

UP13 - Catabolisme

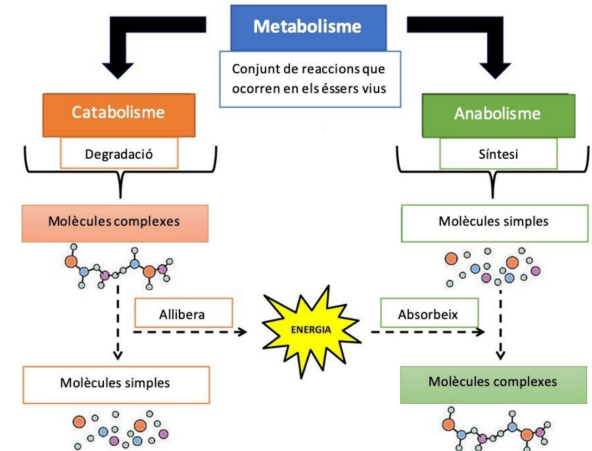
1. Introducció

1.1 Què és el catabolisme?

És el conjunt de reaccions químiques del metabolisme cel·lular que s'encarrega de la **degradació de molècules orgàniques** mitjançant **reaccions d'oxidació**, produint l'**alliberació d'energia** que emmagatzemen a l'enllaç fosfat de l'**ATP**

Per tant...

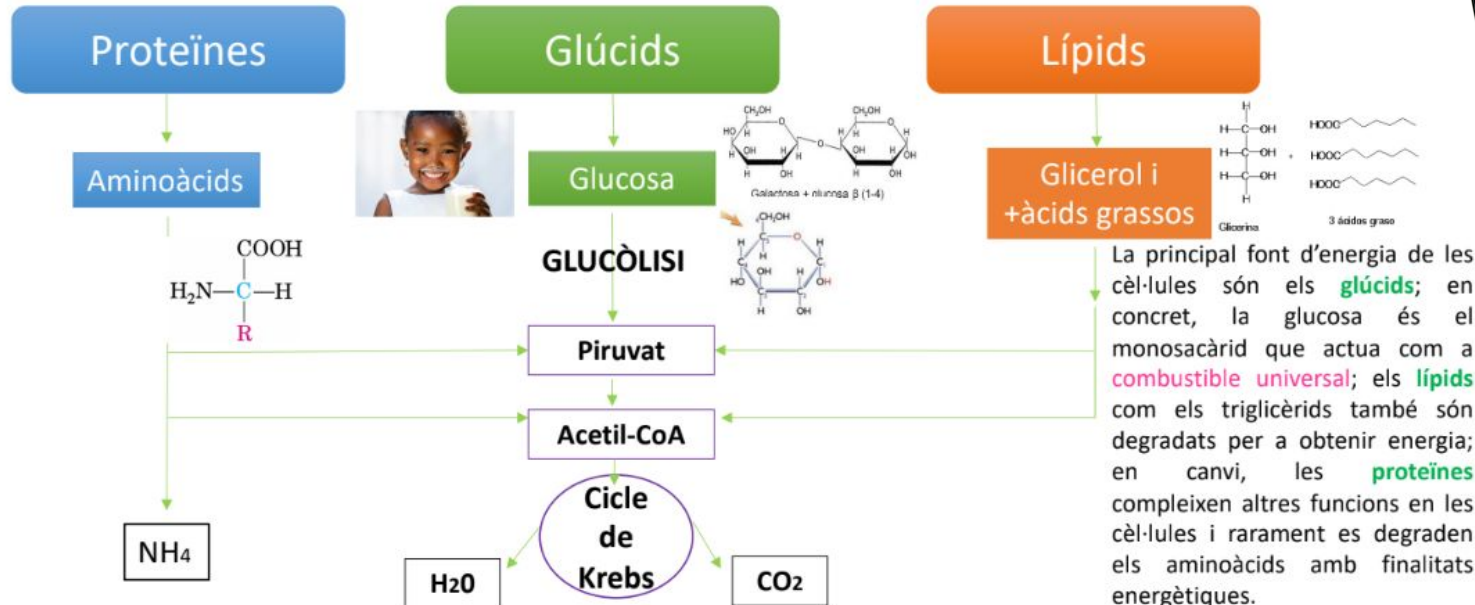
- **Les molècules orgàniques es transformen en altres de més senzilles**, que han d'intervenir en les reaccions metabòliques fins a transformar-se en els productes finals del catabolisme.
- L'energia emmagatzemada en els enllaços rics en **energia de l'ATP** posteriorment es podrà utilitzar per a les **reaccions anabòliques** o per dur a terme altres activitats cel·lulars.
- Són **reaccions d'oxidació**, és a dir, amb **pèrdua d'electrons**.
 - Durant les oxidacions, s'obtenen, a més, **coenzims reduïts** (com el NADH i FADH_2) necessaris per a l'anabolisme i per la cadena de transport d'electrons.



1. Introducció

El catabolisme està conformat per una sèrie de rutes metabòliques **convergentes**

- **Totes les degradacions** (tant de glúcids, com de lípids o proteïnes) convergeixen en el denominat **cicle de Krebs**, que es desenvolupa en la matriu mitocondrial i suposa la degradació total de la matèria orgànica a inorgànica (CO_2 i H_2O).



1. Introducció

RECORDA!

Un àtom només pot perdre electrons (**oxidació**) si hi ha un àtom que els hi accepta (**reducció**), per aquest motiu reben el nom de **reaccions d'oxidació-reducció (redox)**.

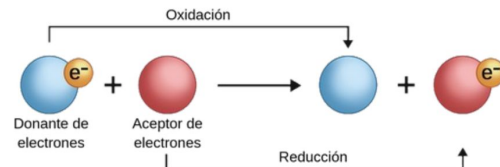
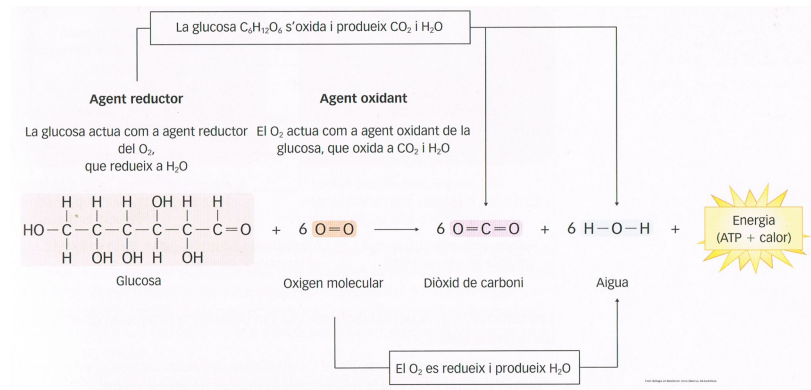
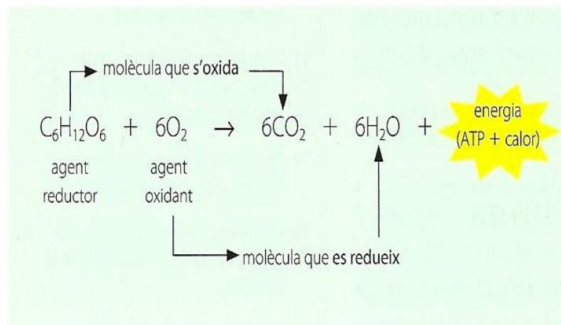
La substància que provoca que una altra perdi electrons, és l'**agent oxidant**.

- L'agent oxidant es redueix, ja que accepta els electrons.

La substància que provoca que una altra guanyi electrons, és l'**agent reductor**.

- L'agent reductor s'oxida, ja que cedeix electrons.

Glucosa com a agent reductor



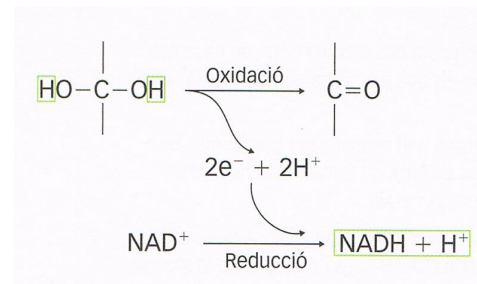
1. Introducció

1.2 Alliberament gradual d'energia en el catabolisme

En el catabolisme, l'energia s'allibera gradualment i en **forma d'energia química** (energia emmagatzemada en els enllaços químics de les molècules d'ATP).

Les característiques del catabolisme que permeten que això passi són:

- **Reaccions successives:** les reaccions succeeixen una rere l'altre, i cada una d'elles està catalitzada per un enzim diferent.
- **Transport d'hidrògens:** els electrons que perden les substàncies oxidades viatgen amb protons, constituint així àtoms d'hidrogen.
 - Aquests àtoms d'hidrogen passen a un **coenzim**, que actuarà com a transportador d'hidrogen.



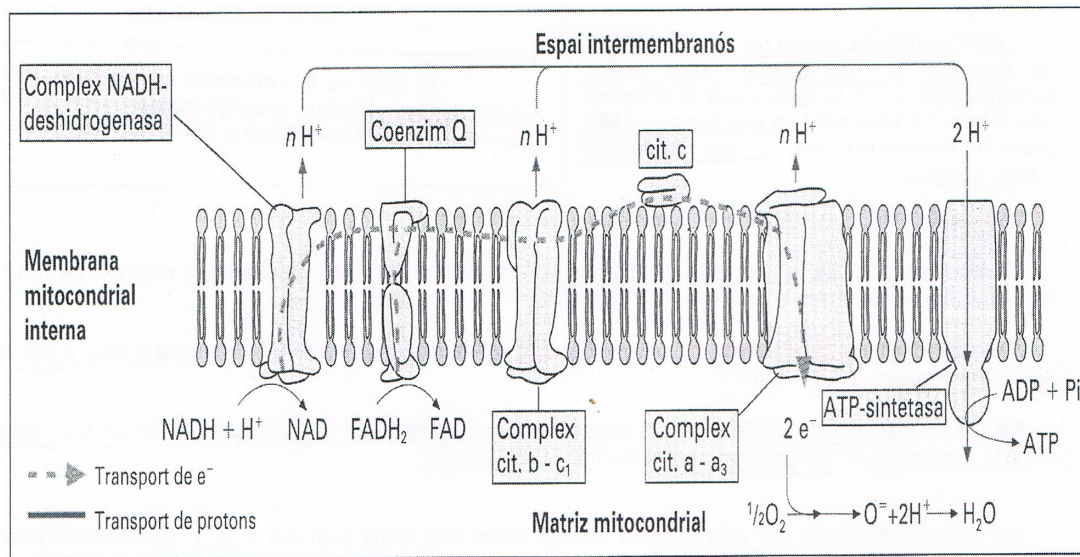
L'**enzim deshidrogenasa**, elimina de la glucosa 2 H⁺ i 2 e⁻ (2 àtoms d'hidrogen), i cedeix 2e⁻ i 1H⁺ al NAD⁺, que es redueix a NADH + H⁺.

1.2 Alliberament gradual d'energia en el catabolisme

- **Cadena transportadora d'electrons:** El coenzim NAD^+ es redueix a NADH , però aquest no passa els e^- directament a l' O_2 , sinó a una cadena transportadora d'electrons.
 - Aquesta cadena consta d'unes proteïnes anomenades **citocroms** englobades en certes membranes (*m. interna mitocondrial*).
 - A cada canvi de citocrom, els e^- s'acosten més al nucli de l'àtom acceptor i van perdent energia.
 - Finalment **els electrons són transferits a àtoms d'oxigen**, als quals s'uneixen els protons lliures i es forma aigua (H_2O).
 - L'energia que s'allibera en passar els electrons a una posició inferior s'utilitza per a fosforilar l'ADP i formar molècules d'ATP gràcies als enzims

ATP-sintases.

Al final, els electrons són cedits a l'oxigen (O), els quals, unint-se als H^+ lliures, es forma H_2O .



1. Introducció

1.3 Tipus de catabolisme

Es poden distingir dos tipus de catabolisme:

1- Respiració. **Hi intervé la cadena transportadora d'electrons.** Això permet transferir electrons procedents de la matèria orgànica inicial a un acceptor final que és un **compost inorgànic**. Atenent a l'agent oxidant hi ha dos tipus de respiració:

- **Respiració aeròbica.** L'**agent oxidant és l'oxigen molecular** (O_2). En reduir-se l' O_2 i acceptar electrons i protons forma aigua (H_2O).
 - Cèl·lules eucariotes (humans, plantes...) i algunes procariotes.
 - **Acceptor final de e^- :** O_2 .
 - **Producte final:** matèria inorgànica.
- } Oxidació total de matèria orgànica.
- **Respiració anaeròbica.** L'**agent oxidant** no és l'oxigen molecular, sinó **ions** com l'ió nitrat (NO_3^-) que, en reduir-se, forma l'ió nitrit (NO_2^-).
 - Ex: bacteris anaeròbies, alguns protozous...

2- Fermentació. **No** hi intervé la cadena transportadora d'electrons. **El compost final sempre és un compost orgànic.**

- Cèl·lules procariotes i algunes eucariotes com llevats, o cèl·lules animals en anaerobiosi (múscul esquelètic en absència d'oxigen (esport)).
 - **Acceptor final de e^- :** matèria orgànica.
 - **Producte final:** matèria orgànica.
- } Oxidació parcial de matèria orgànica

1. Introducció

1.3 Tipus de catabolisme

Quins processos catabòlics veurem?

AERÒBICS

- Catabolisme o oxidació dels **glúcids** (glucosa): glucòlisi i respiració cel·lular (cicle de Krebs i cadena respiratòria o de transport electrònic)
- Catabolisme o oxidació dels **àcids grassos**

ANAERÒBICS

- Fermentació **alcohòlica o etílica** (glucosa)
- Fermentació **làctica** (glucosa)

	Respiració aeròbica	Respiració anaeròbica	Fermentació
<i>Requereix oxigen</i>	Si	No	No
<i>Tipus de substrat</i>	Qualsevol principi immediat	Qualsevol principi immediat	Preferentment glúcids i pròtids
<i>Acceptor d'electrons</i>	Oxigen	Molècules inorgàniques (ex. ió nitrat)	Molècules orgàniques
<i>Rendiment energètic</i>	Alt 38 ATP	Alt 38 ATP	Baix 2 ATP



PAU

2. Catabolisme dels glúcids

A l'aparell digestiu dels animals, els **polisacàrids** continguts en els aliments són hidrolitzats i degradats, primer en **disacàrids** i, finalment, en **monosacàrids**, com la **glucosa**, fructosa i galactosa.

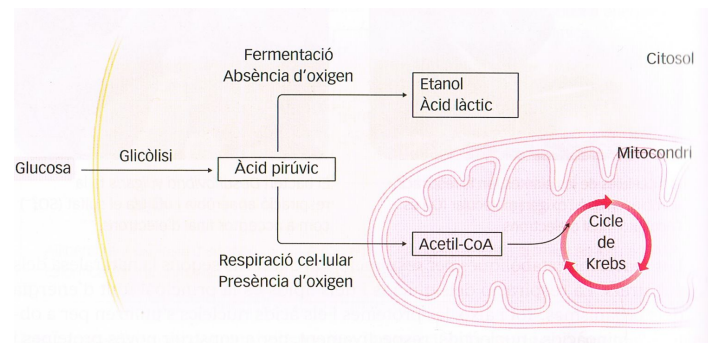
- Les **reserves de glucògen** presents en el teixit muscular també es poden hidrolitzar en glucosa, quan es requereix energia per a l'exercici muscular.

En les cèl·lules vegetals, són les **reserves de midó** el que s'hidrolitzen a molècules de glucosa.

Per explicar el catabolisme dels glúcids utilitzarem la glucosa, ja que és el monosacàrid més abundant.

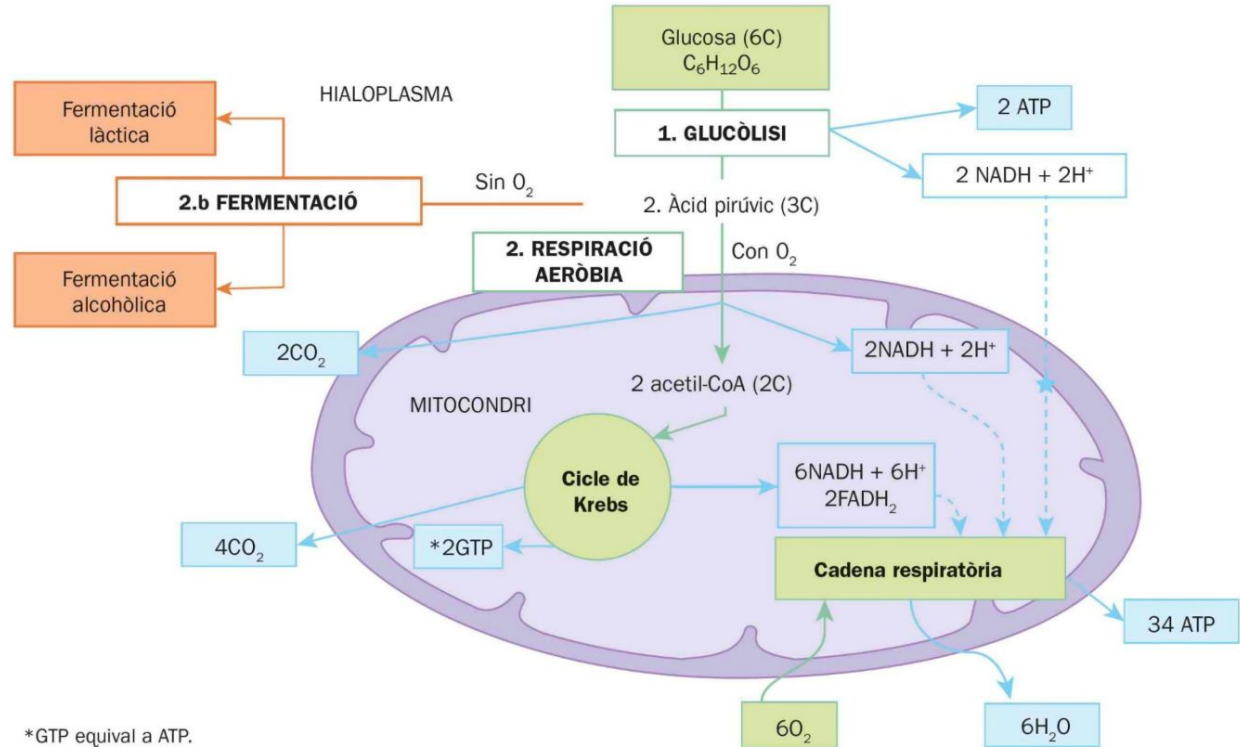
La degradació de la glucosa té lloc en dues etapes:

FASES	DESENVOLUPAMENT	PRODUCTES
1ª	Glucòlisi	PRODUCTES: ATP 2 molècules d'àcid pirúvic (= piruvat)
2ª	Sense O ₂ (condiciones anaeròbiques) → Fermentació	L'àcid pirúvic es transforma en molècules orgàniques simple (PRODUCTE FINAL). Acceptor final d'electrons: molècula orgànica
	Amb O ₂ (condicions aeròbiques) → Respiració cel·lular	L'àcid pirúvic entra en els mitocondris → cycle de Krebs → cadena de transport d'electrons. Acceptor final d'electrons: O ₂ Productes finals: ATP, <u>CO₂</u> i <u>H₂O</u>



2. Catabolisme dels glúcids

Per tant, tant les fermentacions com la respiració aeròbia, necessiten una primera ruta metabòlica comuna a totes dues: **LA GLUCÒLISI**, que té lloc en el citoplasma i que dóna com a producte final **PIRUVAT**.



2. Catabolisme dels glúcids

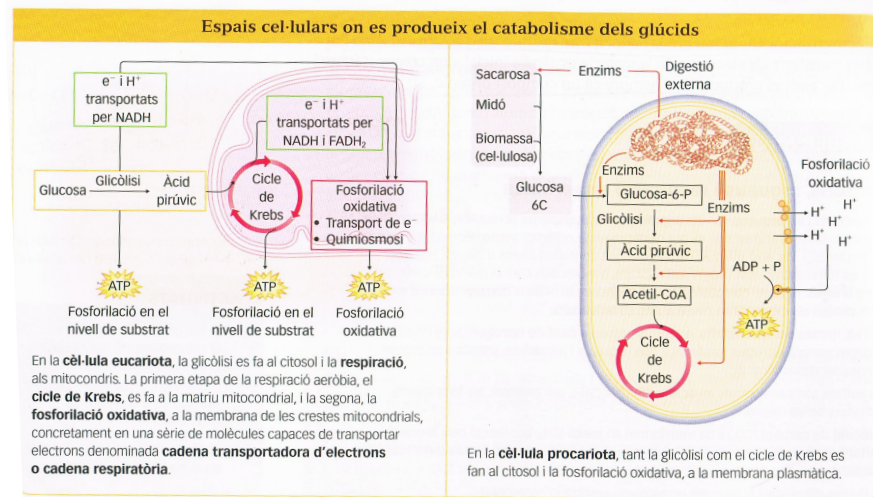
On es produeix el catabolisme dels glúcids?

Cèl·lula procariota

- Glicòlisi i cicle de krebs: **citòsol**
- Cadena de transport d'electrons: **membrana plasmàtica**

Cèl·lula eucariota

- Glicòlisi: **citòsol**
- Respiració (Cicle de Krebs i cadena transportadora d'electrons):
mitocondris
 - Cicle de Krebs: **matriu mitocondrial**
 - Cadena de transport d'e- : **membrana crestes mitocondrials**



D'on ve la glucosa?

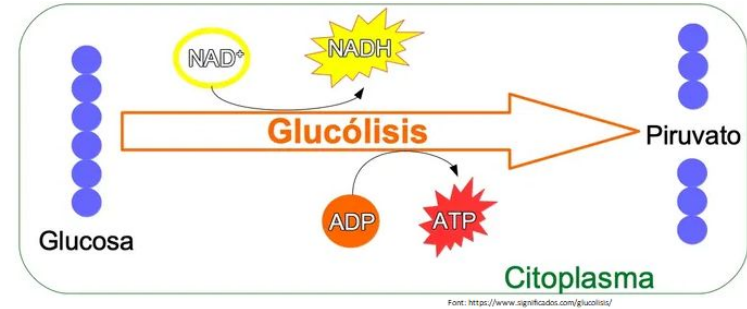
En cèl·lules animals	En cèl·lules vegetals
■ Dels glúcids dels aliments (digestió del midó, de la sacarosa, de la lactosa, etc.). ■ De la degradació del glucogen emmagatzemat en els músculs i en el fetge. ■ De la neoglucogènesi, a partir d'aminoàcids i de l'àcid làctic.	■ Glucosa sintetitzada en la fase fosca de la fotosíntesi. ■ Degradació del midó (polisacàrid de reserva dels vegetals). ■ De la neoglucogènesi, a partir d'aminoàcids, àcid làctic i àcids grassos.

2. Catabolisme dels glúcids

2.1 Glucòlisi

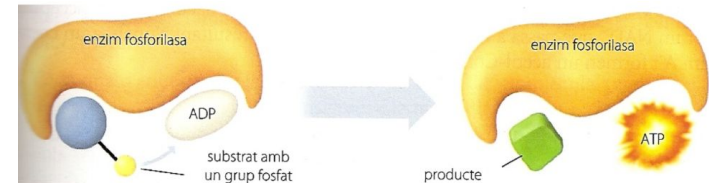
La **glucòlisi** és la via metabòlica encarregada d'**oxidar la glucosa** amb la finalitat d'**obtenir energia** per a la cèl·lula.

- Consisteix en deu reaccions enzimàtiques consecutives que converteixen a la **glucosa** (de sis àtoms de carboni) en dues molècules de **piruvat** (tres àtoms de carboni cadascuna), capaços de seguir altres vies metabòliques i continuar produint energia per a l'organisme.



La **síntesi d'ATP** que es produeix en la glucòlisi es fa per mitjà d'una **fosforilació a nivell de substrat**, és a dir, una molècula de substrat que conté un grup fosfat el cedeix a un ADP.

El **balanç energètic de la glucòlisi és de 2 ATP** (s'en produeixen 4 però se'n consumeixen 2 durant el procés)



2.1 Glucòlisi

En la glucòlisi s'hi poden diferenciar **dues fases**:

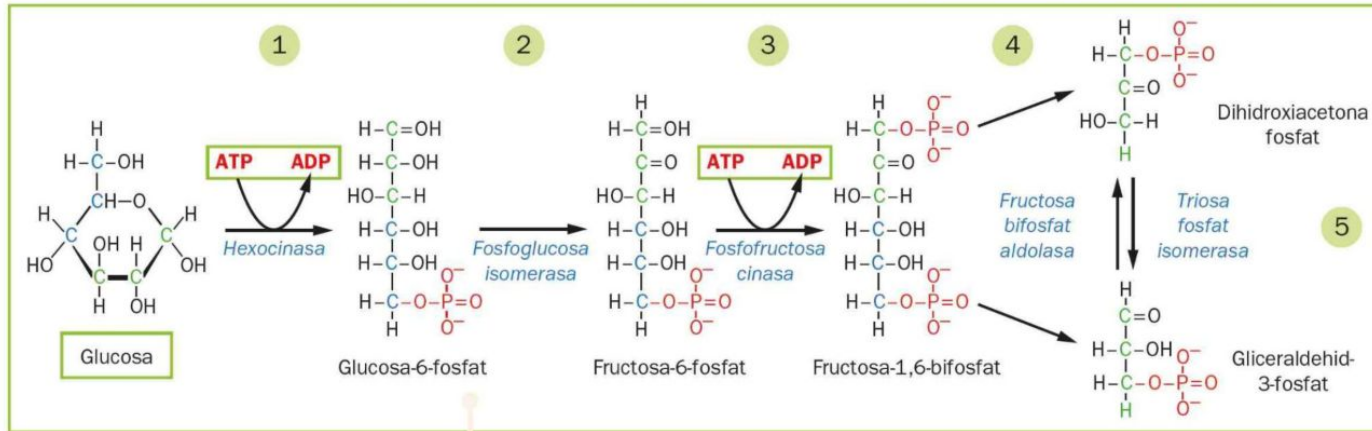
1.- Primera fase, preparatòria o de **consum d'energia**.

- Es fa una despesa de dues molècules d'ATP.
- Es transforma una molècula de glucosa en dues molècules de **gliceraldehid-3-fosfat**.

2.- Segona fase o fase de **producció d'energia**.

- Per cada glucosa es formen **quatre ATP** i dos àcids **pirúvics**.

1.- Primera fase, preparatòria o de consum d'energia



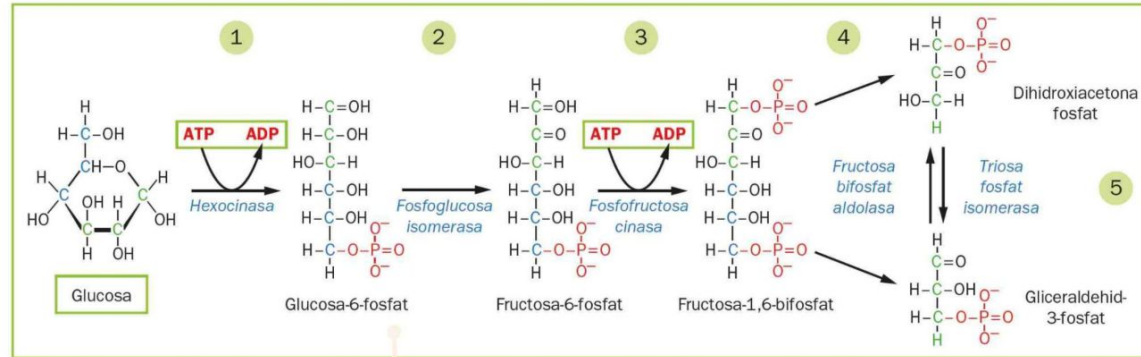
2.1 Glucòlisi

1.- Primera fase, preparatòria o de consum d'energia

1. La glucosa es **fosforila** a **glucosa 6-fosfat**, **consumint** una molècula d'**ATP**.
 - Aquesta fosforilació és catalitzada per una hexoquinasa, la qual activa la glucosa i impedeix que surti de la cèl·lula.
2. La **glucosa 6-fosfat** s'**isomeritza** a **fructosa 6-fosfat**
 - Canvia d'estructura però manté exactament la mateixa fórmula química.
 - Passa d'aldehid a cetosa ja que amb la forma cetosa de la fructosa es pot dividir simètricament més endavant en dos trioses fosfat.
3. Amb la **despesa d'un altre ATP** la **fructosa 6-fosfat** es fosforila a **fructosa 1,6-bifosfat**

4. L'enzim aldolasa catalitza la **conversió** de **fructosa 1,6-bifosfat** amb dues molècules de tres carbonis (trioses): **dihidroxietona fosfat** i **gliceraldehid -3-fosfat**.

5. **Només el gliceraldehid 3-fosfat pot seguir la ruta de la glucòlisi**, de manera que la **dihidroxietona s'isomeritza a gliceraldehid 3-fosfat**, amb la qual cosa a partir d'aquesta etapa els següents passos es multiplicaran per dos.



2.1 Glucòlisi

2.- Segona fase o fase de producció d'energia.

6. El **gliceraldehid 3-fosfat** mitjançant una **oxidació** i **fosforilació** es converteix en **1,3-bifosfoglicerat**.

- Mentre el grup aldehid s'oxida el NAD^+ es redueix donant $\text{NADH} + \text{H}^+$.
 - El NAD^+ es redueix a $\text{NADH} + \text{H}^+$ quan accepta dos electrons i un protó.

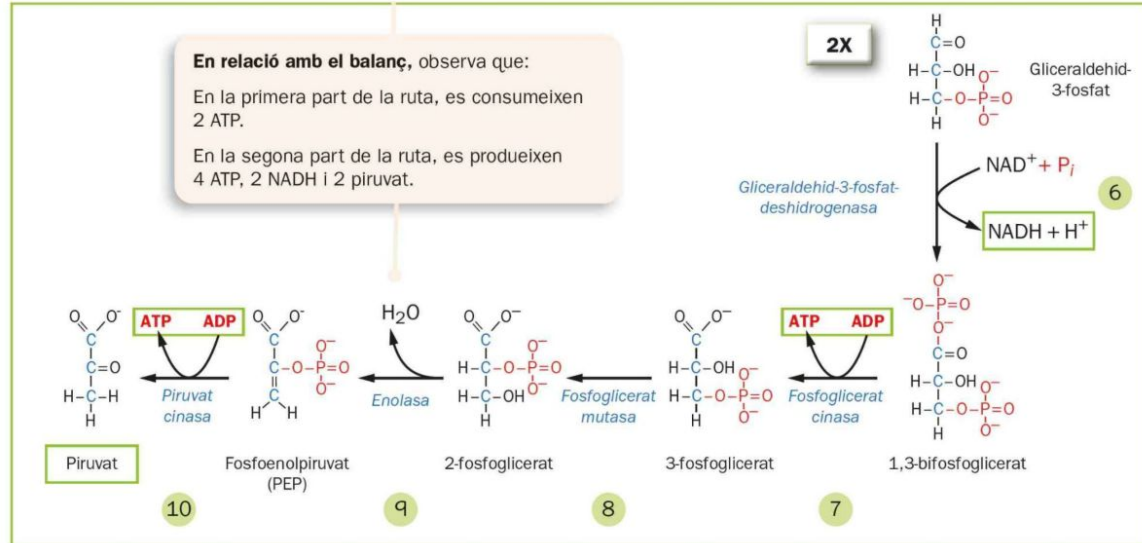
7. El 1,3-bifosfoglicerat **cedeix un grup fosfat a l'ADP** formant-se **ATP** i **3-fosfoglicerat**

8. El grup fosfat passa del carboni 3 al carboni 2, formant-se **2-fosfoglicerat**.

9. Per **deshidratació** es forma **2-fosfoenolpiruvat**.

- La reorganització de la molècula **concentra més energia al grup fosfat**.

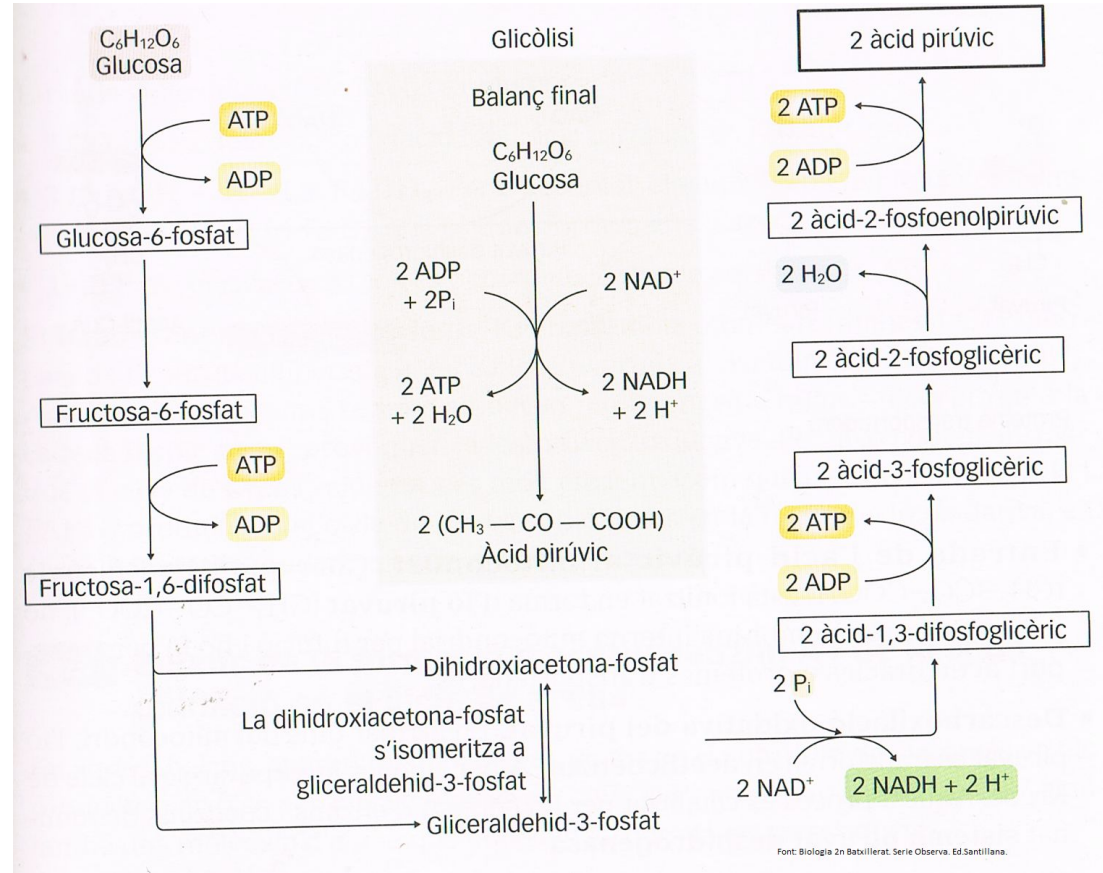
10. El fosfat es transferit a l'ADP, **formant-se ATP** i **àcid pirúvic** (piruvat).



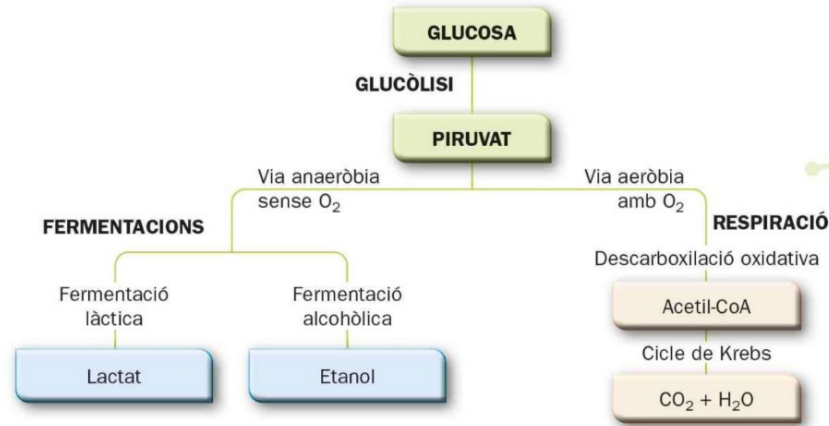
2.1 Glucòlisi

Producte de la glucòlisi obtenim:

- 2 piruvat
- 4 ATP
- 2 NADH + H⁺



2.1 Glucòlisi



La destinació del piruvat està condicionada per la presència o absència d'oxigen en la cèl·lula.

En absència d'oxigen, seguirà la via anaeròbia de les fermentacions (**fermentació làctica o fermentació alcohòlica**) per a originar lactat (àcid làctic) o etanol.

Si la cèl·lula disposa d'oxigen, realitzarà la respiració aeròbia en els mitocondris. En aquest sentit, el piruvat ha de patir una descarboxilació oxidativa i originar **acetil-coenzim A**, molècula que es degradarà en el **cicle de Krebs**.

Font: Zn Bataillon. Biologia. Ed. McGrawHill

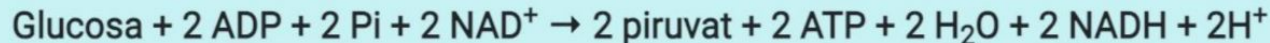
Balanç energètic de la glucòlisi

Gairebé tots organismes realitzen la glucòlisi, des dels procariotes als éssers pluricel·lulars.

Es **necessita utilitzar dues molècules d'ATP per a començar** (fase preparativa), però després s'obtidran:

- Dues molècules de NADH
- Quatre molècules d'ATP

El **balanç energètic final** és de **dues molècules de NADH** (que originaran més ATP en el cas que se segueixi posteriorment un procés de respiració) i **dues molècules d'ATP** (4-2=2) per cada molècula de glucosa.



2.1 Glucòlisi

Objectius de la glucòlisi

- Obtenir energia en forma d'ATP
- Obtenir poder reductor en forma de NADH.
- Obtenir piruvat que, si estem en presència d'oxigen, continuarà el seu catabolisme amb el **cicle de Krebs**.
- La producció d'intermediaris metabòlics, com el gliceraldehid-3-fosfat, que poden ser emprats en altres processos cel·lulars.

Regulació de la glucòlisi

Totes les rutes metabòliques estan sotmeses a una **regulació estricta**, en funció de les necessitats energètiques de les cèl·lules.

En el cas de la glucòlisi:

- **Nivells alts d'ATP**: inhibeixen la glucòlisi. → **no necessitem obtenir més energia. La glucosa es dirigirà cap a rutes anabòliques (formació de greix).**
- **Nivells alts d'AMP i ADP**: activen la glucòlisi.

Què hem de recordar de la glucòlisi?

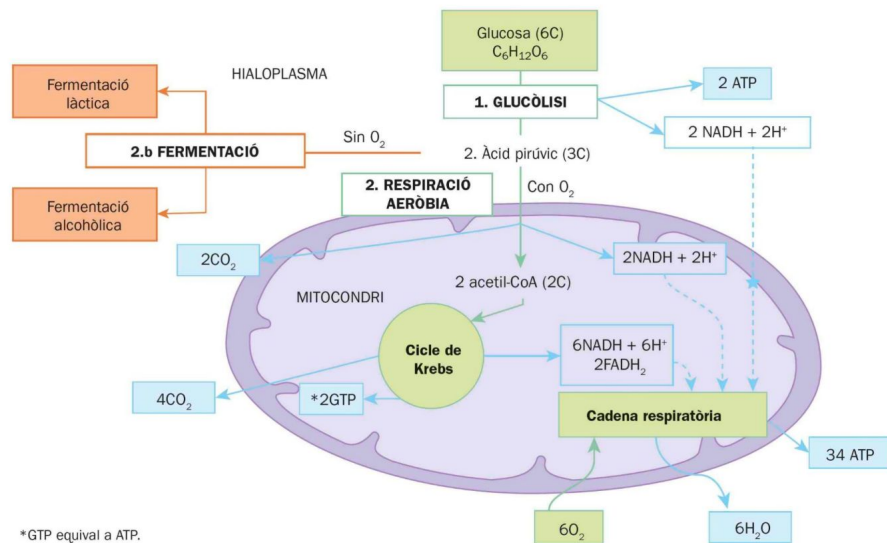
- És duita a terme per la majoria d'éssers vius. És **universal**.
- Es produeix en el **citoplasma**.
- **S'obté ATP** per fosforilació a nivell de substrat.
- La seva **eficàcia energètica és baixa** (2 ATP per cada molècula de glucosa).
- Genera **poder reductor** (2 NADH).
- Subministra a la cèl·lula **precursors metabòlics**.
- No requereix la presència d'oxigen.



2. Catabolisme dels glúcids

2.2 Respiració aeròbia

Si la cèl·lula **té oxigen**, l'oxidació del piruvat es completa en el **mitochondri**.



Font: 2n Batxillerat: Biologia. Ed McGrawHill

RECORDA!!

La degradació completa d'una molècula de glucosa per via aeròbia implica els processos següents:

Glucòlisi: $2\text{ATP} + 2\text{NADH} + 2\text{piruvat}$

Descarboxilació oxidativa: $2\text{piruvat} \rightarrow 2\text{acetil-CoA} + 2\text{NADH}$

Cicle de Krebs: per 2 acetil - CoA $\rightarrow 4\text{CO}_2 + 2\text{GTP} + 2\text{FADH}_2 + 6\text{NADH}$

La respiració aeròbia pot definir-se com en **conjunt de processos catabòlics** que tenen lloc en els mitocondris, en els quals es produeix la **degradació total** de les molècules orgàniques a diòxid de carboni (**CO₂**) i aigua (**H₂O**), amb l'**obtenció d'energia en forma d'ATP** i **consum d'oxigen** (O₂, acceptor final d'electrons).

En la respiració aeròbia diferenciem les etapes següents:

- Obtenció d'acetil-CoA
- El cicle de krebs
- La cadena de transport electrònic mitocondrial i fosforilació oxidativa.

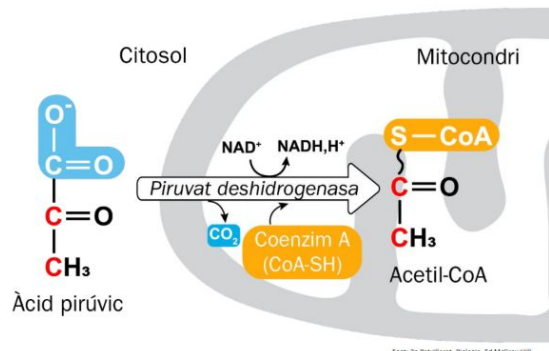
2.2 Respiració aeròbia

1. Obtenció d'acetil-CoA

En la cèl·lula eucariota l'àcid **pirúvic** obtingut en la glicòlisi entra per transport actiu al mitocondri on un conjunt d'enzims el transforma en **acetil-CoA**.

Dins el mitocondri el **piruvat** ($\text{CH}_3\text{-CO-COOH}$) es **transforma** pel sistema piruvat-deshidrogenasa en **acetil-CoA**, a partir d'una **descarboxilació i oxidació**.

- El carboni i els dos oxígens del grup carboxílic es separen i s'allibera una molècula de **CO_2** , formant-se una molècula d'acetil ($\text{CH}_3\text{-CO}$). Reacció catalitzada per la **piruvat deshidrogenasa**.
 - Cada acetil s'uneix a un compost anomenat **coenzim A** i es forma l'**acetil CoA** (s'incorporarà al **cicle de Krebs**).
 - En aquesta reacció es forma una molècula de **NADH** a partir d'una molècula de **NAD^+** .

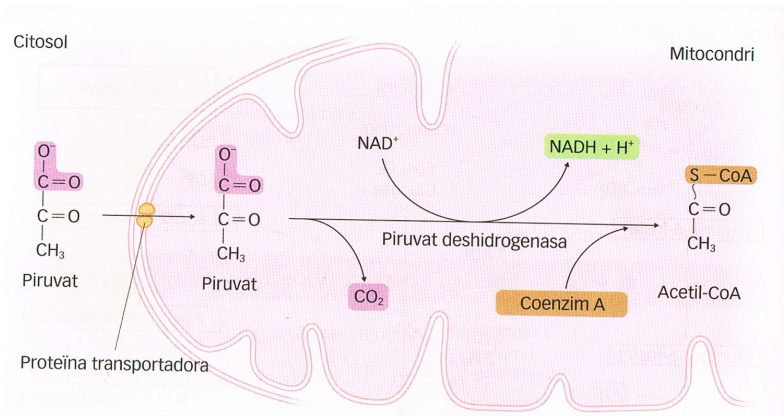


Font: Zn Butxillerat, Biologia, Ed. Medispa/Hill

BALANÇ DE LA DESCARBOXILACIÓ OXIDATIVA

2 molècules d'àcid pirúvic procedents de la glicòlisi:

- ❑ 2 acetil-CoA
- ❑ 2 $\text{NADH} + 2\text{H}^+$
- ❑ 2 CO_2



2.2 Respiració aeròbia

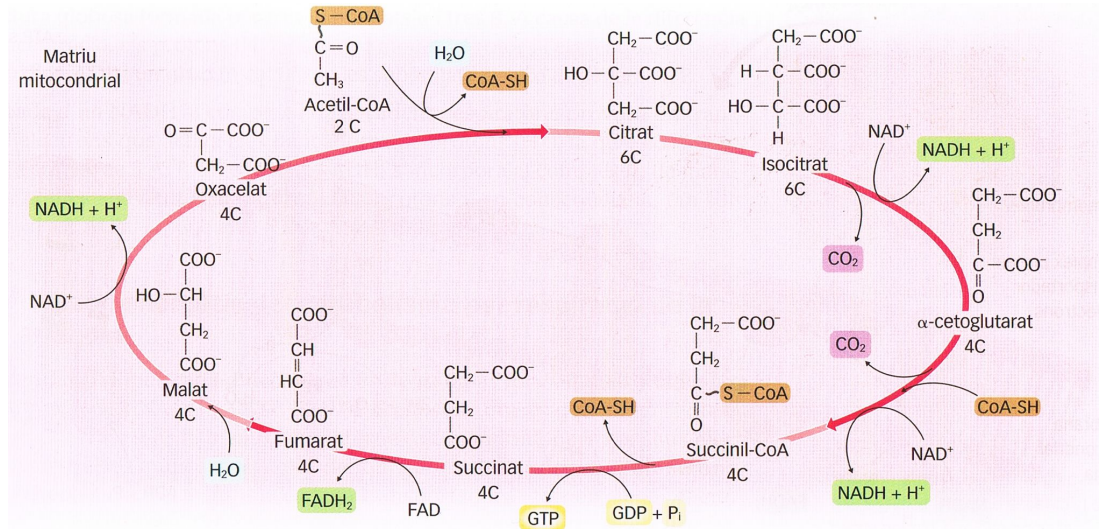
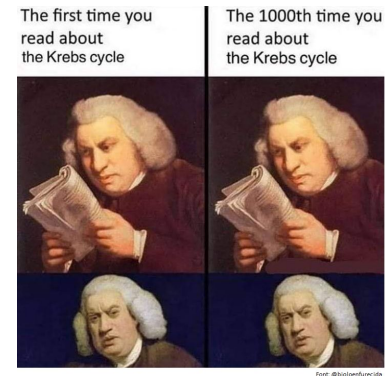
2. Cicle de Krebs

El cicle de krebs és una **seqüència tancada de reaccions** en la qual el producte inicial i el final són els mateixos: l'àcid oxalacètic (oxalacetat).

L'**acetil-CoA** s'incorpora al cicle de krebs, transferint el grup acetil a un **àcid oxalacètic**, que en acceptar-lo forma un **àcid cítric**.

- A partir d'aquí es succeeixen una sèrie de transformacions en què degraden completament el grup acetil en **dues molècules de CO_2** i **hidrògens**.
 - Els hidrògens són acceptats per coenzims oxidats (3 NAD^+ i un FAD^+) que es transformen en coenzims reduïts (**3 NADH** i **1 FADH_2**).

Al final es regenera l'àcid oxalacètic, tancant el cicle.



2.2 Respiració aeròbia

2. Cicle de Krebs

Balanç del cicle de Krebs

Per cada molècula d'**acetil-CoA** que entra en el cicle, s'obtenen:

- 2 CO_2
- 1 FADH_2
- 3 NADH
- 1 GTP (= 1 ATP)
- Es regenera el CoA-SH

En el cas del catabolisme de la glucosa, això ho hauriem de multiplicar x2 ja que entraran dues molècules d'acetil-CoA (provenents dels dos piruvats) al cicle.

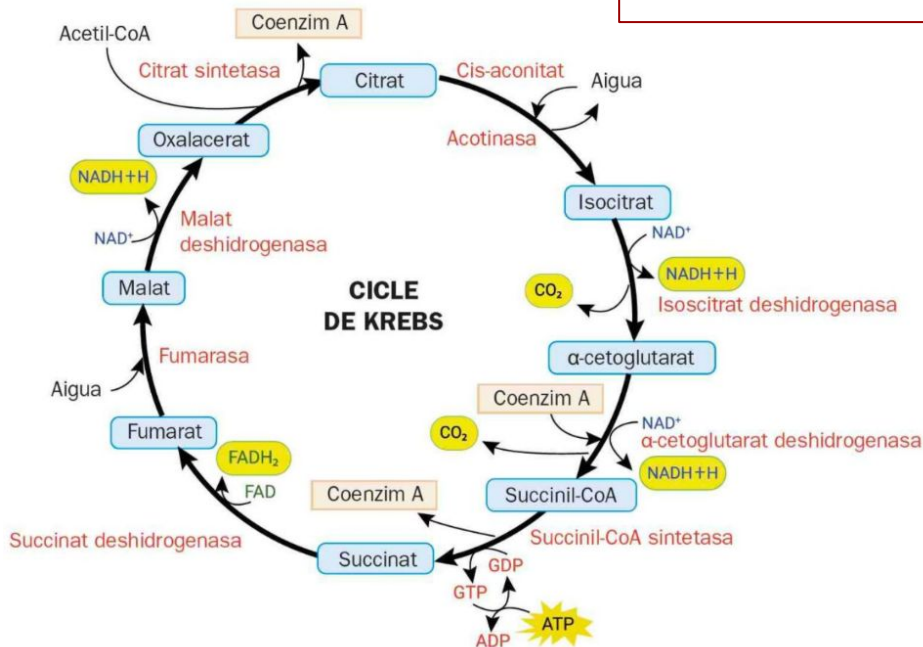
S'ha completat la degradació de la glucosa:

Els **sis carbonis** de la **glucosa** s'han després en forma de **6 CO_2** : dos en la descarboxilació oxidativa del piruvat i quatre en el cicle de Krebs.

El CO_2 és un residu de la respiració que és expulsat de les cèl·lules.

Per què 6 CO_2 ? (Ens referim a la degradació de la glucosa)

RECORDA! N'obtenim dos quan s'oxiden les dues molècules de piruvat en la descarboxilació. Obtenim dos acetil-CoA, que entraran al cicle donant lloc a dos CO_2 cada un (en total 4).



En el cicle de Krebs **NO** es necessita **oxigen** directament. Els electrons i els protons que es mouen són acceptats per les molècules de NAD^+ i FAD . Si que serà necessari en l'etapa següent de la respiració, la **cadena respiratòria**.

Els $\text{NADH} + \text{H}^+$ i el FADH_2 (coenzims reduïts), alliberen molta energia quan s'incorporen a la cadena respiratòria, provocant la **fosforilació oxidativa**.

- Els $\text{NADH} + \text{H}^+$ i el FADH_2 seran oxidats en la fosforilació oxidativa

2.2 Respiració aeròbia

3. Cadena de transport d'electrons i fosforilació oxidativa

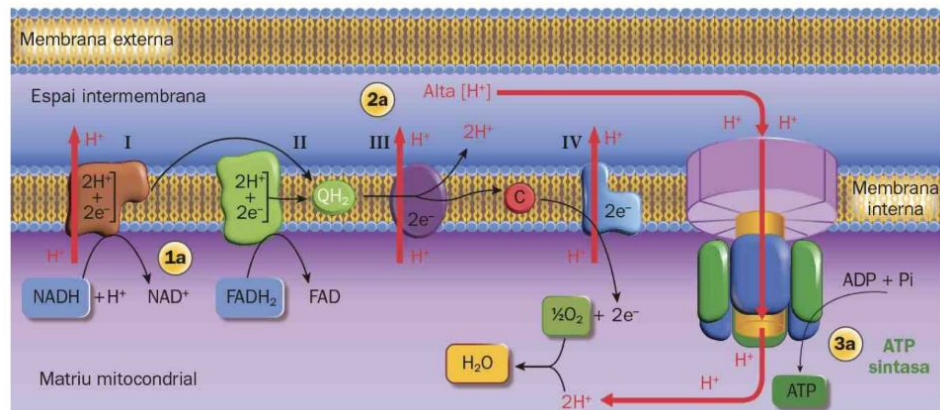
La molècula de **glucosa** que va iniciar la glucòlisi es troba **completament oxidada**.

- Una part de la seva energia s'ha utilitzat en la **síntesi d'ATP**.
- La major part de l'energia es troba en els electrons acceptats per les molècules de **NADH i FADH₂**.

També es coneix com a **cadena respiratòria**.

- És l'última fase de la respiració mitocondrial, la qual esdevé en presència l'oxigen (O₂).

Els **coenzims reduïts** NADH i FADH₂, generats en tots els processos anteriors (glucòlisi, descarboxilació oxidativa del piruvat i cicle de Krebs) **cedeixen els electrons**, que han captat en les reaccions d'oxidació, a una **cadena de transportadors d'electrons** situada en la **membrana mitocondrial interna**.



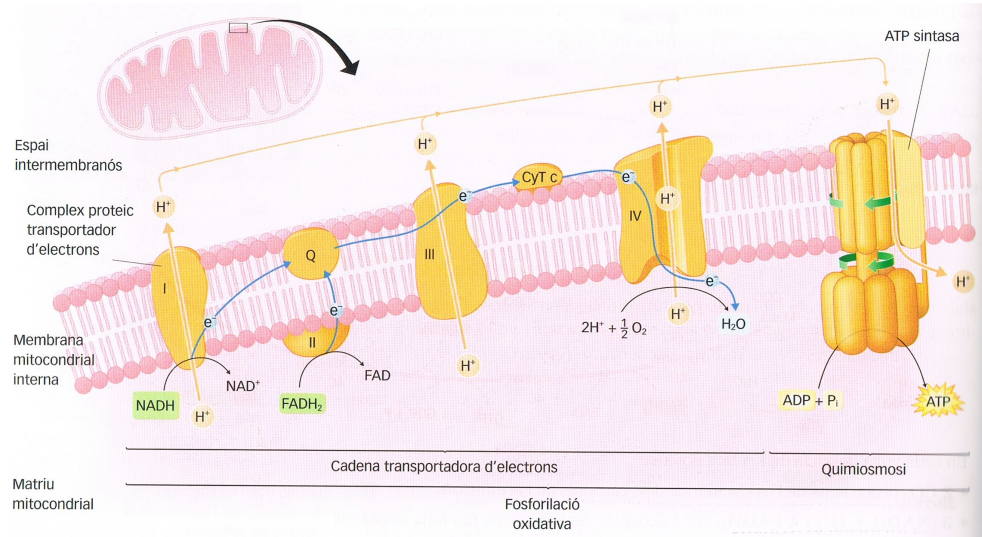
2.2 Respiració aeròbia

3. Cadena de transport d'electrons i fosforilació oxidativa

Com és l'estructura de la cadena transportadora d'electrons?

Es situen en la **membrana mitocondrial interna** i hi trobem:

- Quatre grans complexos proteics
 - **Complex I** o Complex NADH-deshidrogenasa.
 - **Complex II** o Ubiquinona o Coenzim Q reductasa.
 - **Complex III** o Complex citocrom b-c1.
 - **Complex IV** o Complex citocrom-oxidasa.
- Una molècula lipídica anomenada **ubiquinona (Q)**
- Una proteïna anomenada **citocrom c**



2.2 Respiració aeròbia

3. Cadena de transport d'electrons i fosforilació oxidativa

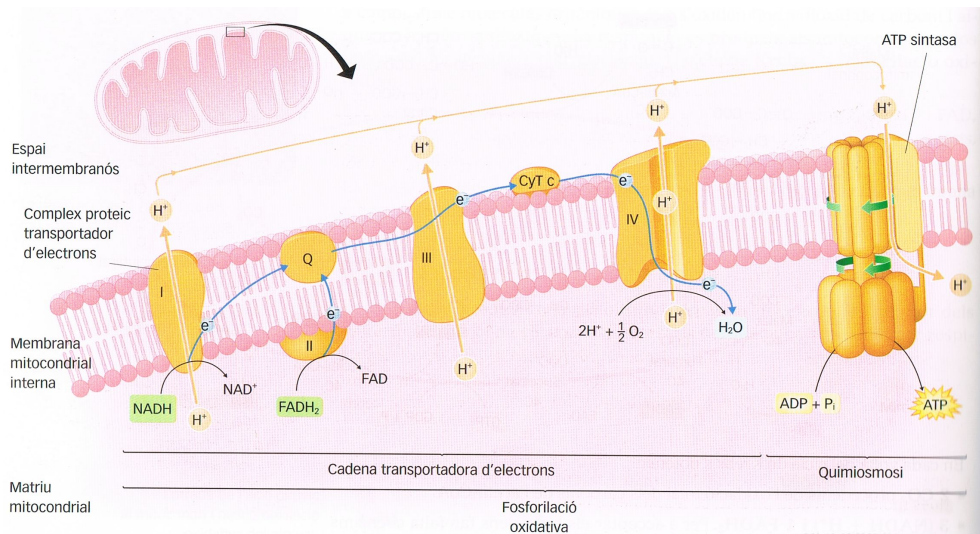
Com es transporten els d'electrons?

1. Procedents del cicle de Krebs, arriben els **NADH i FADH₂**, els quals **s'oxidaran** en cedir els electrons a la cadena respiratòria.
2. La **ubiquinona (Q)**, s'encarrega de transportar els electrons del complex I i II, fins al complex III (citocrom b - c1).
3. El **citocrom c**, transportarà els electrons del complex III al IV (citocrom c oxidasa)
4. A la matriu mitocondrial, aquests electrons es cedeixen al seu **acceptor final**, que és l'**O₂**, i s'utilitzaran per formar H₂O.

A través de la cadena de transport electrònic, **els electrons arriben fins a l'oxigen**, que és l'acceptor final dels H⁺ i els e⁻

El NADH cedirà els electrons al **complex I / NADH deshidrogenasa**

El FADH₂ cedirà els electrons al **complex II / succinat deshidrogenasa**



2.2 Respiració aeròbia

3. Cadena de transport d'electrons i fosforilació oxidativa

Quimiosmosi

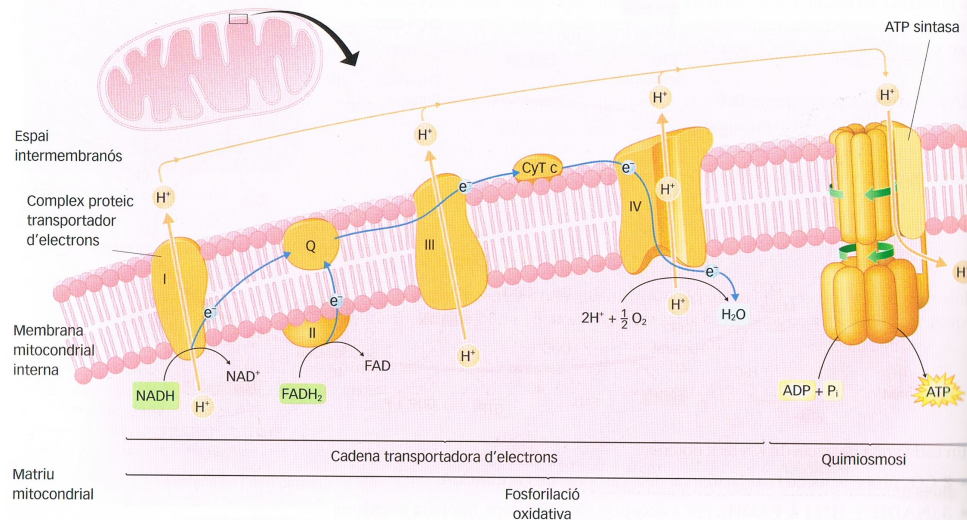
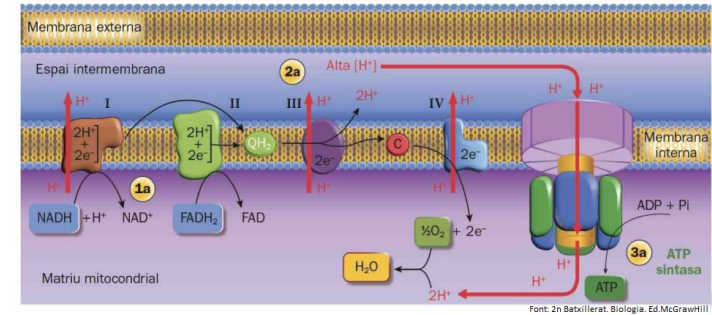
La **fosforilació oxidativa** és el principal mitjà de **regeneració d'ATP** en organismes heteròtrofs.

- L'ATP es regenera a partir d'ADP i Pi i aquest procés està adaptat al transport d'electrons des del NADH i FADH₂ fins a l'O₂.

Quan es dona el transport d'e⁻ entre els diferents components de la cadena hi ha 3 punts concrets (I, III i IV) **on els e⁻ perden energia que s'empra per bombar protons cap a l'exterior** (espai intermembranós).

- Els protons (H⁺) s'acumulen a l'espai intermembranós i quan la concentració és elevada, els protons tornen a la matriu a través de les **ATP-sintases** (canals proteics). **Quimiosmosi**

Quan a través d'aquesta estructura enzimàtica hi circulen els protons cap a la matriu es **sintetitza ATP** a partir d'ADP + Pi.



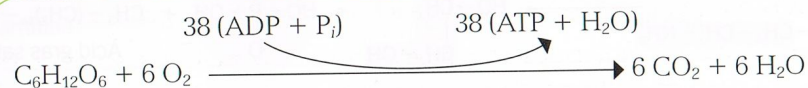
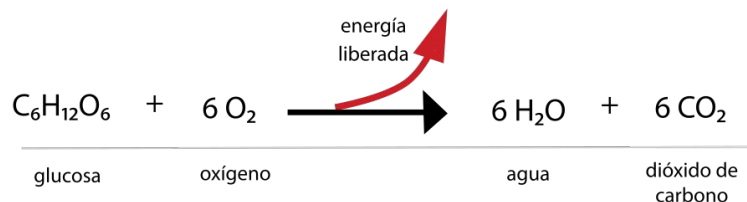
2.2 Respiració aeròbia

Rendiment energètic del catabolisme per respiració de la glucosa

Com que la quantitat de H^+ bombejat per cada un dels complexos de la cadena respiratòria és suficient per sintetitzar ATP, s'ha calculat que:

- Per cada **NADH + H^+** que ingressa a la cadena respiratòria, s'obtenen **3 ATP**.
- Per cada **FADH₂** que ingressa a la cadena respiratòria, s'obtenen **2 ATP**, ja que el FADH₂ s'incorpora en el complex II

REACCIÓ GLOBAL DE LA RESPIRACIÓ CEL·LULAR



Rendiment energètic de l'oxidació completa d'una molècula de glucosa

Citoplasma	Glicòlisi	2 ATP	
Mitocondri	Matriu	Membrana interna	
	Procedent de la glicòlisi	2 (NADH + H ⁺)	6 ATP
	Àcid pirúvic → Acetil-CoA	2 (NADH + H ⁺)	6 ATP
	Cicle de Krebs	6 (NADH + H ⁺)	18 ATP
		2 (FADH ₂)	4 ATP
		2 GTP	2 ATP
TOTAL		38 ATP	

El consum d' alcohol i el catabolisme

Se sap que els grans consumidors d'alcohol de begudes alcohòliques sovint sofreixen greus afeccions de fetge que els poden portar a la mort. Com es produeixen aquestes cirrosis hepàtiques? Quina relació té el metabolisme amb l'alcohol ingerit?

De fa molt de temps es coneix que l'etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$) és oxidat a les cèl·lules hepàtiques a acetaldehid ($\text{CH}_3\text{-CHO}$) en un procés en el qual es forma una molècula de $\text{NADH} + \text{H}^+$. Després l'acetaldehid és oxidat a àcid acètic, i finalment aquest a diòxid de carboni (que s'elimina a l'exterior) i aigua.

El consum continuat i excessiu d'alcohol produeix l'abundància de NADH d'origen etílic, que disminueixen els processos de la glucòlisi i del cicle de Krebs, que són els principals productors d'aquest coenzim reduït.

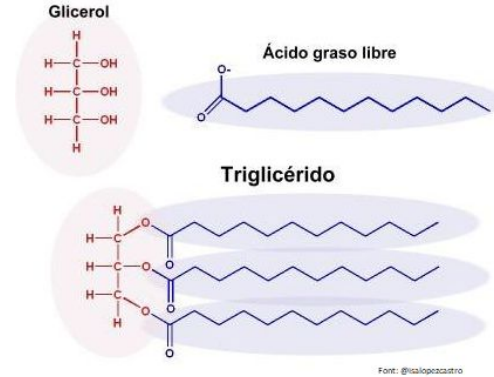
La conseqüència d'això és que els monosacàrids, els aminoàcids i els àcids grassos no es catabolitzen sinó que es converteixen en greixos que s'acumulen a les cèl·lules hepàtiques que poca poc tendeixen a anar morint, produint l'hepatitis alcohòlica i al final la cirrosi hepàtica.

3. Catabolisme dels lípids

Els **lípids** tenen un **alt valor calòric**, ja que la degradació d'1 gram de greix produeix fins a 9 kcal, a diferència de les 4 kcal que produeixen els glúcids.

Els lípids més comuns que se sotmeten al catabolisme són els **triglicèrids**, que consisteixen en una molècula de glicerol unida a tres àcids grassos.

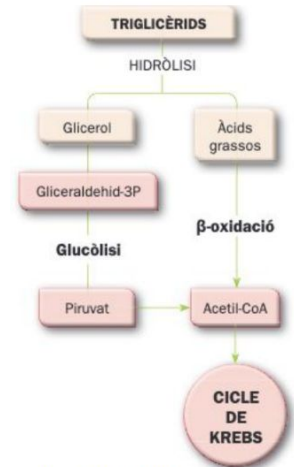
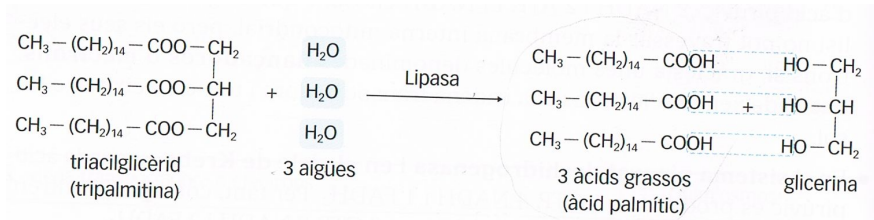
- La degradació dels triglicèrids es produeix en diverses etapes i es duu a terme principalment en el **teixit adipós**.



El catabolisme de lípids passa per diferents fases

PRIMERA FASE: LIPÒLISI → TRENCAMENT DELS TRIGLICÈRIDS

Es refereix a la hidròlisi dels triacilglicèrids gràcies als enzims **lipases**, que trenquen els enllaços èster i separen els **àcids grassos** de la **glicerina**.



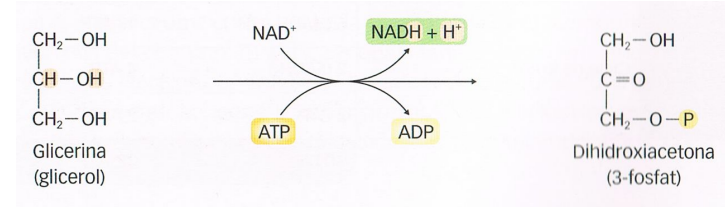
3. Catabolisme dels lípids

La glicerina i els àcids grassos formats, agafen camins diferents

Glicerina

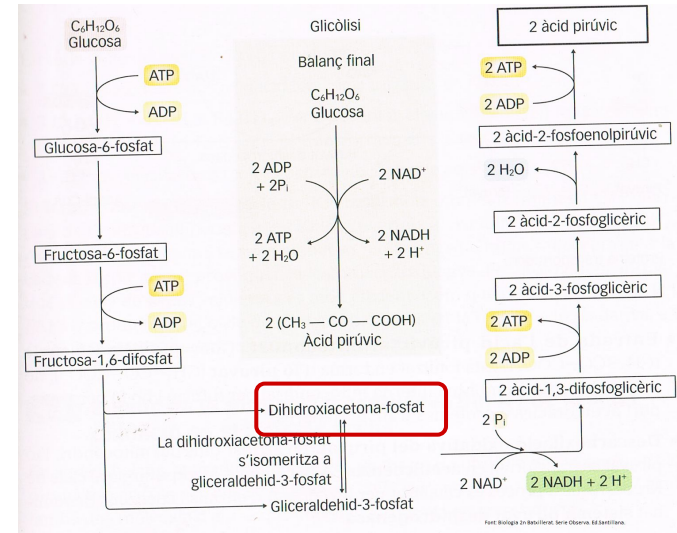
Perd 2 hidrogens i es fosforila, obtenint-se **dihidroxicetona 3-fosfat**, la qual pot:

- Incorporar-se a la glucòlisi
- Utilitzar-se per sintetitzar glucosa



Àcids grassos

Per tal de degradar els àcids grassos i poder obtenir energia, **han d'entrar al mitocondri**, on sofreixen un procés anomenat **β -oxidació** o **hèlix de Lynen**, que consisteix en la **oxidació del carboni β** .



3. Catabolisme dels lípids

Àcids grassos

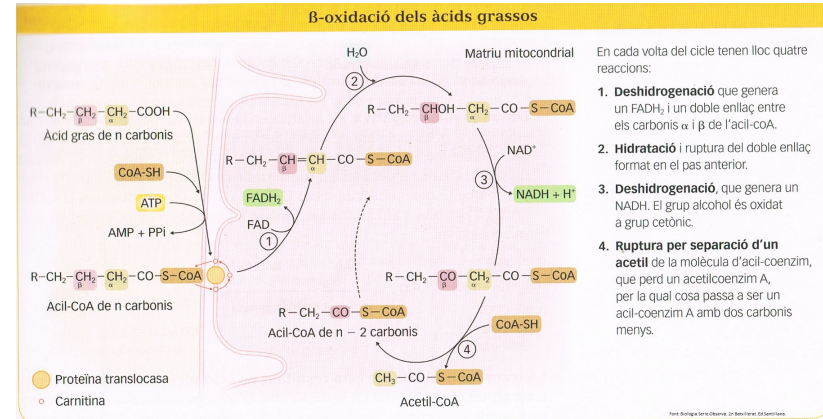
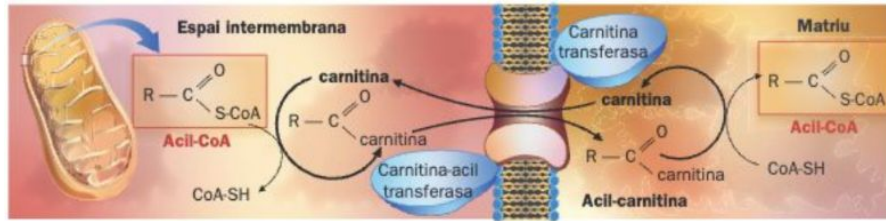
La β -oxidació dels àcids grassos, es realitza mitjançant les següents reaccions:

1. Degut a que els àcids grassos **no** poden travessar la membrana externa mitocondrial, s'uneixen a coenzims A mitjançant el procés d'**activació de l'àcid gras**, en un procés que requereix energia (ATP).

- Aquesta reacció té lloc al citosol i permet la formació d'un **Acil-CoA** (àcid gras activat). **ALERTA!! No confondre amb Acetil-CoA**

2. L'**acil-CoA** entra a la matriu mitocondrial.

- Si l'àcid gras és de cadena curta (fins a 12 C), podrà travessar la bicapa lipídica de les membranes mitocondrials.
- Àcids grassos de cadena llarga (més de 12C) necessiten un transportador orgànic especial, la **carnitina**.



3. Catabolisme dels lípids

La β -oxidació dels àcids grassos, es realitza mitjançant les següents reaccions:

A la **matriu mitocondrial** s'inicia la **α -oxidació** que provoca que el carboni α (el segon a partir del grup carboxil final) passi a estar format per un $-\text{CH}_2-$ a estar format per un $-\text{CO}-$.

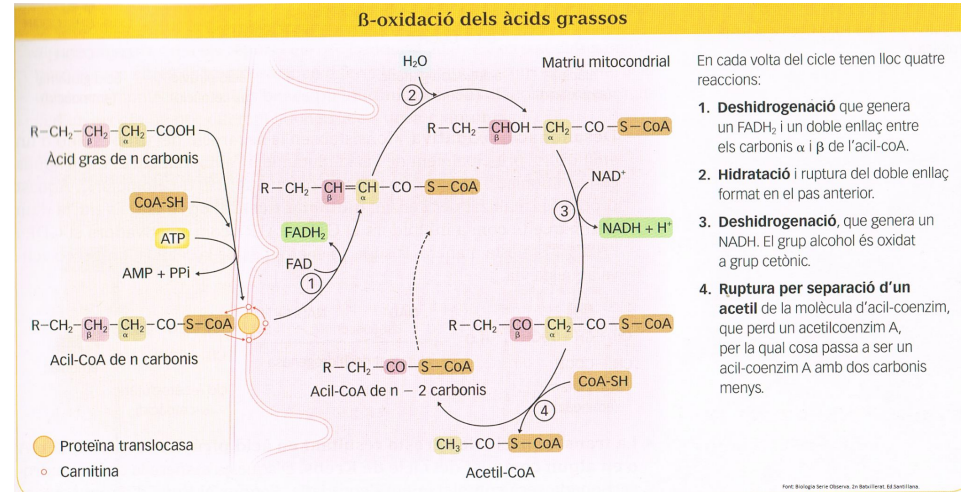
3. L'**acil-CoA** sofreix la primera oxidació del carboni β , i es forma un **acil-CoA insaturat** (amb un doble enllaç), i **1 FADH_2** .

4. L'**acil-CoA** s'**hidrata**, amb la qual cosa es forma un **β -hidroxiacil-CoA**, sense doble enllaç i amb un grup alcohol ($-\text{OH}$) en el carboni β .

5. El **β -hidroxiacil-CoA** sofreix l'oxidació del carboni β i es forma un **β -cetoacil-CoA** (amb un grup cetònic ($-\text{CO}-$) i un **$\text{NADH} + \text{H}^+$**

6. El **β -cetoacil-CoA** interacciona amb una molècula de CoA, amb la qual cosa es trenca en dues molècules, un **acetil-CoA** (2C) i un **acil-CoA**, que té dos carbonis menys ($n-2$) que el que va iniciar el cicle de la β -oxidació

El FADH_2 i NADH s'oxidaran en la cadena respiratòria per donar ATP.
Tots els acetil-CoA s'incorporen al cicle de Krebs i es degraden totalment.



3. Catabolisme dels lípids

La β -oxidació dels àcids grassos, es realitza mitjançant les següents reaccions:

Quin és el resultat de tot aquest procés?



L'acil-CoA de (n-2) pot iniciar un altre cicle de β -oxidació i originar un altre acetil-CoA i un acil-CoA de dos carbonis menys (n-4), i així successivament fins que s'obtinguin tan sols dues molècules d'acetil-CoA.

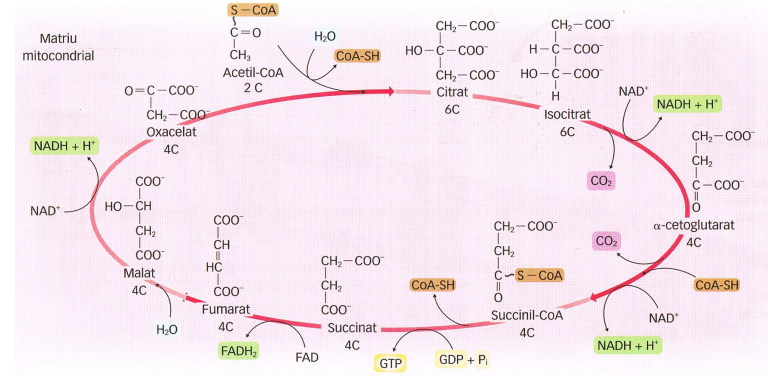
Les molècules d'acetil-CoA formades a la β -oxidació, poden seguir la **ruta catabòlica dels cicle de Krebs**, i degradar-se totalment de manera aeròbia.

Per tant..

- A cada volta de la β -oxidació dels àcids grassos es genera 1 NADH + 1 FADH₂ + Acetil-CoA
- L'acetil-CoA s'incorpora directament al cicle de Krebs.

Rendiment energètic del catabolisme dels lípids

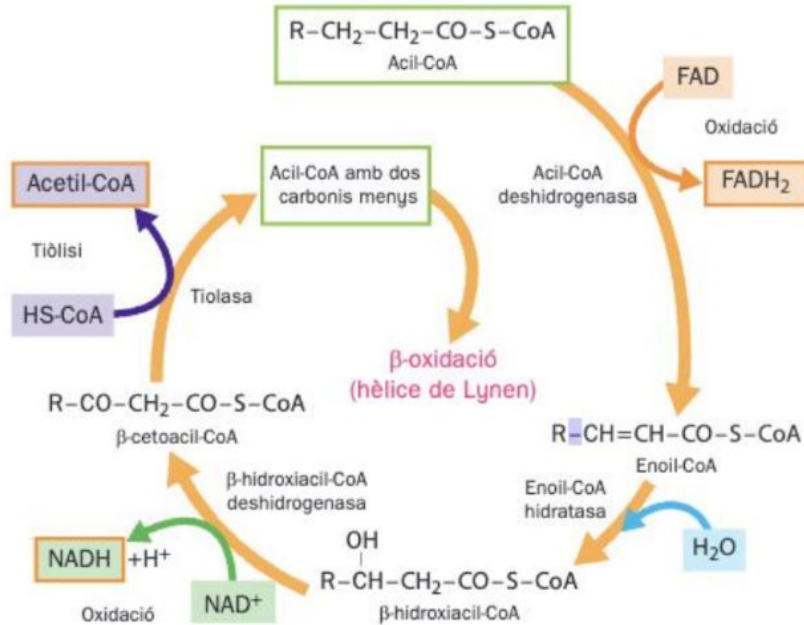
Cada lípid tindrà, segons la seva composició, un **rendiment energètic diferent**, ja que la quantitat d'ATP que es forma vindrà donada per la quantitat de carbonis que formen part del lípid.



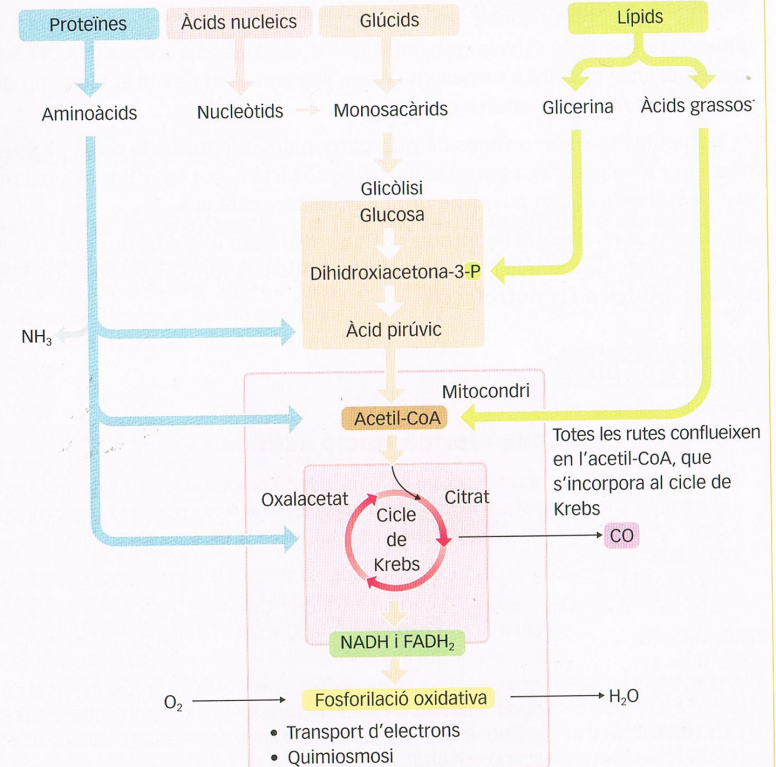
Balanç energètic de l'oxidació completa d'un àcid gras de 16 carbonis

Entrada al mitocondri		-2 ATP
β -oxidació	En cicle de Krebs i cadena respiratòria	
8 Acetil-CoA	12 ATP/acetil-CoA	+96 ATP
7 FADH ₂	2 ATP/FADH ₂	+14 ATP
7 (NADH+H ⁺)	3 ATP/(NADH+H ⁺)	+21 ATP
TOTAL		+129 ATP

3. Catabolisme dels lípids



Relacions entre les vies catabòliques per respiració de glúcids, lípids, proteïnes i àcids nuclears



4. Fermentacions

És un procés catabòlic en el qual **no intervé la cadena respiratòria**, per tant, no s'utilitza l'oxigen com a acceptor final d'electrons. Es tracta d'un procés **anaeròbic** que ocorre en el citoplasma, produint-se la degradació de la matèria orgànica a biomolècules orgàniques més simples amb l'objectiu d'obtenir energia.

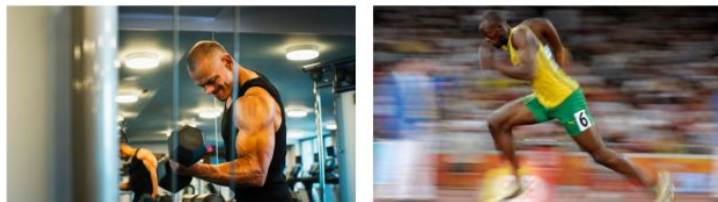
En funció del tipus de producte, es distingeix:

- **Fermentació alcohòlica:** el producte final és l'alcohol etílic
- **Fermentació làctica:** el producte final és l'àcid làctic
- **Fermentació butírica:** el producte final és l'àcid butíric
- **Fermentació pútrida:** són productes orgànics i pudents

Qui les realitza?

Són pròpies dels **microorganismes** (determinats llevats i bacteris), encara que alguna, com la fermentació làctica, es pot dur a terme al **teixit muscular** dels animals quan no arriba prou oxigen a les cèl·lules.

En les fermentacions s'obté ATP per **fosforilació a nivell de substrat**, ja que no hi intervé la ATP-sintasa.



Pot ocórrer en el múscul esquelètic davant exercicis d'alta intensitat, fet que provocarà l'acumulació d'àcid làctic (lactat) que, si s'acumula en grans quantitats, conduirà a la fatiga muscular.

4. Fermentacions

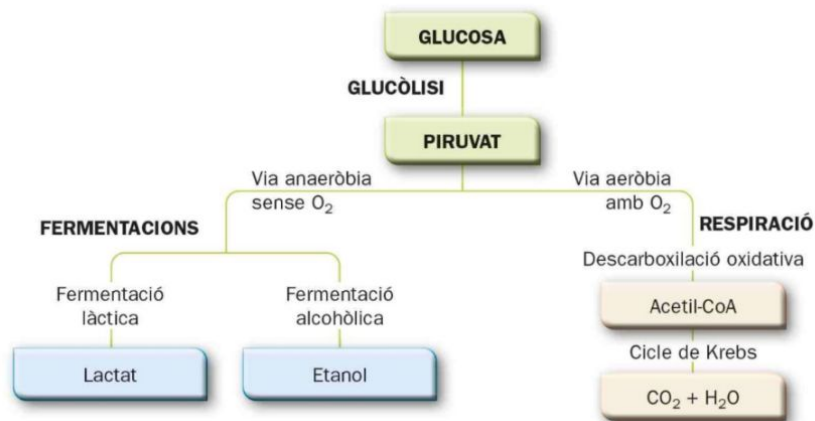
Es poden distingir dos tipus d'organismes segons el procés catabòlic que duen a terme:

1. **Anaerobi facultatiu**: organismes que en presència d'oxigen al medi, realitzen la respiració i, en absència d'aquest, realitzen fermentació.
 - Exemples: *Lactobacillus* i *Streptococcus*.
2. **Anaerobi estricte**: organismes que **sempre** realitzen la fermentació.
 - *Saccharomyces ellipsoïdes*: fabricació del vi
 - *Saccharomyces cerevisiae*: fabricació de cervesa.

Les fermentacions consten de dues etapes:

- **1a etapa**: **glucòlisi** → oxidació de la glucosa a piruvat, obtenint 2 ATP i 2 NADH.
- **2a etapa**: reducció del **piruvat** a productes finals.
 - Si el producte és àcid làctic parlem de la **fermentació làctica**
 - Si el producte és etanol ens referim a la **fermentació alcohòlica**.

En ambdós casos s'obté NAD⁺ que tornarà ser emprat en la glucòlisi.

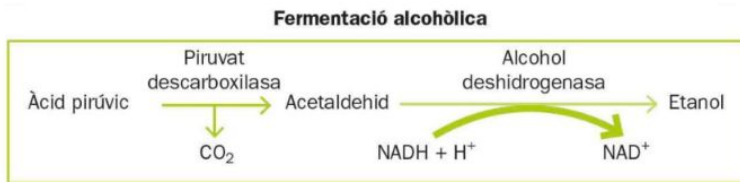


4. Fermentacions

4.1 Fermentació alcohòlica

És la transformació d'àcid pirúvic en etanol i diòxid de carboni.

- Es produeix quan determinats **fongs unicel·lulars** estan catabolitzant un líquid ric en sucres per mitjà de la respiració, esgoten l'oxigen disponible i continuen el catabolisme per mitjà de la fermentació.

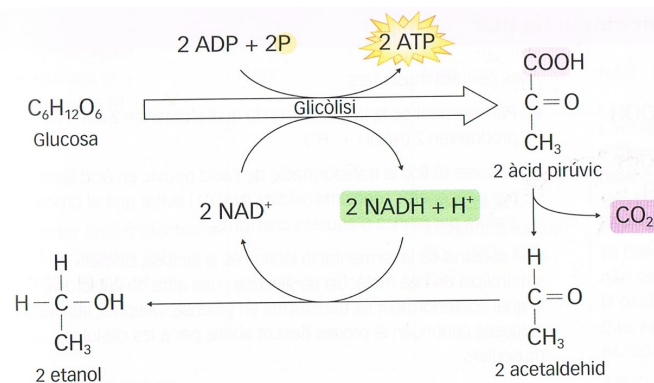
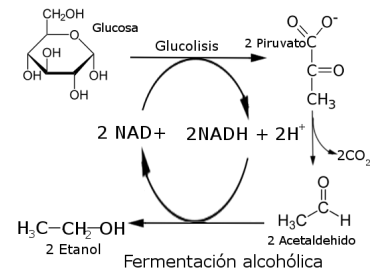


Com es produeix?

El **piruvat** procedent de la glucòlisi s'oxida donant lloc a **acetaldehid** i alliberant CO_2 .

- L'acetaldehid accepta els electrons cedits per NADH (que prové de la glucòlisi) i es redueix donant lloc a **etanol**.

Com a resultat s'obtenen 2 ATP (procedent de la glucòlisi) i 2 molècules d'etanol.

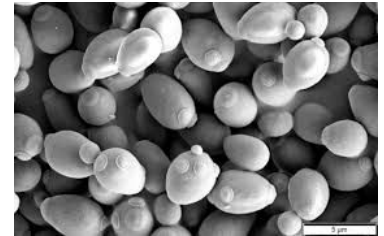


4. Fermentacions

4.1 Fermentació alcohòlica

La fermentació alcohòlica es duu a terme gràcies als **enzims** continguts en llevats del gènere *Saccharomyces*, que són anaerobis facultatius.

- Segons l'espècie de llevat, es pot arribar a obtenir **cervesa** (*S.cerevisiae*), **vi** (*S.ellipsoideus*) **sidra** (*S.apiculatus*).
- També s'empren per l'**elaboració del pa**.
 - En aquest darrer cas l'**alcohol s'elimina** durant el procés de cocció del pa.



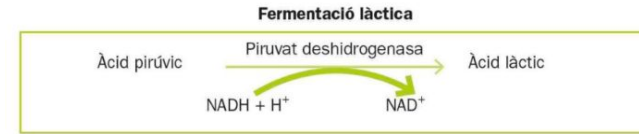
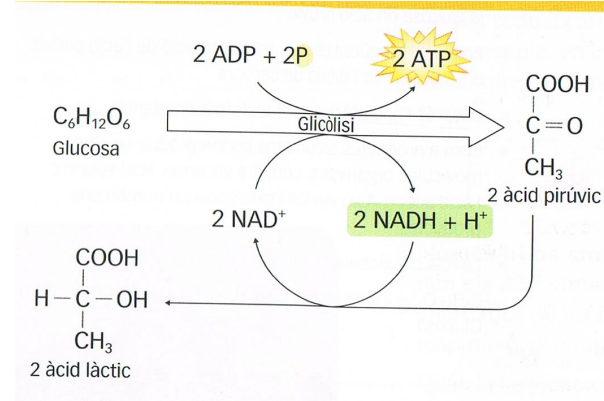
4. Fermentacions

4.2 Fermentació làctica

Es forma **àcid làctic** a partir de glucosa

Com es produeix?

- El **piruvat** procedent de la glucòlisi es redueix a **àcid làctic** emprant el NADH generat en la glucòlisi.
- Per molècula de glucosa s'obtenen **2 àcids làctics** i **2 ATP**



El **formatge, iogurt, kefir**, s'obtenen per aquest tipus de fermentació.

- L'àcid làctic disminueix el pH produint la desnaturalització de proteïnes de la llet, que es tornen insolubles i precipiten, transformant la textura i el gust de la llet.

També es produeix en **cèl·lules musculars** quan no hi ha suficient oxigen.

