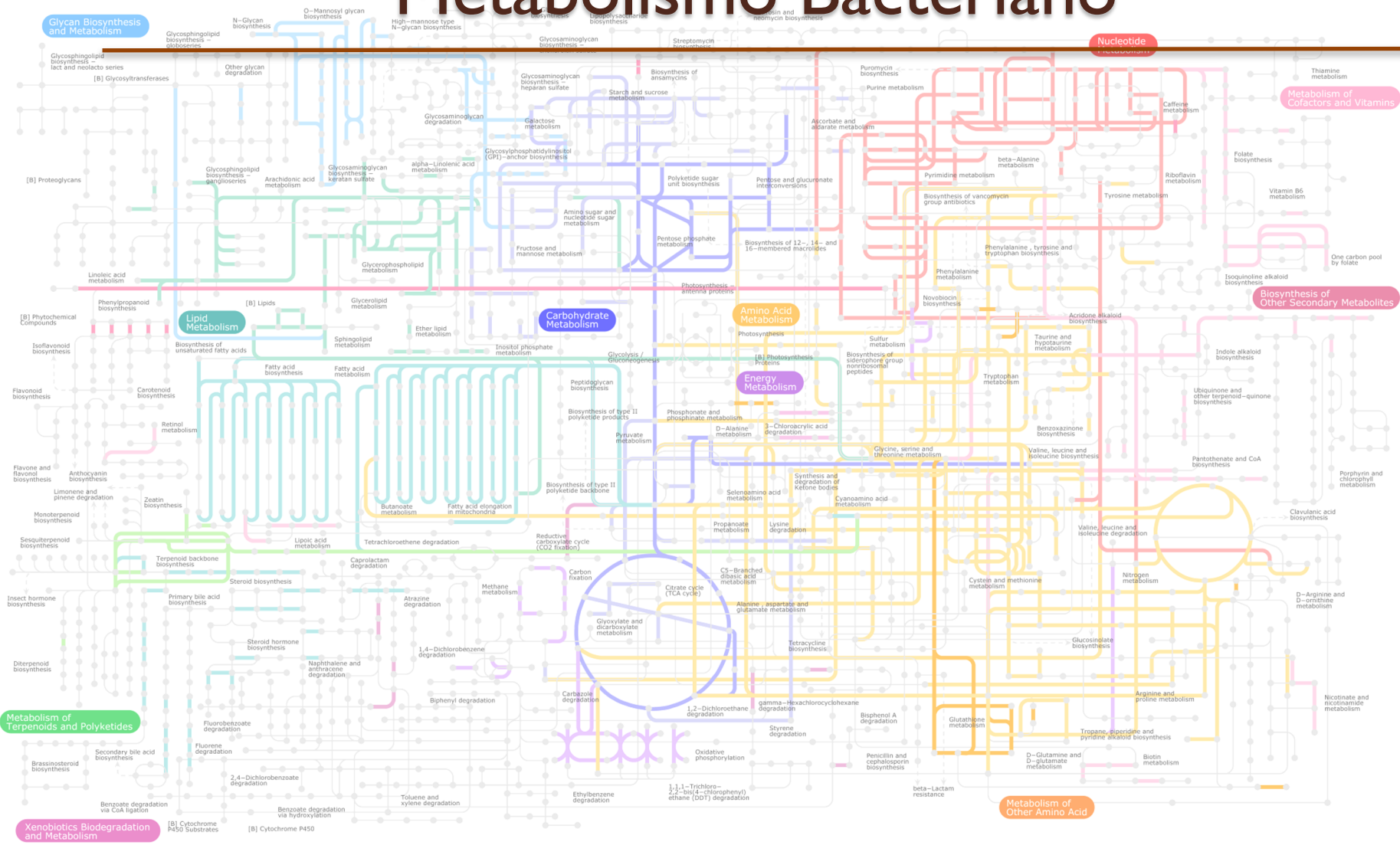


# Metabolismo Bacteriano



Cristiane Guzzo

Departamento de Microbiologia - ICBII-USP

O que é metabolismo?

Como ele ocorre?

Onde ele ocorre?

O metabolismo procariótico é igual ao eucariótico?

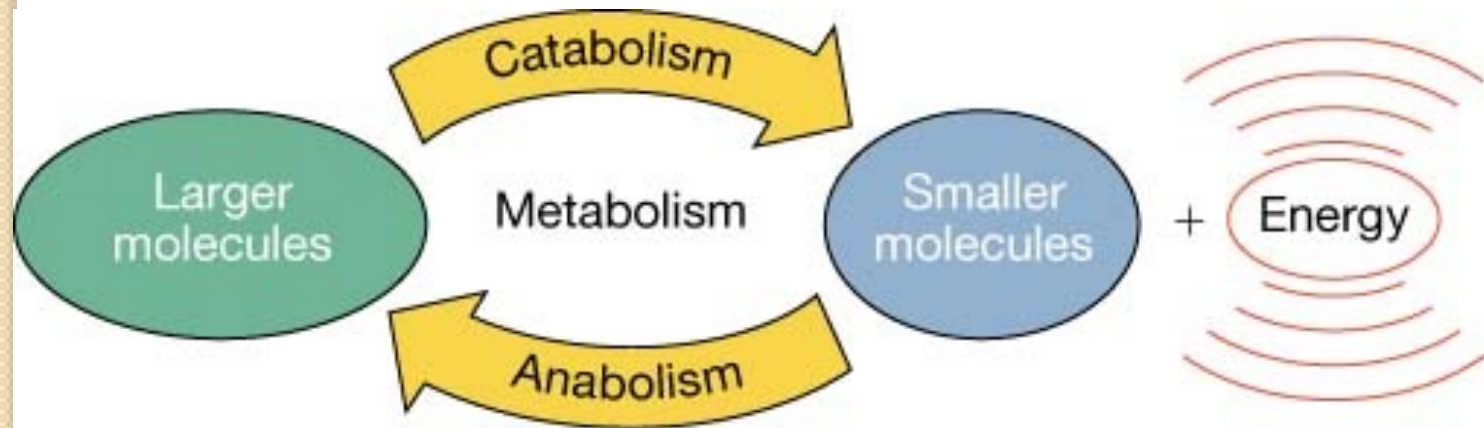
Qual a diferença entre os dois?

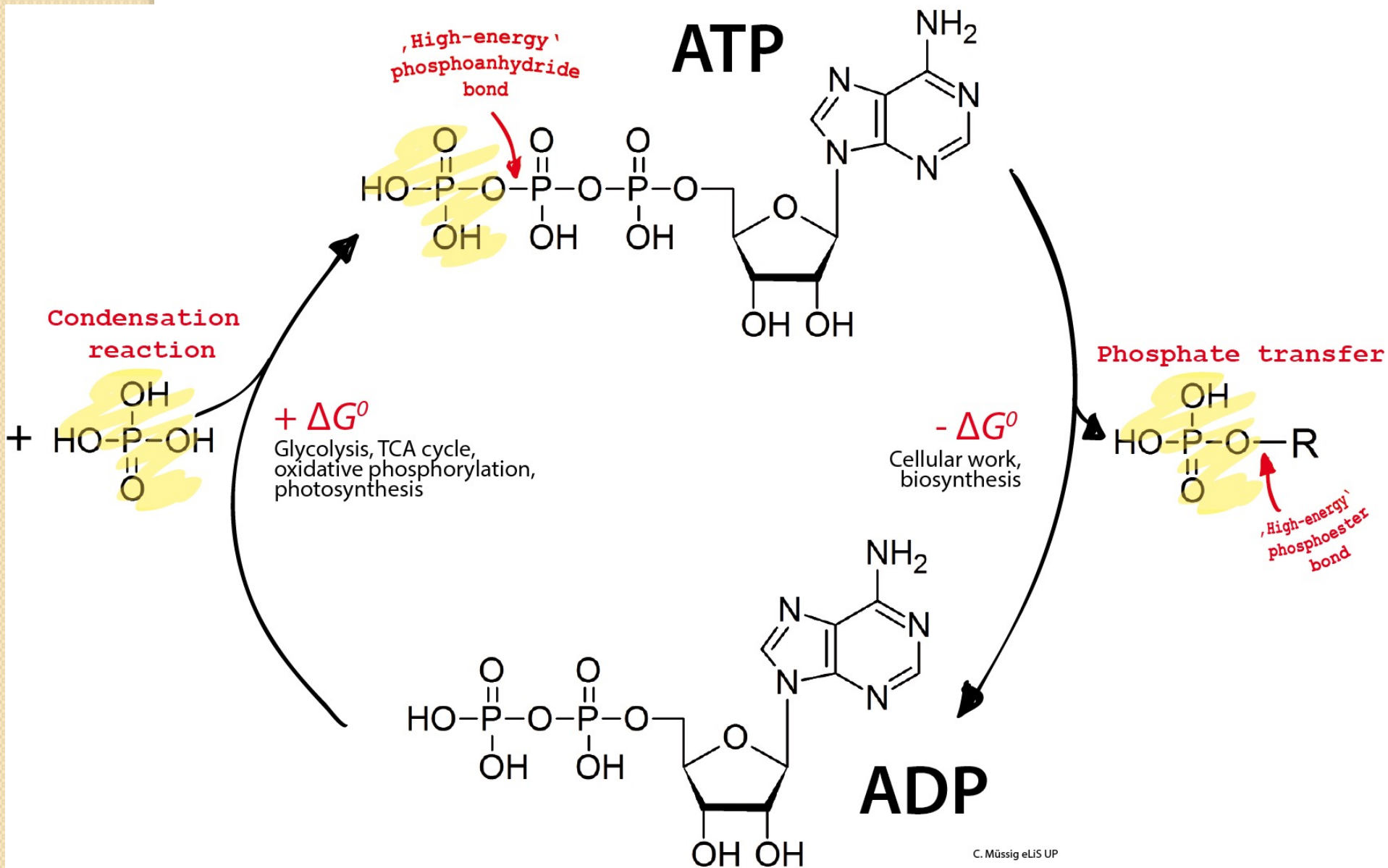
O que é fermentação e respiração?

# Princípios gerais de metabolismo

## Metabolismo

Soma de todas as reações químicas que ocorrem dentro de um organismo vivo





# Diversidade Metabólica

Fonte de energia (Catabolismo)  
para produzir ATP

Chemicals

Light

Chemotrophy

Phototrophy

Organic  
chemicals

(glucose, acetate, etc.)

Inorganic  
chemicals

(H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Fe<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.)

**Chemoorganotrophs**

**Chemolithotrophs**

**Phototrophs**

(glucose + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O)

(H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>O)

(light)

**ATP**

**ATP**

**ATP**

Fonte única de Carbono

Autotróficos: CO<sub>2</sub>

Heterotróficos:  
compostos orgânicos

Quais são os macro e micronutrientes?

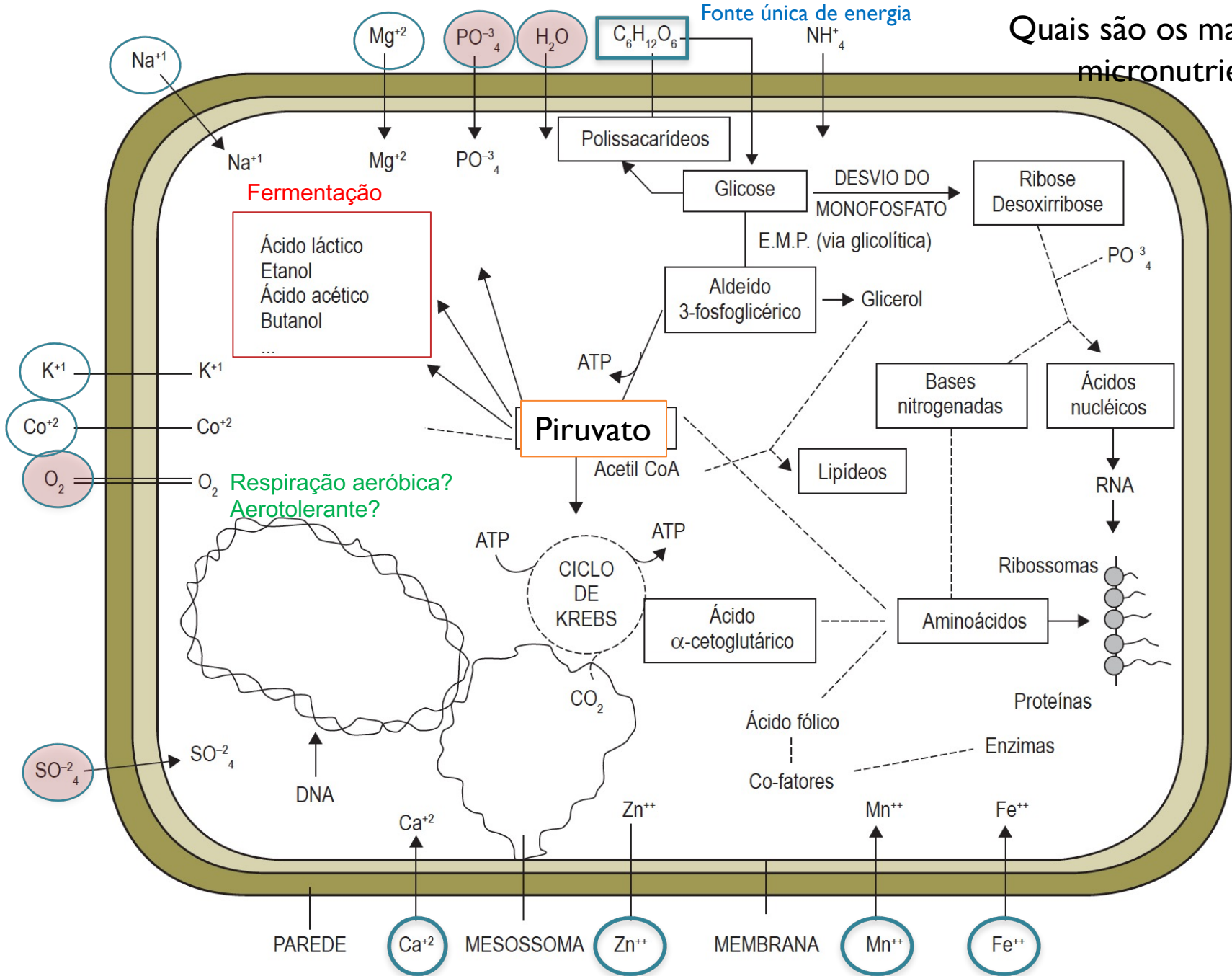
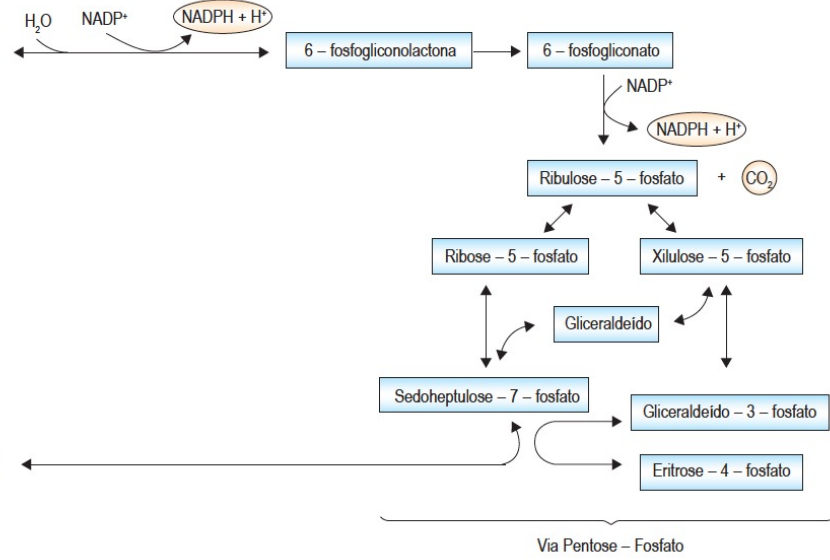
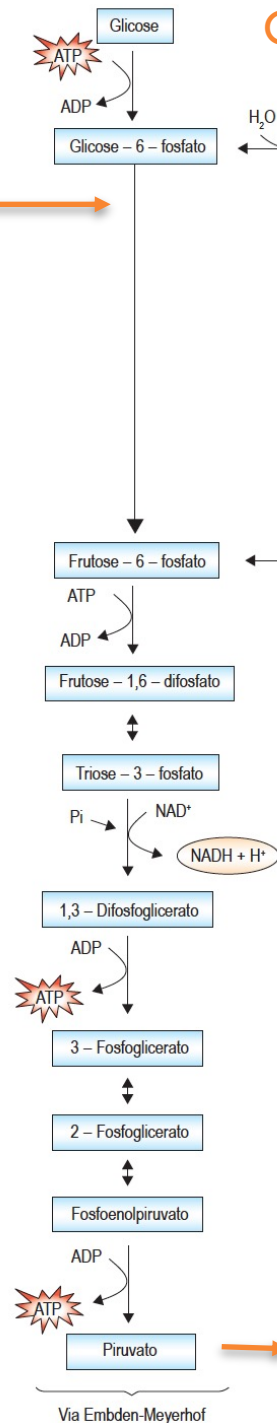
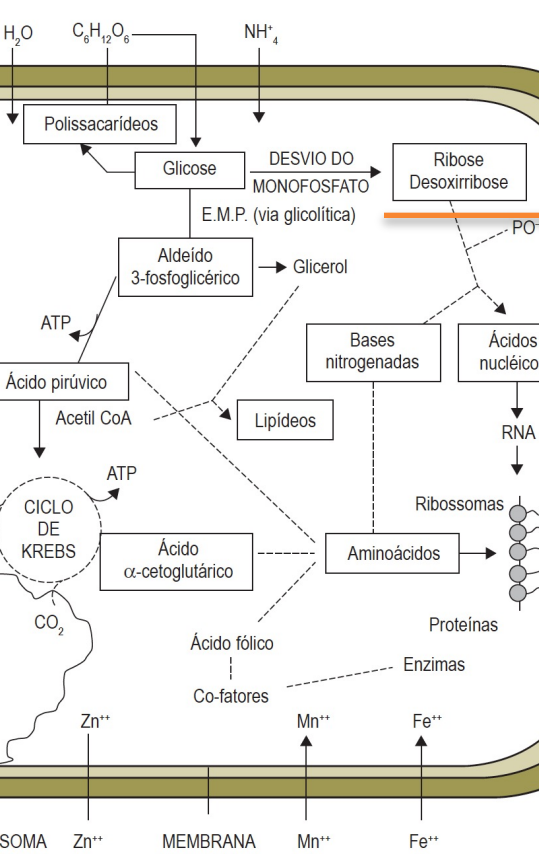


Figura 3.1 — Esquema geral do metabolismo bacteriano.



## Catabolismo da Glicose – Via Glicolítica em Bactérias

# CATABOLISMO da Glicose e Respiração



Redução de NAD<sup>+</sup> para NADH, ou seja NAD<sup>+</sup> ganha 2 elétrons e um H<sup>+</sup>

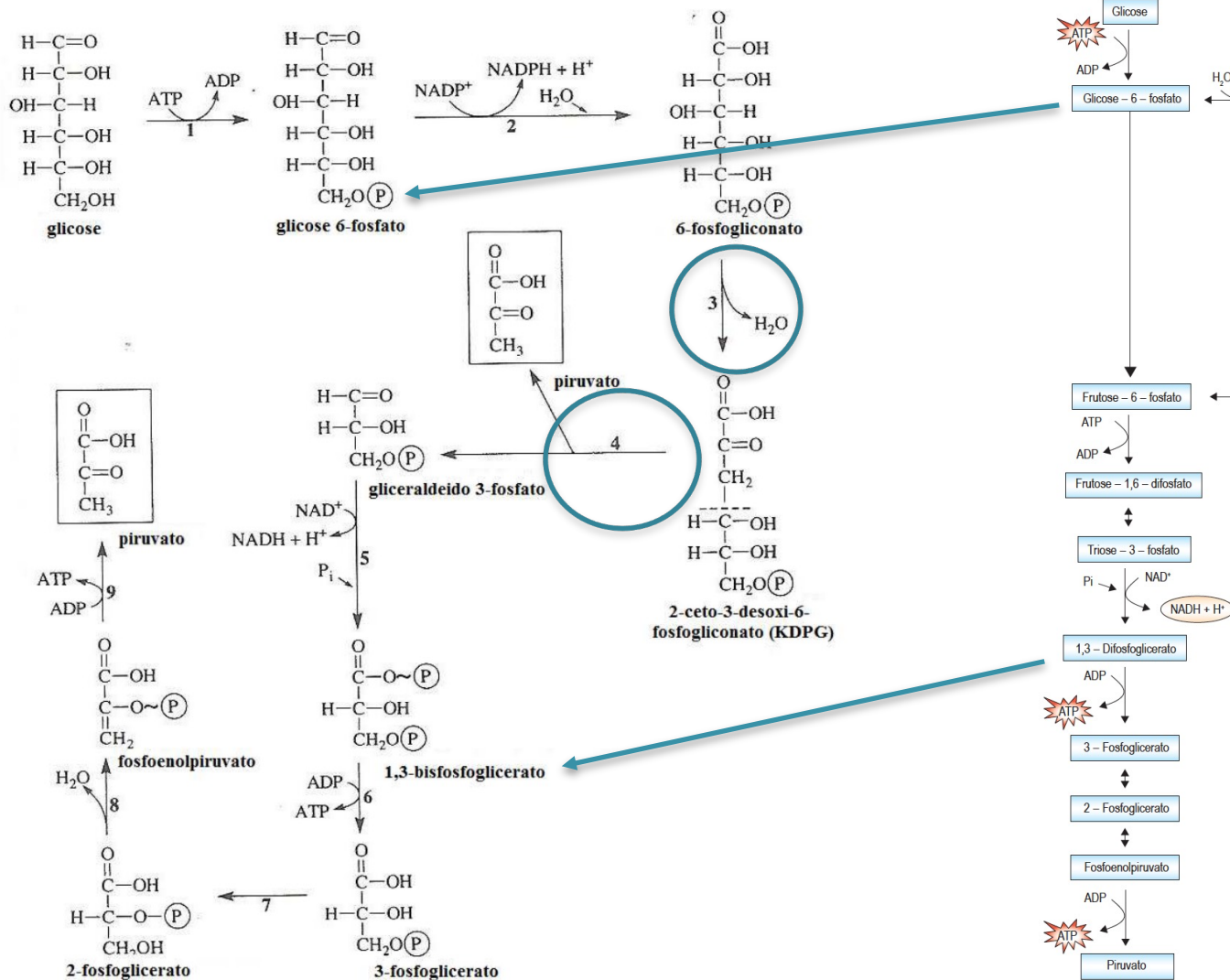




# Glicólise: Entner-Duodoroff [E-D] Ocorre apenas em Microorganismos

## Entner-Doudoroff

## Embden-Meyerhof-Parnas

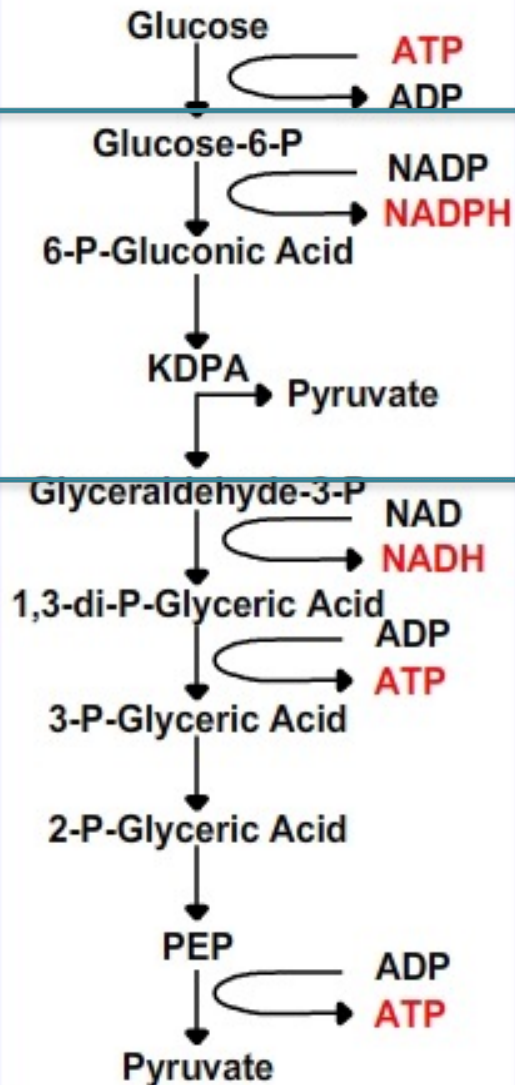


Principal via de  
degradação de  
açúcares para  
*Pseudomonas*,  
*Ralstonia*,  
*Xanthomonas* e etc..

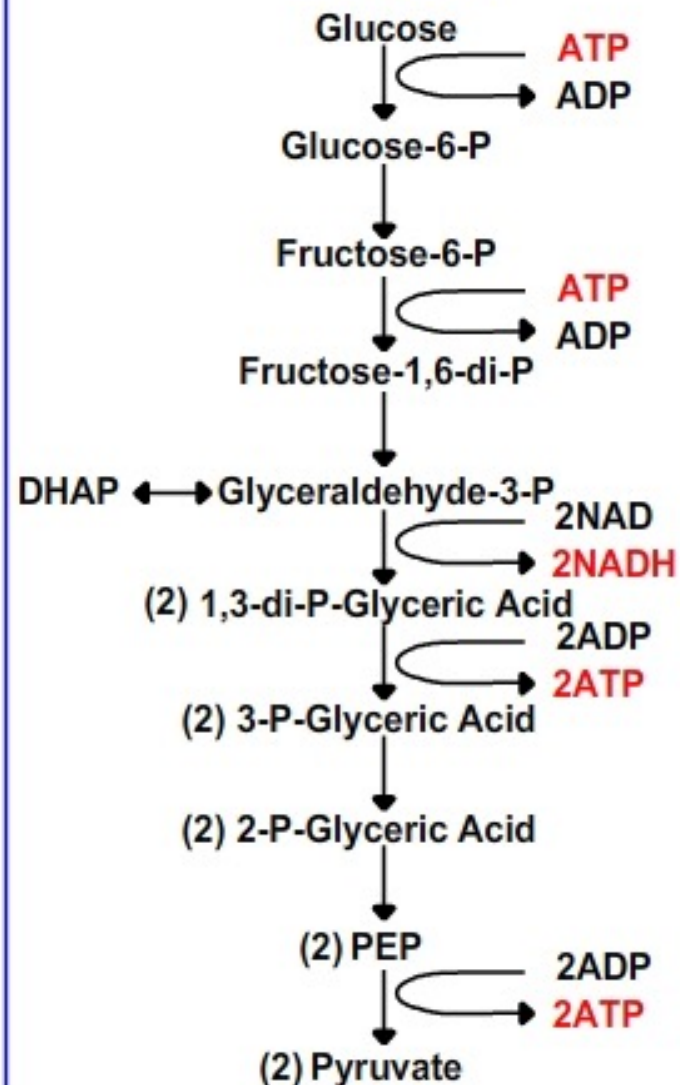
Figura 3.5. Via de Entner-Doudoroff.

Via Embden-Meyerhof

### Entner-Doudoroff



### Embden-Meyerhof (Glycolysis)



Organismo	EMP	ED
<i>Ralstonia eutropha</i>	-	+
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	+
<i>Pseudomonas saccharophila</i>	-	+
<i>Escherichia coli</i>	+	-/+*
<i>Xanthomonas phaseoli</i>	-	+
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	-	+
<i>Azotobacter choococcum</i>	+	-
<i>Bacillus subtilis</i>	+	-
<i>Arthrobacter sp</i>	+	-

\**E. coli* somente expressa as enzimas de Entner-Doudoroff quando cresce em gliconato.

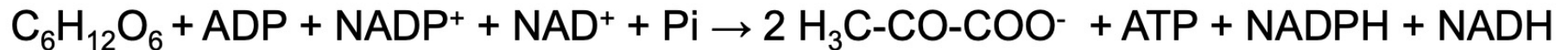
EMP - Glicolise



Glicose

Piruvato

ED



Glicose

Piruvato



## Catabolismo da Glicose – Utilização do Piruvato para Respiração

# CATABOLISMO da Glicose e Respiração Ciclo de Krebs e Fosforilação Oxidativa

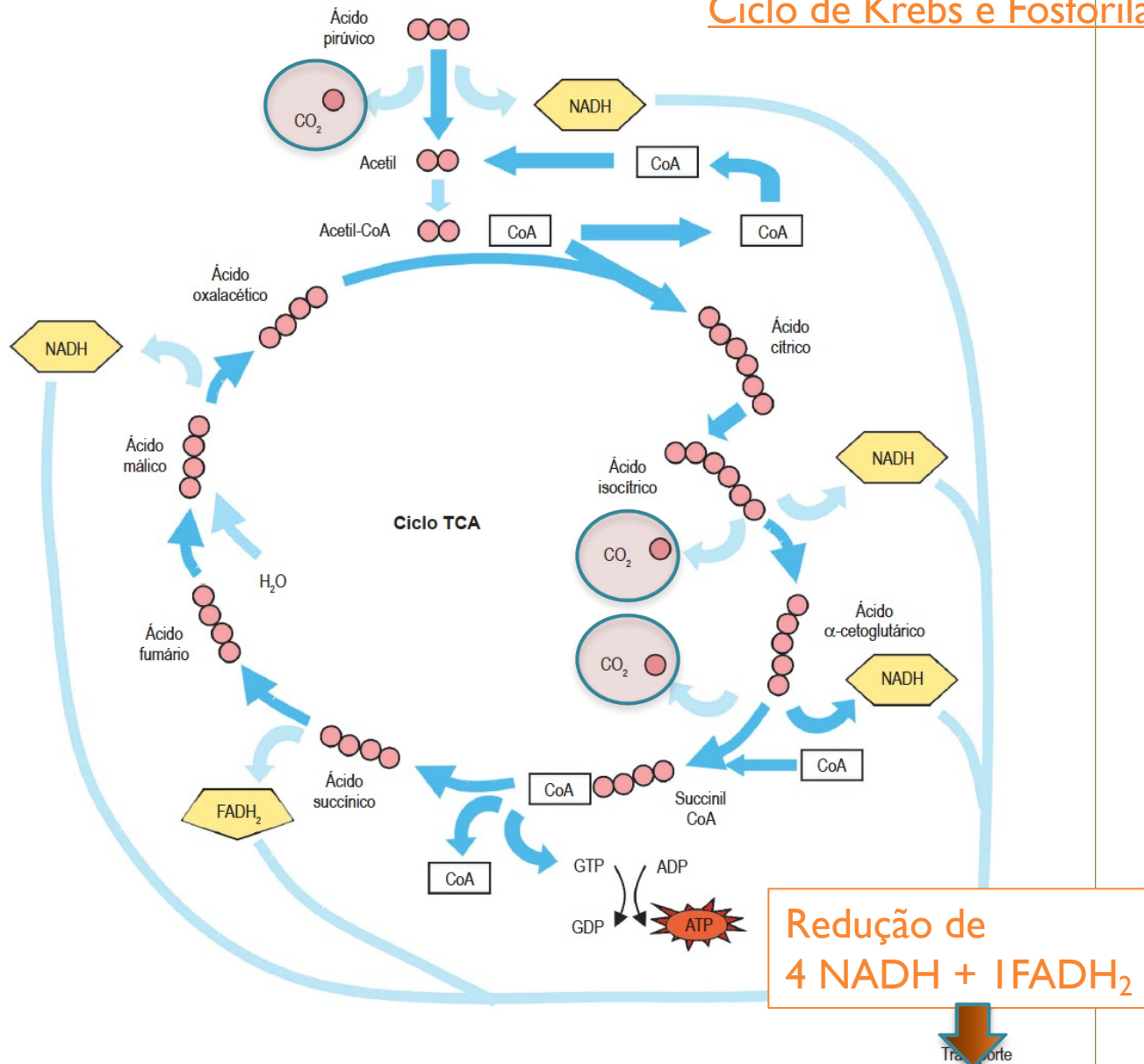
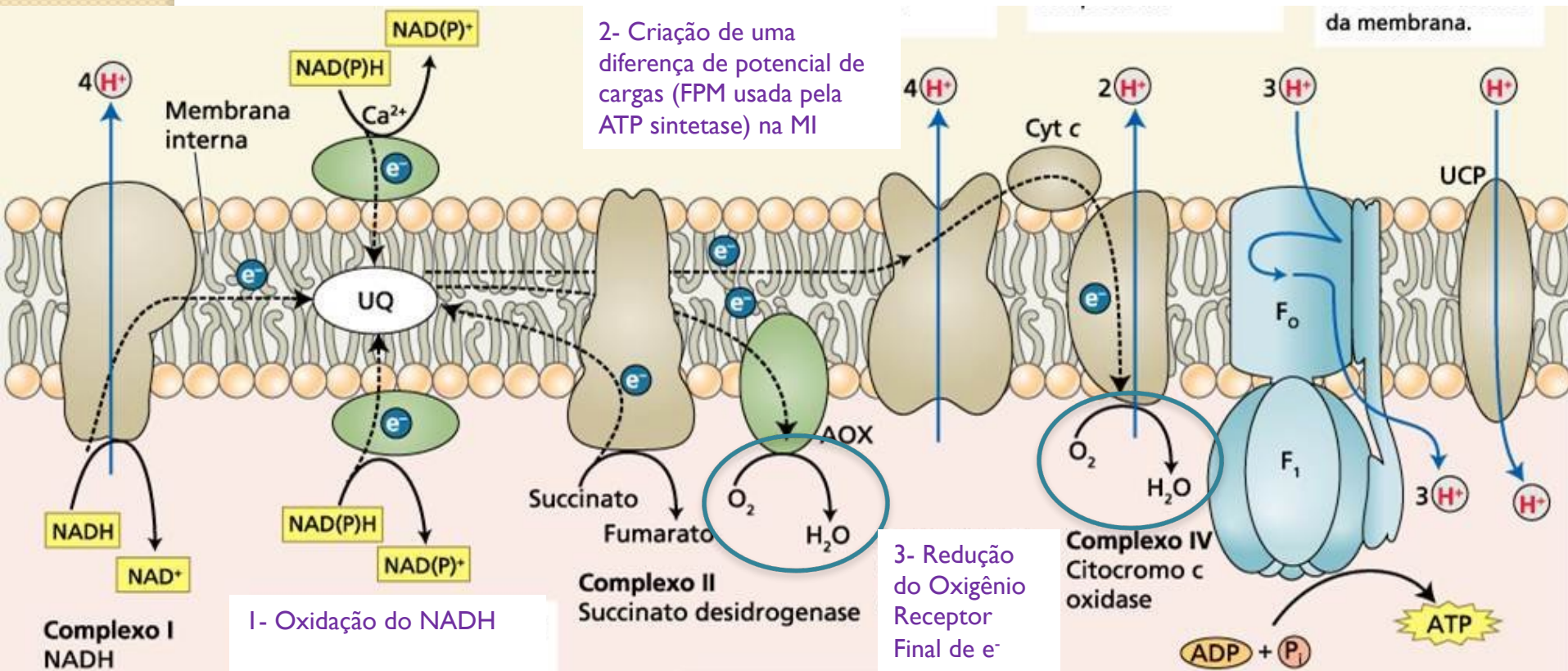


Figura 3.4 — Ciclo de Krebs.

Cadeia de Transporte de elétrons na membrana citoplasmática para doar os elétrons para o Oxigênio

# Respiração – Cadeia de transporte de elétrons (Fosforilação Oxidativa) e translocação de $H^+$

Oxidação dos 10 NADH e 2  $FADH_2$  e transferência de  $e^-$  para o Oxigênio que é reduzido à  $H_2O$



4- Reestabelece o equilíbrio de Cargas pela ATP sintetase e síntese de ATP  
“ Reestabelece o par redox de  $NAD^+/NADH$  e  $FAD/FADH_2$  pela redução do Oxigênio “

# Respiração Anaeróbica

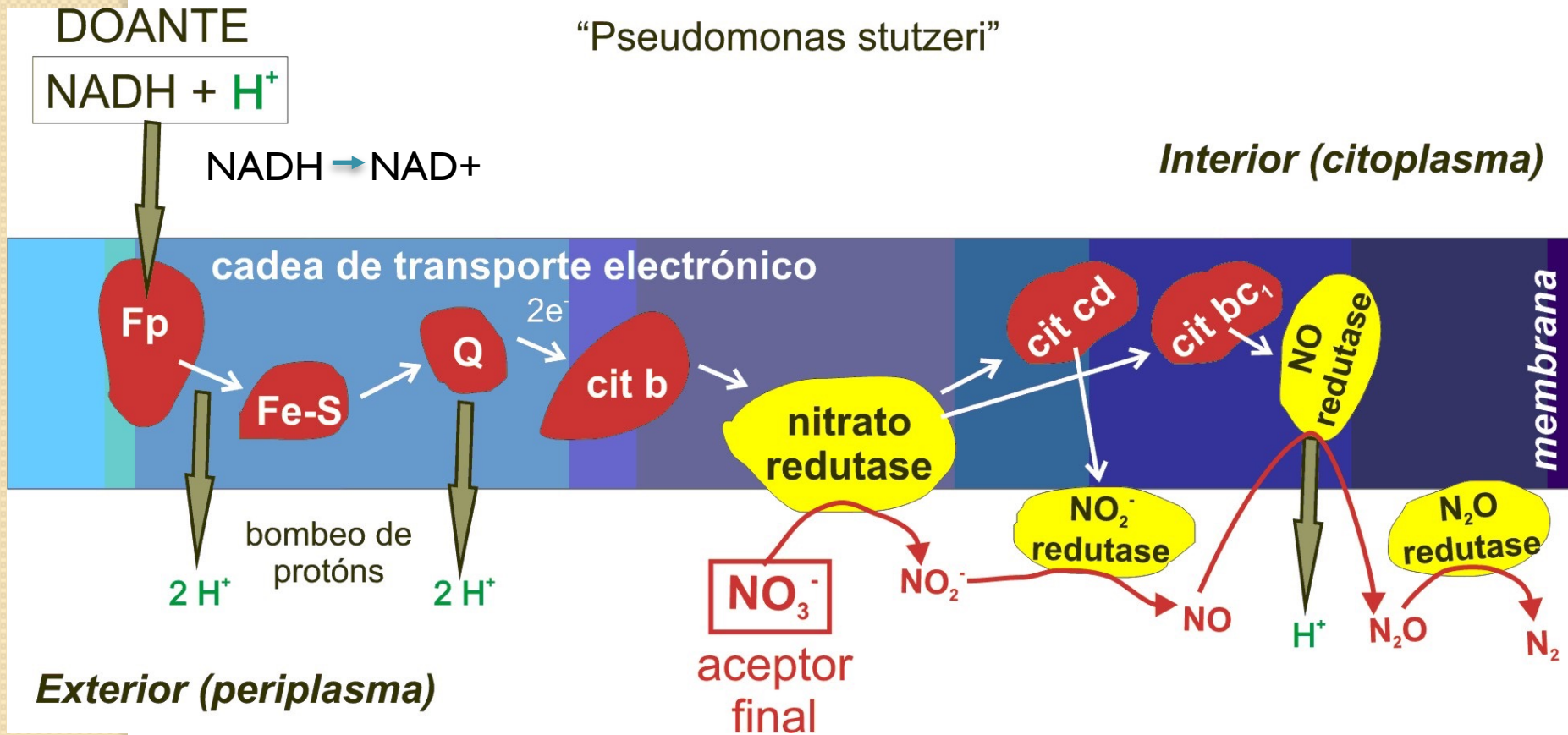
O aceptor final de elétrons é uma substância inorgânica diferente de oxigênio ( $O_2$ )

Pode ser:

- *Pseudomonas* e *Bacillus*: íon nitrato ( $NO_3^-$ ) reduzido à Íon nitrito ( $NO_2^-$ ),  $N_2O$  ou  $N_2$
- *Desulfovibrio* : íon sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) reduzido à sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ )
- Outras bactérias:  $CO_3^{2-}$  reduzido à metano ( $CH_4$ )

# Respiração anaeróbica: redução de nitrato para N<sub>2</sub>

"Pseudomonas stutzeri"

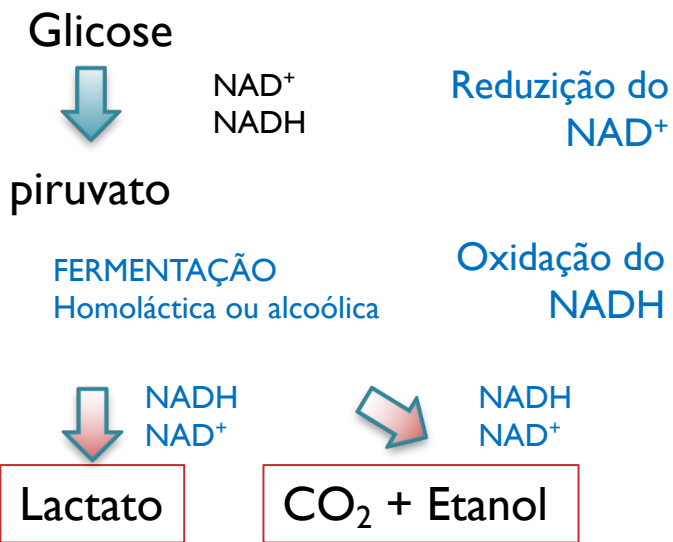
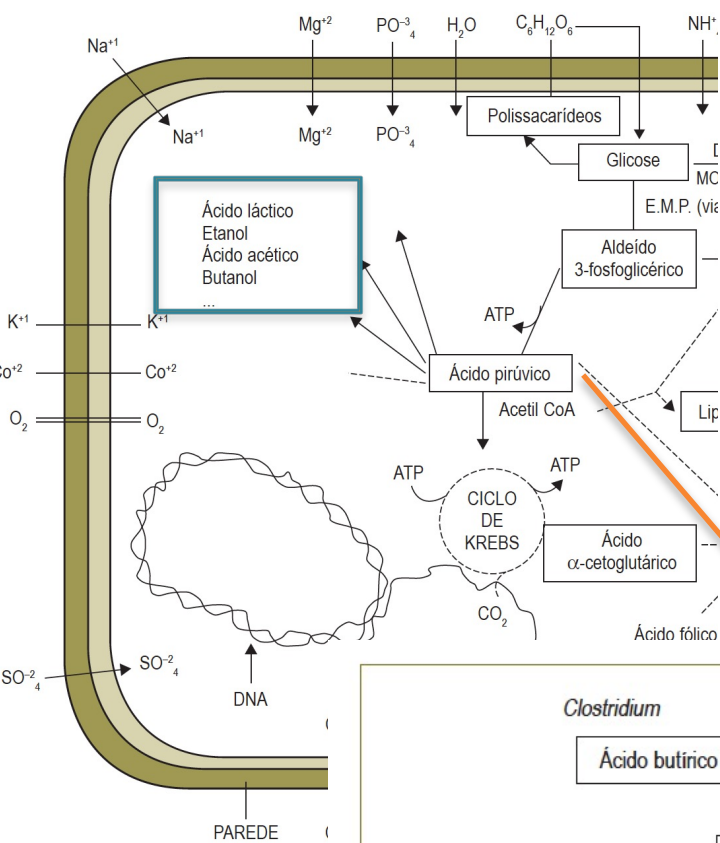






O que Acontece na Fermentação?

# Destino do Piruvato: Respiração ou Fermentação?



## Fermentação Reestabelece o par redox

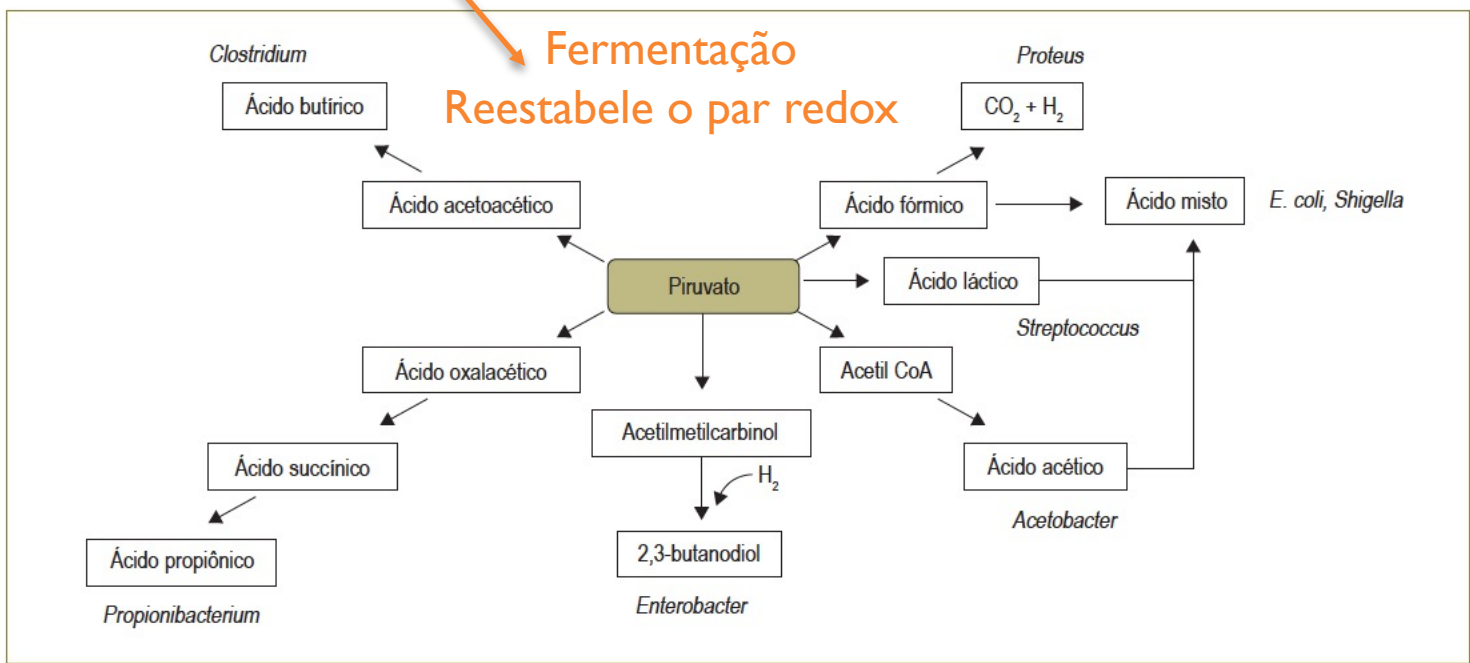
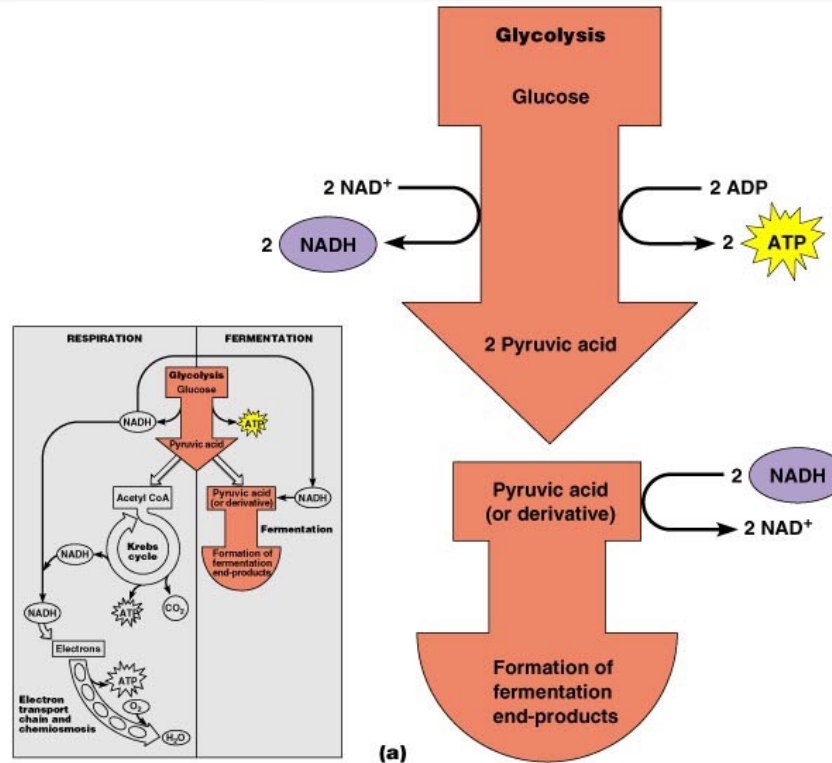


Figura 3.3 — Alguns exemplos de fermentação com diferentes produtos finais e respectivos micro-organismos produtores.

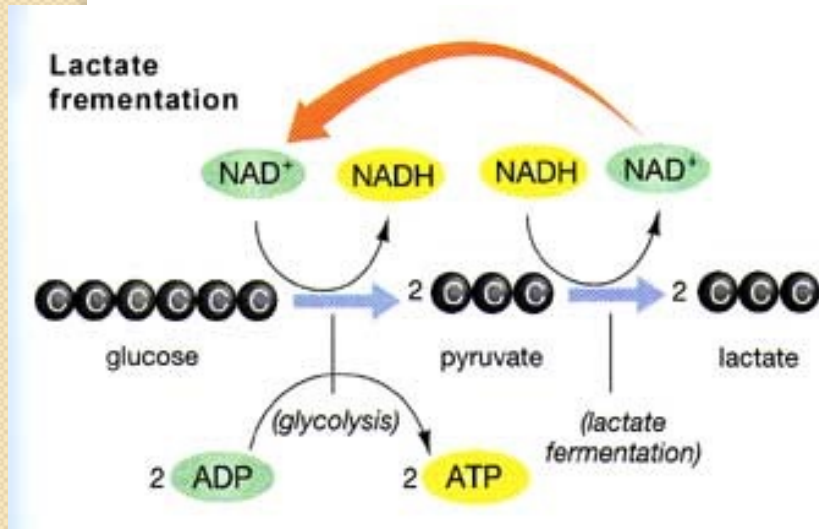
# Diferentes Produtos provindos da Fermentação



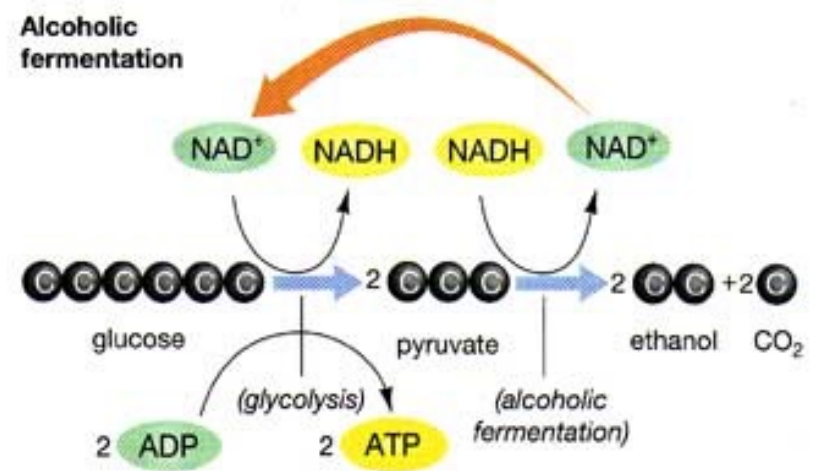
A glicose não é completamente oxidada CO<sub>2</sub>

	Pyruvic Acid					
<b>Organism</b>	<i>Streptococcus, Lactobacillus, Bacillus</i>	<i>Saccharomyces</i> (yeast)	<i>Propionibacterium</i>	<i>Clostridium</i>	<i>Escherichia, Salmonella</i>	<i>Enterobacter</i>
<b>Fermentation end-product(s)</b>	Lactic acid	Ethanol and CO <sub>2</sub>	Propionic acid, acetic acid, CO <sub>2</sub> , and H <sub>2</sub>	Butyric acid, butanol, acetone, isopropyl alcohol, and CO <sub>2</sub>	Ethanol, lactic acid, succinic acid, acetic acid, CO <sub>2</sub> , and H <sub>2</sub>	Ethanol, lactic acid, formic acid, butanediol, acetoin, CO <sub>2</sub> , and H <sub>2</sub>

# Diferença entre a fermentação láctica e alcoólica

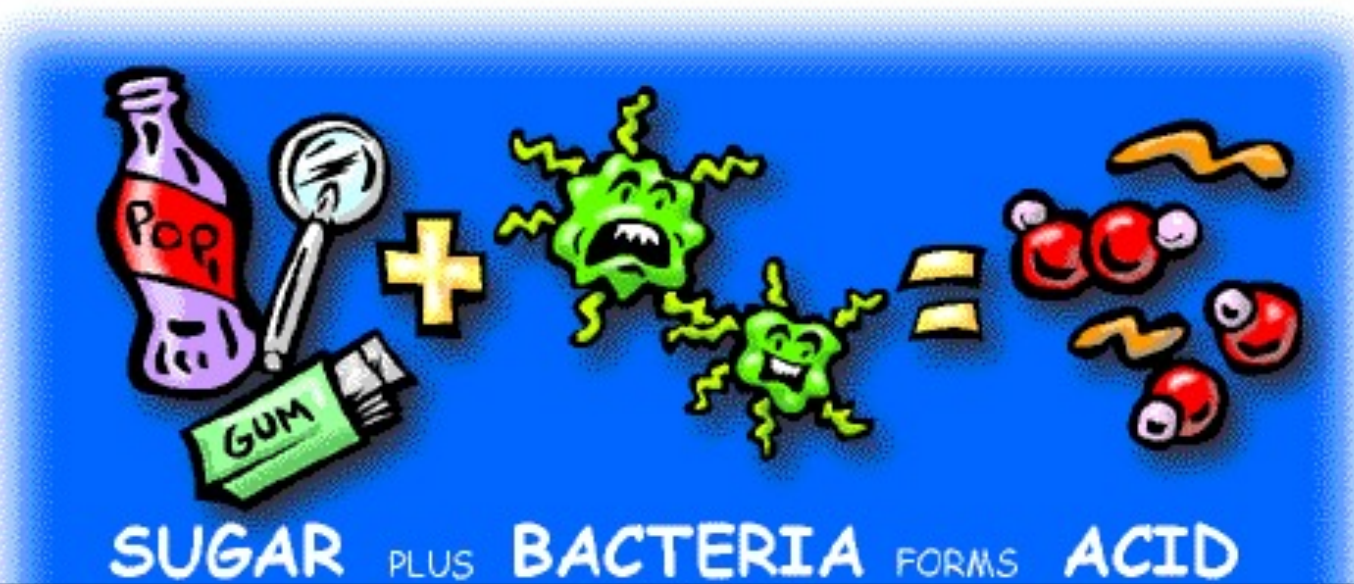


Yogurt



Cerveja!!!!

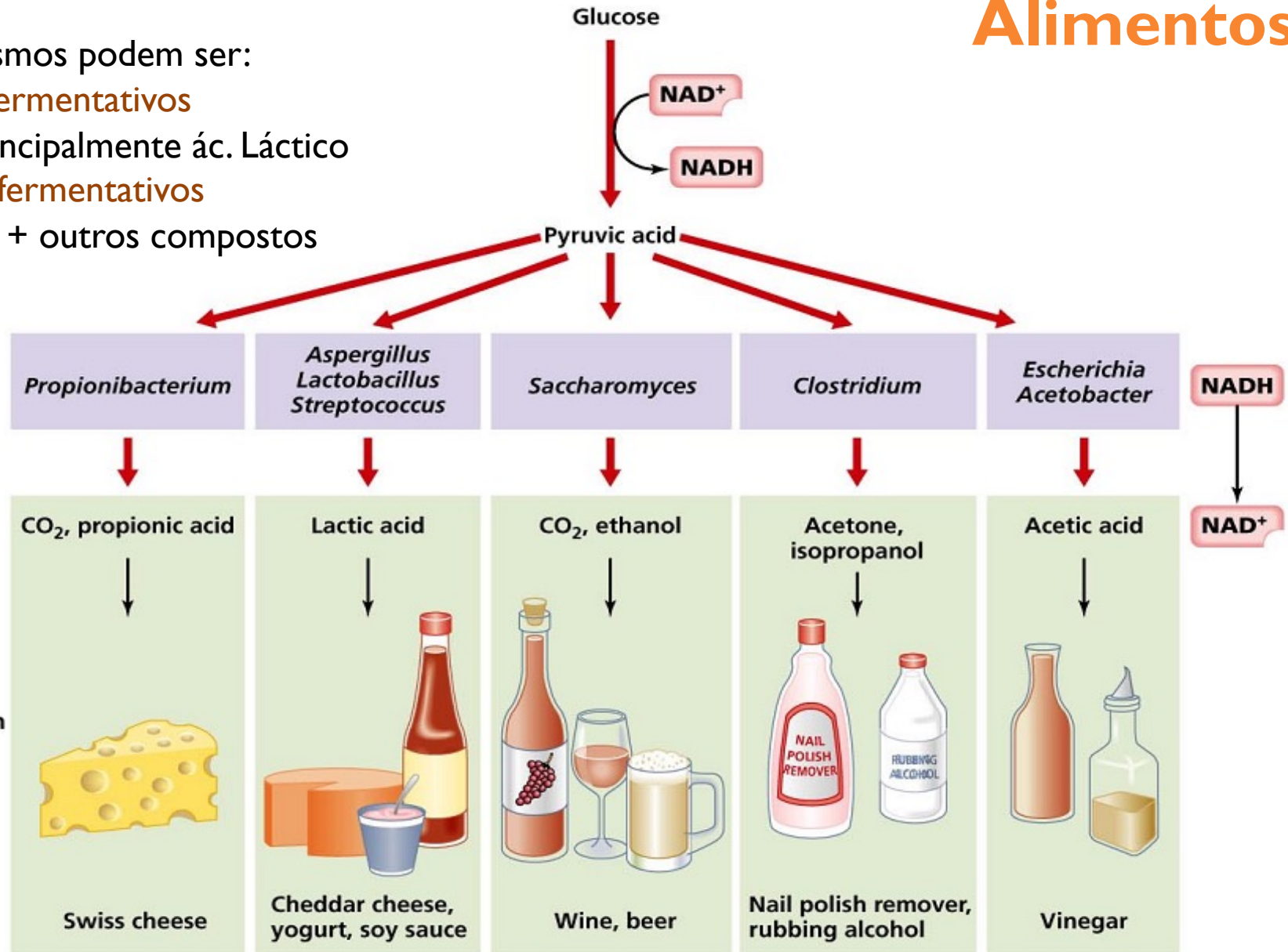
# Importância da fermentação na saúde bucal



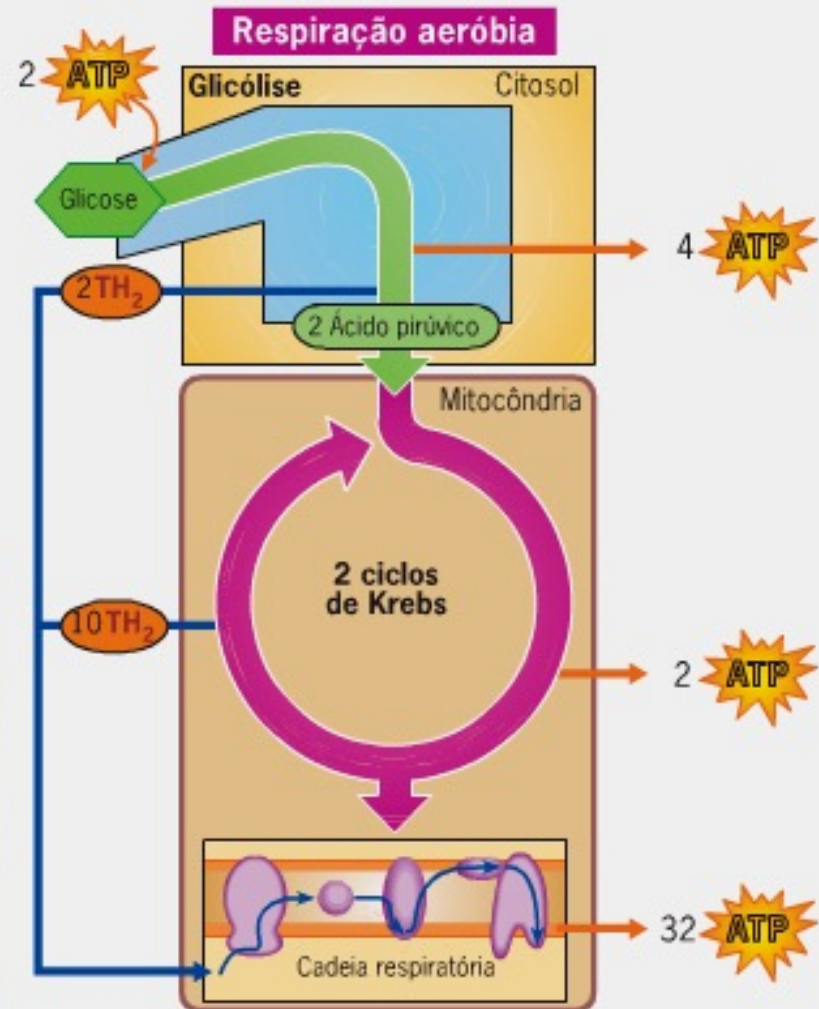
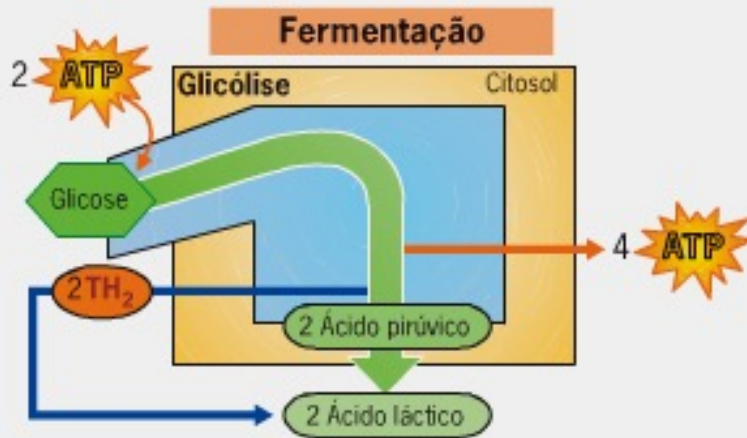
# Importância da fermentação na Indústria de Alimentos

Os organismos podem ser:

- **Homofermentativos**  
produz principalmente ác. Láctico
- **Heterofermentativos**  
ác. Láctico + outros compostos



# Respiração ou a Fermentação é mais energética?



Rendimento energético em termos de moléculas de ATP

Fermentação			Respiração aeróbia		
Estrutura	ATP		Estrutura	ATP	
	Formado	Mobilizado		Formado	Mobilizado
Citosol	4	2	Citosol	4	2
Saldo	2 ATP		Mitocôndria	2	—
			Membrana interna	32	—
			Saldo	36 ATP (2 + 2 + 32)	

# Diversidade no metabolismo bacteriano

**Tabela 3.4.** Bactérias quimiolitotróficas, respectivos substratos e valor do  $\Delta G^{\circ}$  da reação de oxidação

Bactéria	Reação	$\Delta G^{\circ}$ (mV/mol)
<i>Nitrosomonas europaea</i>	$2 \text{NH}_4^+ + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2^- + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{H}^+$	-551,2
<i>Nitrobacter winogradskyi</i>	$2 \text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_3^-$	-74,3
<i>Cupriavidus necator</i>	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	-472,5
<i>Pseudomonas carboxydovorans</i>	$2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$	-504,9
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	$2 \text{S}^0 + 3 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+$	-588,2
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	$4 \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ \rightarrow 4 \text{Fe}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	-17,7
<i>Leptothrix</i> spp.	$2 \text{Mn}^{2+} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+$	-77,6
<i>Paracoccus denitrificans</i>	$5 \text{H}_2 + 2 \text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ \rightarrow 6 \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	-958,8
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	$4 \text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4 \text{H}_2\text{O}$	-154,4
<i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i>	$4 \text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{H}_2\text{O}$	-138,6

Oxidação da  $\text{NH}_4^+$  (doador de  $e^-$ ) para  $\text{NO}_2^-$ . Os elétrons são transferidos para o receptor final de elétrons, que neste caso é o  $\text{O}_2$



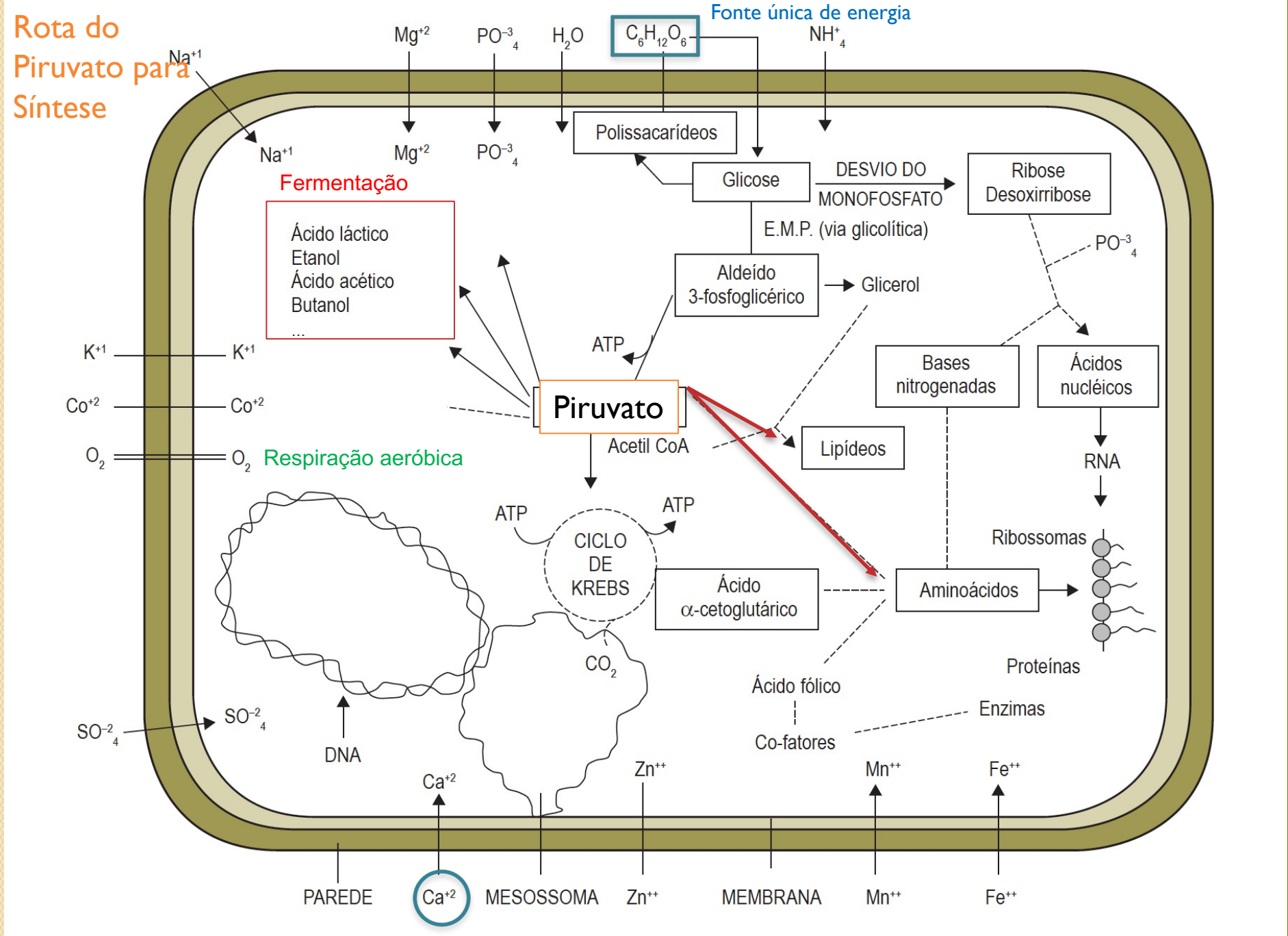
# Resumo da produção de energia

	<b>Doadores de e-</b>	<b>Aceptores e-</b>
Respiração aeróbica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Glicose</li><li>• Compostos de enxofre</li><li>• Amônia</li><li>• hidrogênio</li></ul>	Oxigênio
Respiração anaeróbica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Glicose</li><li>• Compostos de enxofre</li><li>• Amônia</li><li>• Hidrogênio</li><li>• outros</li></ul>	Íons inorgânicos
Fermentação	Glicose	Compostos orgânicos



Anabolismo.

Uso de Energia para síntese de compostos essenciais para a célula crescer



**Figura 3.1** — Esquema geral do metabolismo bacteriano.

## Rota do Piruvato para Síntese de Aminoácidos

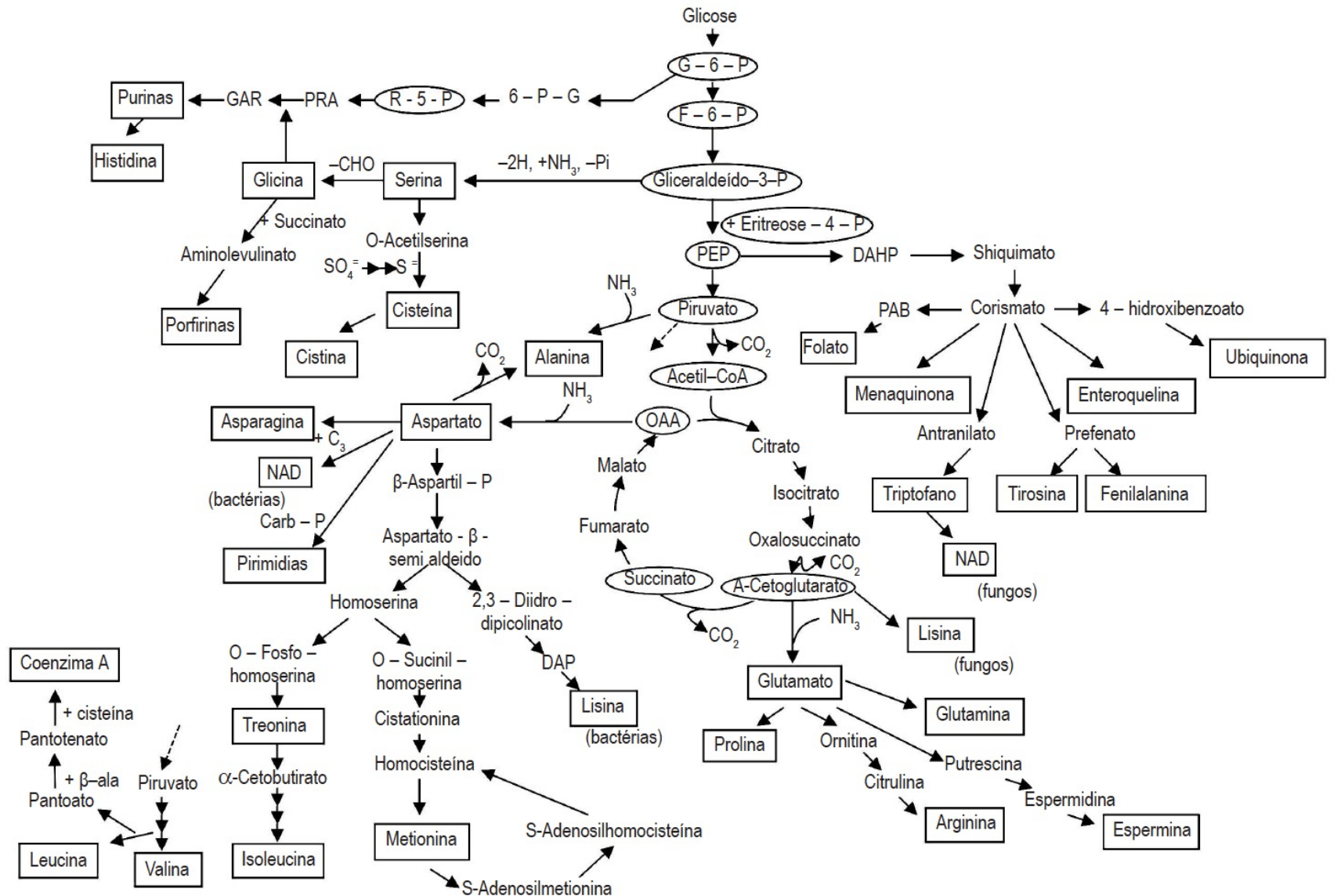
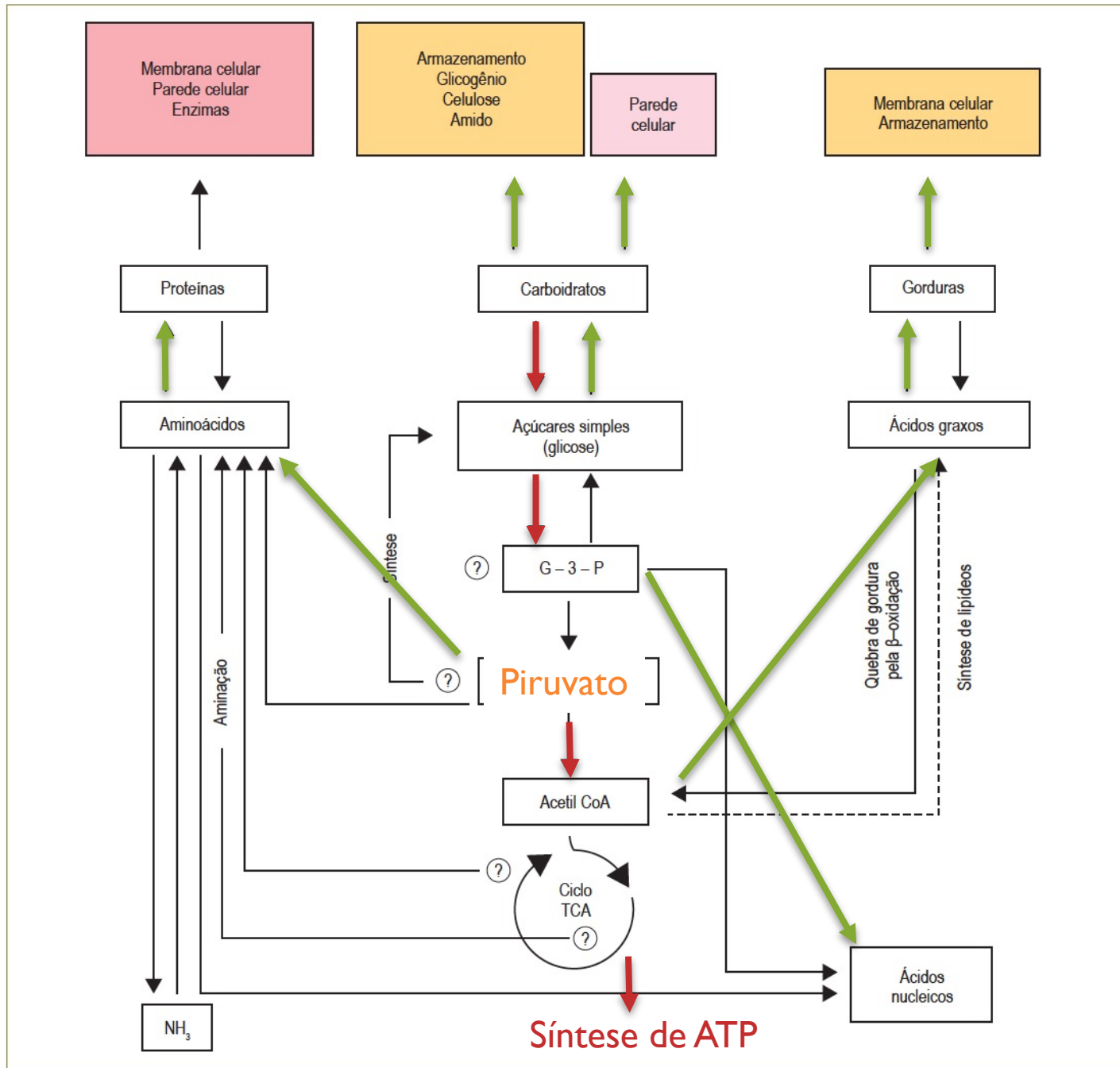


Figura 3.6 — Vias biossintéticas de produção de aminoácidos e compostos relacionados.



↓ Catabolismo de Açúcares (degradação) Produção de ATP

↑ Anabolismo (Síntese de aa, purinas, lipídeos ..) – Consumo de ATP

Figura 3.5 — Esquema genérico de integração do metabolismo.

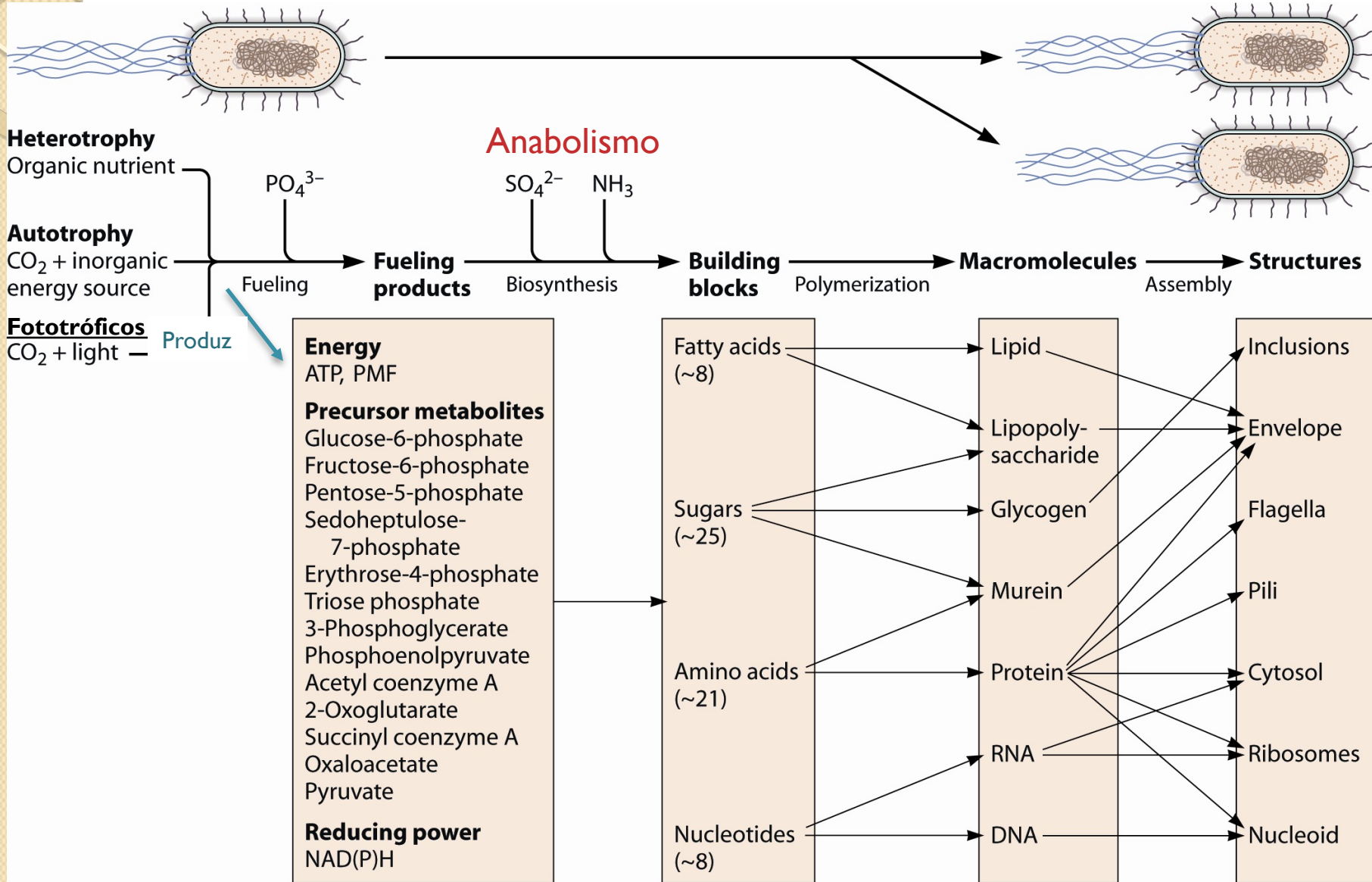
**Table 5.2** Gene products of *Escherichia coli* associated with various metabolic processes

<b>Functional category</b>	<b>No. of genes</b>
<b>Metabolism of small molecules</b>	
Degradation and energy metabolism	316
Central intermediary metabolism	78
Broad regulatory function	51
Biosynthesis	
Amino acids and polyamines	60
Purines, pyrimidines, nucleosides, and nucleotides	98
Fatty acids	26
<b>Metabolism of macromolecules</b>	
Synthesis and modification	406
Degradation	69
Cell envelopes	168
Cell processes	
Transport	253
Other, e.g., cell division, chemotaxis, mobility, osmotic adaptation, detoxification, and cell killing	118
Miscellaneous	107
<b>Total</b>	<b>1,894</b>

Em torno de 40 %  
das proteínas  
produzidas por um  
microorganismo

# Metabolismo & Anabolismo Microbiano

Fonte de Energia





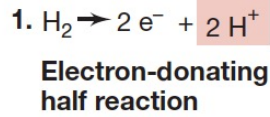
# Todo o Processo envolve Equilíbrio Redox: Oxidação e Redução

Entender o Par Redox

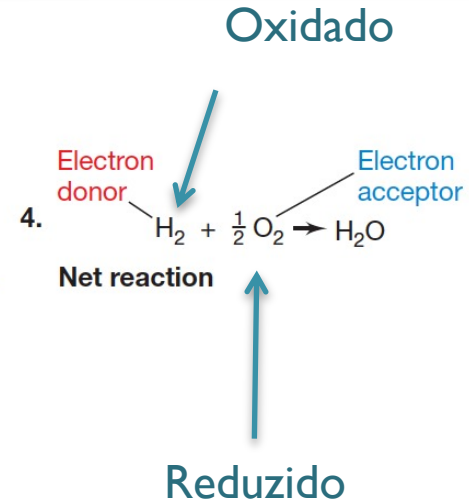
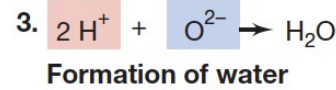
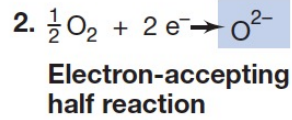


# Reações Redox: Oxidação e Redução

Reação de oxidação (perde e-)



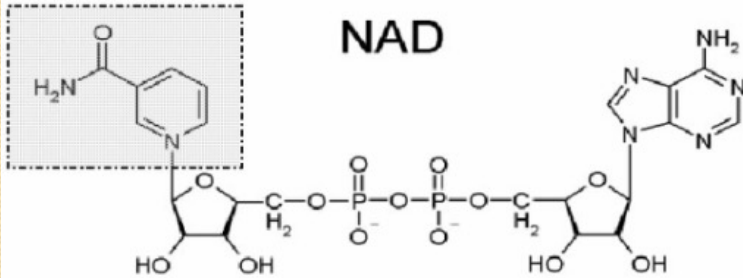
Reação de redução (ganha e-)



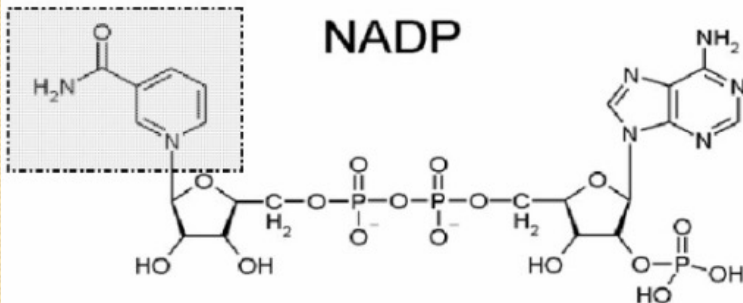
**Figure 4.8** Example of an oxidation–reduction reaction. The formation of H<sub>2</sub>O by reaction of the electron donor H<sub>2</sub> and the electron acceptor O<sub>2</sub>.

## Coenzimas

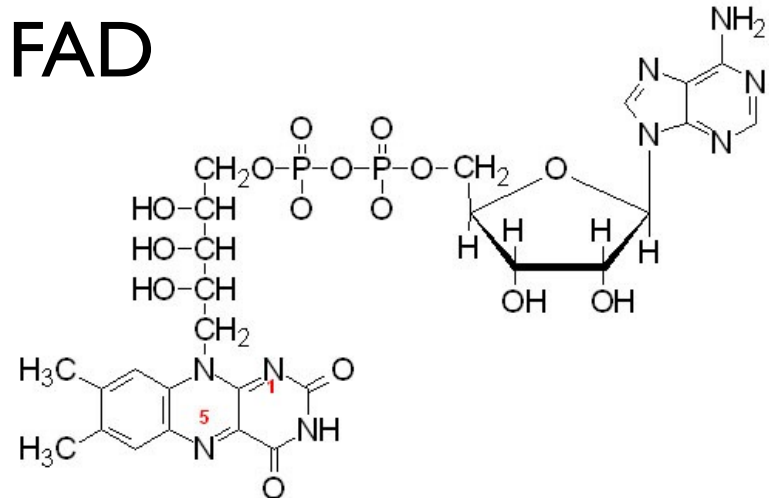
NAD



NADP

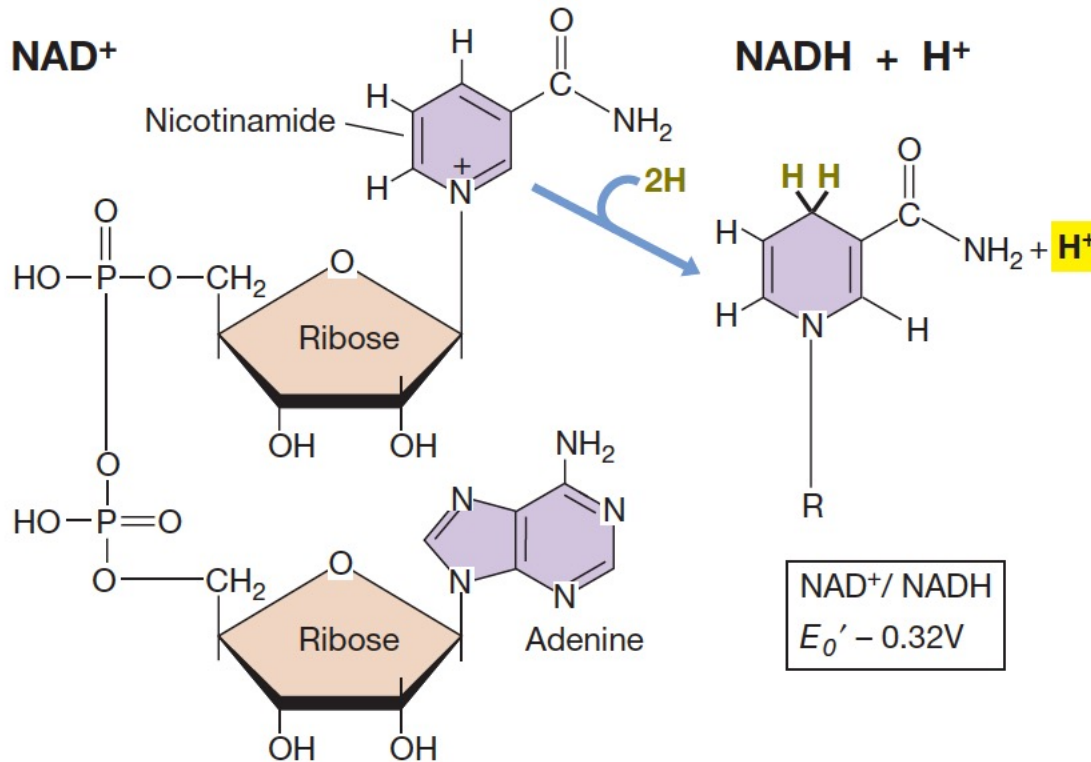


FAD



# Par Redox em Microorganismos

## Redução do NAD<sup>+</sup> para NADH

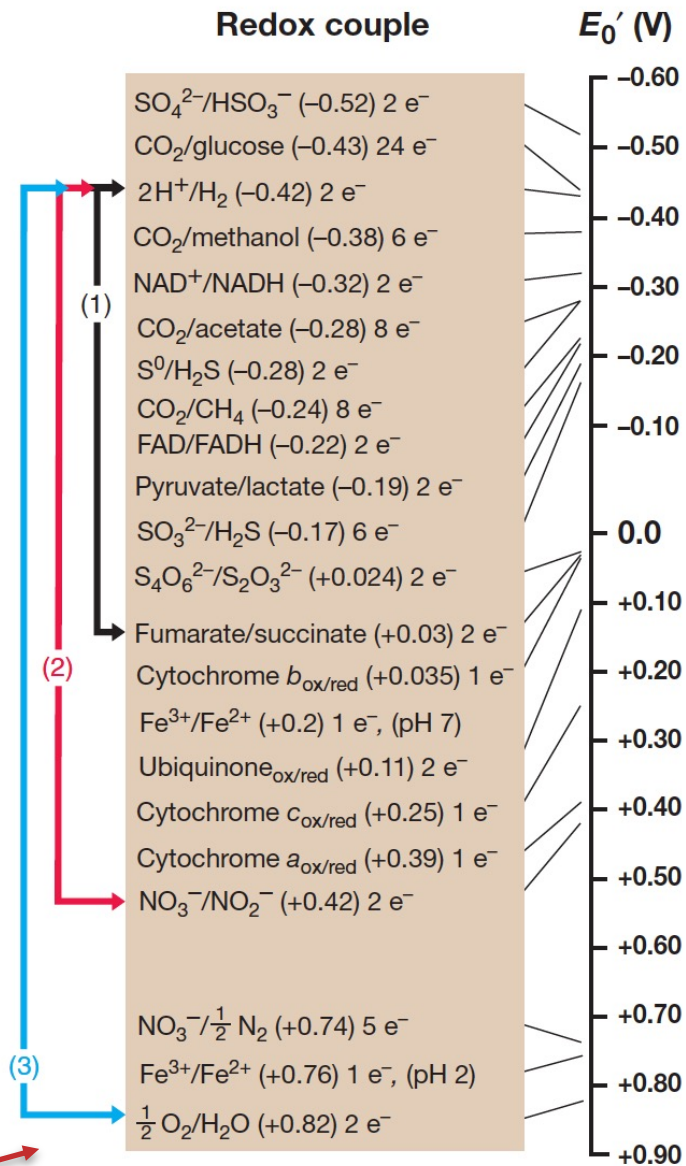


Glicose dá energia para NAD<sup>+</sup> se tornar NADH. Essa energia depois é usada para reduzir o O<sub>2</sub>

**Figure 4.10** The oxidation–reduction coenzyme nicotinamide adenine dinucleotide (NAD<sup>+</sup>). NAD<sup>+</sup> undergoes oxidation–reduction as shown and is freely diffusible. “R” is the adenine dinucleotide portion of NAD<sup>+</sup>.

Temos outras moléculas, como NADP<sup>+</sup> para NADPH

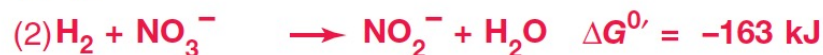
# Potencial de Redução (ganho de e<sup>-</sup>)



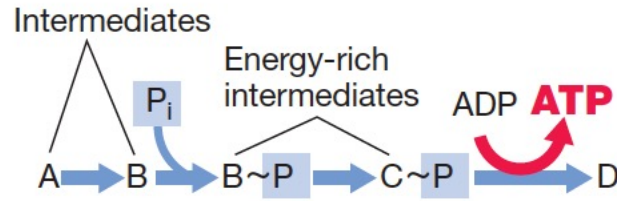
Ótimos receptores de e<sup>-</sup>

Alto valor E<sub>0</sub>

Melhor agente oxidante é o O<sub>2</sub> (doa elétrons), por possuir maior valor de E<sub>0</sub>

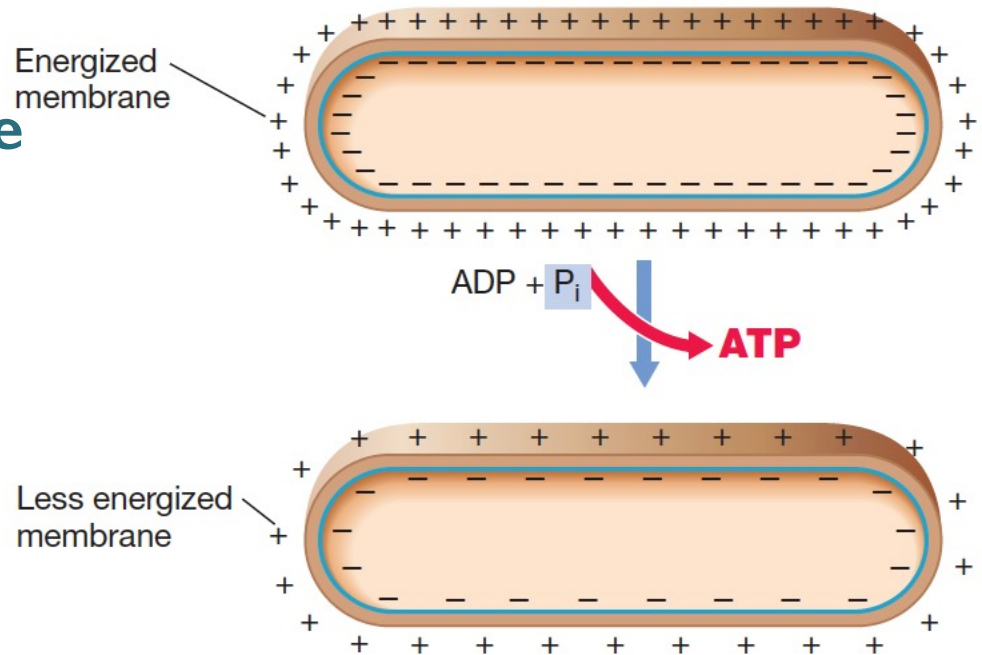


# ATP : Molécula de alta Energia para ser usada



(a) **Substrate-level phosphorylation**

**FPM apenas ocorre no Processo de Respiração e Fotossíntese, mas não na fermentação**

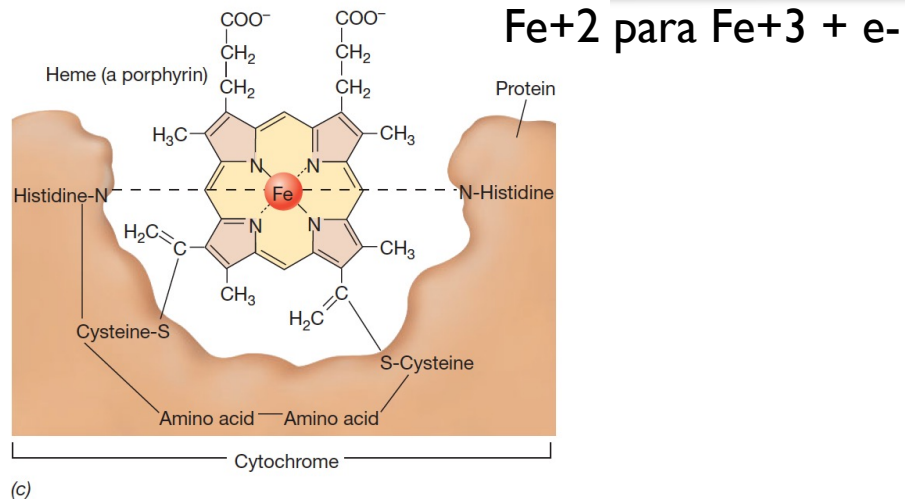
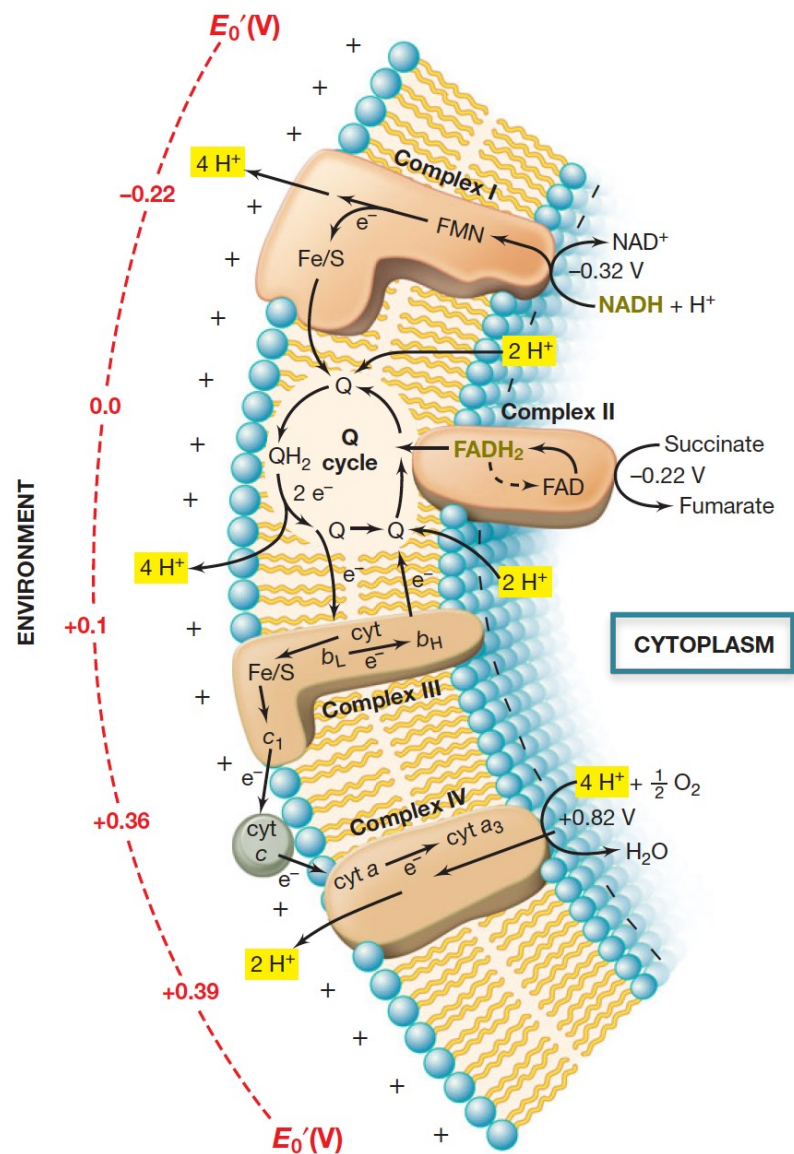


(b) **Oxidative phosphorylation**

**Figure 4.13** Energy conservation in fermentation and respiration. (a) In fermentation, substrate-level phosphorylation produces ATP. (b) In respiration, the cytoplasmic membrane, energized by the proton motive force, dissipates energy to synthesize ATP from ADP + P<sub>i</sub> by oxidative phosphorylation.

**Fermentação ocorre para açúcares mas não para ácidos Graxos (muito reduzidos para serem fermentados)**

# Respiração: FPM e Cadeia de transporte de elétrons na membrana – Diferentes transportadores de elétrons

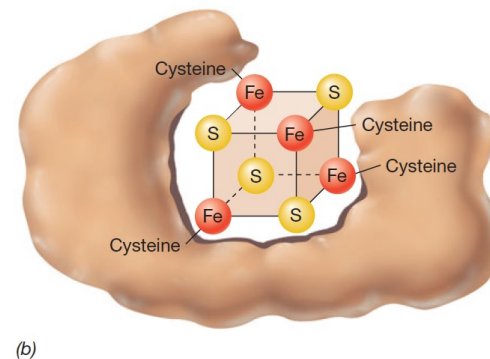
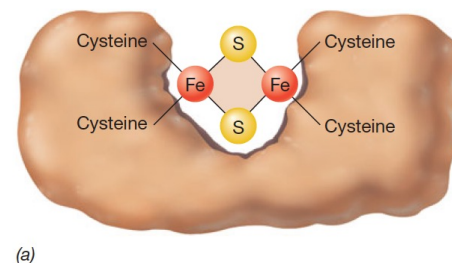


I- Processo de Oxidação de NADH/FADH<sub>2</sub> cria diferença de potencial pq?

Doa e<sup>-</sup> e H<sup>+</sup>

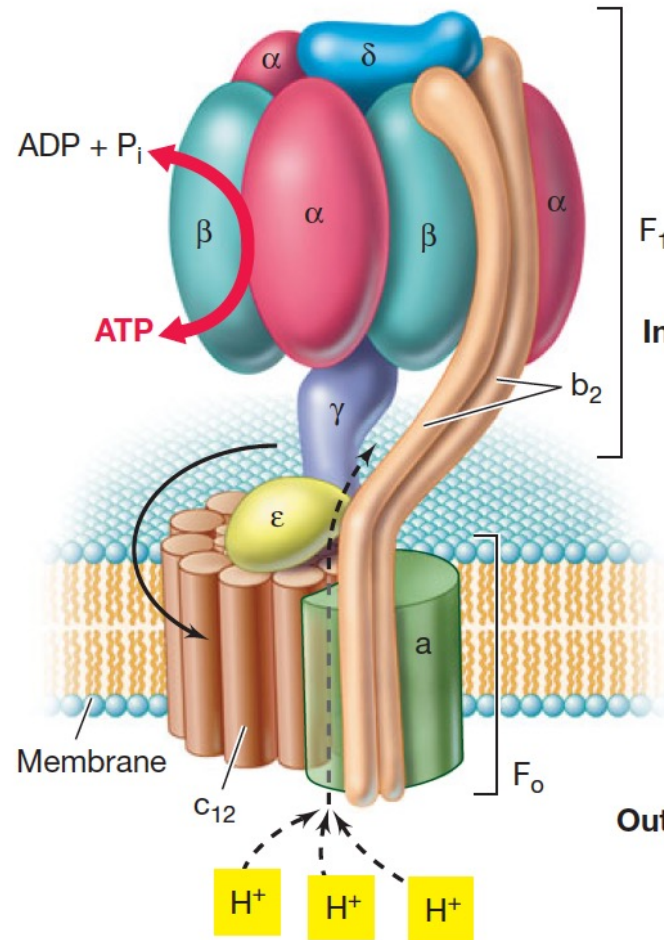
2- O<sub>2</sub> recebe os e<sup>-</sup> e

Doa e H<sup>+</sup>

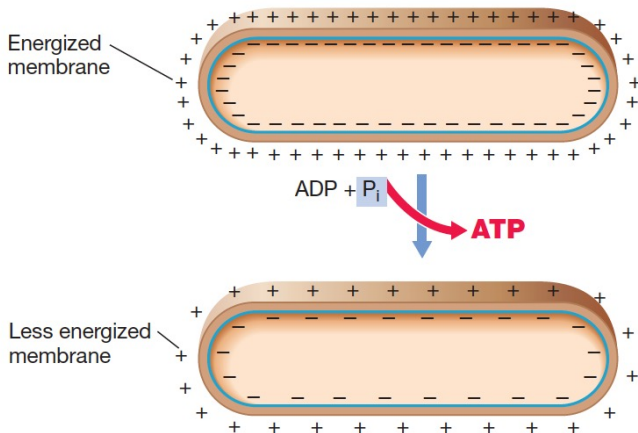


# Respiração: FPM e Cadeia de elétrons na membrana

ATP sintetase usa a diferença de potencial na membrana (como se fosse uma bateria) para gerar ATP



(a)



(b) Oxidative phosphorylation

**Table 5.4** Some cellular activities requiring energy

---

**Cellular activity**

---

**Growth related**

---

Entry of nutrients

Biosynthesis of building blocks

Polymerization of macromolecules

Modification and transport of macromolecules

Assembly of cell structures

Cell division

**Growth independent**

---

Motility

Secretion of proteins and other substances

Maintenance of metabolite pools

Maintenance of turgor pressure

Maintenance of cellular pH

Repair of cell structures

Sensing the surroundings

Communication among cells

---



O que é Fotossíntese?

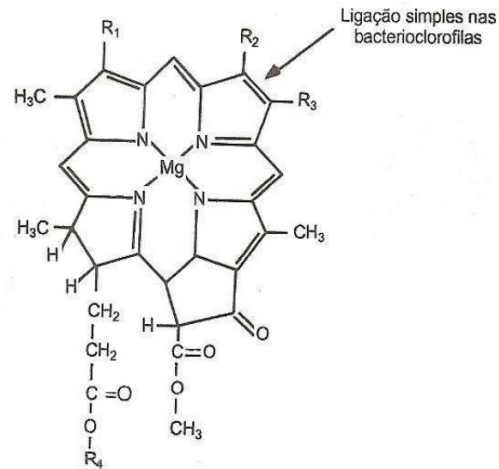


# Fotossíntese

- ❖ Energia luminosa (elétrons) excita elétrons de pigmentos;
- ❖ Como se a luz fosse oxidada e o pigmento fosse reduzido;
- ❖ Transferida a outros pigmentos ou outras proteínas;
- ❖ O elétron é transferido por uma cadeia de transporte de elétrons até um receptor final.
- ❖ As transferências de elétrons causa um gradiente de prótons que permite a síntese de ATP.
- ❖ Dependendo do receptor final, o tipo de **fotossíntese é cíclico** ou **não cíclico**.
  - Doador de elétrons: Luz
  - Receptor intermediário de elétrons: pigmentos
  - Receptor final de elétrons: pode ser vários

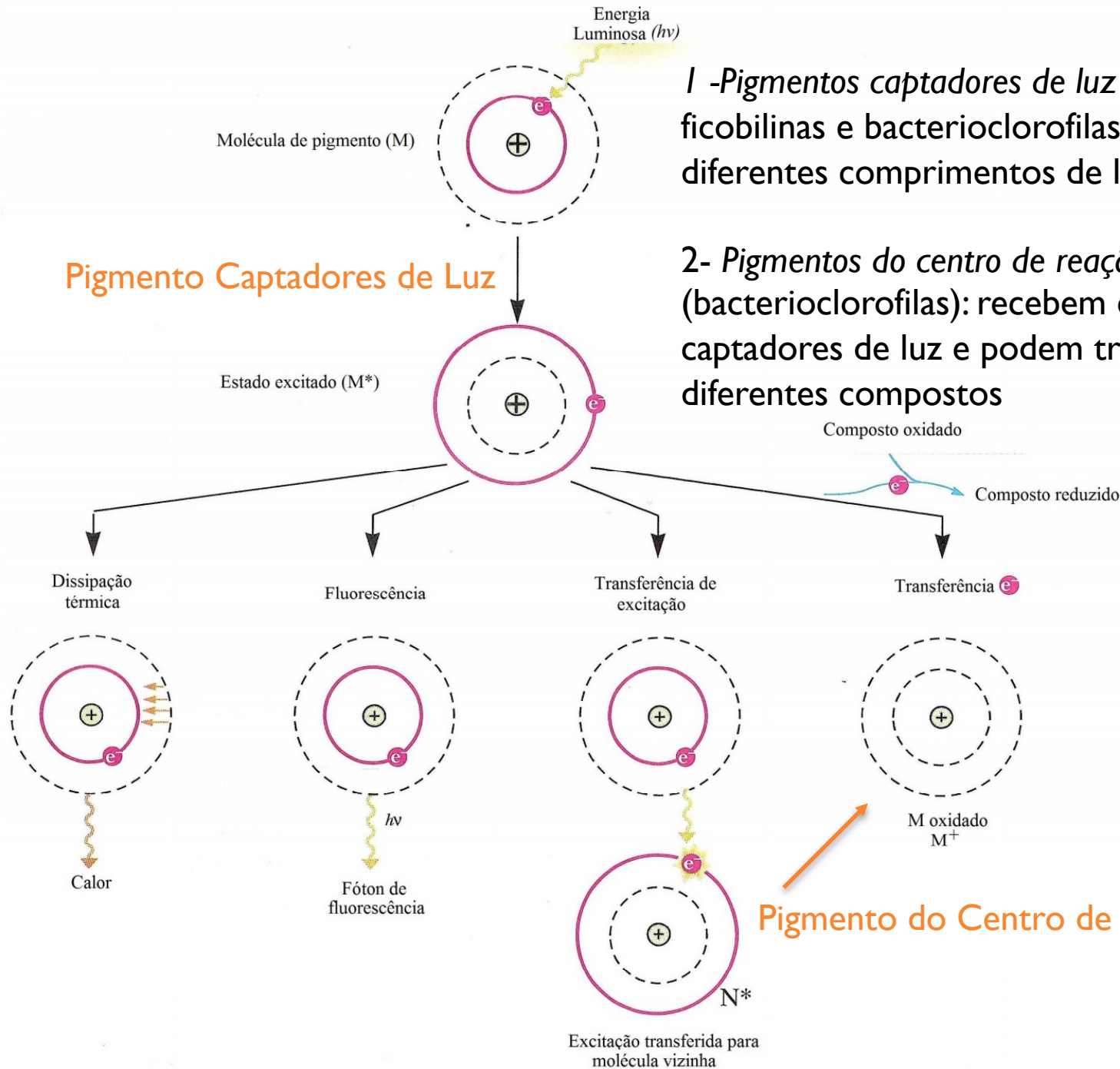
# Pigmentos Fotossensíveis

- Clorofila-a e Feofitinas encontradas apenas nas cianobactérias;
- Bacterioclorofilas e Bacteriofeofitinas, encontradas nas bactérias.



	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
Clorofila a	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	 CH <sub>2</sub>
Clorofila b	-CH=CH <sub>2</sub>	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{H} \end{array}$	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	
Bacterioclorofila a	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{CH}_3 \end{array}$	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	
Bacterioclorofila b	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{CH}_3 \end{array}$	-CH <sub>3</sub>	=CH-CH <sub>3</sub>	fitil

Feofitinas: o átomo de Mg é substituído por dois prótons



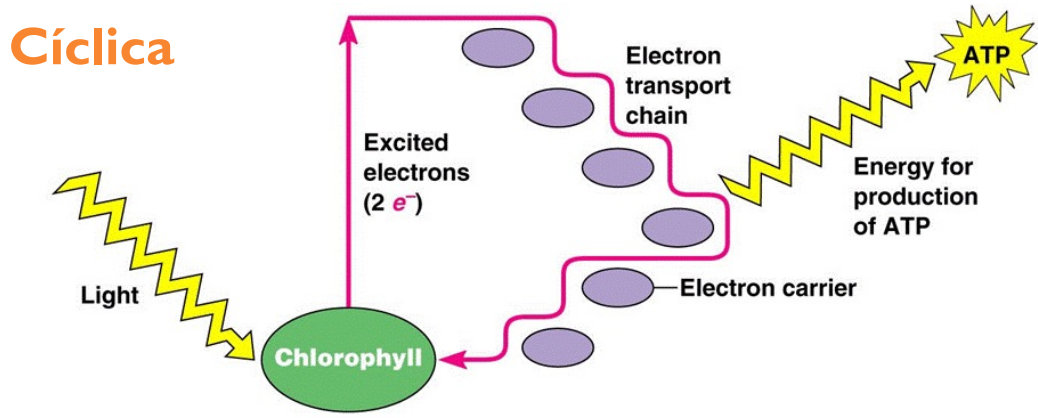
## Pigmento Captadores de Luz

1- **Pigmentos captadores de luz** (carotenoides, ficobilinas e bacterioclorofilas), absorvem luz em diferentes comprimentos de luz;

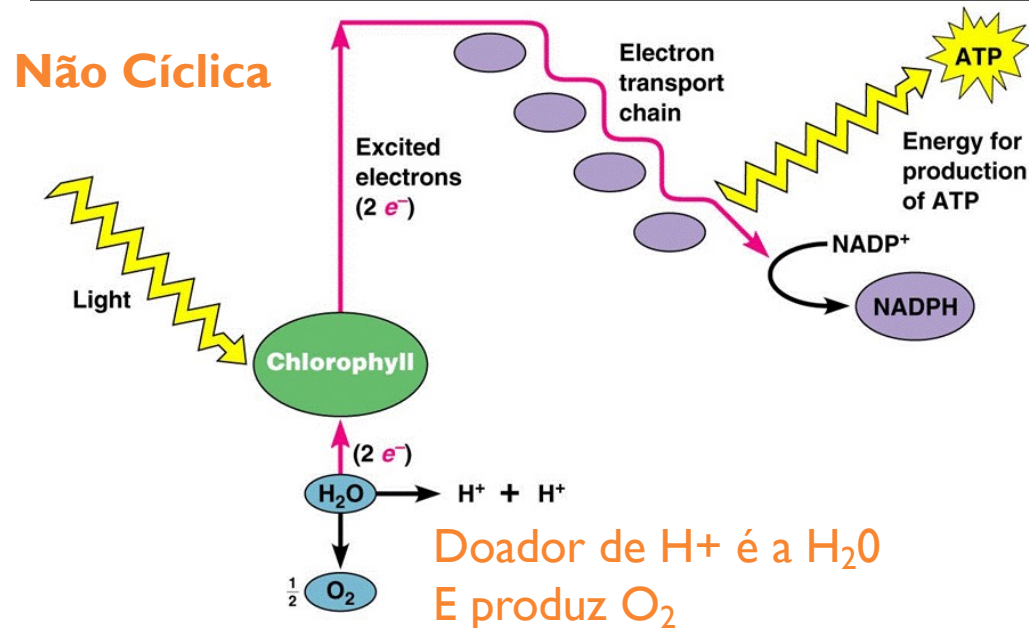
2- **Pigmentos do centro de reação** (bacterioclorofilas): recebem e<sup>-</sup> dos pigmentos captadores de luz e podem transferir e<sup>-</sup> e reduzir diferentes compostos

## Pigmento do Centro de reação

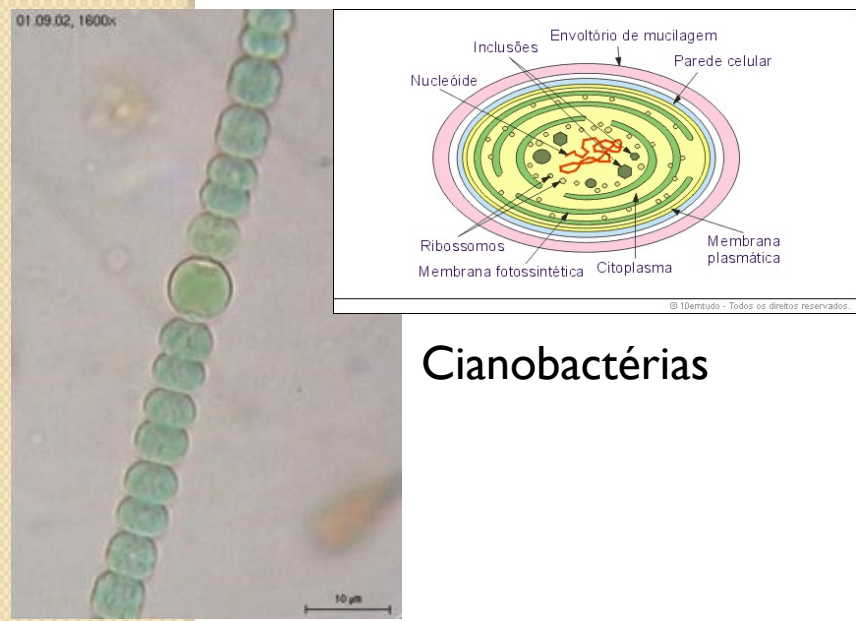
# Fotossíntese: Cadeia de transporte de elétrons na membrana, Respiração:



(a) Cyclic photophosphorylation



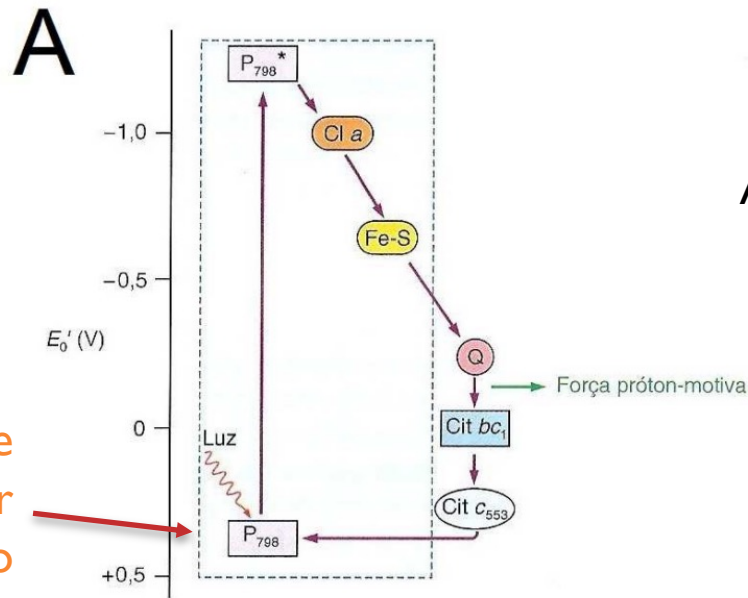
(b) Noncyclic photophosphorylation



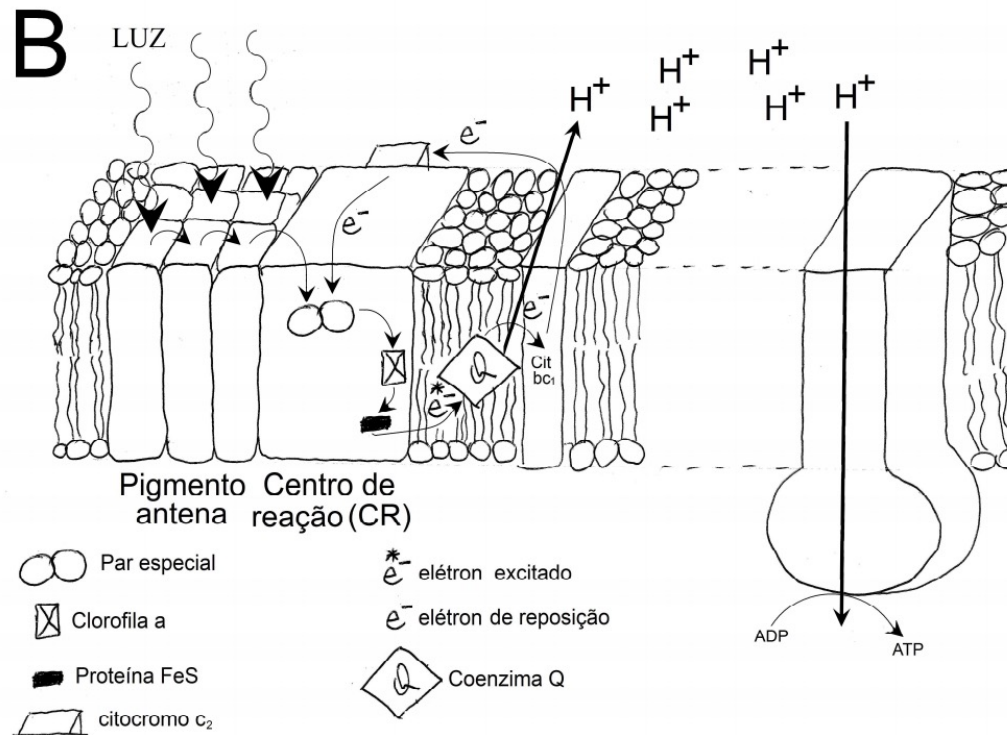
Cianobactérias

# Fotossíntese: Fosforilação cíclica

Pigmento do Centro de reação é um ótimo receptor final de elétrons quando não excitado.

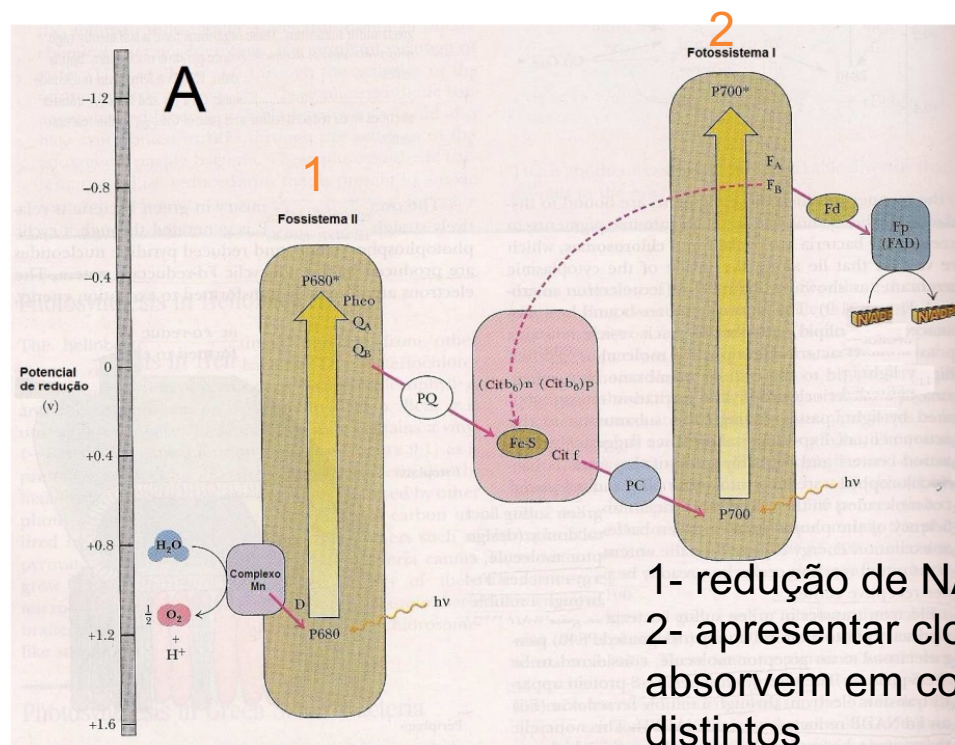


Apenas a participação do  
Fotossistema I



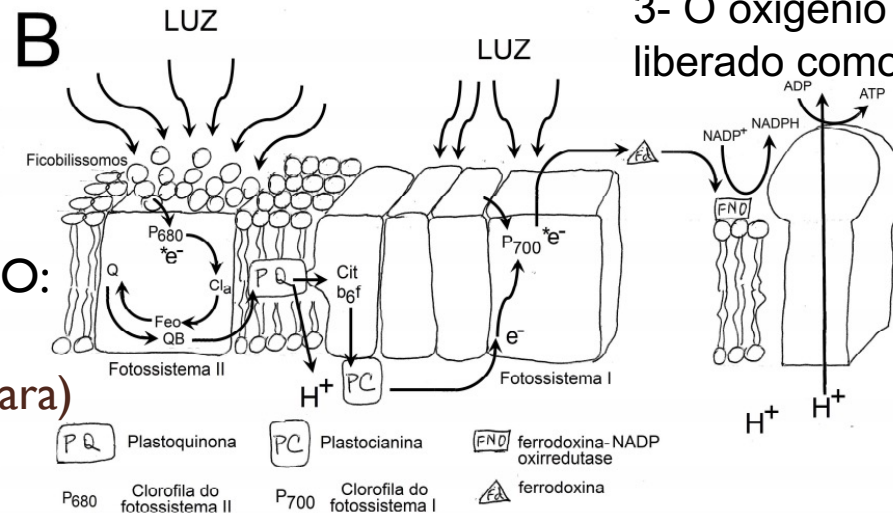
# Fotossíntese: Fosforilação não cíclica

Cianobactérias e  
semelhante à das algas



1- redução de NADP+ para NADPH ;  
2- apresentar clorofilas diferentes, que  
absorvem em comprimentos de onda  
distintos

3- O oxigênio da molécula de água é  
liberado como O<sub>2</sub> (fotossíntese oxigênica)



Protons provindos de H<sub>2</sub>O:  
Formação de H<sup>+</sup> e O<sub>2</sub>  
Fotólise da Água (fase Clara)  
2 H<sub>2</sub>O + 2NADP  
Resultam  
2NADPH<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>

**Figura 3.22.** Fotossíntese não cíclica. A. Esquema de transferência de elétrons considerando os potenciais de redução. B. Disposição na membrana plasmática de componentes da cadeia de transporte de elétrons.

# Fotossíntese

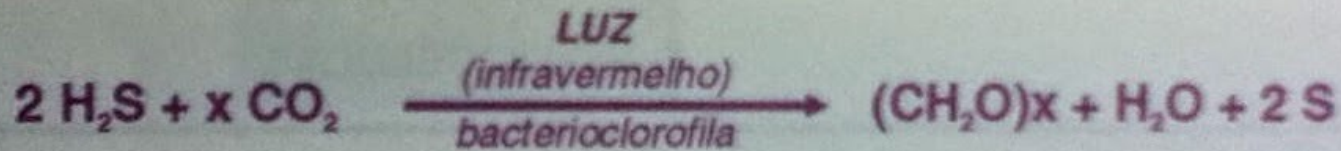
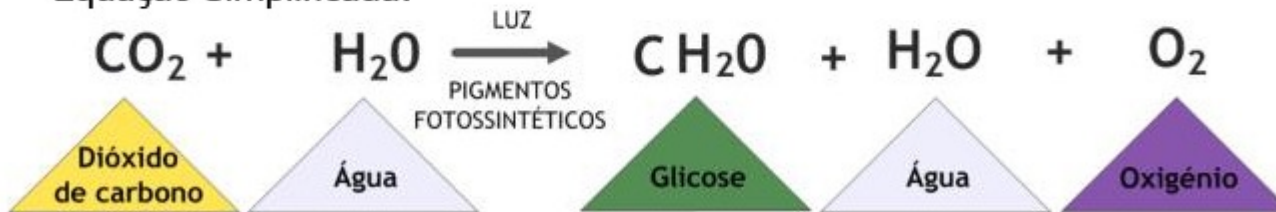
## Plantas, algas e algumas bactérias

Equação Geral:



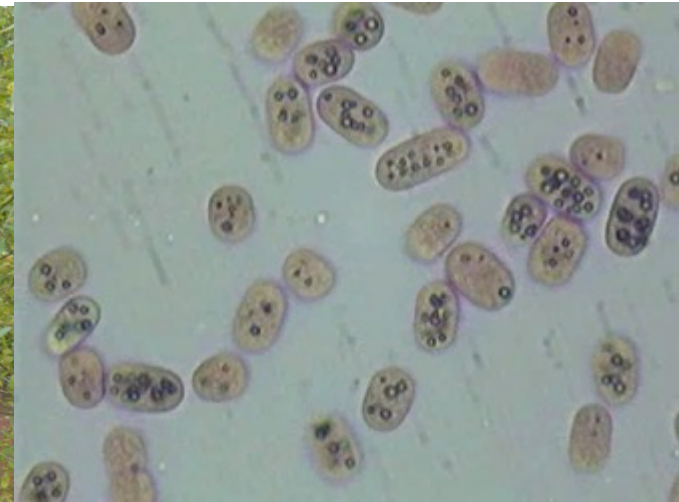
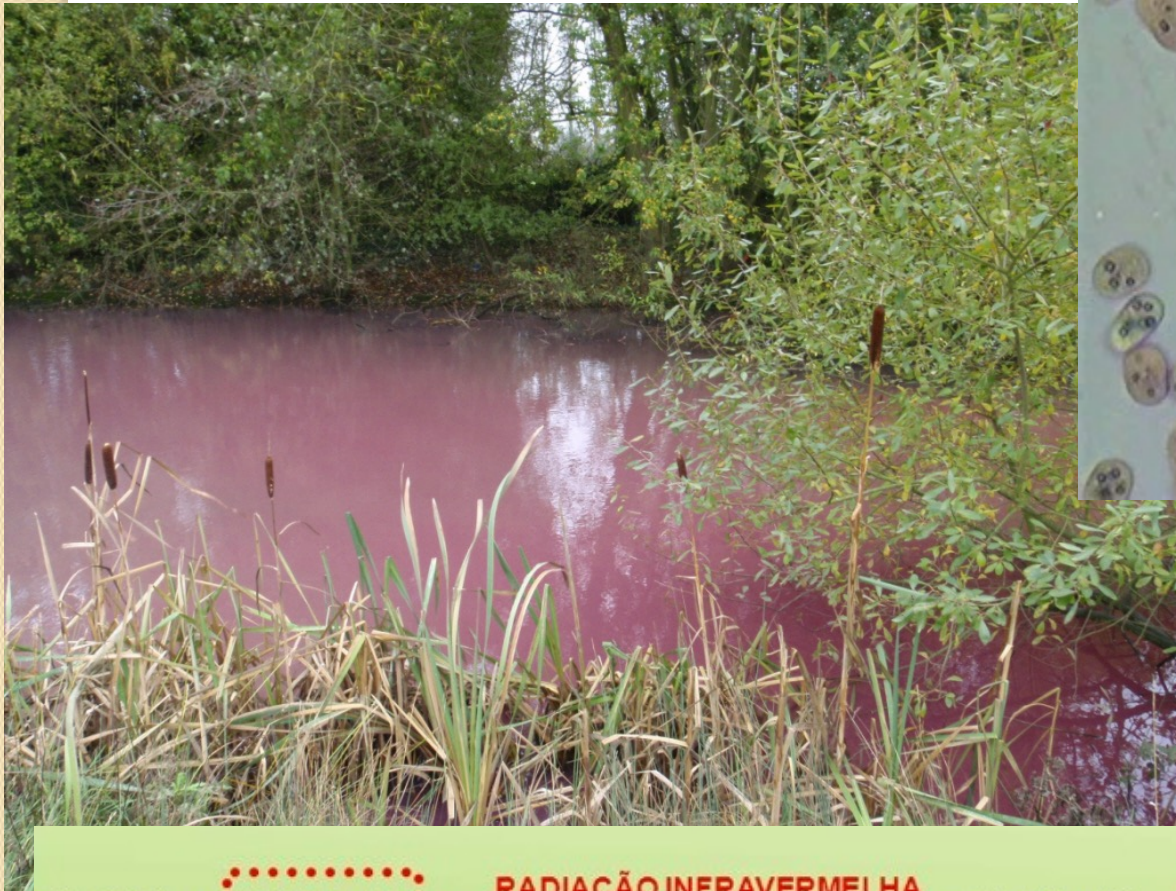
Plantas,  
Algas e  
cianobactérias

Equação Simplificada:



Bactérias  
púrpuras e  
verdes do  
enxofre

# Bactérias púrpuras: proteobactérias



(*Chromatium okenii*)  
fotoheterotrófico



↓  
Não utilizam água  
como substrato  
doador de H

↓  
Não liberam  
oxigênio



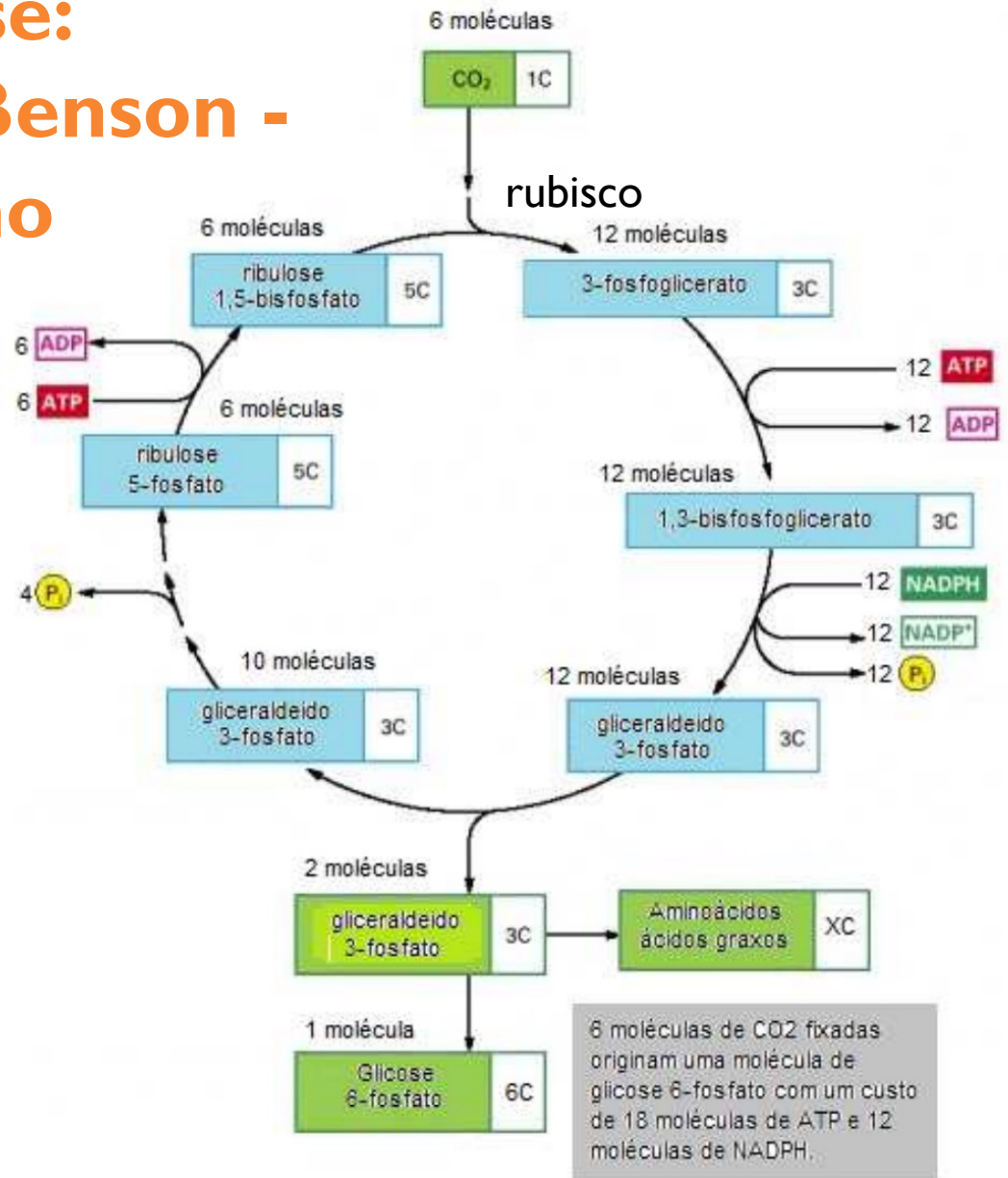


Como ocorre a transformação de CO<sub>2</sub> para compostos mais complexos?

# Fotossíntese: Ciclo de Kelvin-Benson - Anabolismo

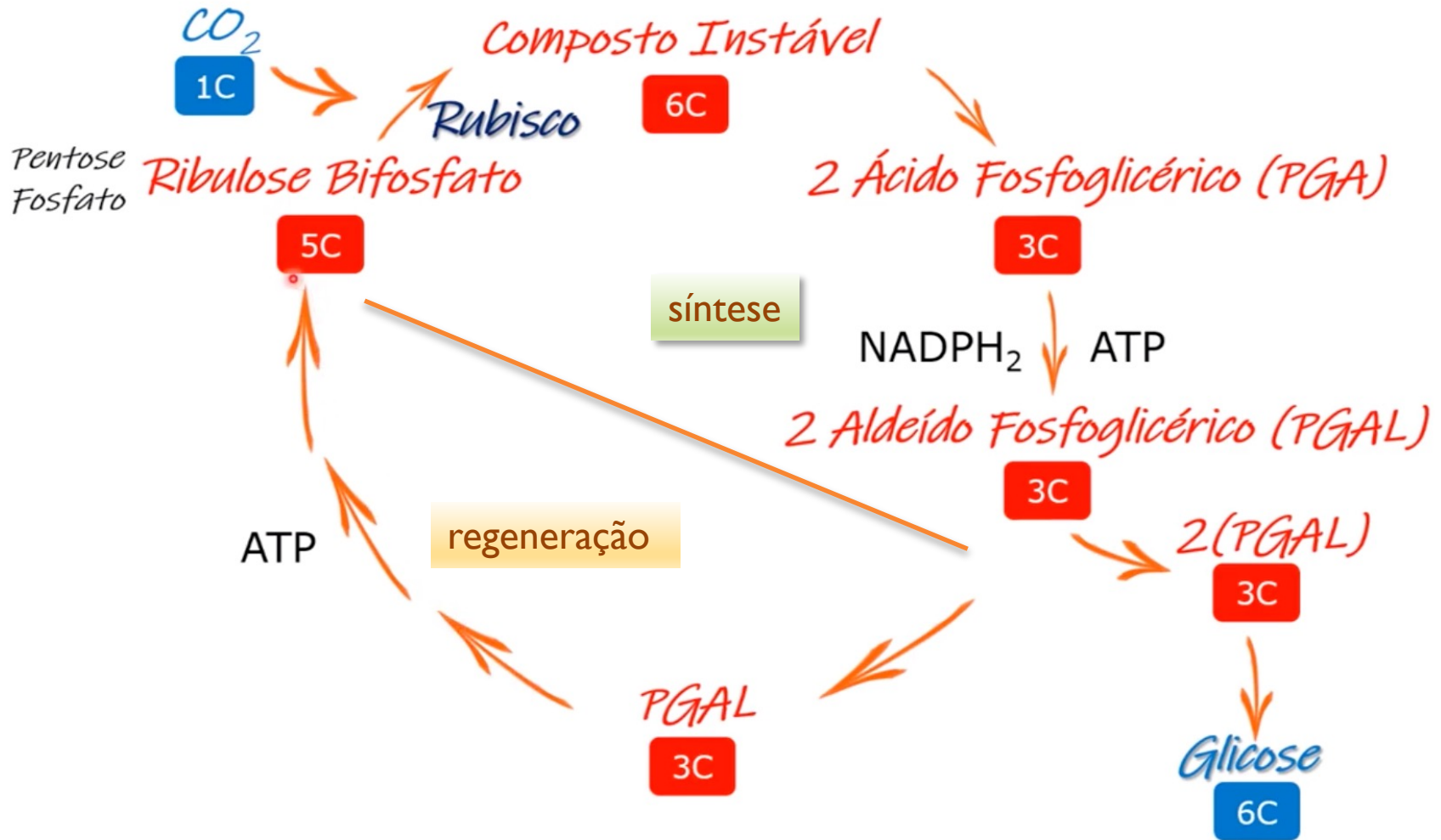
Duas enzimas específicas desta via biossintética:

- ribulose 1,5- bisfosfato carboxilase/oxigenase (rubisco) e;

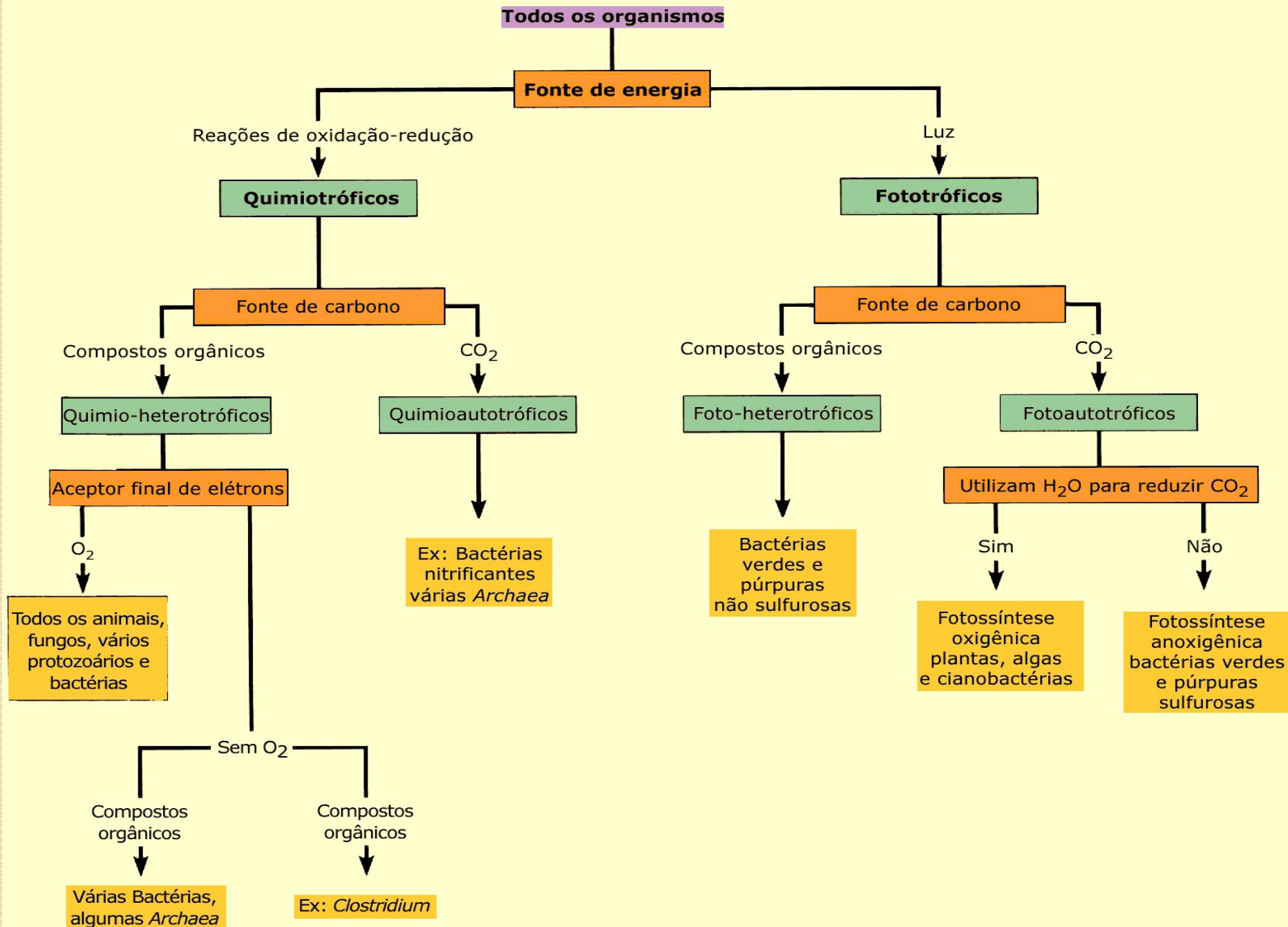


**Figura 3.24.** Fixação de CO<sub>2</sub> pelo Ciclo de Calvin

# CICLO DE CALVIN



# Classificação dos organismos de acordo com os padrões Nutricionais



**Tabela 3.5 – Diversidade metabólica em bactérias fotossintetizantes.**

Produção de O <sub>2</sub>	Tipo	Pigmentos	Doador de elétrons	Fonte de Carbono	Via de fixação de CO <sub>2</sub>	Exemplos
Sim	Cianobactérias	Clorofila a,e b, ficobilinas	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Calvin-Benson	<i>Anabaena</i>
Não	Púrpuras do enxofre	Bacterioclorofila a ou b	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sup>3-</sup> , H <sub>2</sub> ou orgânico	CO <sub>2</sub> ou Orgânico (etanol ou piruvato)	Calvin-Benson	<i>Chromatium</i>
	Púrpuras não-enxofre	Bacterioclorofila a ou b	H <sub>2</sub> , Fe <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> S (não é o principal) ou orgânico	CO <sub>2</sub> ou Orgânico (succinato/ malato)	Calvin-Benson	<i>Rhodopseudomonas</i> <i>Rhodobacter</i> <i>Rhodospirillum</i>
	Verdes do enxofre	Bacterioclorofila a+ c,d ou e	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sup>2-</sup> O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> ou orgânico	CK reductivo	<i>Chlorobium</i>
	Verdes não-enxofre	Bacterioclorofila a+ c ou d	H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> ou orgânico	CO <sub>2</sub> ou orgânico	Outras vias	<i>Chloroflexus</i>
	Heliobactérias	Bacterioclorofila g	orgânico	orgânico	Não fixam	<i>Heliobacterium</i>

# Diversidade Catabólica em Microrganismos

