

METABOLISMO DOS CARBOIDRATOS

Renato Massaharu Hassunuma • Patrícia Carvalho Garcia • Sandra Heloísa Nunes Messias



METABOLISMO DOS CARBOIDRATOS

Prof. Dr. Renato Massaharu Hassunuma
*Professor Titular do Curso de Biomedicina da
Universidade Paulista – UNIP, Câmpus Bauru*

Prof.^a Dr.^a Patrícia Carvalho Garcia
*Coordenadora Auxiliar do Curso de Biomedicina da
Universidade Paulista – UNIP, Câmpus Bauru*

Prof.^a Dr.^a Sandra Heloísa Nunes Messias
*Coordenadora Geral do Curso de Biomedicina da
Universidade Paulista – UNIP*

1^a Edição / 2023
Bauru, SP



© Renato Massaharu Hassunuma.

Conselho Editorial

ENF. ESP. FÁBIO APARECIDO DA SILVA

Especialista em Enfermagem em UTI Neonatal e em Ginecologia e Obstetrícia pela Faculdade de São Marcos – FACSM.

BIOMÉDICA ESP. MARYANA LOURENÇO BASTOS DO NASCIMENTO

Especialista em Bacteriologia Clínica pela Faculdade Metropolitana do Estado de São Paulo (FAMEESP).

Capa e Design

PROF. DR. RENATO MASSAHARU HASSUNUMA

Créditos da foto da capa, folha de rosto, páginas capitulares e contracapa

Fonte: Ewing S. Tasty fresh chocolate macarons on table [Internet]. 2018 Aug 22 [acesso 08 set 2023]. Disponível em: <https://www.pexels.com/photo/tasty-fresh-chocolate-macarons-on-table-4600638/>. Figura registrada como: *Free to use. Attribution is not required.*

Catálogo na Publicação (CIP)
(BENITEZ Catalogação Ass. Editorial, MS, Brasil)

H284m Hassunuma, Renato Massaharu
1.ed. Metabolismo dos carboidratos [livro eletrônico] / Renato Massaharu
Hassunuma, Patrícia Carvalho Garcia, Sandra Heloísa Nunes Messias. –
1ª ed. - Bauru: Canal 6, 2023.
PDF

Bibliografia.
ISBN 978-85-7917-625-8
DOI 10.52050/9788579176258

1. Carboidratos na nutrição humana. 2. Carboidratos – Metabolismo.
I. Garcia, Patrícia Carvalho. II. Messias, Sandra Heloísa Nunes. III.
Título.

12-2023/01

CDD 613.283

Índice para catálogo sistemático:

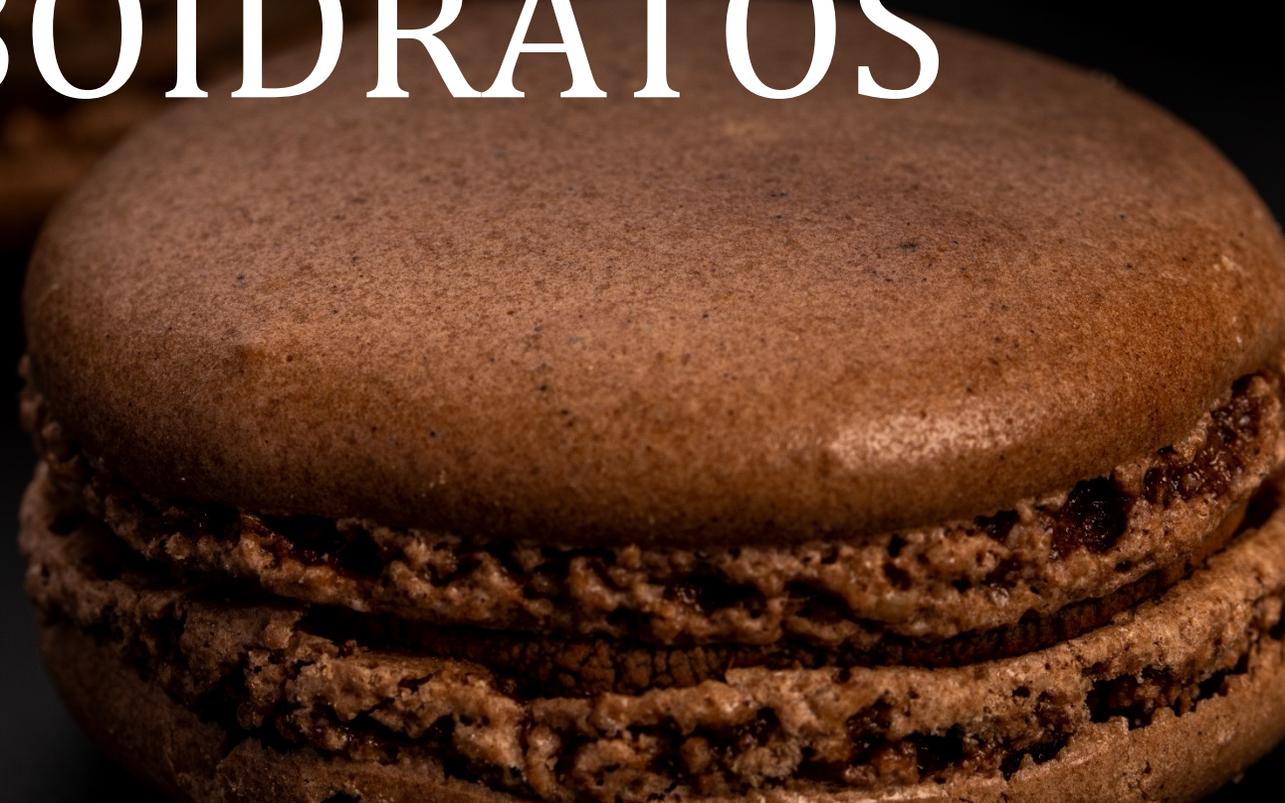
1. Metabolismo : Carboidratos : Nutrição aplicada : Ciências médicas 613.283

Bibliotecária : Aline Grazielle Benitez CRB-1/3129

Sumário

Lista de abreviaturas	06
1. Digestão do amido	07
2. Digestão de dissacarídeos	08
3. Glicólise	09
4. Descarboxilação oxidativa	10
5. Ciclo do ácido cítrico, dos ácidos tricarboxílicos ou de Krebs	11
6. Cadeia respiratória ou transportadora de elétrons e fosforilação oxidativa	12
7. Reações da cadeia respiratória ou transportadora de elétrons	13
8. Glicólise anaeróbica ou fermentação	14
9. Via das pentoses fosfato	15
10. Glicogenólise	16
11. Glicogênese ou glicogenogênese	17
12. Gliconeogênese	18
13. Via glicose-lactato-glicose ou ciclo de Cori	19
Referências e sugestões de leitura	20

METABOLISMO DOS CARBOIDRATOS



Lista de abreviaturas

 : reação irreversível

 : reação reversível

 : linha tracejada preta ou vermelha indica representação simplificada de uma reação

⊕ : enzima regulatória ou marcapasso

(-): ação inibitória

(+): ação ativadora

(e⁻): elétron

ADP: adenosina difosfato

ATP: adenosina trifosfato

b: citocromo b

b heme b_L: grupo heme b_L do citocromo b

b heme b_H: grupo heme b_H do citocromo b

c: citocromo c

c₁: citocromo c₁

CO₂: dióxido de carbono

CoA: coenzima A

Cu_A/Cu_A: centro cobre A-cobre A

FAD: flavina adenina dinucleotídeo no estado oxidado

FADH₂: flavina adenina dinucleotídeo no estado reduzido

Fe-S: centro ferro enxofre

Fe²⁺-S: centro ferro enxofre no estado reduzido

Fe³⁺-S: centro ferro enxofre no estado oxidado

FMN: flavina mononucleotídeo no estado oxidado

FMNH₂: flavina mononucleotídeo no estado reduzido

GDP: guanosina difosfato

GTP: guanosina trifosfato

H⁺: íon hidrogênio

H₂O: água

heme a: grupo heme a

heme a₃-Cu_B: grupo heme a₃-cobre B

HS-CoA: coenzima A, sendo que esta abreviatura destaca o grupamento tiol (-SH)

Pi: fosfato inorgânico

PPi: pirofosfato

NAD⁺: nicotinamida adenina dinucleotídeo no estado oxidado

NADH: nicotinamida adenina dinucleotídeo no estado reduzido

NADP⁺: nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato no estado oxidado

NADPH: nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato no estado reduzido

NDP: ADP ou GDP

NTP: ATP ou GTP

O₂: dioxigênio

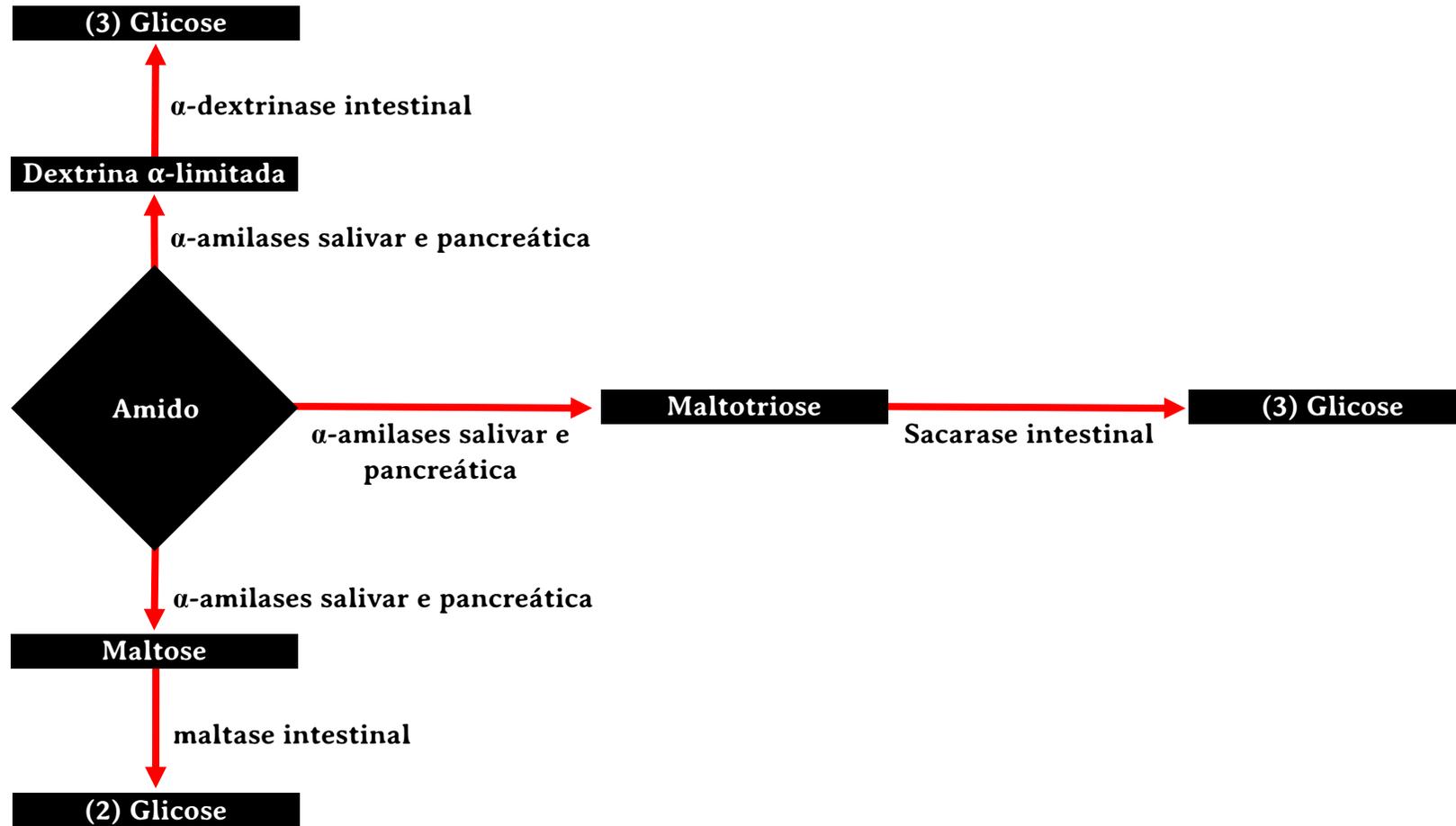
Q: coenzima Q no estado oxidado

QH₂: coenzima Q no estado reduzido

RNA: ácido ribonucleico

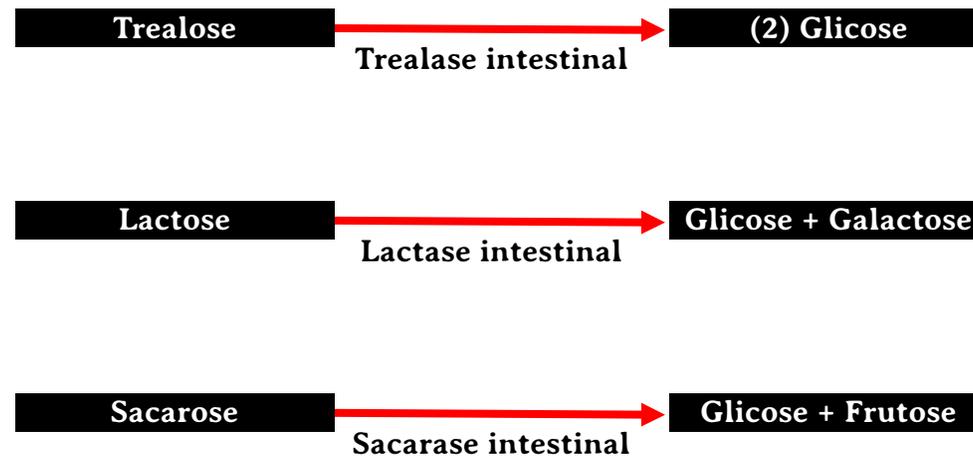
1. Digestão do amido

Local onde ocorre: interior do tubo digestório



2. Digestão de dissacarídeos

Local onde ocorre: interior do tubo digestório

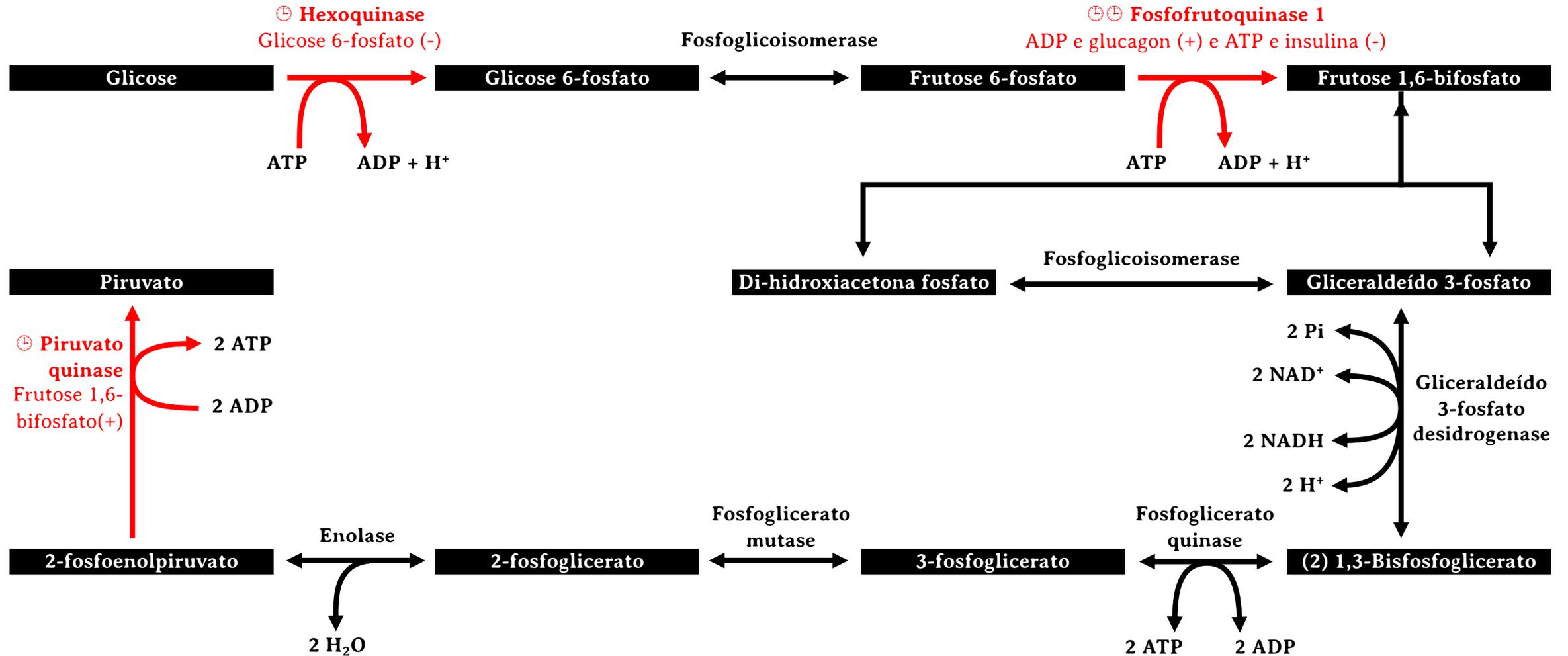


3. Glicólise

Local onde ocorre: citosol

Equação geral: $\text{Glicose} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + 2 \text{ NAD}^+ \rightarrow 2 \text{ Piruvato} + 2 \text{ ATP} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ NADH} + 2 \text{ H}^+$

Rendimento energético: 2 ATP + 2 NADH

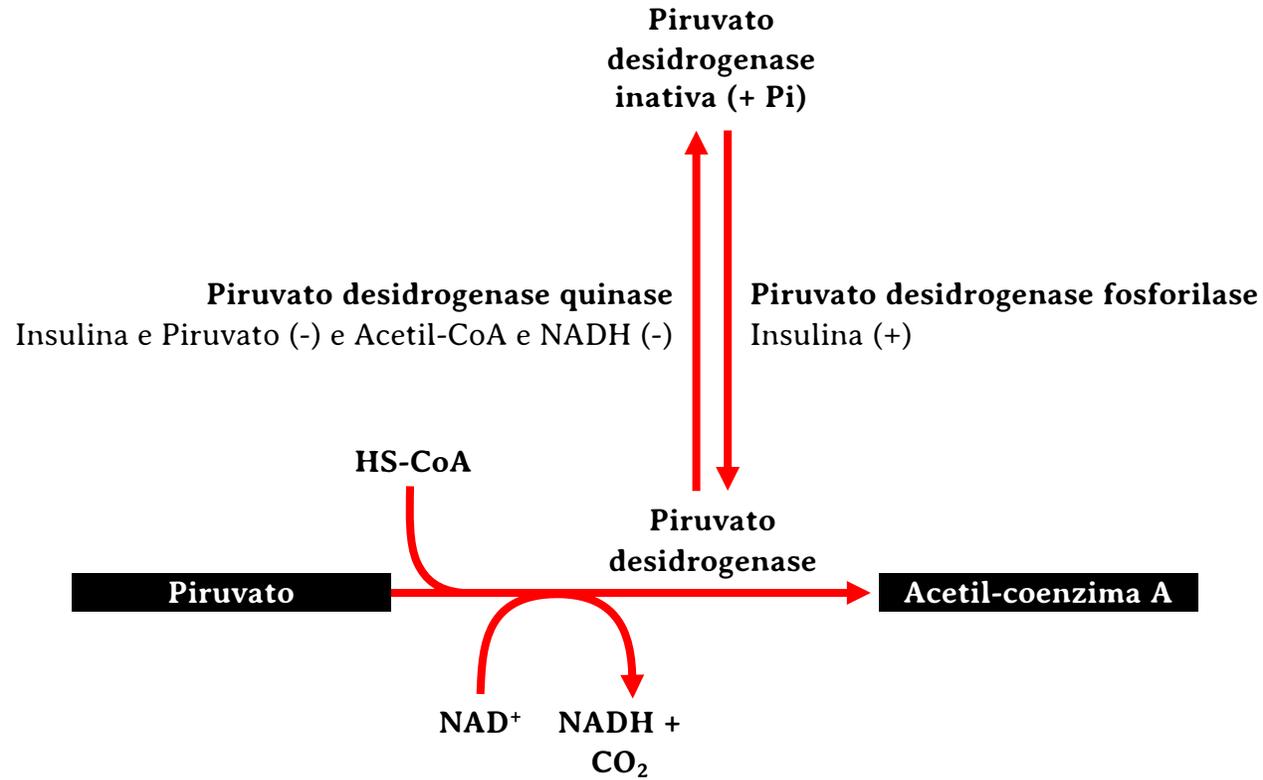


4. Descarboxilação oxidativa

Local onde ocorre: início no citosol e término na matriz mitocondrial.

Equação geral: Piruvato + Coenzima A + NAD^+ \rightarrow Acetil-coenzima A + $\text{NADH} + \text{CO}_2$

Rendimento energético: 1 NADH

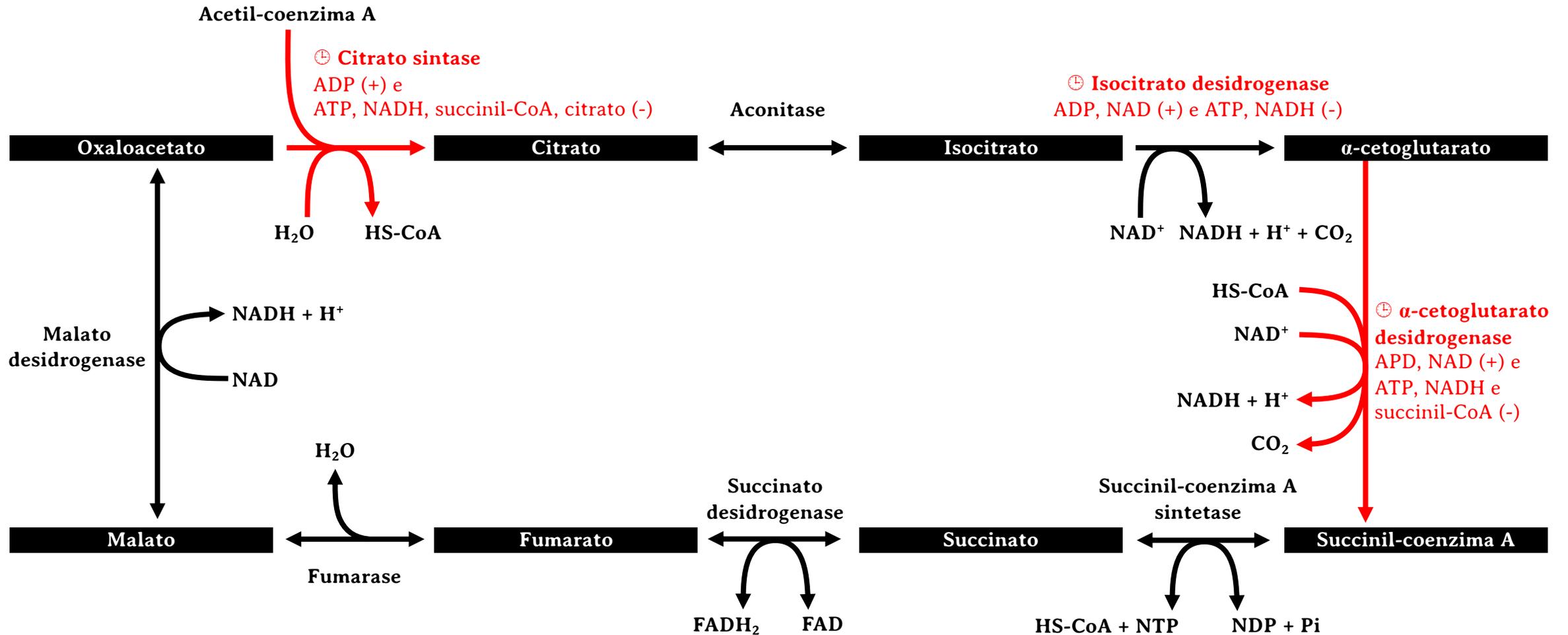


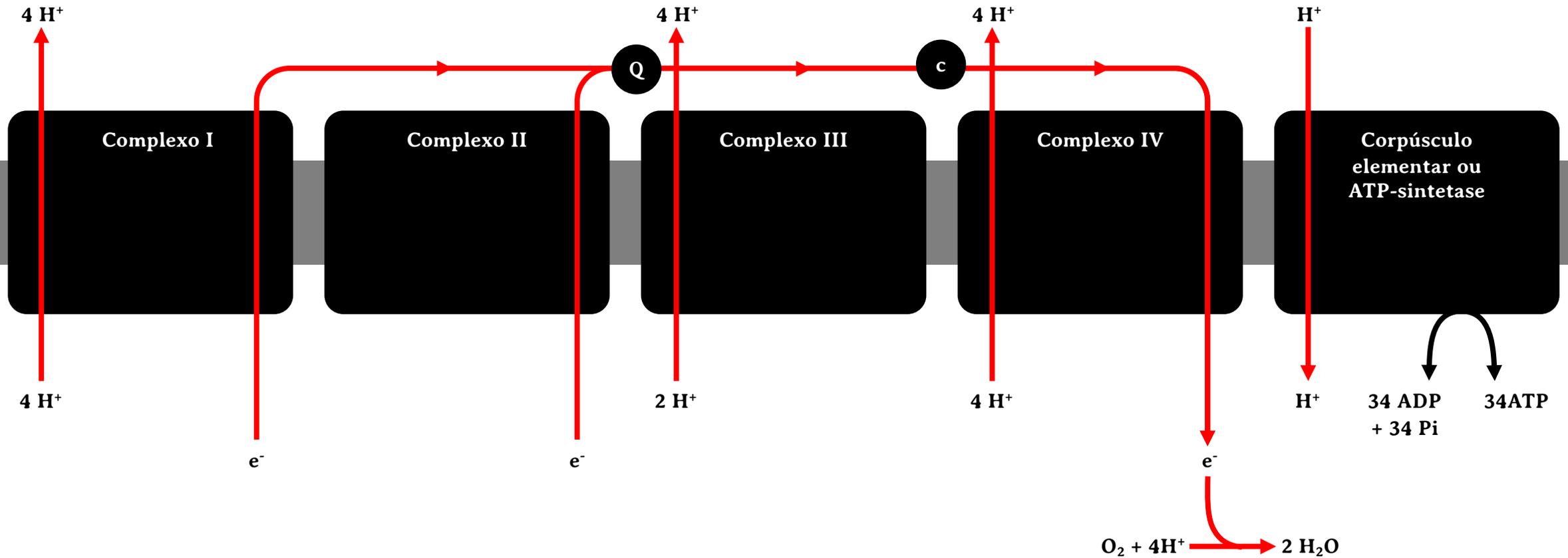
5. Ciclo do ácido cítrico, dos ácidos tricarboxílicos ou de Krebs

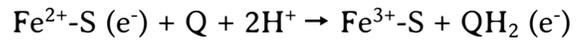
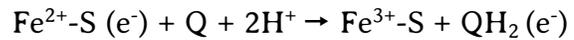
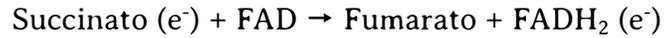
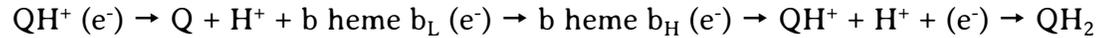
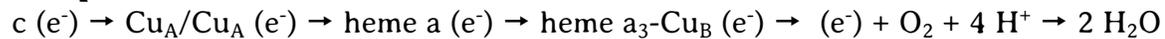
Local onde ocorre: matriz mitocondrial

Equação geral: Acetil-coenzima A + 3 NAD⁺ + FAD + NDP + Pi + 2 H₂O → Coenzima A + 3 NADH + 3 H⁺ + FADH₂ + NTP (ATP ou GTP) + 2 CO₂

Rendimento energético: 2 NTP + 6 NADH + 2 FADH₂



6. Cadeia respiratória ou transportadora de elétrons e fosforilação oxidativa**Local onde ocorre:** membrana mitocondrial interna**Rendimento energético:** 34 ATP

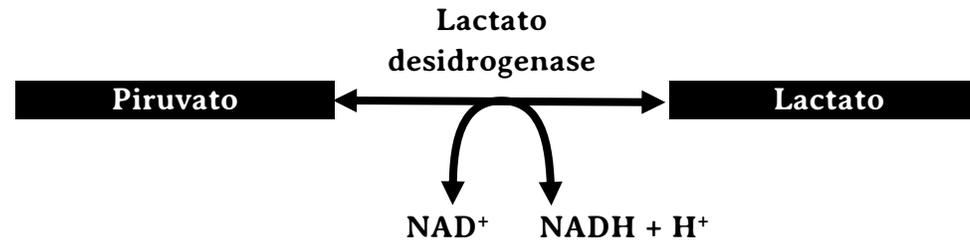
7. Reações da cadeia respiratória ou transportadora de elétrons**Complexo I:****Complexo II:****Complexo III:****Complexo IV:**

8. Glicólise anaeróbica ou fermentação

Conceito: via alternativa de utilização do piruvato

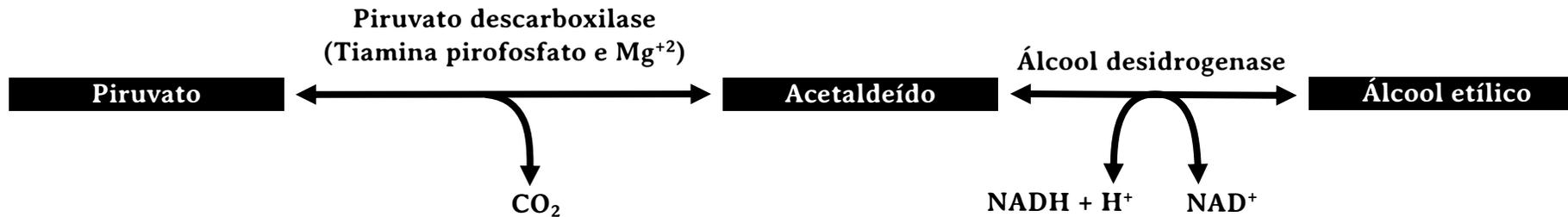
8.1. Fermentação láctica

Local onde ocorre: algumas espécies de bactérias, hemácias, células musculares em condições de oxigenação insuficiente e na produção de alguns tipos de derivados do leite



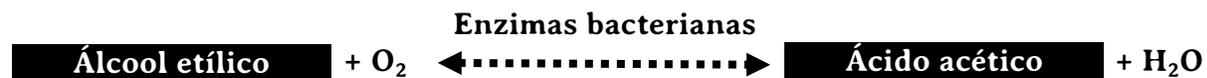
8.2 Fermentação alcoólica

Local onde ocorre: em alguns tipos de bactérias e leveduras, bem como na produção de pães e vinhos



8.3 Fermentação acética

Local onde ocorre: em acetobactérias da família *Pseudomonaceae*, bem como na produção de vinagre e ácido acético industrial; e na fermentação intestinal que ocorre em indivíduos com intolerância à lactose



9. Via das pentoses fosfato

Conceito: via alternativa da oxidação da glicose, que ocorre em situações de altos índices glicêmicos. Ocorre a produção de NADPH utilizado na síntese de ácidos graxos e esteroides

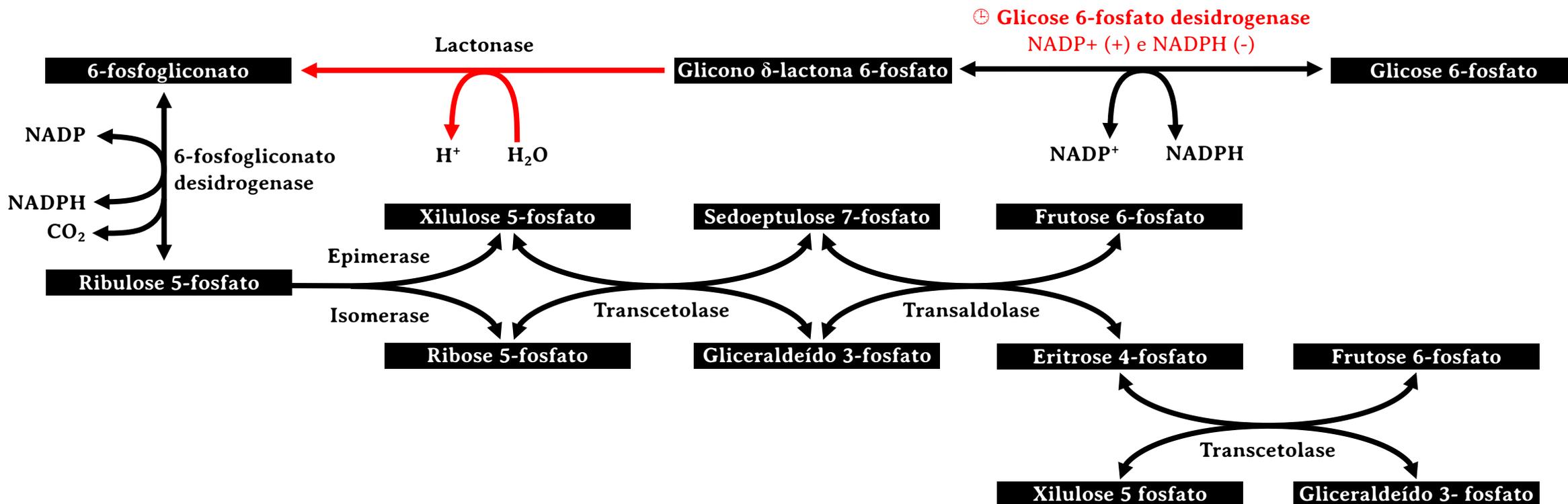
Local onde ocorre: citosol

Fases da via: fase oxidativa (da glicose 6-fosfato até a ribulose 5-fosfato) e não oxidativa (a partir da ribulose 5-fosfato)

Equação geral: Glicose 6-fosfato + 2 NADP⁺ + H₂O → Ribose 5-fosfato + 2 NADPH + CO₂

Rendimento energético: 2 NADPH

Outros produtos de interesse: ribose 5-fosfato, que corresponde à pentose do RNA e de coenzimas como NAD, NADP, FAD, FMN, HS-CoA, ATP, GTP



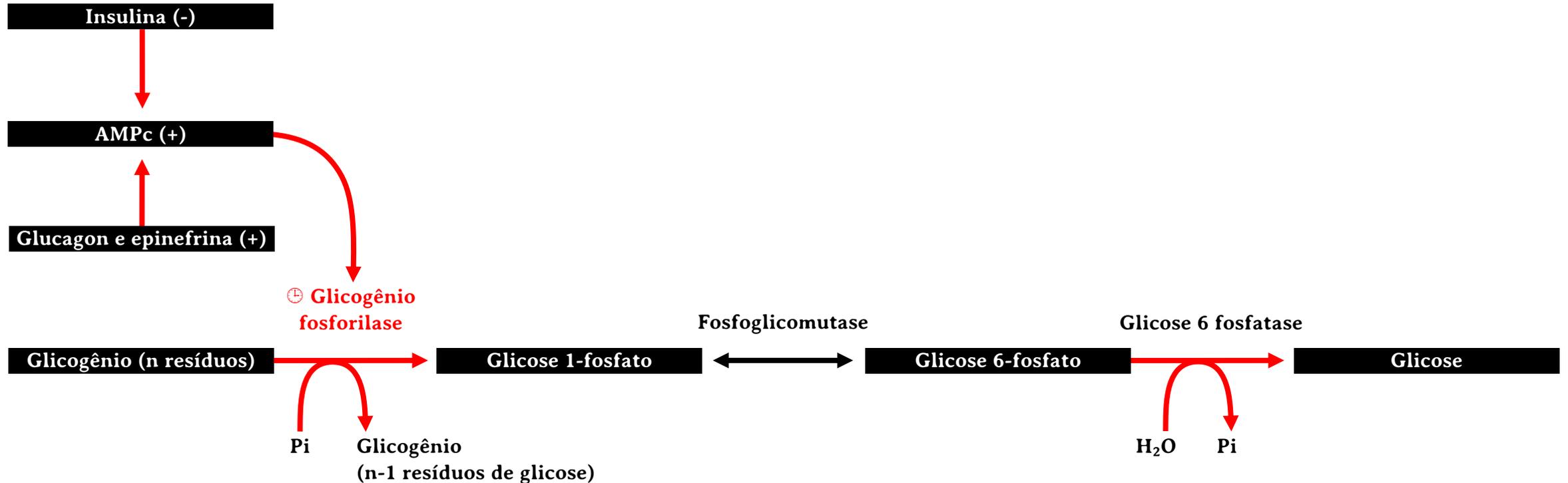
10. Glicogenólise

Conceito: degradação do glicogênio

Local onde ocorre: citosol

Equação geral: Glicogênio (n resíduos de glicose) → Glicogênio (n-1 resíduos de glicose) + glicose

Desramificação: ocorre pela ação das enzimas glicosiltransferase (que remove os últimos 2º, 3º e 4º resíduos de uma ramificação) e α -1,6 glicosidase (remove o último resíduo de uma ramificação), sendo que estas não estão representadas abaixo.



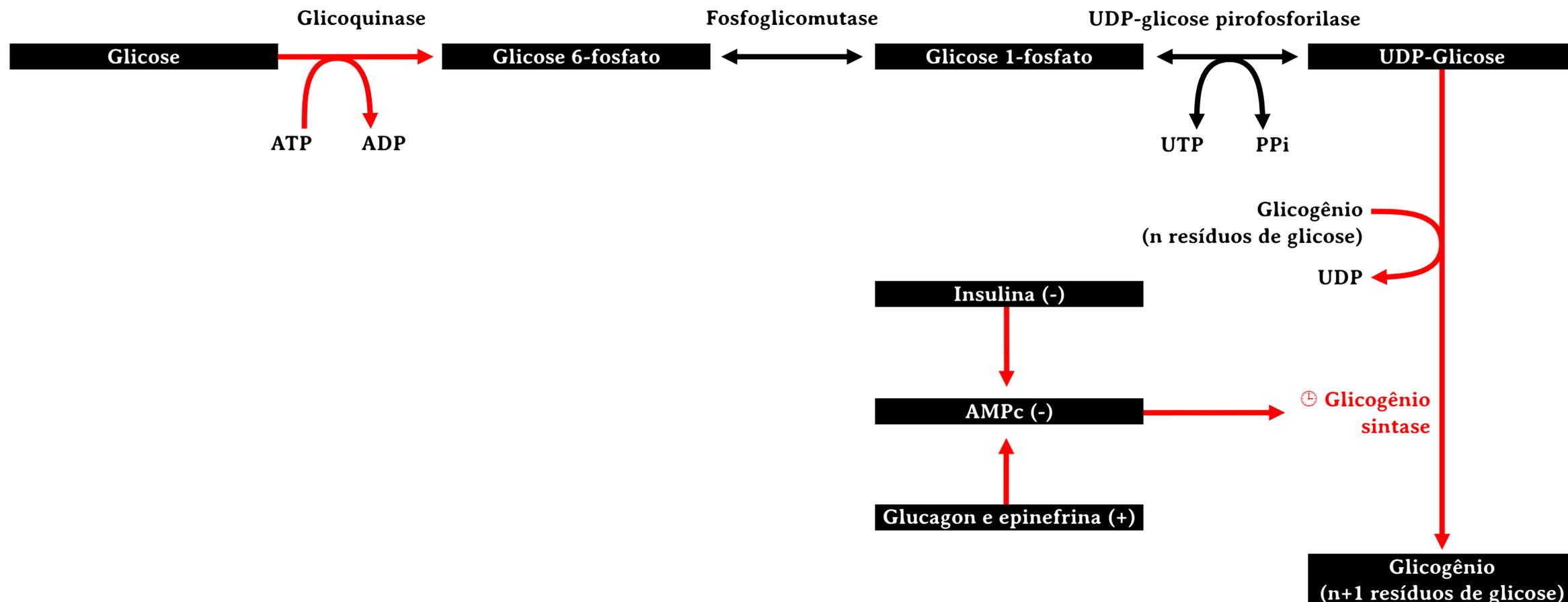
11. Glicogênese ou glicogenogênese

Conceito: síntese de glicogênio

Local onde ocorre: citosol

Equação geral: Glicogênio (n resíduos de glicose) + glicose → Glicogênio (n+1 resíduos de glicose)

Ramificação: ocorre pela ação da enzima ramificadora (que transfere os últimos 6 a 7 resíduos de glicose para uma parte mais interna do glicogênio), sendo que esta não está representada abaixo.



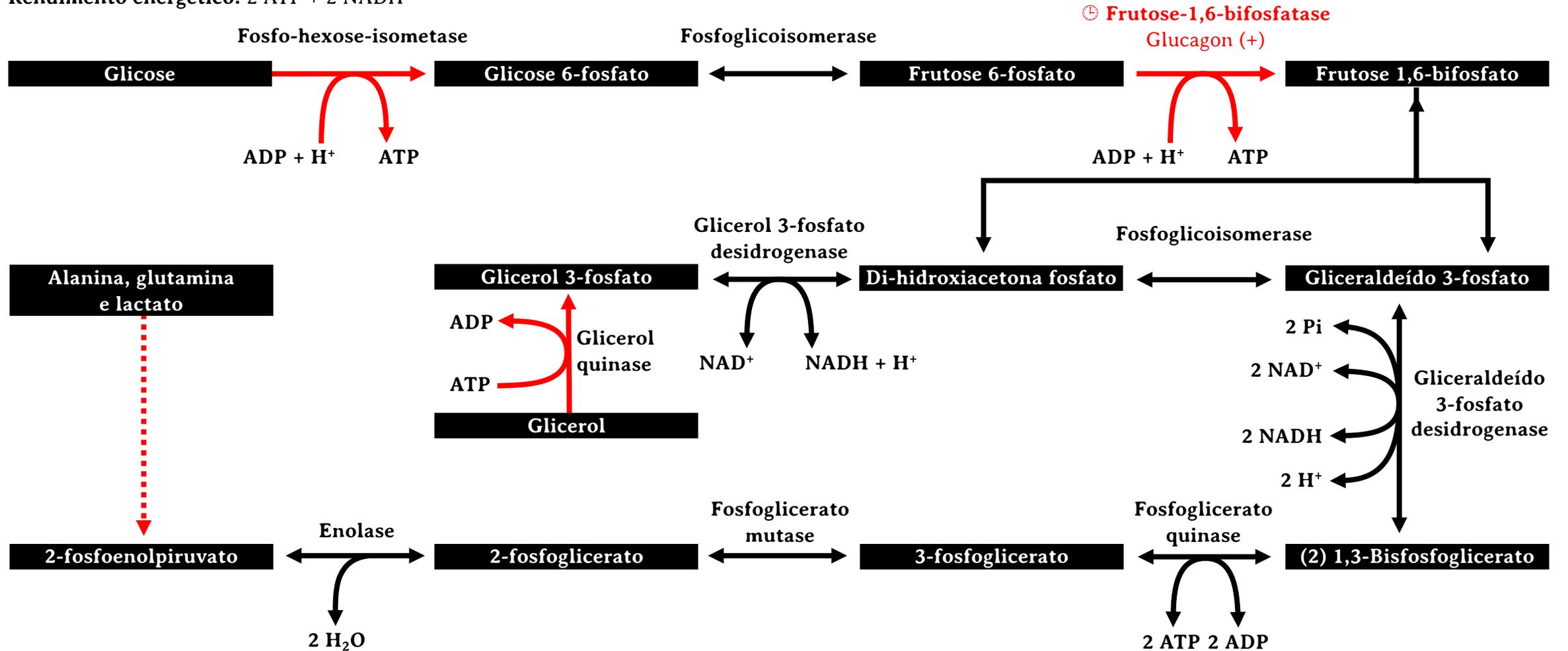
12. Gliconeogênese

Conceito: síntese de glicose a partir de compostos não anglicanos, ou seja, não carboidratos

Local onde ocorre: citosol

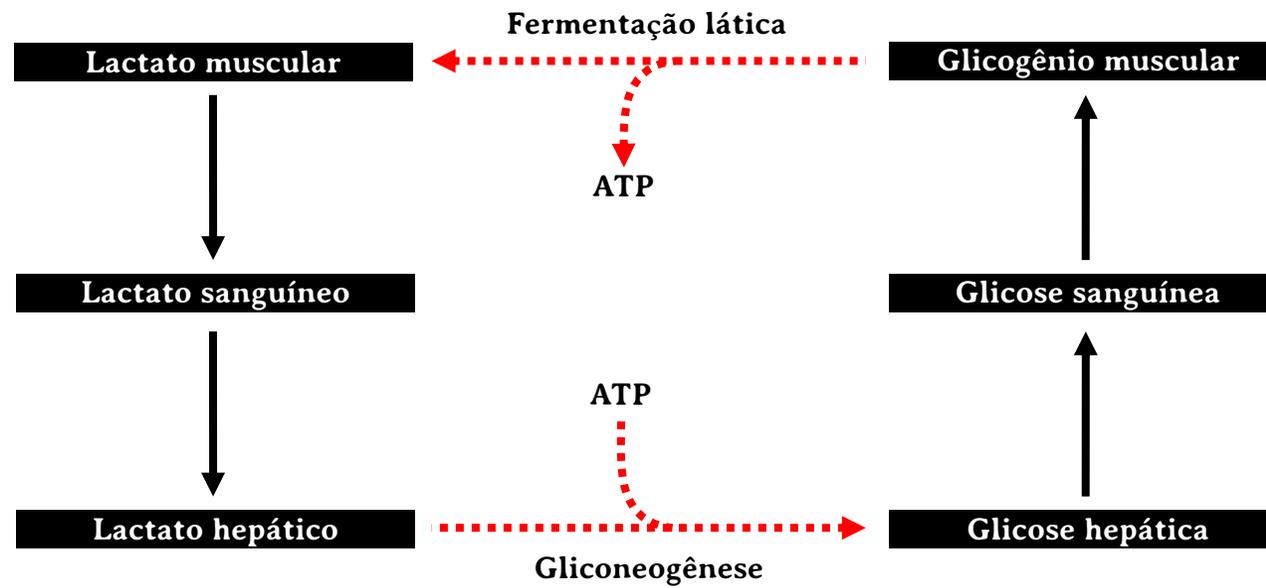
Equação geral: $\text{Glicose} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + 2 \text{ NAD}^+ \rightarrow 2 \text{ Piruvato} + 2 \text{ ATP} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ NADH} + 2 \text{ H}^+$

Rendimento energético: 2 ATP + 2 NADH



13. Via glicose-lactato-glicose ou ciclo de Cori

Conceito e locais onde ocorre: conversão da glicose em lactato, produzido em tecidos musculares durante um período de privação de oxigênio, seguida da conversão do lactato em glicose, no fígado



Referências e sugestões de leitura

- Baynes JW. Armazenamento e síntese de carboidratos no fígado e no músculo. In: Baynes JW, Dominiczak MH. Bioquímica médica. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2010. Capítulo 13; p. 155-71.
- Baynes JW. Metabolismo anaeróbico da glicose nos eritrócitos. In: Baynes JW, Dominiczak MH. Bioquímica médica. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2010. Capítulo 12; p. 143-54.
- Baynes JW. Metabolismo oxidativo de lipídios no fígado e no músculo. In: Baynes JW, Dominiczak MH. Bioquímica médica. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2010. Capítulo 15; p. 185-93.
- Bender DA, Mayes PA. Glicólise e oxidação do piruvato. In: Rodwell VW, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Weil PA. Bioquímica ilustrada de Harper. 30ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2017. Capítulo 17; p. 168-75.
- Bender DA, Mayes PA. Gliconeogênese e o controle da glicemia. In: Rodwell VW, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Weil PA. Bioquímica ilustrada de Harper. 30ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2017. Capítulo 19; p. 185-95.
- Bender DA, Mayes PA. Metabolismo do glicogênio. In: Rodwell VW, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Weil PA. Bioquímica ilustrada de Harper. 30ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2017. Capítulo 18; p. 176-84.
- Bender DA, Mayes PA. O ciclo do ácido cítrico: a via central do metabolismo de carboidratos, de lipídeos e de aminoácidos. In: Rodwell VW, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Weil PA. Bioquímica ilustrada de Harper. 30ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2017. Capítulo 16; p. 161-7.
- Bender DA, Mayes PA. Via das pentoses-fosfato e outras vias do metabolismo das heoxes. In: Rodwell VW, Bender DA, Botham KM, Kennelly PJ, Weil PA. Bioquímica ilustrada de Harper. 30ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2017. Capítulo 20; p. 196-209.
- Campbell MK, Farrell SO. Bioquímica. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning; 2017. Capítulo 17. Glicólise; p. 481-510.
- Campbell MK, Farrell SO. Bioquímica. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning; 2017. Capítulo 18. Mecanismos de armazenamento e controle no metabolismo de carboidratos; p. 511-38.
- Campbell MK, Farrell SO. Bioquímica. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning; 2017. Capítulo 19. Ciclo do ácido cítrico; p. 539-68.

- Campbell MK, Farrell SO. Bioquímica. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning; 2017. Capítulo 20. Transporte de elétrons e fosforilação oxidativa; p. 569-92.
- Campos LS. Entender a Bioquímica. 5ª ed. Lisboa: Escolar Editora; 2009. Capítulo 4. Glúcidos: estruturas e metabolismo. Aspectos da regulação metabólica; p. 241-350.
- Constanzo LS. Fisiologia. 5ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2014. Capítulo 8. Fisiologia gastrointestinal; p. 329-82.
- Goodsell D. Citric acid cycle [Internet]. 2012 [acesso em: 09 set 2023]. Disponível em: <http://pdb101.rcsb.org/motm/154>.
- Goodsell D. Glycolytic enzymes [Internet]. 2004 [acesso em: 09 set 2023]. Disponível em: <http://pdb101.rcsb.org/motm/50>.
- Harvey RA; Ferrier DR. Bioquímica ilustrada. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2012. Capítulo 8. Glicólise; p. 91-108.
- Harvey RA; Ferrier DR. Bioquímica ilustrada. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2012. Capítulo 9. Ciclo do ácido cítrico; p. 109-16.
- Harvey RA; Ferrier DR. Bioquímica ilustrada. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2012. Capítulo 10. Gliconeogênese; p. 117-24.
- Harvey RA; Ferrier DR. Bioquímica ilustrada. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2012. Capítulo 11. Metabolismo do glicogênio; p. 125-36.
- Harvey RA; Ferrier DR. Bioquímica ilustrada. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2012. Capítulo 13. Via das pentoses-fosfato e NADPH; p. 145-56.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 5. Enzimas; p. 54-81.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 9. Metabolismo de carboidratos: glicólise e formação de acetil-CoA; p. 117-27.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 10. Ciclo de Krebs; p. 128-33.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 11. Cadeia de transporte de elétrons e fosforilação oxidativa; p. 134-60.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 12. Metabolismo de carboidratos: via das pentoses fosfato; p. 161-65.

- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 13. Metabolismo de carboidratos: glicogênio, amido, sacarose e lactose; p. 166-74.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 14. Gliconeogênese; p. 175-80.
- Marzzoco A, Torres BB. Bioquímica básica. 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2017. Capítulo 20. Regulação das vias metabólicas principais; p. 286-310.
- Motta VT. Bioquímica. 2ª ed. Rio de Janeiro: MedBook; 2011. Capítulo 10. Digestão e absorção; p. 145-64.
- Motta VT. Bioquímica. 2ª ed. Rio de Janeiro: MedBook; 2011. Capítulo 11. Metabolismo da glicose; p. 165-90.
- Motta VT. Bioquímica. 2ª ed. Rio de Janeiro: MedBook; 2011. Capítulo 12. Metabolismo do glicogênio e gliconeogênese; p. 191-213.
- Motta VT. Bioquímica. 2ª ed. Rio de Janeiro: MedBook; 2011. Capítulo 13. Ciclo do ácido cítrico; p. 215-28.
- Motta VT. Bioquímica. 2ª ed. Rio de Janeiro: MedBook; 2011. Capítulo 14. Fosforilação oxidativa; p. 229-51.
- Nelson C, Cox MM. Princípios de bioquímica de Lehninger. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2014. Capítulo 14. Glicólise, gliconeogênese e a via das pentoses-fosfato; p. 543-85.
- Nelson C, Cox MM. Princípios de bioquímica de Lehninger. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2014. Capítulo 16. Ciclo do ácido cítrico; p. 633-65.
- Nelson C, Cox MM. Princípios de bioquímica de Lehninger. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2014. Capítulo 19. Fosforilação oxidativa e fotofosforilação; p. 731-46.
- Riegel RE. Bioquímica. 4ª ed. São Leopoldo: Editora Unisinos; 2006. Capítulo 5. Metabolismo dos carboidratos; p. 93-141.
- Rizzon LA. Fermentação acética [Internet]. dez. 2006 [acesso 09 set 2023]. Disponível em:
<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Vinagre/SistemaProducaoVinagre/fermentacao.htm>.
- Stillway LW. O ciclo do ácido tricarboxílico. In: Baynes JW, Dominiczak MH. Bioquímica médica. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2010. Capítulo 14; p. 173-84.
- Voet D, Voet JG. Bioquímica. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2013. Capítulo 17, Glicólise; p. 593-637.

Voet D, Voet JG. Bioquímica. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2013. Capítulo 21, O ciclo do ácido cítrico; p. 789-822.

Voet D, Voet JG. Bioquímica. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2013. Capítulo 22, Transporte de elétrons e fosforilação oxidativa; p. 823-70.

Voet D, Voet JG. Bioquímica. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2013. Capítulo 23, Outras rotas para o metabolismo de carboidratos; p. 871-900.

Este livro apresenta de forma ilustrada as principais vias de anabolismo e catabolismo dos carboidratos, indicando para cada uma: um esquema das principais reações químicas com as enzimas que participam, os substratos e os produtos intermediários e finais; o local onde ocorre; a(s) enzima(s) regulatória(s) (incluindo seus inibidores e ativadores); a equação geral; e o rendimento energético. Um prato cheio (de carboidratos) para quem deseja aprender um pouco mais sobre Bioquímica Metabólica.

