

**Energia i Primer Principi de la Termodinàmica***Energia interna (U)*

En començar a parlar de calor i temperatura vam utilitzar un model de sòlid ideal



En aquest model les molècules tenen energia cinètica de vibració i energia potencial associada a les forces interacció amb altres molècules. Aquesta idea que vam utilitzar en aquest cas ideal el podem generalitzar i podem parlar de l'*energia interna* dels sistemes.

L'energia interna és l'energia total que conté un sistema termodinàmic.

Un dels postulats importants de la física és el de la conservació de l'energia. Quan un procés pateix un procés que li provoca una variació d'energia aquesta no desapareix es bescanviada amb el seu entorn. Si el bescanvi és d'energia cinètica l'anomenem calor, a les altres formes de bescanviar energia els anomenem treball.

Primer Principi de la Termodinàmica

Això ens permet enunciar el Primer Principi de la Termodinàmica

$$\Delta U = Q + W$$

La variació d'energia interna d'un sistema és la suma de l'energia bescanviada en forma de calor i el treball realitzat.

Si utilitzem notació diferencial

$$dU = \delta Q + \delta W$$

El signe δ que utilitzem per expressar les variacions de calor no ens ha de preocupar. Es tracta d'un formalisme matemàtic, la calor no és el que es coneix com una funció d'estat, sinó depèn del procés que segueixi el sistema, per això no s'utilitza el diferencial. És per tant una qüestió formal, però a efectes d'iniciar-se en termodinàmica podem pensar simplement que δQ és una quantitat infinitesimal d'energia bescanviada en forma de calor.

Conveni de signes

Un sistema pot guanyar o perdre energia interna, això és el que determina els signes que han de tenir la calor i el treball. Si un sistema guanya energia com conseqüència d'un flux de calor $Q > 0$, si dissipa calor llavors $Q < 0$. El mateix amb el terme de treball, si un sistema perd energia per la realització d'un treball $W < 0$, en canvi si el sistema guanya energia perquè des de l'entorn realitzem un treball sobre ell $W > 0$.



Cal anar amb compte, històricament la formulació del Primer principi de la Termodinàmica va néixer de l'estudi de la calor i es formulava com:

$$Q = \Delta U + W$$

Amb aquesta formulació el signe del treball és el contrari del que hem explicat. A molts llibres de física i enginyeria encara trobem aquesta formulació. En els llibres de química o biologia no. La formulació del Primer Principi i el conveni de signes que s'utilitzen a l'assignatura són els proposats per la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

Treball

A mecànica, en els estudis de física a secundària, s'explica que el treball és el producte de la força per al desplaçament:

$$W = F \Delta x$$

En una definició més rigorosa la força i el desplaçament són dues magnituds vectorials. El treball és un escalar obtingut mitjançant el producte escalar de la força pel desplaçament:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

$$W = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

En aquest tema no utilitzarem càlcul vectorial, però cal que reviseu els seus fonaments que ens caldran per entendre alguns conceptes, i alhora és fonamental en altres àmbits de la física.

El treball mecànic és un cas particular de treball, el treball pot tenir altres naturaleses. Podem definir treball com

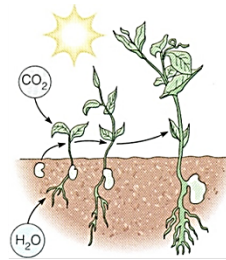
$$W = \Delta U - Q$$

Per exemple, si realitzem una reacció química, l'energia del sistema varia, si a aquesta variació d'energia li restem la calor bescanviada, el resultat és el treball.

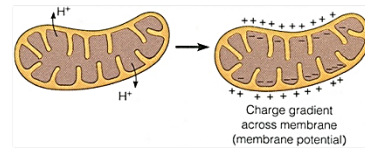
En biologia podem definir diversos tipus de treball, com els que es mostren a la figura:



Treball mecànic



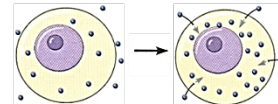
Treball de síntesis de biomassa



Treball elèctric



Treball de bioluminescència



Treball de concentració

Treball d'expansió i compressió d'un gas ideal

El treball realitzat per expandir o comprimir un gas ideal és un cas senzill des d'una perspectiva matemàtica i molt important per entendre diferents tipus de màquines tèrmiques, des dels motors d'explosió fins a les neveres. Ho estudiarem mínimament perquè ens ajudarà a introduir posteriorment alguns conceptes d'importància per entendre el funcionament de sistemes biològics.

Considerem un gas ideal dins d'un cilindre tancat per un èmbol. Anem a calcular el treball que fem si comprimim o expansionem el gas mitjançant un procés quasiestàtic reversible.

Considerem que estem expansionant un gas.



Força que fa el gas sobre l'èmbol: $F_g = P S$



Força que realitzem externament sobre l'èmbol: $F = -P S$

On S és la secció del cilindre o la superfície de l'èmbol.

Afirmar que ho estem fent de forma quasiestàtica reversible és equivalent a imaginar que ho fem amb lentitud extrema, seguint una successió d'estats d'equilibri. Òbviament es un procés ideal.

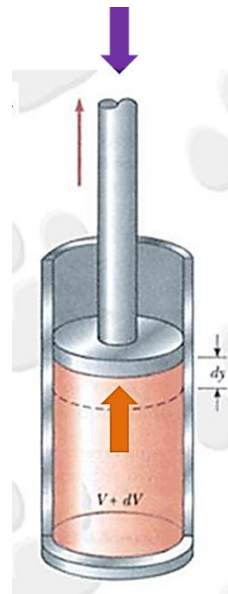
Procés
quasiestàtic $\Rightarrow F_{\uparrow} = F_{\downarrow}$
reversible

Calcularem el treball que realitzem sobre el sistema. La força que realitzem exteriorment és:

$$F = -P S$$

El treball en una definició elemental és força per desplaçament

$$\delta W = F dy = -P S dy$$





L'augment de volum és:

$$dV = S dy$$

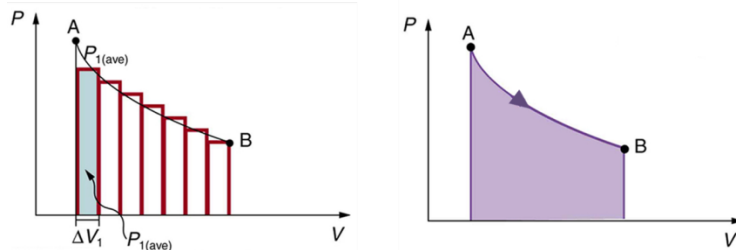
Per tant el treball el podem escriure com

$$\delta W = -P dV$$

Si integrem des del punt inicial fins el punt final

$$W = - \int_i^f P dV$$

Si utilitzem una representació Pressió-Volum



Podem veure que el treball coincideix, en valor absolut amb l'àrea que queda sota la corba

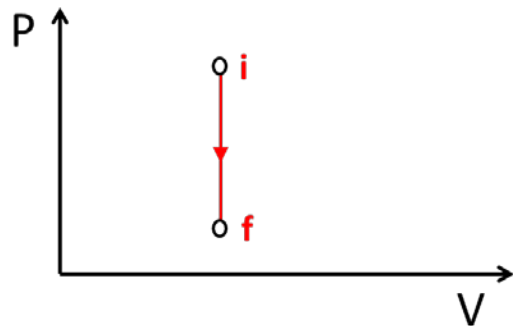
$$W = -\text{àrea sota la corba}$$

Exemples

Exemple 1. Procés a volum constant (isocòric)

En aquest cas $dV = 0$, per tant

$$W = - \int_i^f P dV = 0$$



Si proporcionem calor a un sistema que manté el seu volum constant:

$$Q = C_V \Delta T$$

Utilitzant el Primer Principi

$$\Delta U = Q + W$$

Atès que

$$W = 0$$

$$(\Delta U)_V = Q = C_V \Delta T$$

L'energia interna d'un gas ideal no depèn del procés que s'hagi seguit sinó de quin és l'estat del sistema, per tant

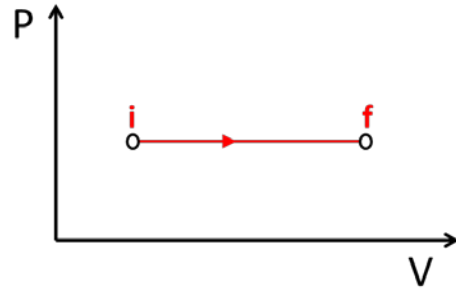
$$\Delta U = C_V \Delta T$$

és vàlid per qualsevol procés.



Exemple 2. Expansió isobàrica (a pressió constant)

$$W = - \int_i^f P dV = -P \int_i^f dV = -P \Delta V$$



Si proporcionem calor a un sistema que s'expansiona a pressió constant, la relació entre la calor proporcionada i l'augment de la temperatura és la capacitat calorífica a pressió constant

$$Q = C_p \Delta T$$

Si considerem el Primer Principi

$$\Delta U = Q + W$$

$$C_V \Delta T = C_p \Delta T - P \Delta V$$

Utilitzant l'equació d'estat del gas ideal

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Atès que la pressió és constant

$$\Delta V = \frac{nR}{P} \Delta T$$

Llavors

$$C_V \Delta T = C_p \Delta T - P \Delta V$$

$$C_V \Delta T = C_p \Delta T - nR \Delta T$$

D'on

$$C_p = C_V + nR$$

Per escalfar un gas a pressió constant hem de proporcionar més calor que si ho fem a volum constant atès que una part de la calor s'inverteix en realitzar treball.

Si utilitzem

$$C_p = C_V + nR$$

Recordant els valor que té la capacitat calorífica a volum constant d'un gas ideal:

	Gas ideal monoatòmic	Gas ideal diatòmic
C_V	$\frac{3}{2}nR$	$\frac{5}{2}nR$
C_P	$\frac{5}{2}nR$	$\frac{7}{2}nR$



Capacitats calorífiques de sistemes reals

Capacitats calorífiques molars ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) de diversos gasos a 25°C

GAS	C_V	C_P	C_V/R	C_P/R	$(C_P - C_V)/R$
MONOATÒMIC					
He	12.52	20.79	1.51	2.50	0.99
Ne	12.68	20.79	1.52	2.50	0.98
Ar	12.45	20.79	1.50	2.50	1.00
Kr	12.45	20.79	1.50	2.50	1.00
Xe	12.52	20.79	1.51	2.50	0.99
DIATÒMICS					
N_2	20.80	29.12	2.50	3.50	1.00
H_2	20.44	28.82	2.46	3.47	1.01
O_2	20.98	29.37	2.52	3.53	1.01
CO	20.74	29.04	2.49	3.49	1.00
POLIATÒMICS					
CO_2	28.17	36.62	3.39	4.40	1.02
N_2O	28.39	36.90	3.41	4.44	1.02
H_2S	27.36	36.12	3.29	4.34	1.05

L'exemple que estem estudiant també ens serveix per introduir una funció termodinàmica molt important, la funció Entalpia (H).

Es defineix com Entalpia a

$$H = U + PV$$

El seu ús té moltes aplicacions, una d'elles està relacionada amb els processos que esdevenen a pressió constant. Les variacions d'entalpia:

$$dH = dU + PdV + VdP$$

Si considerem un procés a pressió constant $dP = 0$

Per tant

$$(dH)_P = dU + PdV$$

Recordant que

$$\delta W = -PdV$$

$$(dH)_P = dU - \delta W$$

Si utilitzem el Primer Principi

$$dU = \delta Q + \delta W$$

d'on

$$\delta Q = dU - \delta W$$

Veiem doncs que



$$(dH)_P = \delta Q$$

En general

$$(\Delta H)_P = Q$$

Aquest resultat és general per qualsevol procés realitzat a pressió constant si no hi ha cap altre tipus de treball. Si mesurem la calor bescanviada en un procés a pressió constant estem mesurant les variacions d'entalpia. Per això en taules trobem sovint tabulades variacions d'entalpia, tal com vam veure en les taules de les propietats de l'aigua on es parlava de l'entalpia de canvi de fase de líquid a vapor.

Exemple 3. Expansió isoterma

$$W = - \int_i^f P dV$$

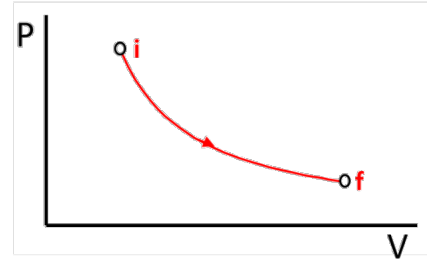
Si utilitzem l'equació del gas ideal:

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$W = - \int_i^f \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_i^f \frac{dV}{V} = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$W = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$



Tal com hem vist anteriorment

$$\Delta U = C_V \Delta T$$

Si estem considerant un procés a temperatura constant, $\Delta T = 0$ i per tant

$$\Delta U = 0$$

Utilitzant el Primer Principi

$$\Delta U = Q + W$$

Per tant

$$Q = -W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

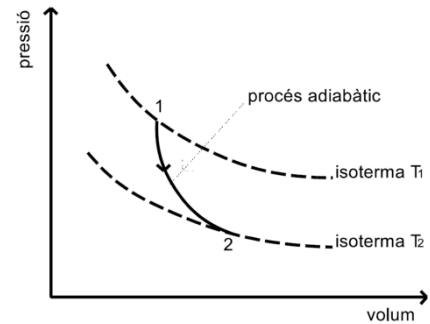


Exemple 4. Procés adiabàtic

Un procés adiabàtic per definició és aquell en que el sistema no bescanvia calor amb el seu entorn. Per tant

$$Q = 0$$

En una expansió adiabàtica el sistema realitza treball, però com que no hi ha bescanvi de calor, aquest treball l'haurà de realitzar a costa d'una disminució de la seva energia interna. Així doncs en una expansió adiabàtica hi haurà un refredament del sistema. En un diagrama PV un procés adiabàtic serà una corba que unirà dos punts de temperatures diferents, veiem doncs que el pendent de la corba adiabàtica haurà de ser superior al pendent de les isoterms. Mentre les isoterms són corbes que compleixen la Llei de Boyle



$$PV = \text{constant}$$

veurem que les corbes adiabàtiques obeeixen

$$PV^\gamma = \text{constant}$$

On l'exponent γ és

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Demostració:

$$dU = \delta W$$

$$dU = -PdV$$

$$C_v dT + PdV = 0$$

$$dT = -\frac{1}{C_v} PdV$$

Si considerem l'equació d'estat d'un gas ideal

$$PV = nRT$$

$$PdV + VdP = nRdT$$

I considerant el valor de dT per un procés adiabàtic:

$$PdV + VdP = -nR \frac{1}{C_v} PdV$$

$$C_v PdV + C_v VdP = -nR PdV$$

$$(C_v + nR) PdV + C_v VdP = 0$$

Recordant que



$$C_V + nR = C_P$$

$$C_P P dV + C_V V dP = 0$$

Dividint els dos termes per C_V , P i V

$$\frac{C_P}{C_V} \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

Recordem que hem definit:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

Si integrem aquesta darrera equació

$$\gamma \int \frac{dV}{V} + \int \frac{dP}{P} = 0$$

$$\gamma \ln V + \ln P = \text{constant}$$

$$\ln(PV^\gamma) = \text{constant}$$

$$PV^\gamma = \text{constant}$$

Demostrada aquest propietat, podem calcular el treball en un procés adiabàtic, considerem

$$PV^\gamma = C$$

$$P = C V^{-\gamma}$$

Lavors

$$W = - \int_i^f P dV = - \int_i^f C V^{-\gamma} dV = C \left(\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right)_i^f = \frac{-C V_f^{-\gamma+1} + C V_i^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}$$

Substituïrem C per

$$C = P_f V_f^\gamma = P_i V_i^\gamma$$

$$W = \frac{-P_f V_f^\gamma V_f^{-\gamma+1} + P_i V_i^\gamma V_i^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} = \frac{-P_f V_f + P_i V_i}{1-\gamma} = \frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma-1}$$

$$W = \frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma-1}$$

Comentari: Procés politròpic

Es defineix com transformació politròpica si compleix

$$PV^n = \text{constant}$$



On n és una constant que dependrà de la naturalesa del procés.

Una transformació adiabàtica és una politròpica on

$$n = \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Una transformació isoterma és una politròpica on

$$n = 1$$

En les transformacions politròpiques on $n \neq 1$ podem calcular el treball seguint el mateix procediment desenvolupat per l'adiabàtica substituint γ per n .

Resum dels exemples:

	TIPUS DE PROCÉS			
	ISÒBAR ($P = ct$)	ISÒCOR ($V = ct$)	ISOTERM ($T = ct$)	ASIABÀTIC ($Q = 0$)
Q	$C_p \Delta T$	$C_v \Delta T$	$nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	0
W	$-P \Delta V$	0	$-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$	$\frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma - 1}$ $C_v \Delta T$
ΔU	$C_v \Delta T$	$C_v \Delta T$	0	$C_v \Delta T$
ΔH	$C_p \Delta T$	$C_p \Delta T$	0	$C_p \Delta T$

Mireu:

<http://www.educaplus.org/game/transformaciones-termodinamicas>

Màquina de Carnot

La Màquina de Carnot és una màquina tèrmica, una màquina que aprofitar bescanvis de calor per generar treball. Realment és una màquina ideal, és un cicle molt difícil de realitzar experimentalment, tot i així és el fonament per entendre el funcionament dels motors tèrmics (gasolina, dièsel, turbines,...) i serveix per introduir conceptes que també són importants per entendre els sistemes biològics.

El cicle de Carnot té quatre etapes, dues isotermes i dues adiabàtiques. En la següent animació ho podeu veure:

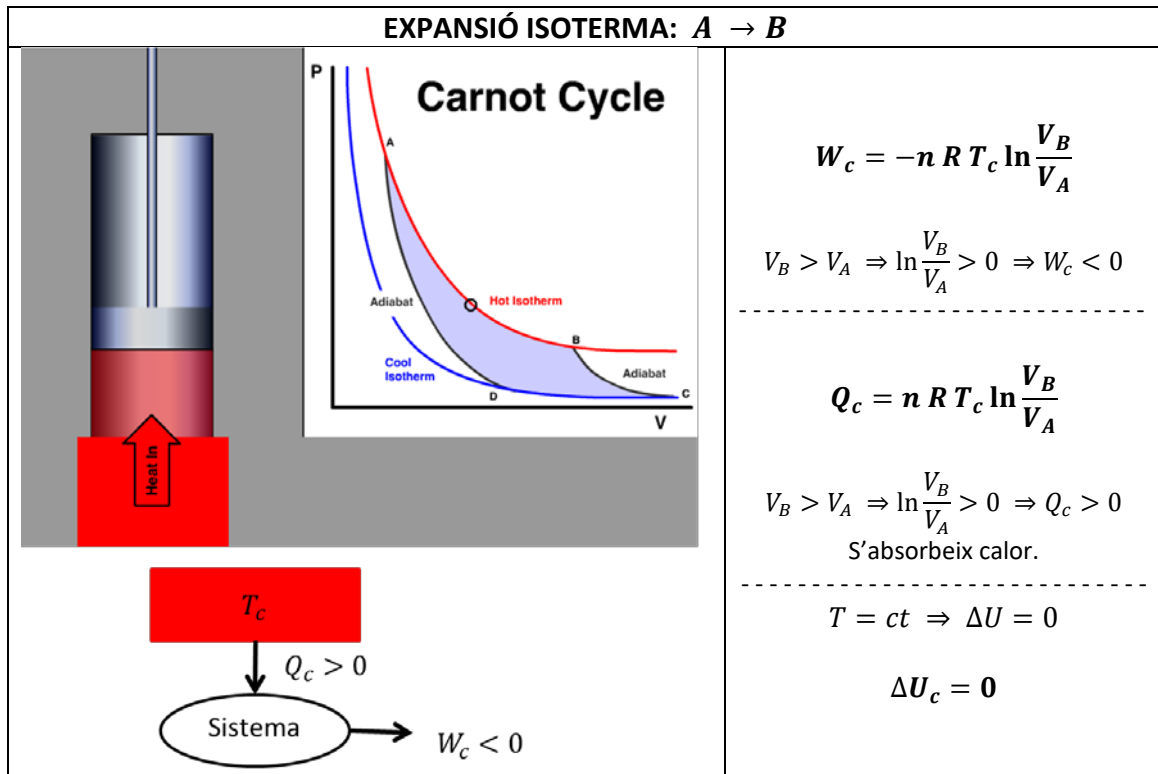
<http://science.sbccc.edu/physics/flash/heatengines/Carnot%20cycle.swf>



Etales del cicle:

a) Expansió isoterma T_c

Imaginem que tenim un gas a l'interior d'un èmbol en contacte tèrmic amb un sistema molt gran a temperatura T_c . Augmentem el volum ocupat pel gas de forma quasiestàtica reversible. La temperatura es mantindrà constant (T_c), el sistema realitza treball, però la temperatura es manté constant gràcies a l'absorció de calor (Q_c) de la font de temperatura T_c .





b) Expansió adiabàtica

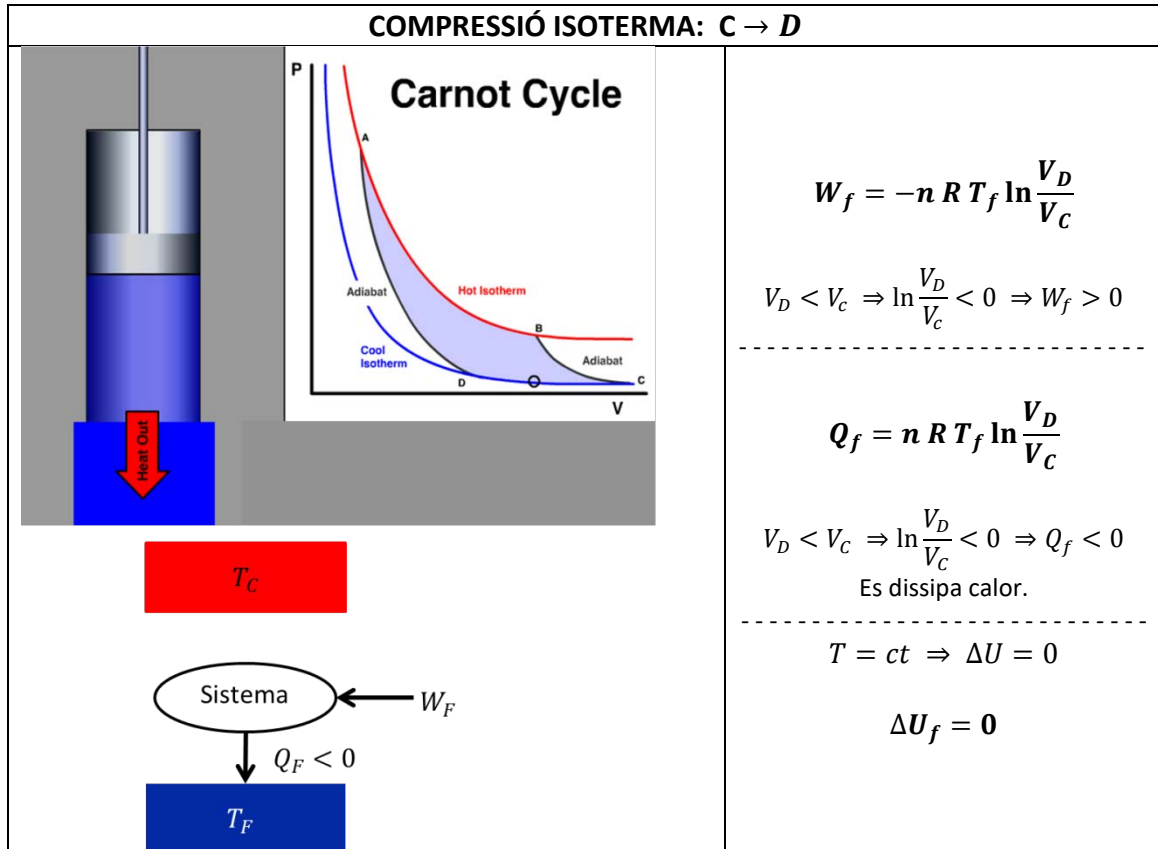
A continuació envoltam l'èmbol de parets adiabàtiques i seguim expansionant de forma quasiestàtica reversible, el sistema realitza treball, per realitzar treball ha de "consumir" energia, i es produeix un refredament del gas fins una temperatura T_F .

EXPANSIÓ ADIABÀTICA: $B \rightarrow C$	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div> <p style="text-align: center;">Carnot Cycle</p> </div> </div> <div style="margin-top: 20px; text-align: center;"> <div style="background-color: red; color: white; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">T_c</div> <div style="margin: 10px auto; width: 150px;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; display: inline-block;">Sistema</div> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> \rightarrow W_{adi} </div> </div> <div style="background-color: blue; color: white; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">T_F</div> </div>	<div style="margin-top: 20px;"> $W_{BC} = \frac{P_C V_C - P_B V_B}{\gamma - 1} = C_v (T_f - T_c)$ <p style="text-align: center;"><i>expansió</i> $\Rightarrow W_{BC} < 0$</p> <p style="text-align: center;">$T_f < T_c \Rightarrow W_{BC} < 0$</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p style="text-align: center;">$Q_{BC} = 0$</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p style="text-align: center;">--</p> <p style="text-align: center;">$\Delta U_{BC} = W_{BC} = C_v (T_f - T_c)$</p> <p style="text-align: center;">$\Delta U_{BC} = C_v (T_f - T_c)$</p> </div>



c) Compensió isoterma T_F

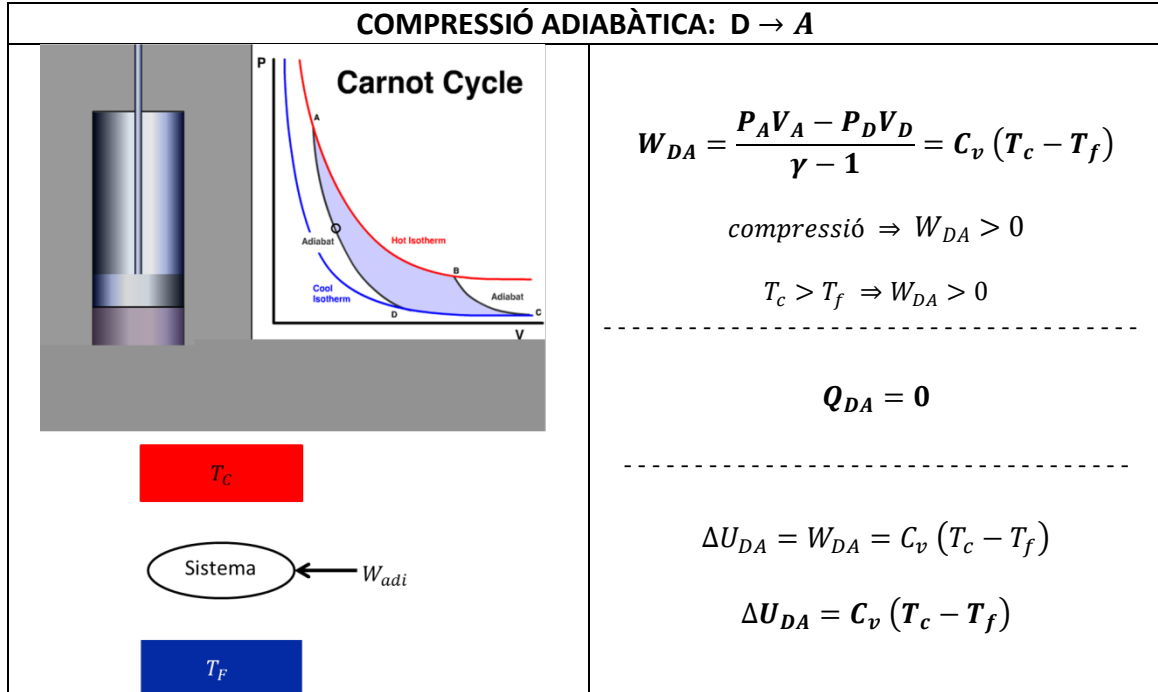
Col·loquem el gas en contacte tèrmic amb un gran sistema a temperatura T_F i comprimim reversible i quasiestàticament. Estem realitzant treball sobre el sistema, la temperatura d'aquest es manté constant gràcies a que el sistema dissipa calor (Q_F) cap a la font tèrmica a temperatura T_F .





d) Compensió adiabàtica

Finalment tornem a envoltar el sistema de parets adiabàtiques i seguim comprimint. Estem realitzant treball sobre el sistema, aquest treball fa augmentar l'energia interna del sistema, augmentem la temperatura fins assolir l'estat inicial a temperatura T_c .



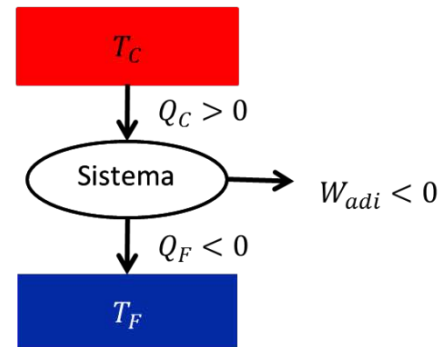
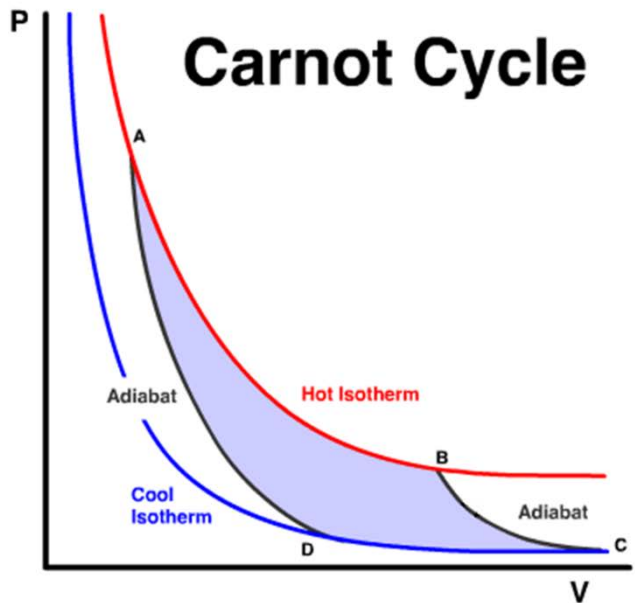
Al llarg del cicle hem absorbit calor ($Q_c > 0$) de la font a temperatura T_c i hem cedit calor (Q_f) a la font tèrmica a temperatura T_f , en realitzar l'estudi dels valors de la calor i el treball que hem anat realitzant a cada part del cicle veurem que Com que hem tornat a les condicions inicials

$$\Delta U = 0$$

Considerant el Primer Principi per tot el cicle

$$Q_c + Q_f + W = 0$$

La diferència entre la calor absorbida i la calor cedida l'hem convertit en treball ($W < 0$). Hem aconseguit una màquina tèrmica, és dir un mecanisme per transformar energia tèrmica en treball. Transformem una part de l'energia que hem absorbit en forma de calor, d'una font tèrmica, en treball, i una part de l'energia es dissipa també en forma de calor cap a una font tèrmica més freda.



Podem definir rendiment de la màquina tèrmica com:

$$\eta = \frac{\text{benefici}}{\text{cost}}$$

El benefici d'una màquina tèrmica és el treball que realitzem, el cost l'energia que hem absorbit (Q_C).

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C}$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q_C + Q_F + W \\ \text{cicle} &\Rightarrow \Delta U = 0 \\ -W &= Q_C + Q_F \end{aligned}$$

Si substituïm Q_C i Q_F podem trobar finalment:

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = \frac{T_C - T_F}{T_C}$$

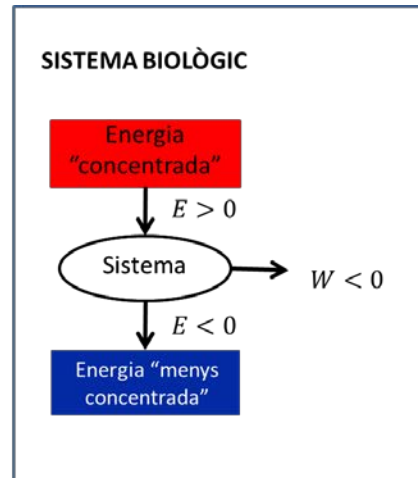
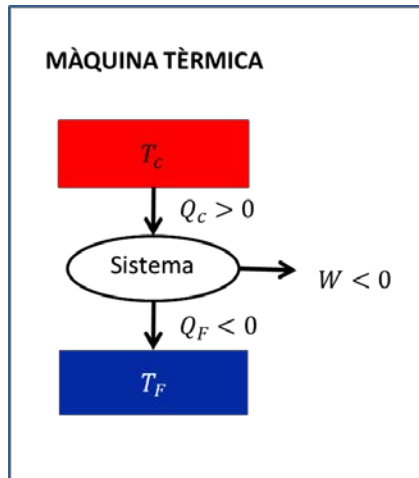
Aquest és el rendiment d'una màquina tèrmica ideal, qualsevol màquina tèrmica real que treballi entre aquestes dues temperatures tindrà un rendiment inferior.

Constatem que no podem transformar tota la calor en treball, necessàriament una part important d'energia es dissipa cap a una altra font tèrmica.

BIOFÍSICA

Introducció a la termodinàmica

Aquestes conclusions que tenen un interès conceptual i tecnològic les podem utilitzar també per pensar en el funcionament dels sistemes biològics

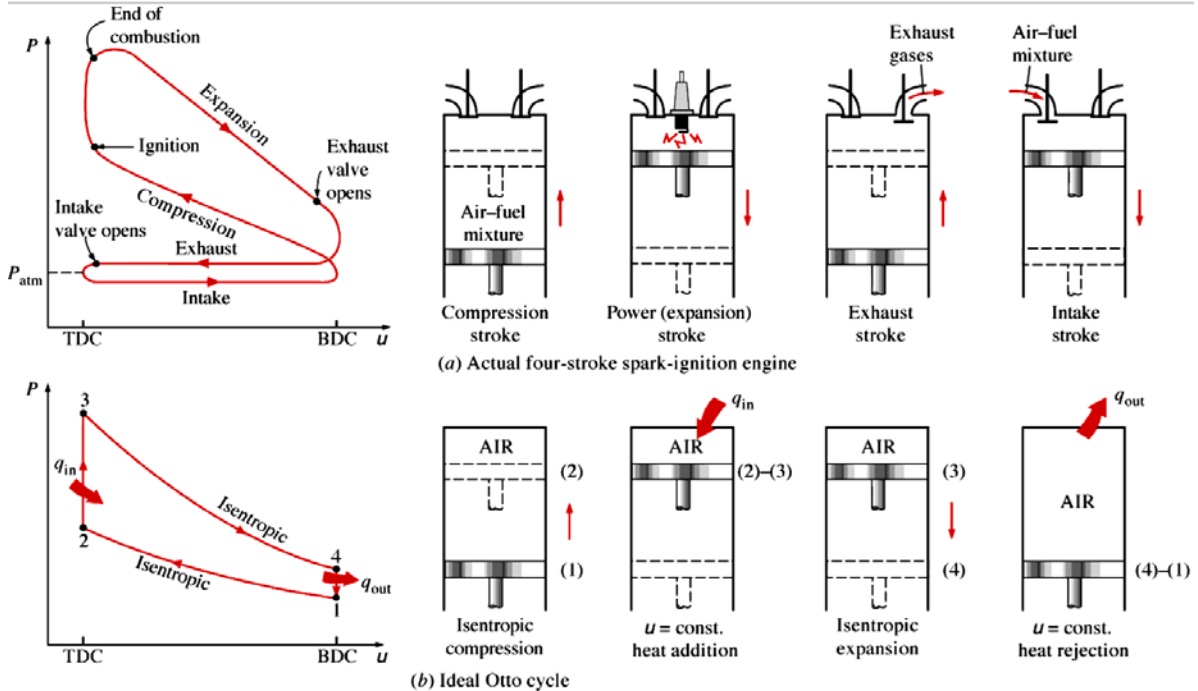




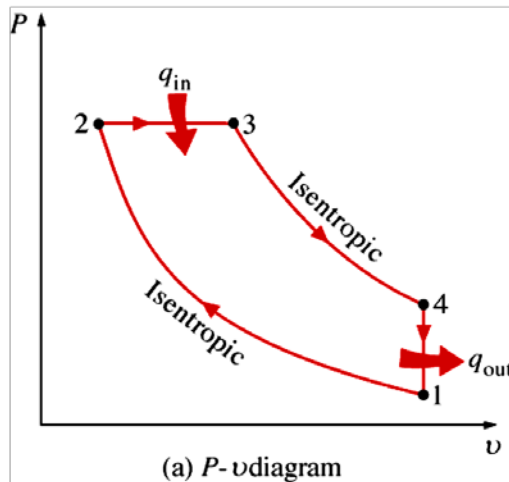
El nostre interès en aquesta assignatura és la biofísica, tot i així val la pena comentar que el que estem fent és útil per estudiar motors reals en l'enginyeria com el motor de gasolina (cicle d'Otto), el motor diesel o el motor Rankine (turbines).

Nota: Un procés adiabàtic també es pot anomenar procés isoentròpic.

Cicle d'Otto



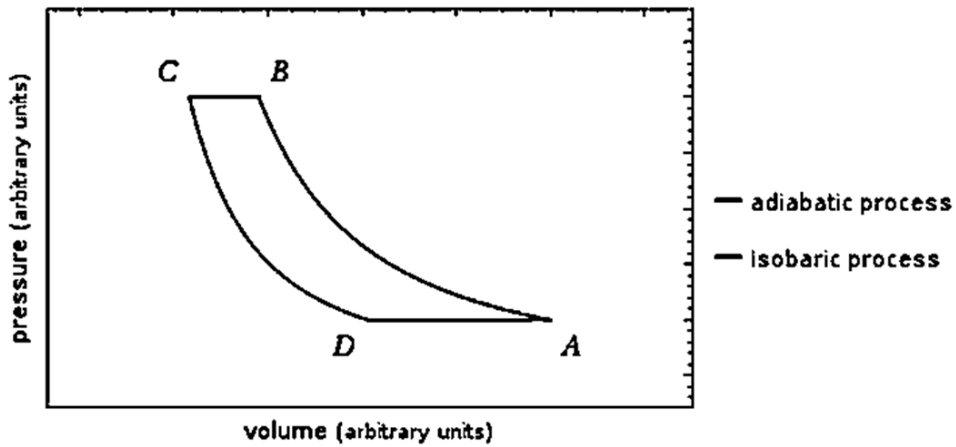
Cicle Diesel





Cicle de Brayton

Pressure vs. volume:

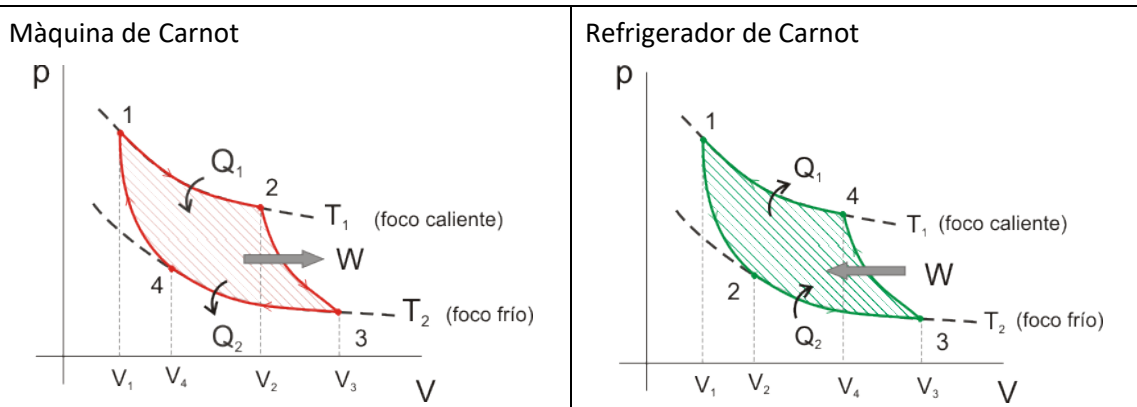


Podeu veure més cicles a:

<https://www.wolframalpha.com/examples/ThermodynamicCycles.html>

D'altra banda, les neveres o les bombes de calor també es fonamenten en cicles termodinàmics, però enlloc de girar en el sentit de les agulles del rellotge ho fan en sentit contrari.

Exemple (sentit del cicle $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$):





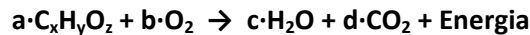
2.7. Energia i metabolisme

Despesa energètica i primer principi

Els organismes complexos, com els humans, han de ser capaços d'emmagatzemar energia per poder-la consumir de progressivament al llarg del temps per tal de mantenir els gradients iònics a través de les membranes, enviar corrents elèctrics a les neurones, realitzar reaccions endotèrmiques o fer teixits nous, entre d'altres. Aquesta energia s'obté de l'alimentació i s'emmagatzema en enllaços químics per ser recuperada, quan es necessita, mitjançant processos d'oxidació. Les substàncies orgàniques que s'utilitzen són:

- **Glucosa:** font principal d'energia, es distribueix per la sang.
- **Glucogen:** polisacàrid de glucosa present en poca quantitat a fetge i músculs, per fer esforços ràpids.
- **Teixit adipós:** magatzem principal d'energia, triglicèrids deshidratats amb alt contingut energètic per unitat de massa.

Per recuperar l'energia emmagatzemada cal realitzar una reacció d'oxidació del tipus:



Per tant, a partir del consum d'oxigen es pot determinar el consum energètic d'un organisme. La relació entre consum d'oxigen i despesa energètica dependrà de quina molècula s'estigui oxidant (glucosa, glucogen o triglicèrids), però de mitjana es pot considerar que s'obtenen **4.83 kcal per litre d'O₂ (uns 20 kJ / L O₂)**. Aquest valor és el que es coneix com a equivalent calorífic de l'oxigen. A la taula següent tenim els equivalents calorífics de l'oxigen segons el tipus d'aliment (hidrat de carboni = glúcid).

Contenido energético medio por unidad de masa de alimento y equivalente calorífico del oxígeno de una dieta típica		
Alimento	Contenido energético por unidad de masa (kcal g ⁻¹)	Equivalente calorífico del oxígeno (kcal litro ⁻¹)
Hidrato de carbono	4,1	5,05
Proteína	4,2	4,46
Grasa	9,3	4,74
Etanol	7,1	4,86
Promedio estándar		4,83

Recordem que en tots els intercanvis energètics cal que es compleixi el Primer Principi ($\Delta U = Q + W$), així com en la despesa energètica per unitat de temps ($\Delta U/\Delta t = Q/\Delta t + W/\Delta t$). Quan el nostre cos consumeix energia emmagatzemada es produeix una disminució de l'energia interna del nostre cos ($\Delta U_{\text{despesa}} < 0$). La taxa de canvi (disminució) de l'energia interna estarà relacionada, com hem comentat, amb la taxa de consum d'oxigen. En canvi, quan mengem i emmagatzmem l'energia obtinguda en enllaços químics podem parlar d'un augment de l'energia interna del nostre cos ($\Delta U_{\text{ingesta}} > 0$). Tot i que els ritmes d'ingesta i despesa són



diferents, en promig la variació d'energia interna del nostre cos ha de ser pròxima a zero (en estat estacionari). Podem pensar que, per mantenir un estat estacionari, al llarg del dia hem de gastar tanta energia com hem emmagatzemat, de manera que $\Delta U_{\text{GLOBAL}} = 0$.

Taxes metabòliques

La taxa metabòlica és la despesa energètica per unitat de temps ($\Delta U/\Delta t$). Podem parlar de la taxa metabòlica en un moment determinat (per exemple, quan realitzem una activitat concreta), o bé de valors mitjans al llarg del dia. Veiem en primer lloc les diverses taxes metabòliques que representen la despesa energètica mitjana d'una persona:

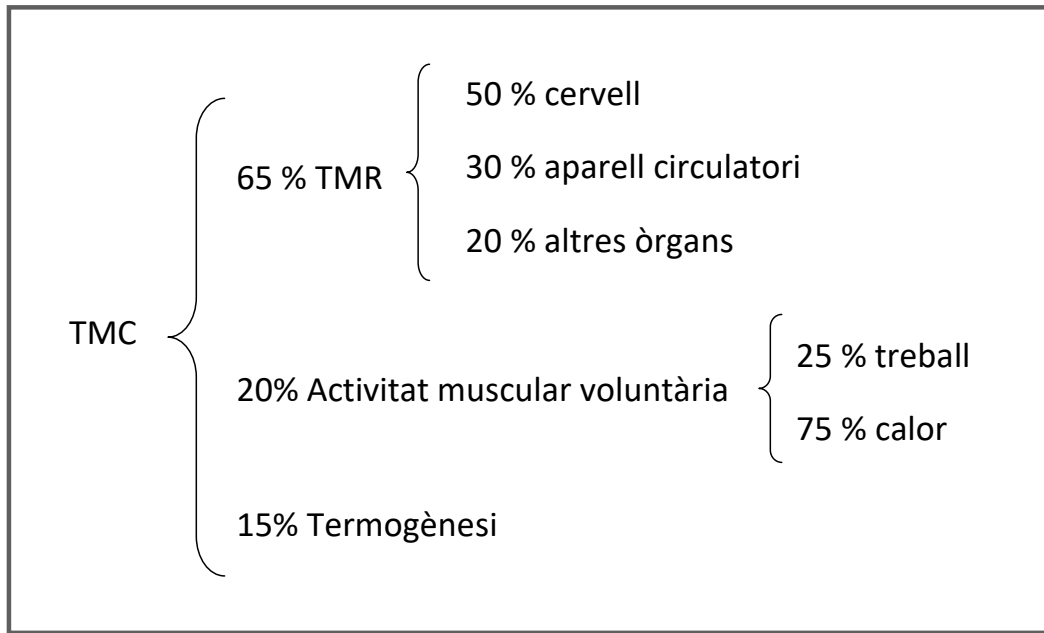
- **Taxa metabòlica en repòs (TMR):** consum metabòlic mínim per al manteniment de les funcions vitals, habitualment expressat en kJ/h. Es determina com el **consum metabòlic per hora d'un individu estirat, en repòs, en un ambient tèrmicament neutre i després de 10 h en dejú**. S'anomena també *Taxa metabòlica estàndard (TME)*. S'estima que la TMR es reparteix entre els òrgans de la manera següent:
 - 50% de la TMR al cervell
 - 30% de la TMR en l'aparell circulatori
 - 20% de la TMR en altres òrgans (mecànica de cor i pulmons, funcions cel·lulars, etc...)
- **Taxa metabòlica de camp (TMC):** consum promig per unitat de temps al llarg d'un dia **d'activitat normal**. S'inverteix en el manteniment (TMR), en l'activitat muscular voluntària i en termogènesi:

$$\text{TMC} = \text{TMR} + \text{activitat muscular voluntària} + \text{termogènesi}$$

- **Activitat muscular voluntària:** involucrada en mantenir la postura, moviment de braços i cames, etc.... És molt variable segons els hàbits de vida i el tipus de feina. En una societat sedentària representa entre el 15% i el 20% de la TMC. L'eficiència química del treball muscular voluntari (i, en general, de qualsevol treball mecànic que realitzi el cos) és del 25%. La resta (75%) es dissipa en forma de calor.
- **Termogènesi:** és l'energia utilitzada en moviments involuntaris com els moviments digestius, els calfreds, l'assimilació de nutrients, transport i emmagatzematge de les reserves, etc... Representa, aproximadament, el 15% de la TMC.



Al quadre següent es resumeix el balanç de la despesa energètica d'una persona, de mitjana::



- Taxa metabòlica durant una activitat física

Com hem comentat, la taxa metabòlica instantània ($\Delta U/\Delta t$) pot augmentar puntualment quan realitzem una activitat. A la taula següent es pot veure quina és la despesa energètica mitjana en algunes activitats habituals per unitat de massa de la persona que les realitza, per un home de 20 anys:

Actividad	$-(1/m) (\Delta V/\Delta t) (W \text{ kg}^{-1})$
Dormir	1,1
Acostado y despierto	1,2
Sentado en posición recta	1,5
De pie	2,6
Pasear	4,3
Temblar	hasta 7,6
Montar en bicicleta	7,6
Traspalar	9,2
Nadar	11,0
Moverse pesadamente	11,0
Esquiar	15,0
Correr	18,0

BIOFÍSICA

Introducció a la termodinàmica



Algunes dades:

- Metabolisme en repòs: (exemple) home, 30 anys, 70 kg, 1,73 m d'alçada, 1,8 m² de superfície dissipa uns 84 W.
- **L'activitat física pot arribar a multiplicar per 10 la dissipació de calor.**
- Un home de mitjana genera 108 W assegut llegint o escrivint,... El valor màxim és de 1250 W als 20 anys i de 730 W als 70 anys. Les dones un 30 % inferior.
- Els atletes poden sobrepassar els 2000 W.
- **La dissipació de calor es pot mesurar de forma indirecta a través del consum d'oxigen, que va des de 0.25 L/min (repòs) fins al 2 L/min (activitat extrema).**

Una forma alternativa es utilitzar l'energia dissipada per unitat de superfície.

Índices metabólicos durante diversas actividades (tomado del Handbook of Fundamentals del Cap. 8, tabla 4)		Actividades de oficina:	
Actividad	Índice metabólico* W/m ²		
Reposo:		Leer, sentado	55
Dormir	40	Escribir	60
Reclinarse	45	Mecanografiar	65
Sentado, quieto	60	Archivar, sentado	70
De pie, relajado	70	Archivar, de pie	80
Caminar (a nivel):		Caminar por allí	100
2 mph (0.89 m/s)	115	Levantar objetos/empacar	120
3 mph (1.34 m/s)	150	Conducir/volar:	
4 mph (1.79 m/s)	220	Automóvil	60-115
		Avión, rutinario	70
		Vehículo pesado	185
		Actividades ocupacionales diversas:	
		Cocinar	95-115
		Limpiar la casa	115-140
		Trabajo en máquinas:	
		Ligero	115-140
		Pesado	235
		Manejar bultos de 50 kg	235
		Trabajo de picar y palear	235-280
		Actividades diversas de placer:	
		Bailar, socialmente	140-255
		Calistenia/ejercicio	175-235
		Tenis, singles	210-270
		Basquetbol	290-440
		Lucha, en competencia	410-505

Per trobar la potència dissipada ens cal llavors conèixer la **superfícies d'homes i dones, una aproximació és:**

D. DuBois (1916):

$$A_S = 0.202 \text{ m}^{0.425} \text{ h}^{0.725} \text{ m}^2$$

On m és la massa i h l'alçada de la persona.



Altres expressions les podem trobar a:

http://en.wikipedia.org/wiki/Body_surface_area

Rendiment en la utilització dels aliments

El rendiment dels éssers humans en utilitzar l'energia química dels aliments per realitzar un treball (mecànic) pot definir-se de diverses maneres. El conveni més habitual es basa en comparar la taxa a la que es realitza el treball mecànic ($|\Delta \dot{W}|$) amb la despesa energètica real ($|\Delta \dot{U}|$) menys la corresponent a la TMR ($|\Delta \dot{U}_{TMR}|$):

$$e = \frac{|\Delta \dot{W}|}{|\Delta \dot{U}| - |\Delta \dot{U}_{TMR}|} \cdot 100$$

Aquest rendiment mai serà del 100%, ja que una part important de l'energia disponible (no gastada en manteniment del cos, TMR) es dissipa en forma de calor. A la taula següent es poden veure els rendiments màxims d'alguns treballs mecànics.

Rendimientos máximos de trabajos físicos	
Actividad	Rendimiento en porcentaje
Traspalar en posición inclinada	3
Levantar pesos	9
Girar una rueda pesada	13
Subir escaleras de mano	19
Subir escaleras	23
Montar una bicicleta	25
Escalar colinas con una pendiente de 5°	30

Adaptado de E. Grandjean, *Fitting the Task to the Man: An Ergonomic Approach*, Taylor and Francis, Londres, 1969.

BIOFÍSICA

Introducció a la termodinàmica



Comoditat tèrmica

Hi ha animals adaptats a entorns freds i humits, com poden ser els ossos polars, els humans no. Els humans som “animals tropicals”. Per això ens cal estratègies “culturals” per adaptar-nos al fred.

La comoditat tèrmica ha estat un element cabdal a la història de la humanitat, per exemple en la qualitat dels llocs on viure, des la vida en coves escalfant-se amb foc fins a la calefacció central (iniciada pels romans), la utilització de tancaments transparents (vidres i altres) per deixar passar la llum i la radiació infraroja, o decidint orientar les cases cap al sud per aprofitar la radiació solar. Tot són accions per aconseguir la comoditat tèrmica.

La comoditat tèrmica depèn de:

- **Temperatura**
- **Humitat relativa**
- **Moviment de l'aire**

Amb roba “normal”, en repòs tindrem comoditat tèrmica:

23-27 °C de temperatura de l'aire i superfícies envoltants (sense roba 29-31 °C).

30-70 % d'humitat relativa, el millor un 50 %.

Velocitat de l'aire per sota de 9 m/min (hivern) i de 15 m/min (estiu).

El vent pot ser causa d'incomoditat tèrmica, per exemple a l'exterior un moviment de 48 km/h a 10 °C produeix la mateixa sensació que -7 °C amb vent de 3 km/h.

Què és condicionament d'aire?

El condicionament d'aire és escalfament o refredament, humidificació o des-humidificació, neteja, desodorització amb l'objectiu de proporcionar comoditat tèrmica a les persones.

Un bon sistema de condicionament ha de proporcionar condicions uniformes per evitar corrents d'aire, radiació tèrmica asimètrica, terres freds o calents, estratificació de temperatures.

Per tenir comoditat tèrmica la asimetria per radiació tèrmica no ha de sobrepassar els 5°C en direcció vertical i 10°C en direcció horitzontal. La asimetria es pot reduir amb bons sistemes d'aïllament.

Algunes dades:

La calor específica mitjana del cos humà és de 3.49 kJ/kg °C. Disminuir 1 °C la temperatura significa perdre uns 244 kJ per un home de 70 kg.

Caigudes de temperatura:

0.5°C : incomoditat notable però acceptable

BIOFÍSICA

Introducció a la termodinàmica



1.3 °C: si dorms et despertes, representa una caiguda de 0.5°C interna i uns 3 °C externa.

2.6 °C: incomoditat extrema

Una caiguda de la temperatura interna per sota de 35°C provoca danys en els mecanismes de regulació de la temperatura, una caiguda per sota de 28°C pot provocar la mort.