } o$) pode bombear um próton. (c) Esquema do transporte de elétrons em membranas de *Pseudomonas stutzeri* durante a denitrificação. As nitrito e óxido nítrico (NO) redutases são proteínas integrais de membrana, enquanto as nitrito (NO_2^-) e óxido nítrico (N_2O) redutases são enzimas periplasmáticas.

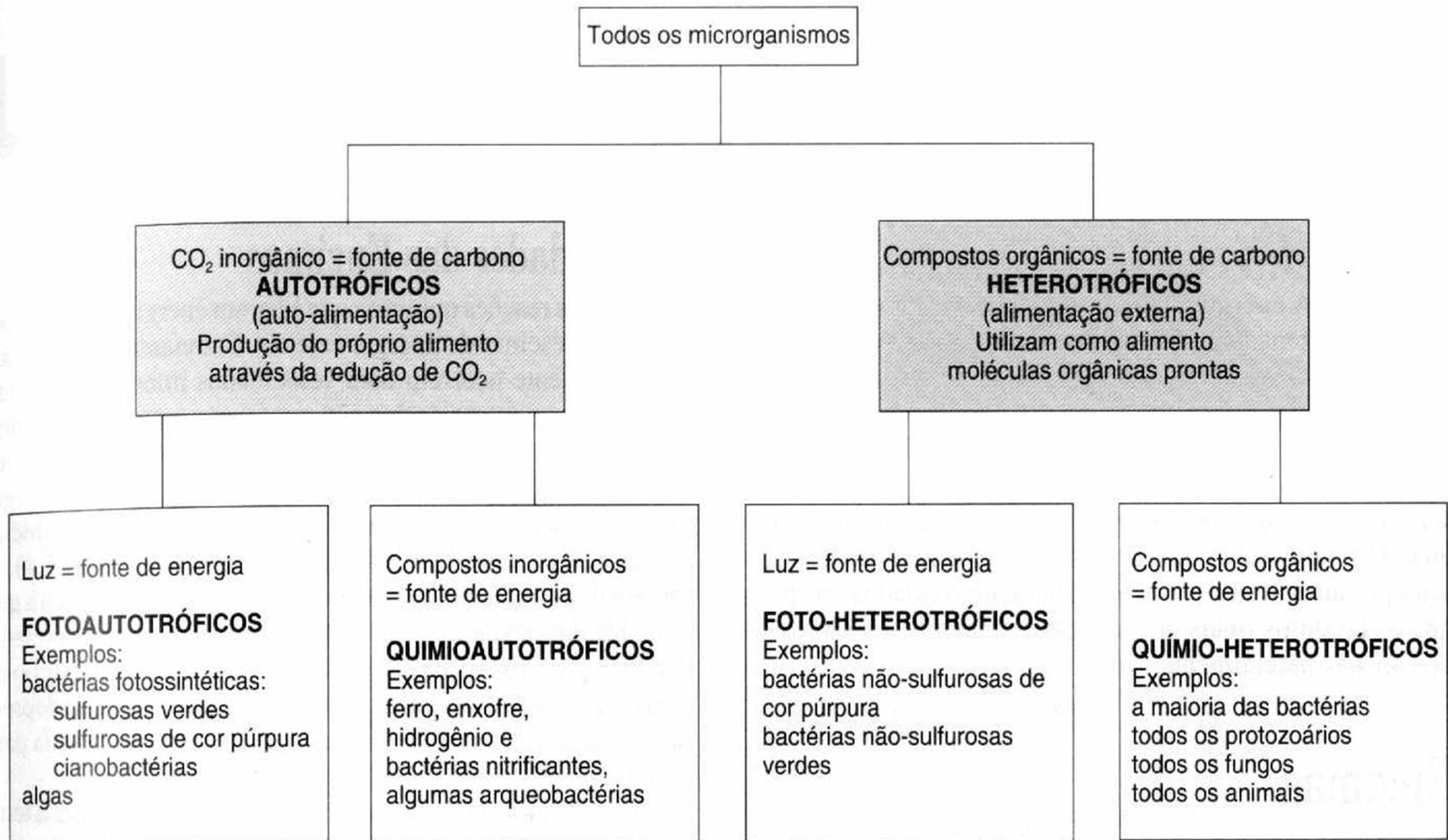
Cadeia de transporte de eletrons

Quadro 8.2 Potenciais de óxido-redução padrão dos componentes da cadeia de transporte de elétrons

Par oxidado/reduzido	E°' (volts)
NAD ⁺ /NADH	- 0,32
FMN/FMNH ₂	- 0,30*
FAD/FADH ₂	- 0,18**
CoQ/CoQH ₂	+ 0,04
Citocromo b (Fe ³⁺)/citocromo b (Fe ²⁺)	+ 0,06
Citocromo c ₁ (Fe ³⁺)/citocromo c (Fe ²⁺)	+ 0,23
Citocromo c (Fe ³⁺)/citocromo c (Fe ²⁺)	+ 0,25
Citocromo a (Fe ³⁺)/citocromo a (Fe ²⁺)	+ 0,29
Citocromo a ₃ (Fe ³⁺)/citocromo a ₃ (Fe ²⁺)	+ 0,55
O ₂ /H ₂ O	+ 0,82

*O valor refere-se à coenzima ligada à NADH desidrogenase.

**O valor refere-se à coenzima livre; quando ligada a proteínas, seu valor varia entre 0,0 e +0,3, dependendo da proteína.



Os principais tipos de metabolismo que captam energia.

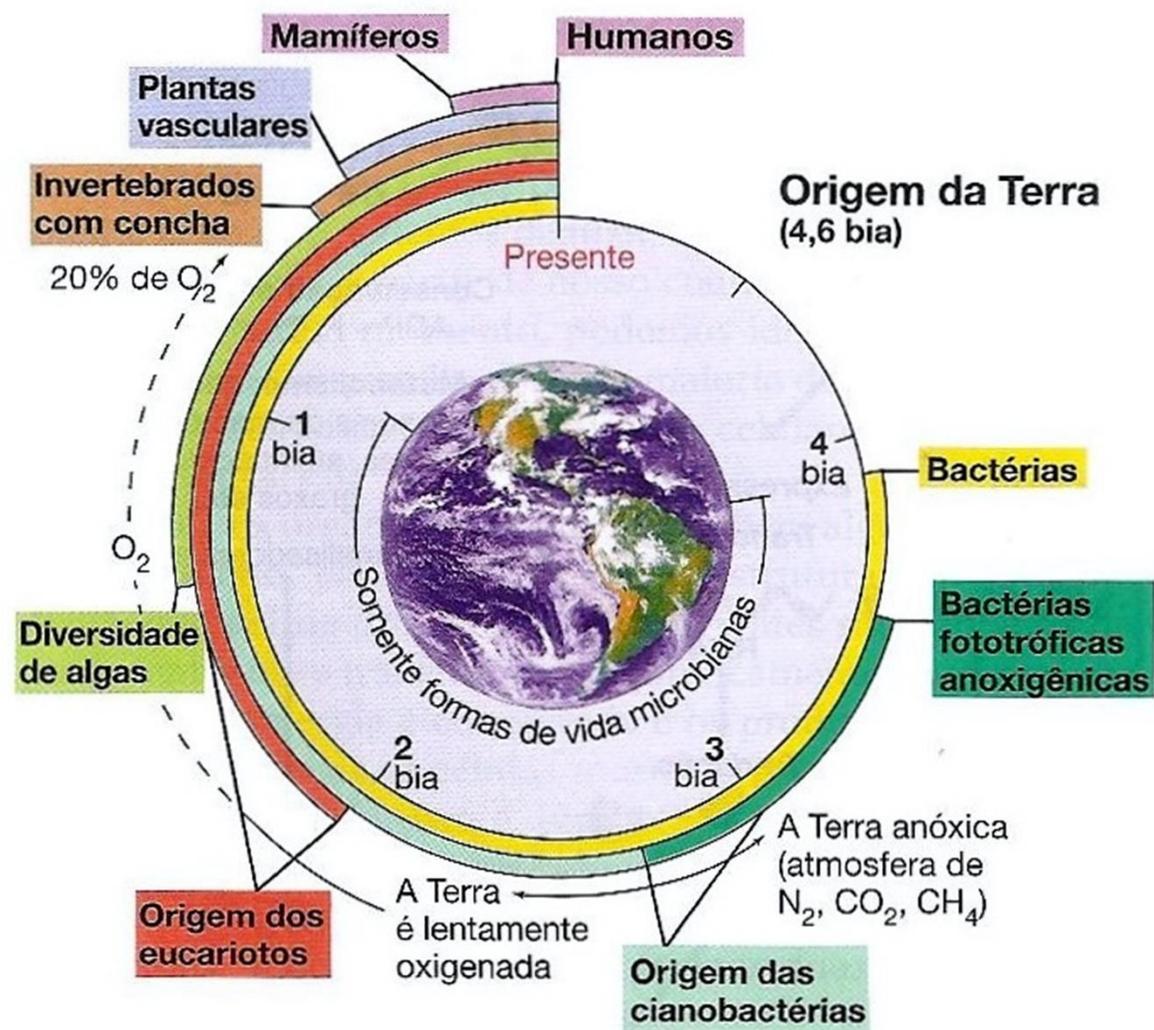
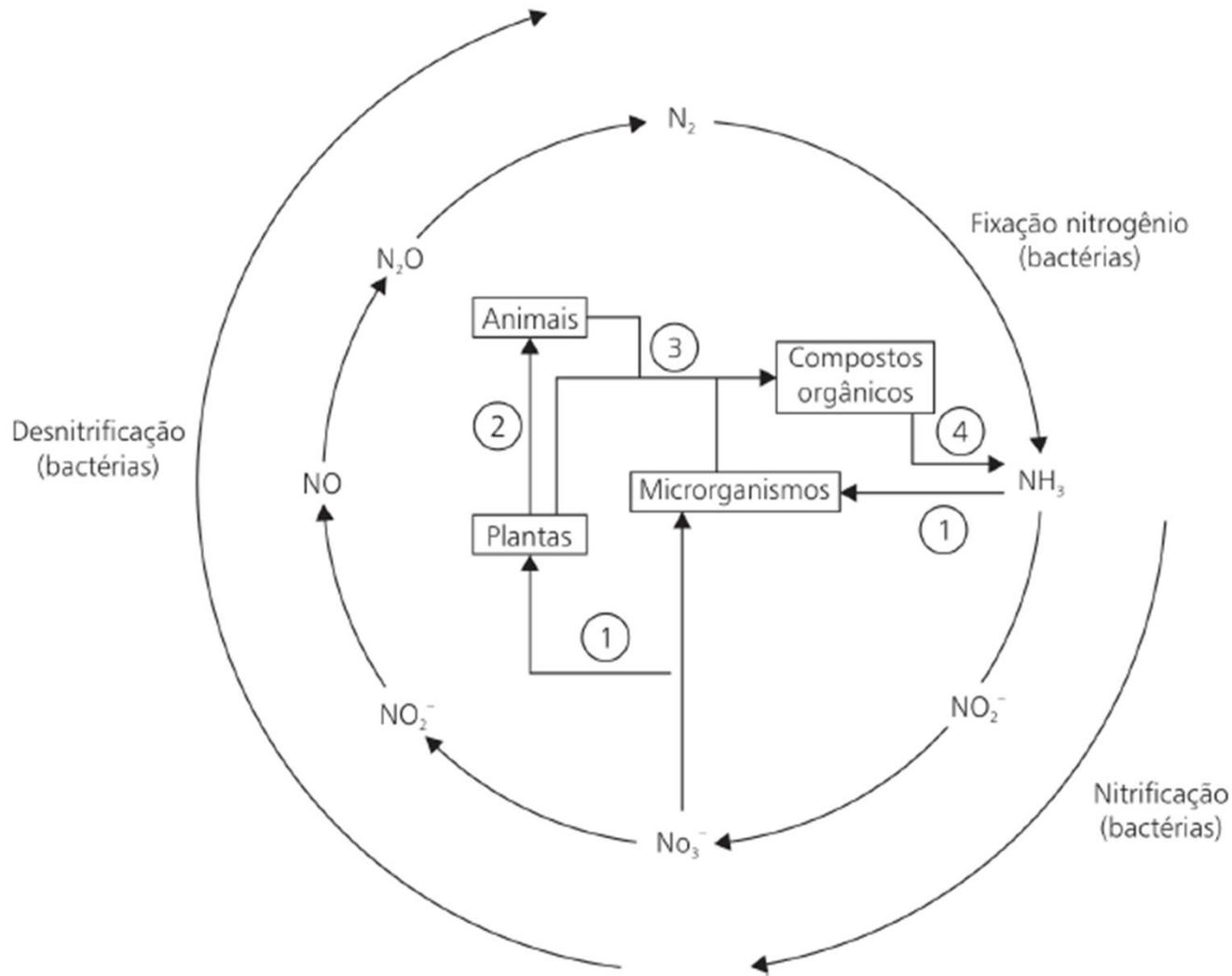


Figura 1.6 Resumo da vida na Terra através do tempo. A vida celular encontrava-se presente na Terra há cerca de 3,8 bilhões de anos (bia). As cianobactérias iniciaram a lenta oxigenação da Terra há cerca de 3 bia, porém os atuais níveis de oxigênio na atmosfera não foram alcançados antes dos últimos 500-800 milhões de anos.

Ciclo do Nitrogênio



Acetogênese x Metanogênese

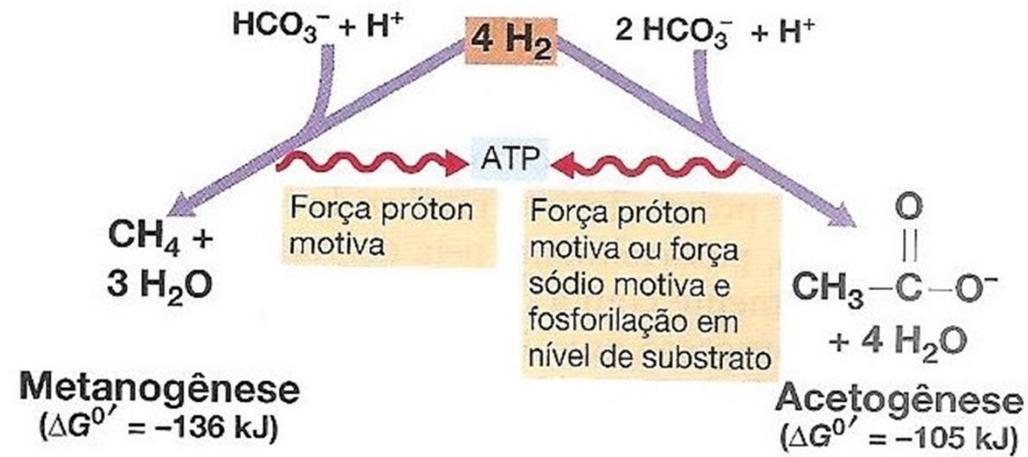


Figura 21.17 Os processos contrastantes de metanogênese e acetogênese. Observe a diferença na energia livre liberada nas reações.

Metanogênese

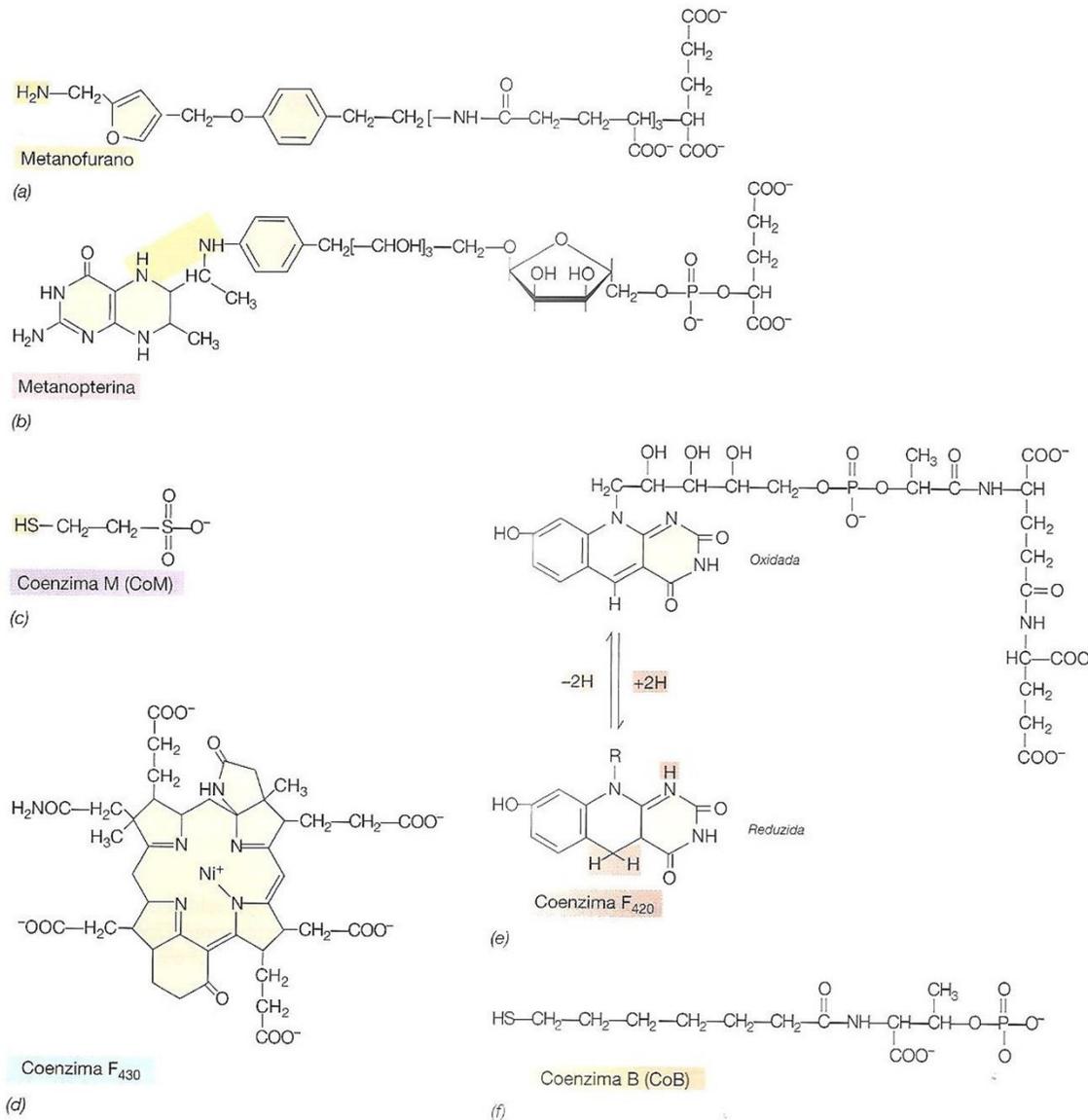


Figura 21.19 Coenzimas da metanogênese. Os átomos sombreados em marrom ou amarelo correspondem aos sítios das reações de oxidação-redução (F₄₂₀ – marrom) ou à posição onde o C₁ liga-se, durante a redução de CO₂ a CH₄ (metanofurano, metanopterina e coenzima M – amarelo). As cores utilizadas para evidenciar uma coenzima em particular (p. ex., CoB em laranja) são também apresentadas nas Figuras 21.21-21.23 para o acompanhamento das reações em cada figura.

Acetogênese

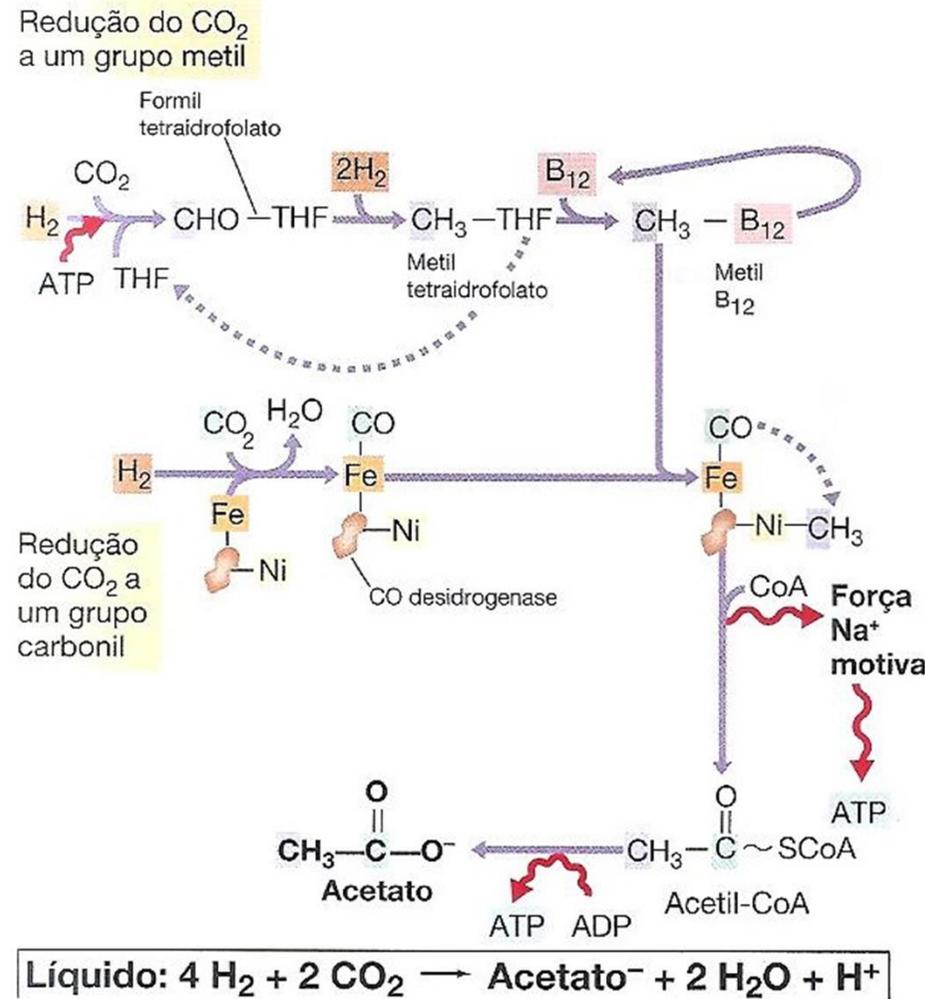


Figura 21.18 Reações da via do acetil-CoA. O monóxido de carbono (CO) liga-se a um átomo de Fe na CO desidrogenase, e o grupo CH₃, a um átomo de níquel em um composto orgânico contendo níquel, na CO desidrogenase. Observe como a formação do acetil-CoA está acoplada à geração de uma força Na⁺ motiva, a qual é utilizada na condução da síntese de ATP, assim como o ATP é também sintetizado durante a conversão de acetil-CoA a acetato. THF, tetraidrofolato; B₁₂, vitamina B₁₂ em um intermediário ligado a uma enzima.

Metanogênese

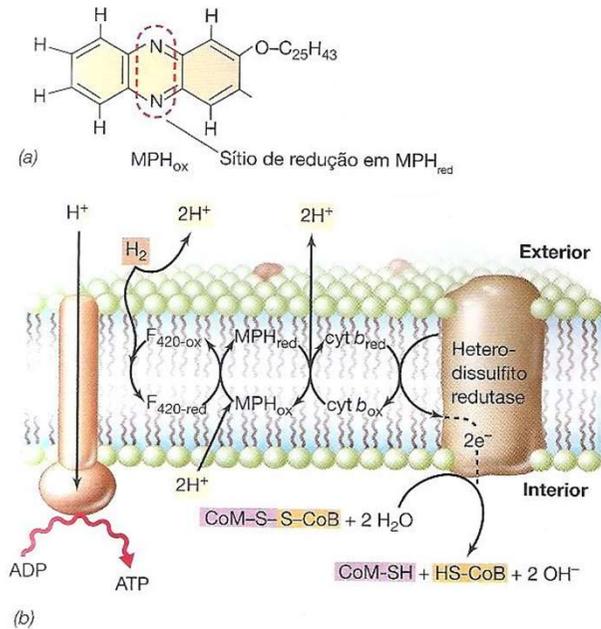


Figura 21.23 Conservação de energia na metanogênese. (a) Estrutura de metanofenazina (MPH, na parte b), um carreador de elétrons da cadeia de transporte que promove a síntese de ATP; o anel central da molécula pode ser alternadamente reduzido e oxidado. (b) Etapas do transporte de elétrons. Os elétrons oriundos do H_2 reduzem F_{420} e, então, a metanofenazina. Esta última, por meio de um citocromo do tipo *b*, reduz a heterodissulfeto redutase, com a extrusão de prótons para fora da membrana. Na etapa final, a heterodissulfeto redutase reduz o complexo CoM-S-S-CoB em HS-CoM e HS-CoB . Ver, na Figura 21.19, as estruturas de CoM e CoB .

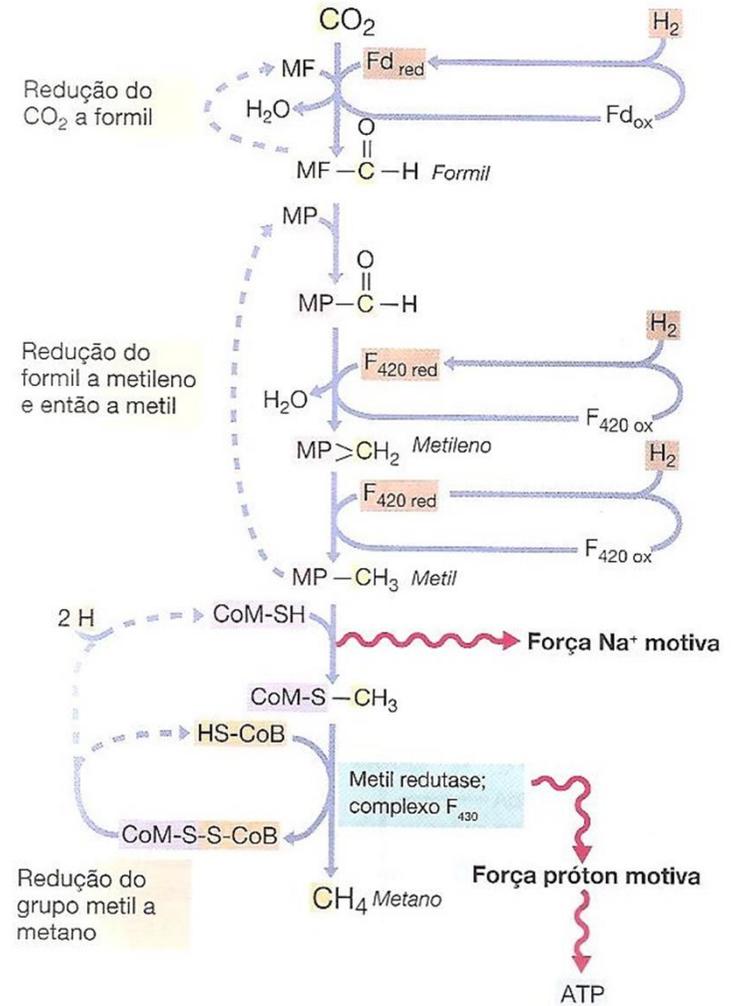


Figura 21.21 Metanogênese, a partir de CO_2 e H_2 . O átomo de carbono reduzido é assinalado em amarelo, enquanto a fonte de elétrons é destacada em marrom. Ver, na Figura 21.19, as estruturas das coenzimas, e, no texto, uma discussão sobre a bomba reversível de Na^+ . MF, metanofurano; MP, metanopterina; CoM, coenzima M; $\text{F}_{420(\text{red})}$, coenzima F_{420} reduzida; F_{430} , coenzima F_{430} ; Fd, ferredoxina; CoB, coenzima B.

Metanogênese e sintrofia

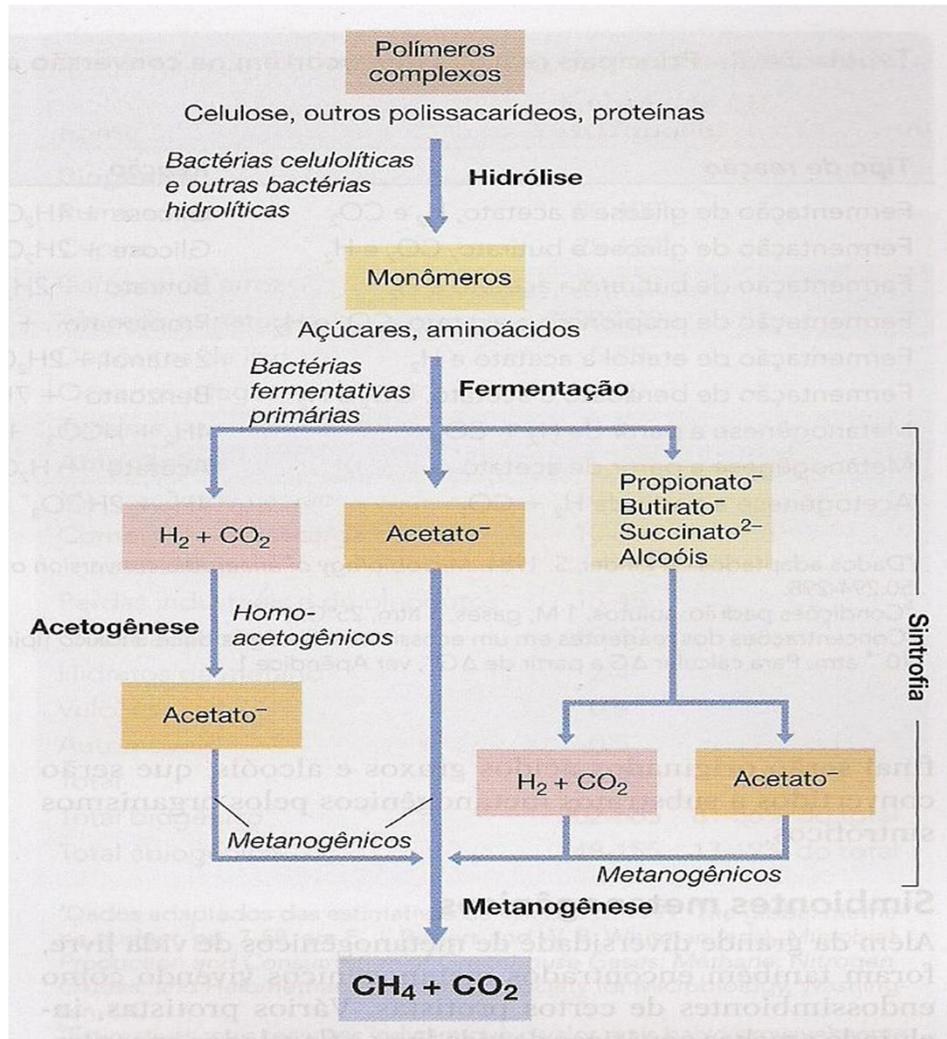
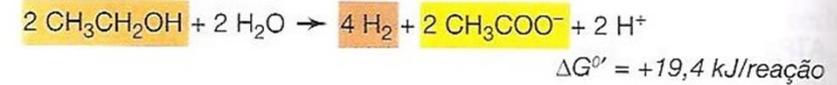


Figura 24.3 Decomposição anóxica. É apresentado o processo geral de decomposição anóxica, em que vários grupos de anaeróbios fermentativos cooperam na conversão de compostos orgânicos complexos a metano (CH₄) e CO₂. Este quadro é representativo de ambientes onde as bactérias redutoras de sulfato desempenham apenas um papel secundário, por exemplo, em sedimentos de lagos de água doce, no lodo de esgoto de biorreatores ou no rúmen.

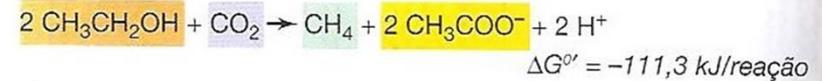
Fermentação de etanol:



Metanogênese:



Reação acoplada:



(a) Reações

Fermentador de etanol



Metanogênico



Transferência de hidrogênio interespecíes



(b) Transferência sintrófica de H₂

Figura 21.10 Sintrofia: transferência de H₂ interespecíes. A fermentação de etanol a metano e acetato, pela associação sintrófica de uma bactéria oxidante de etanol e um parceiro consumidor de H₂, (metanogênico) é apresentada. (a) Reações envolvidas. Os dois organismos partilham a energia liberada pela reação acoplada. (b) Natureza da transferência sintrófica de H₂.