



Termodinàmica Fonamental

Luis Carlos Pardo
planta 11 Despatx 11.61

- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència

2.- Cicle de Carnot

3.1.- Rendiment del cicle de Carnot

3.- Segon principi de la termodinàmica

3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck

3.2.- Enunciat de Clausius

3.3.- Equivalència entre els dos enunciats

3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie

4.- Teorema de Carnot

5.- Teorema de Clausius

6.- Escala termodinàmica de temperatures

7.- Motors

7.1.- Motor de Stirling

7.2.- Màquina de vapor

7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto

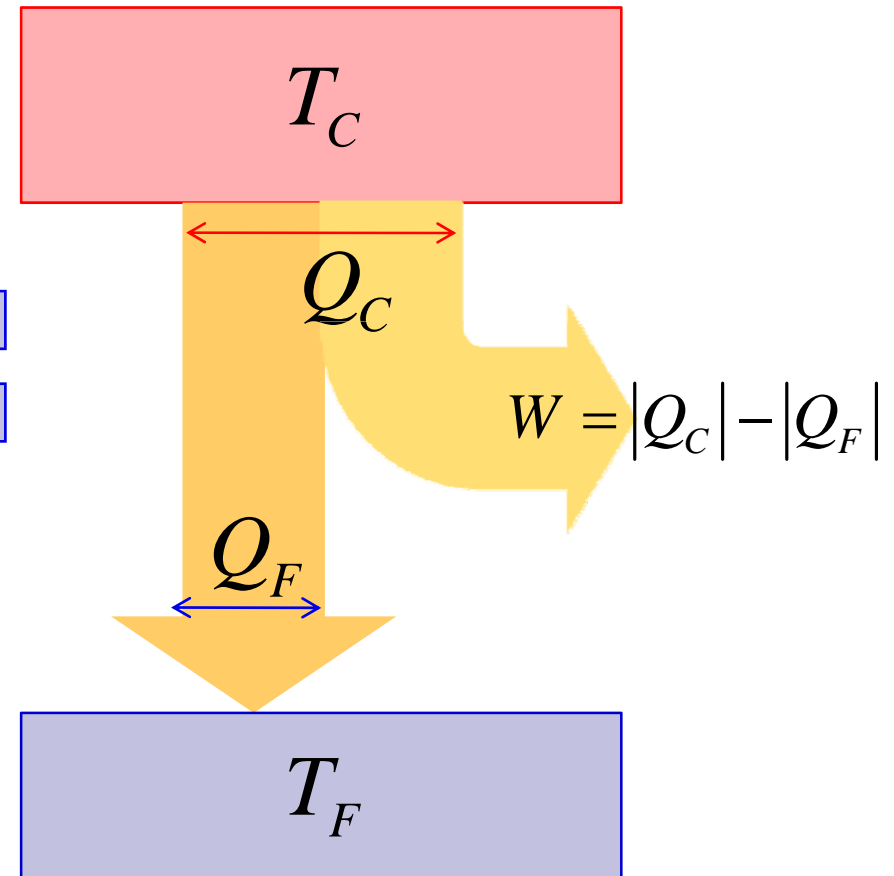
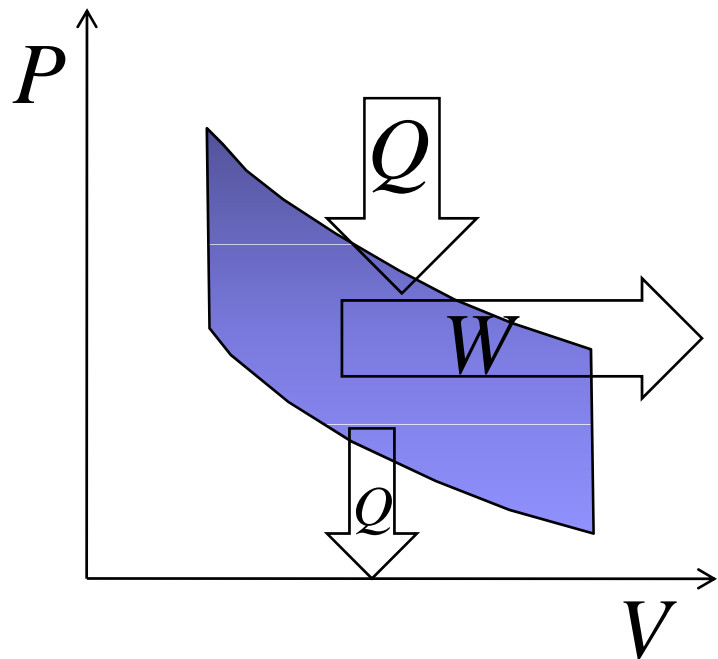
7.4.- Motor diesel

1.- Màquines tèrmiques

Màquina tèrmica: dispositiu que conté una substància anomenada *sistema actiu* que descriu un cicle termodinàmic.

En el cas de que treballi entre dos focus, un calent i un fred, el sistema actiu bescanviarà una quantita de calor Q entre els dos de manera que es produirà un bescanvi de treball W amb l'entorn.

Representació esquemàtica



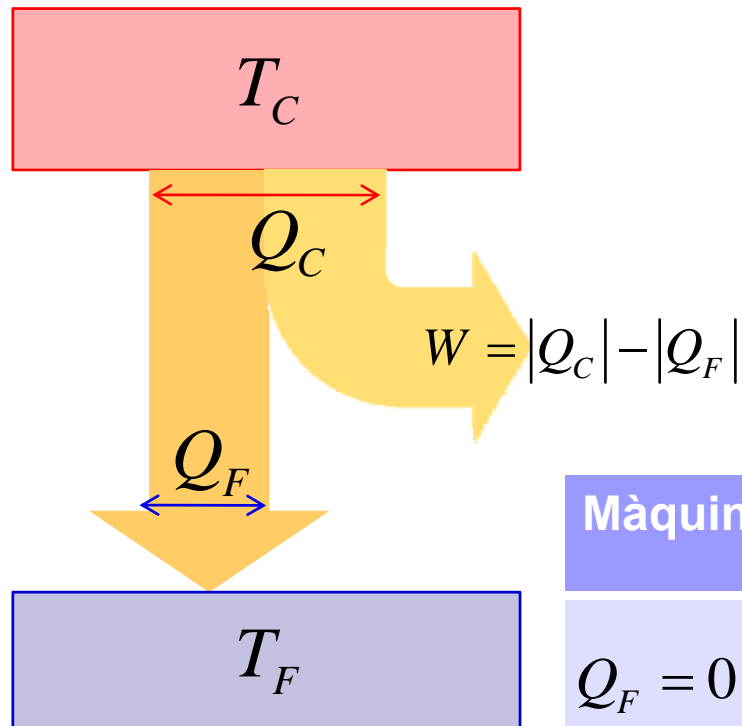
$$\Delta U = 0 = Q - W$$

$$Q = |Q_C| - |Q_F| = Q_C + Q_F = W$$

1.- Màquines tèrmiques

Rendiment = $\frac{\text{"el que em dona"}}{\text{"el que li dono"}}$

Rendiment de la màquina tèrmica



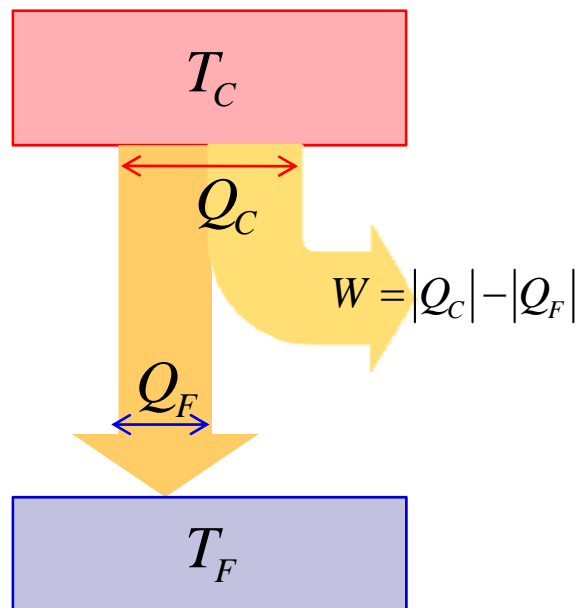
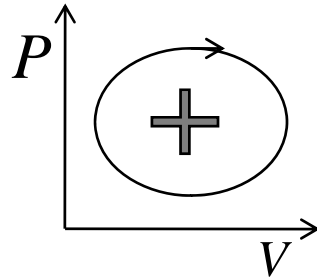
$$r = \eta = \frac{W}{Q_C}$$

$$r = \eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{|Q_F|}{Q_C}$$

Màquina tèrmica perfecta (no existeix)	Màquina tèrmica dolenta (existeix)
$Q_F = 0 \rightarrow \eta = 1 - \frac{ Q_F }{Q_C} = 1$	$ Q_F = Q_C \rightarrow \eta = 1 - \frac{ Q_F }{Q_C} = 0$

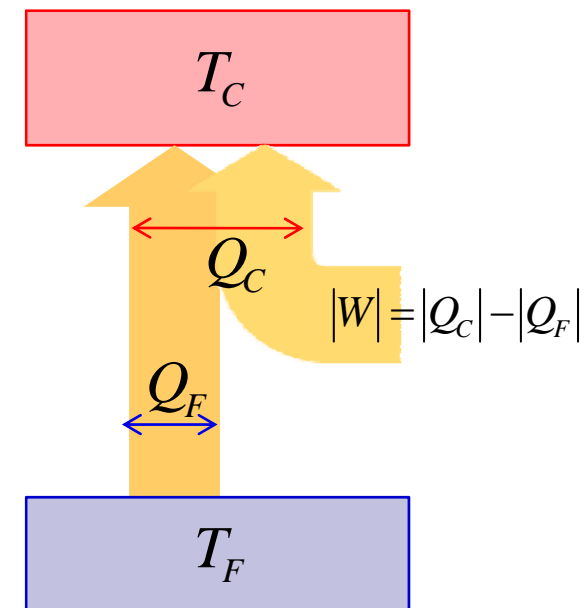
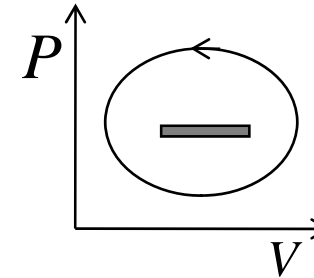
1.- Màquines tèrmiques i frigorífics

Màquina Tèrmica



- S'absorbeix calor del focus calent
- Es cedeix calor al focus fred
- Es produeix treball

Màquina Frigorífica

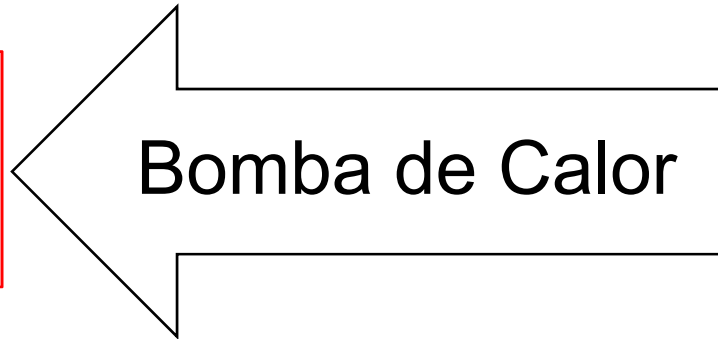
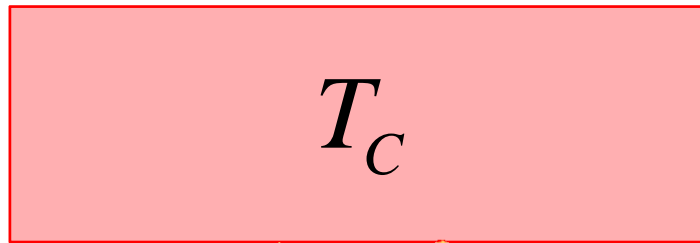


- S'absorbeix calor del focus fred
- Es cedeix calor al focus calent
- Es consumeix treball

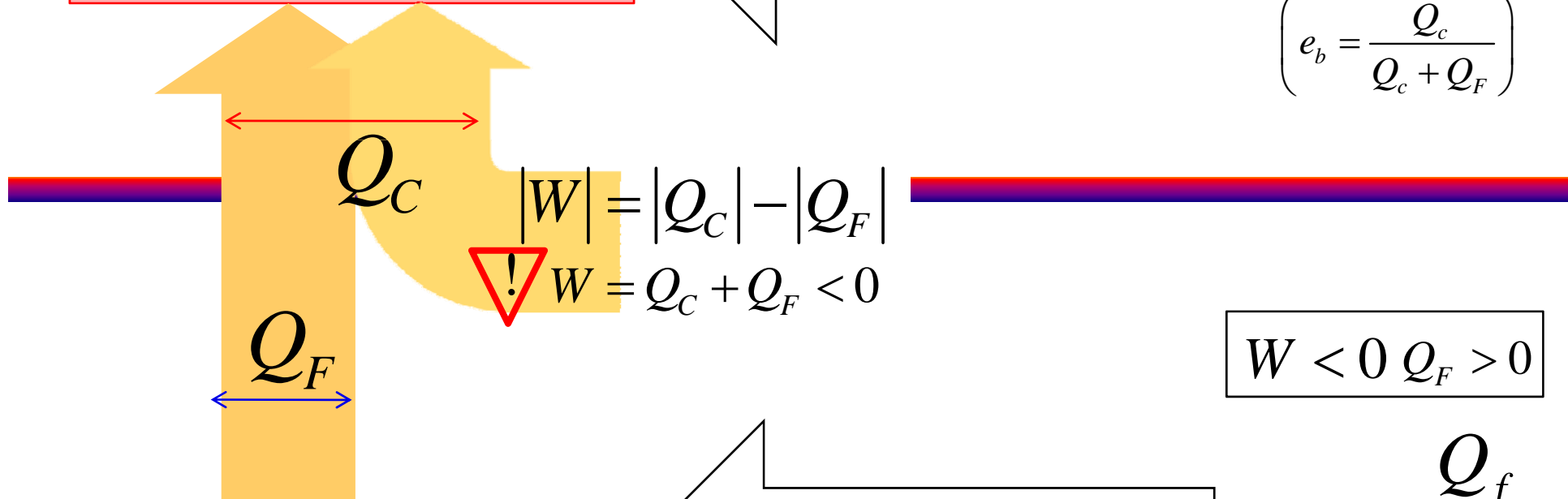
1.- Frigorífics i bombes de calor

Eficiència = $\frac{\text{"el que em dona"}}{\text{"el que li dono"}}$

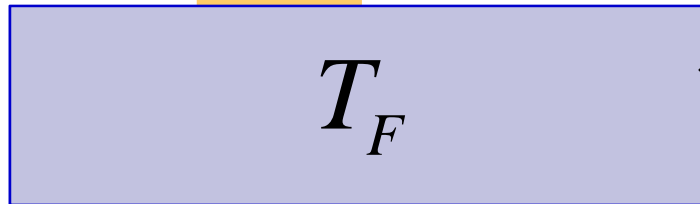
$$W < 0 \quad Q_C < 0$$



$$e_b = \frac{Q_C}{W}$$
$$\left(e_b = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} \right)$$



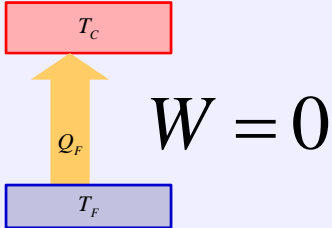
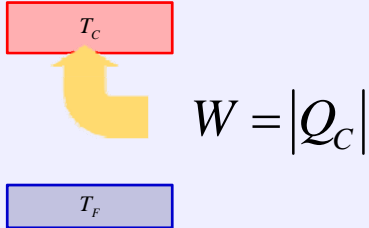
$$W < 0 \quad Q_F > 0$$



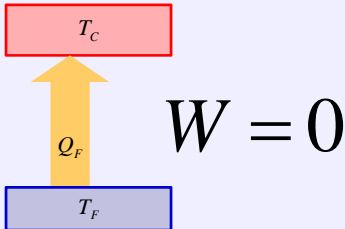
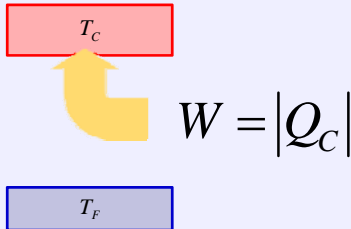
$$e_f = -\frac{Q_f}{W}$$
$$\left(e_f = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} \right)$$

1.- Frigorífics i bombes de calor

$$e_b = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F}$$

Bomba de calor perfecta (no existeix)	Bomba de calor dolenta (existeix)
$ Q_F = Q_C \rightarrow e_b = \frac{- Q_C }{ Q_F - Q_C } = \infty$	$ Q_F = 0 \rightarrow e_b = \frac{- Q_C }{ Q_F - Q_C } = 1$
 <p>$W = 0$</p>	 <p>$W = Q_C$</p>

$$e_f = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F}$$

Frigorífic perfecte (no existeix)	Frigorífic dolent (existeix)
$ Q_F = Q_C \rightarrow e_f = \frac{ Q_F }{ Q_F - Q_C } = \infty$	$ Q_F = 0 \rightarrow e_f = \frac{ Q_F }{ Q_F - Q_C } = 0$
 <p>$W = 0$</p>	 <p>$W = Q_C$</p>

Màquina Tèrmica	Bomba de calor	Frigorífic
$r = \eta = \frac{W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$	$e_b = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_F}$	$e_f = -\frac{Q_f}{W} = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F}$
$0 \leq \eta < 1$	$1 < e_b < \infty$	$0 \leq e_f < \infty$

1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència

2.- Cicle de Carnot

3.1.- Rendiment del cicle de Carnot

3.- Segon principi de la termodinàmica

3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck

3.2.- Enunciat de Clausius

3.3.- Equivalència entre els dos enunciats

3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie

4.- Teorema de Carnot

5.- Teorema de Clausius

6.- Escala termodinàmica de temperatures

7.- Motors

7.1.- Motor de Stirling

7.2.- Màquina de vapor

7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto

7.4.- Motor diesel

2.- Cicle de Carnot

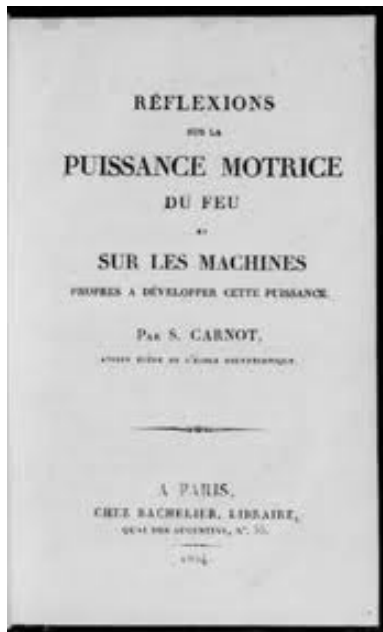
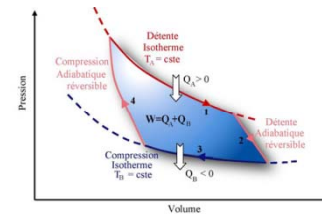


Sadi Carnot
1796-1832



École Polytechnique. Professors:
Gay-Loussac, Poisson, Ampere

Cicle idealitzat de Carnot



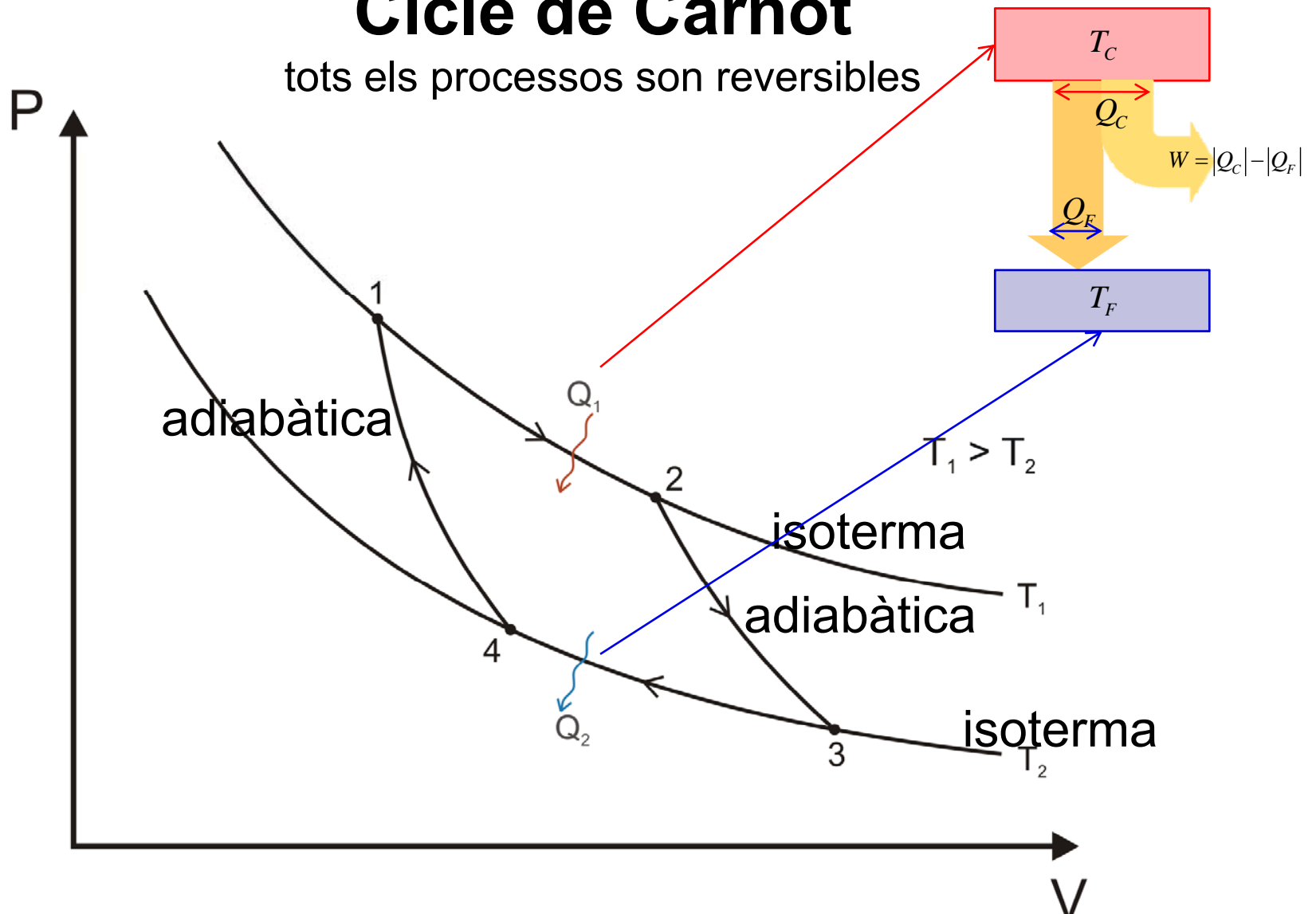
Als 28 anys...

➤ La producció de treball en els motors de vapor no és deguda a un consum de calòric, sino al seu transport entre un cos calent i un cos fred

➤ En la caiguda del calòric el treball augmenta amb la diferència de temperatures entre els cossos calent i fred, però no sabem si es proporcional a aquesta diferència (nosaltres ho esbrinarem!!!!)

Cicle de Carnot

tots els processos son reversibles

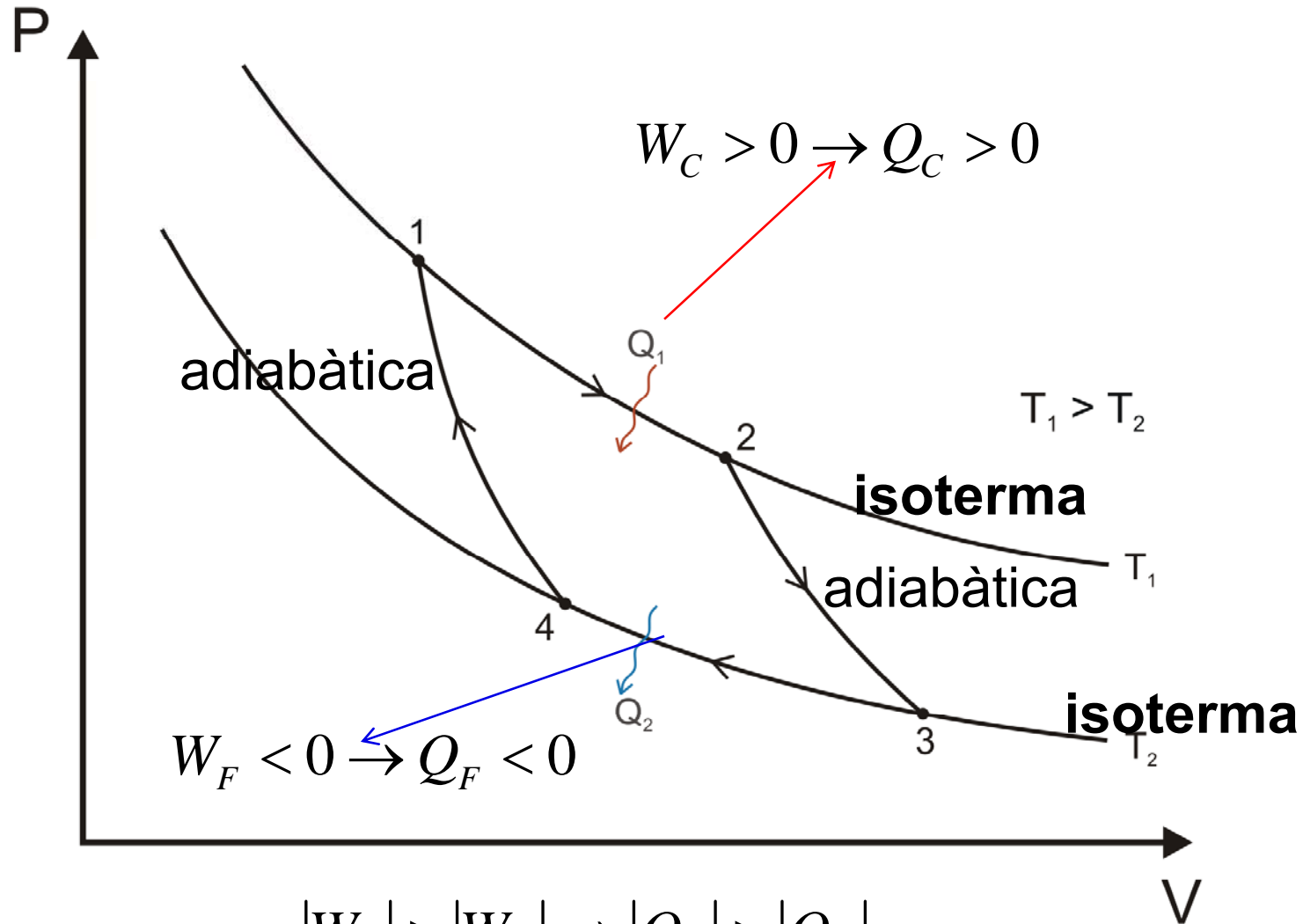


Només utilitzem dos focus per bescanviar calor!!

2.- Cicle de Carnot: isoterme

Cicle de Carnot (isoterme $\Delta U=0$)

$$\Delta U = 0 = Q - W \rightarrow Q = W$$

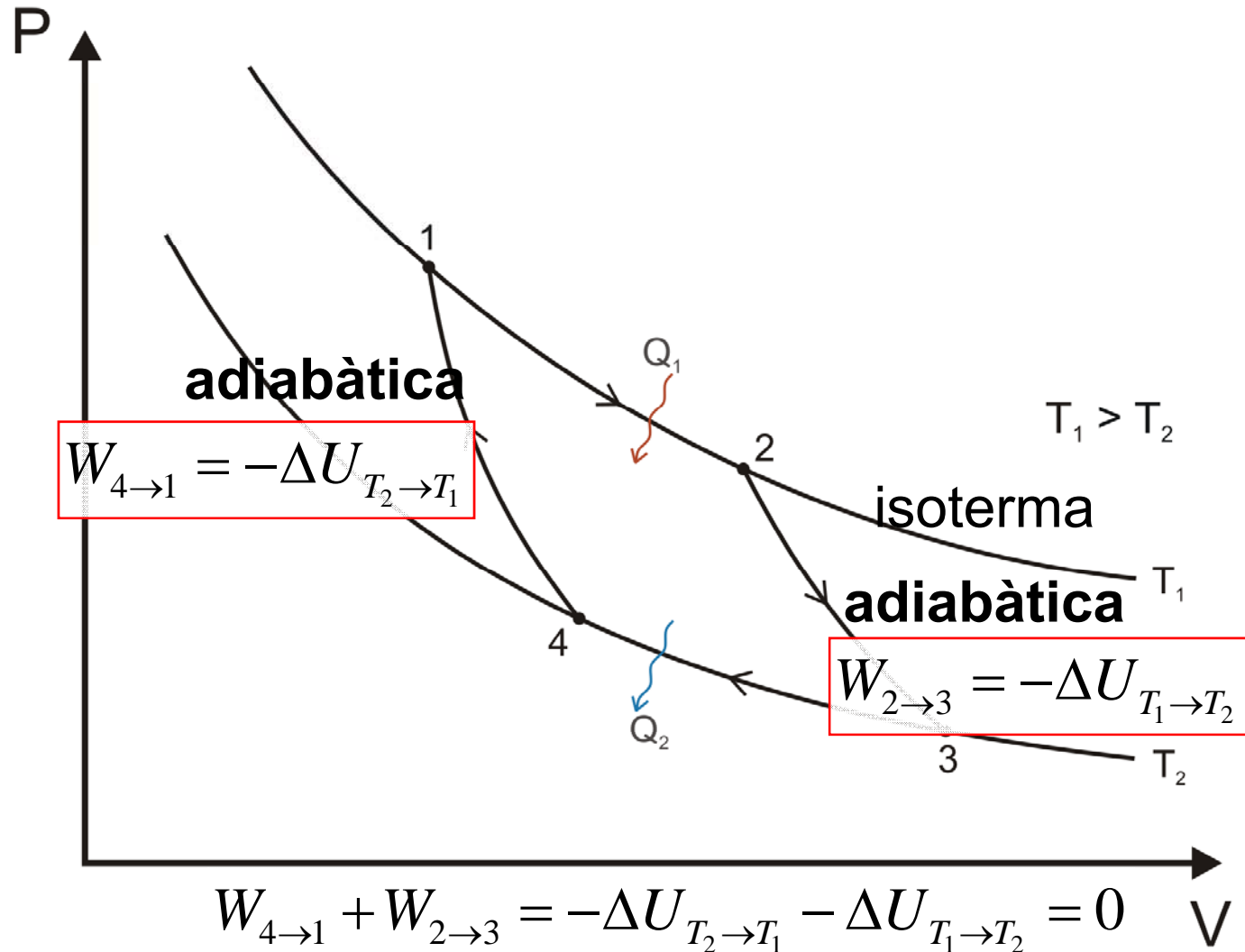


$$|W_C| > |W_F| \rightarrow |Q_C| > |Q_F|$$

2.- Cicle de Carnot: adiabàtiques

Cicle de Carnot (adiabàtiques $Q=0$)

$$\Delta U = Q - W \rightarrow \Delta U = -W$$

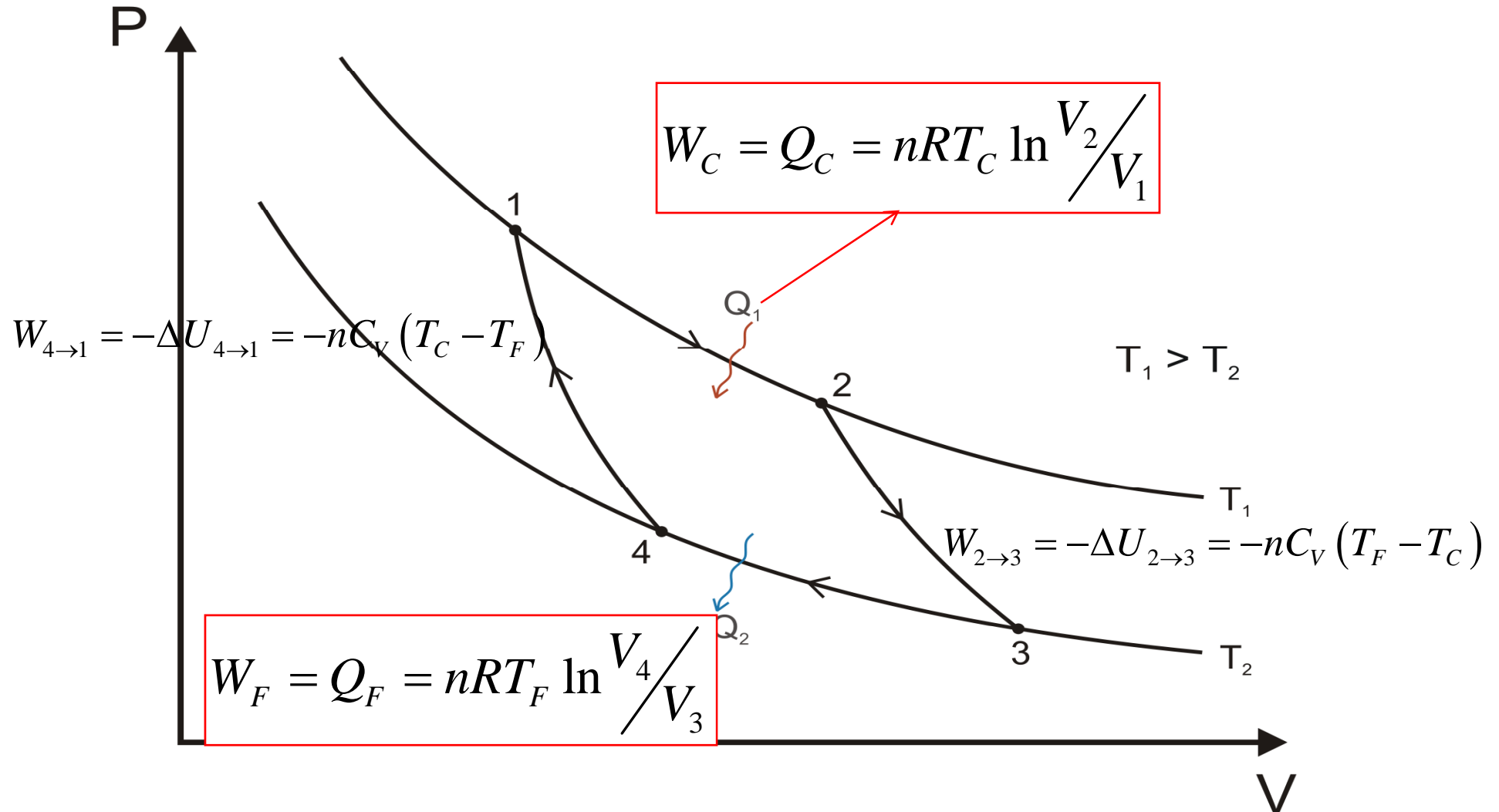


El treball fet en les dues adiabàtiques es zero!!!

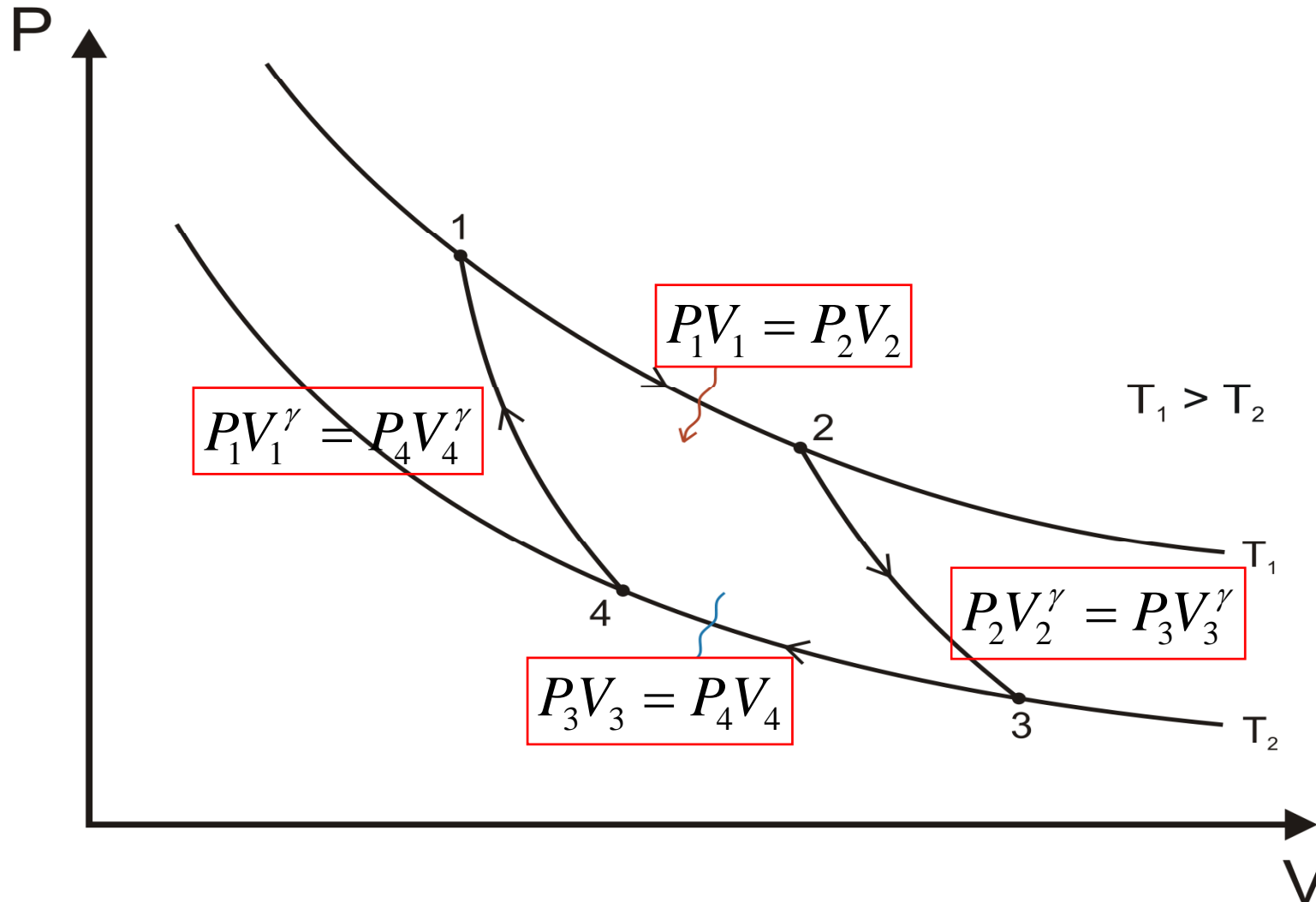
- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- **Cicle de Carnot**
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

2.1- Rendiment del cicle de Carnot

Cicle de Carnot

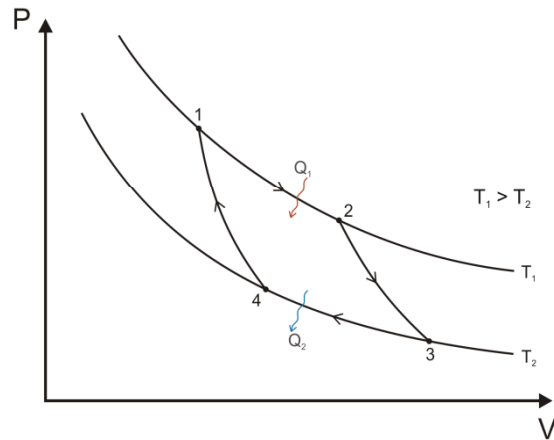


Cicle de Carnot



2.1- Rendiment del cicle de Carnot

Cicle de Carnot



$$r = \eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{nRT_F \ln \frac{V_4}{V_3}}{nRT_C \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

Cal relacionar els volums entre si encara!

$$PV_2^\gamma = PV_3^\gamma$$

$$PV_1^\gamma = PV_4^\gamma$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{PV_2^\gamma}{PV_3^\gamma} = \frac{PV_2^\gamma}{PV_4 V_3^{\gamma-1}} = \frac{PV_2^\gamma V_4}{PV_1 V_4 V_3^{\gamma-1}}$$

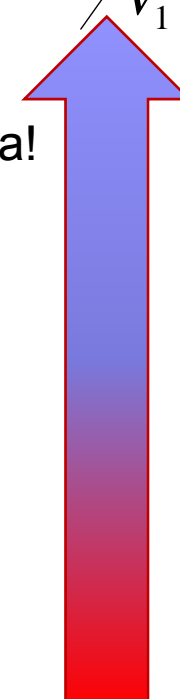
$$PV_1 = PV_2$$

$$PV_3 = PV_4$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2^\gamma V_4^{\gamma-1}}{V_1^\gamma V_3^{\gamma-1}}$$

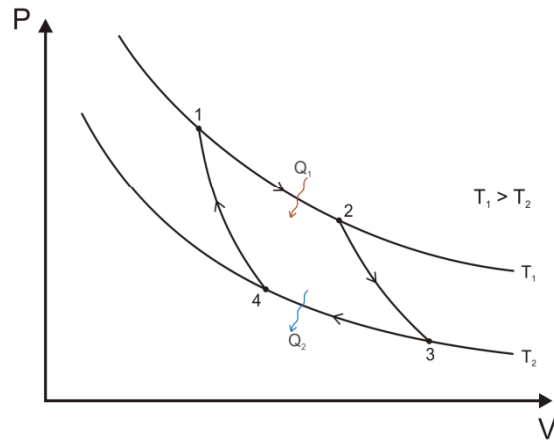
$$\frac{V_2^{1-\gamma}}{V_1^{1-\gamma}} = \frac{V_3^{1-\gamma}}{V_4^{1-\gamma}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

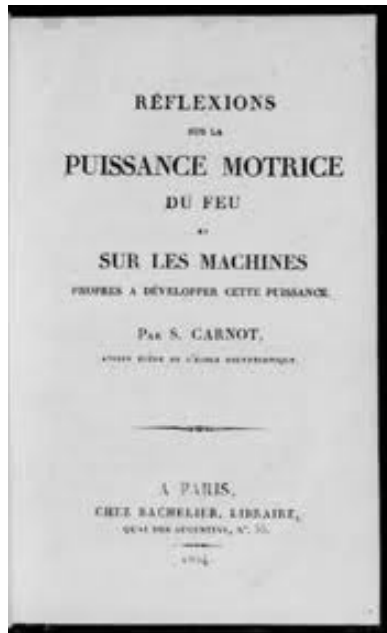


2.1- Rendiment del cicle de Carnot

Cicle de Carnot



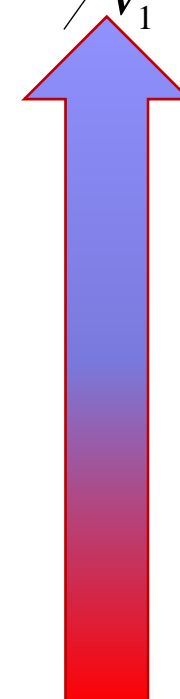
$$\eta = 1 + \frac{nRT_F \ln \frac{V_4}{V_3}}{nRT_C \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{nRT_F \ln \frac{V_3}{V_4}}{nRT_C \ln \frac{V_2}{V_1}}$$



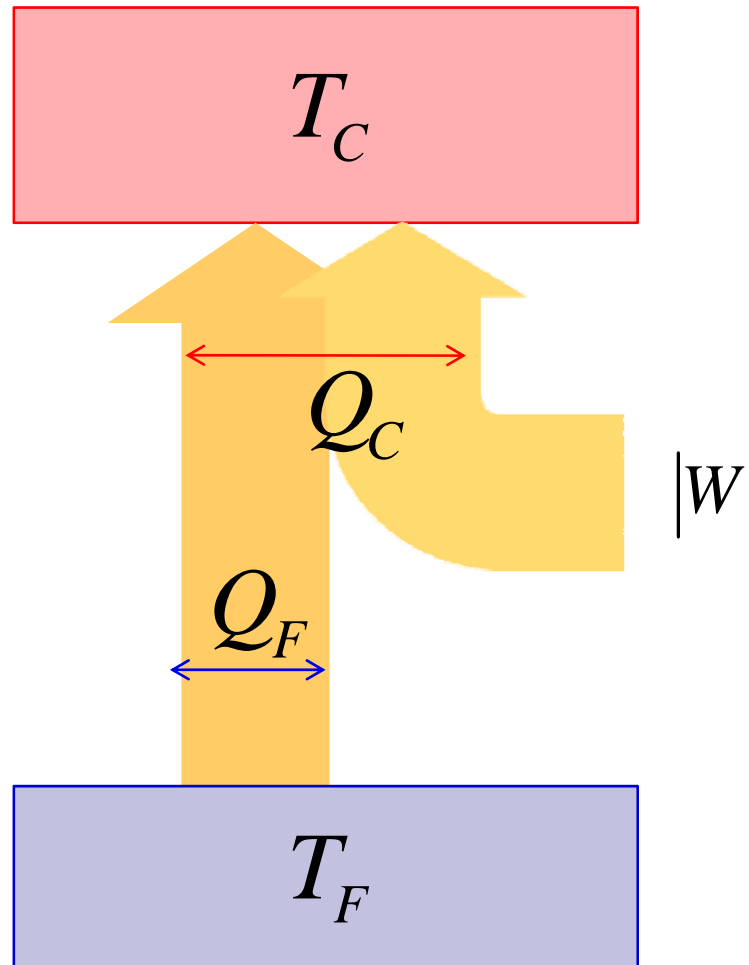
➤ En la caiguda del calòric el treball augmenta amb la diferència de temperatures entre els cossos calent i fred, però **no sabem** si es proporcional a aquesta diferència (**nosaltres ho esbrinarem!!!!**)

$$\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



Bomba de calor de Carnot



$$e_b = \frac{Q_c}{Q_c + Q_F} = \frac{T_C \ln \frac{V_1}{V_2}}{T_C \ln \frac{V_1}{V_2} + T_F \ln \frac{V_3}{V_4}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$e_b = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Frigorífic de Carnot

$$e_f = -\frac{Q_F}{Q_c + Q_F} = -\frac{T_F \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_C \ln \frac{V_1}{V_2} + T_F \ln \frac{V_3}{V_4}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$e_f = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

2.1.- Cicle de Carnot

Màquina Tèrmica	Bomba de calor	Frigorífic
$0 \leq \eta < 1$ $\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = \frac{ Q_C - Q_F }{ Q_C }$	$1 < e_b < \infty$ $e_b = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} = \frac{ Q_C }{ Q_C - Q_F }$	$0 \leq e_f < \infty$ $e_f = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} = \frac{ Q_F }{ Q_C - Q_F }$
$\eta = \frac{T_C - T_F}{T_C}$	$e_b = \frac{T_C}{T_C - T_F}$	$e_f = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

2.1.- Cicle de Carnot

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

$$e_b = \frac{Q_c}{Q_c + Q_F} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

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

$$\frac{Q_C}{T_C} = -\frac{Q_F}{T_F}$$

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$$

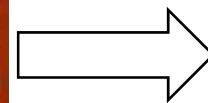
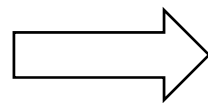
(combustible)

Per tant, per fer Q_c petit
hem de fer T_c gran!!!!!!!

Inspirat pels treballs de Carnot, Diesel va construir un motor que tingués el focus calent a la temperatura més alta possible



Rudolf Diesel
1858-1913



P*,15,13,12,11

P^* - A l'estiu, per mantenir a 17°C una nau industrial, cal extraure'n $400 \text{ cal}\cdot\text{s}^{-1}$. Si es fa servir una màquina frigorífica de Carnot que extreu calor de l'interior de la nau i la cedeix a l'exterior, que es troba a 37°C , quina serà la potència d'aquesta màquina? Usant aquesta mateixa màquina, però invertint el circuit, es pot escalfar la nau a l'hivern, i refredar l'exterior. Suposant que en aquest cas les temperatures són de 17°C i 2°C , respectivament, quina quantitat de calor per segon se subministrarà a la nau? Resulta més adequat aquest sistema de calefacció que una resistència elèctrica?

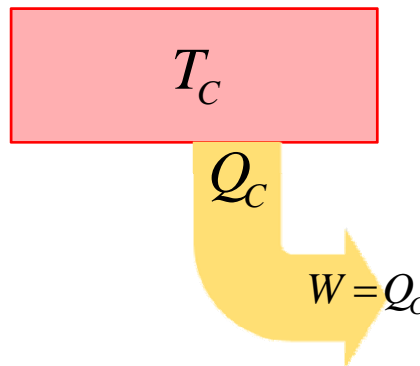
- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica**
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

La conservació de l'energia no ho és tot



Enunciat de Kelvin-Planck

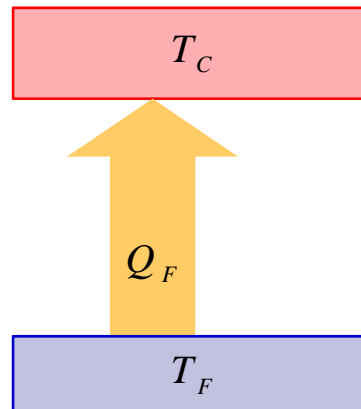
No és possible un procés cíclic que tingui com únic resultat l'absorció de calor procedent d'un focus i la seva conversió total en treball



Impossible

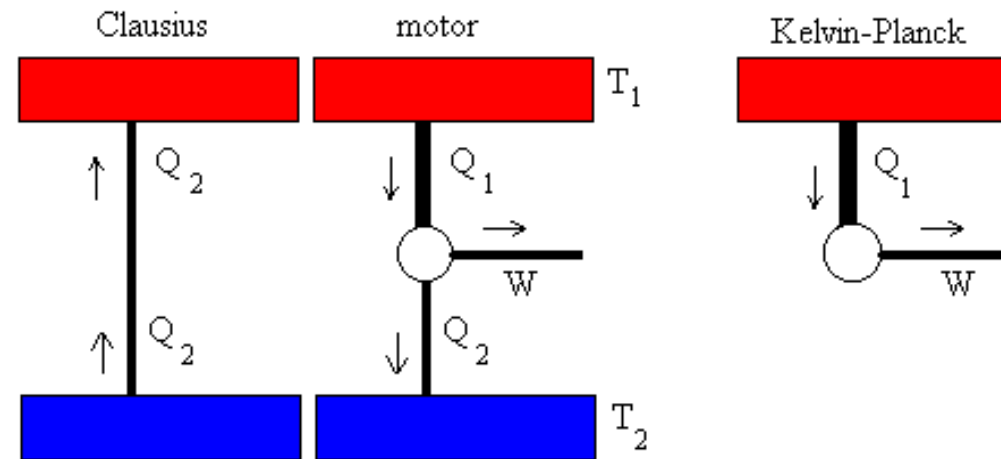
Enunciat de Clausius

No és possible un procés que tingui com únic resultat la transferència de calor d'un cos fred a un cos calent

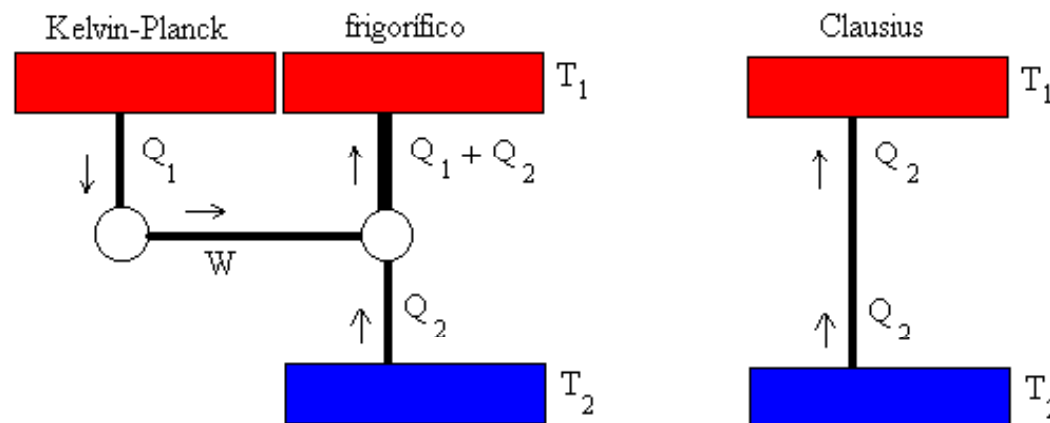


Impossible

No Clausius → No Kelvin-Planck

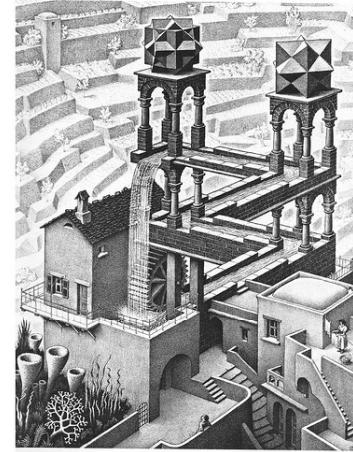
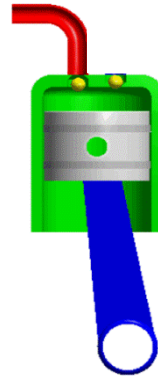
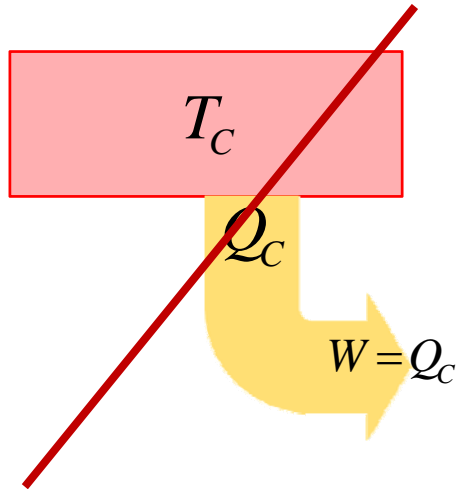


No Kelvin-Planck → No Clausius



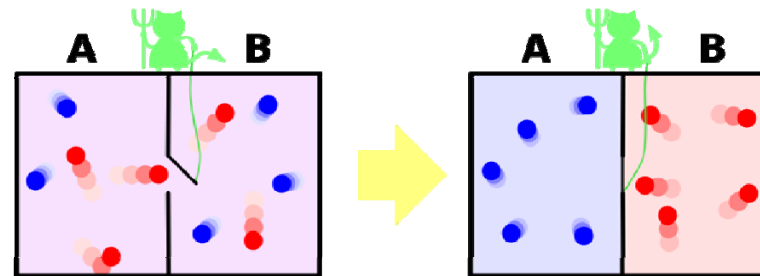
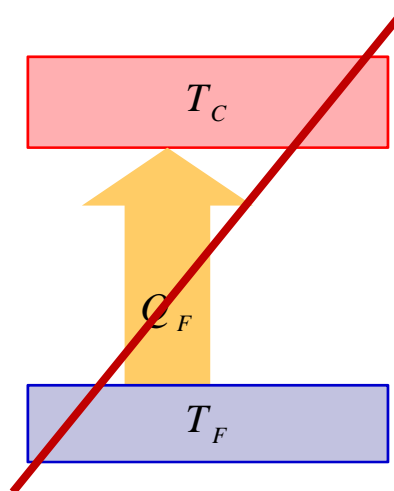
3.- Equivalència entre els dos enunciats

Enunciat de Kelvin-Planck



No pot existir un mòbil perpetu de segona espècie

Enunciat de Clausius

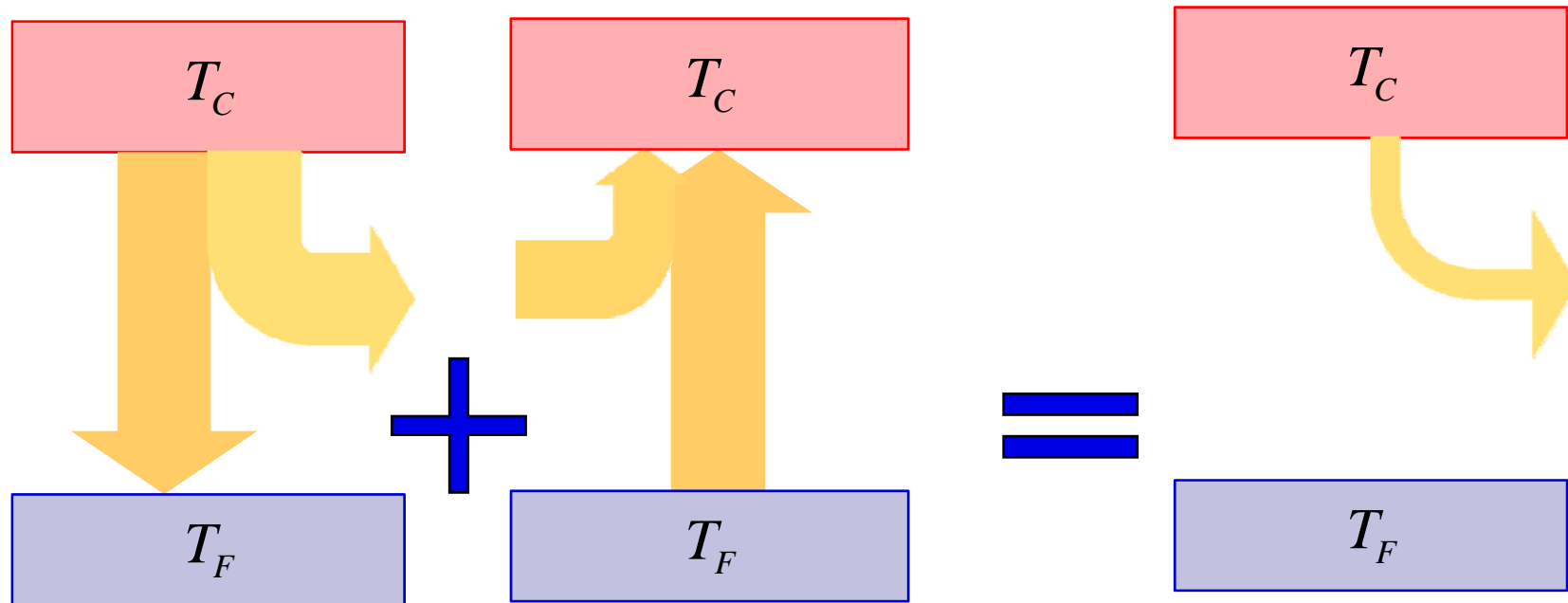


No pot existir el dimoni de Maxwell

- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot**
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

4.- Teorema de Carnot

Totes les màquines tèrmiques que funcionen entre els mateixos focus tenen el mateix rendiment



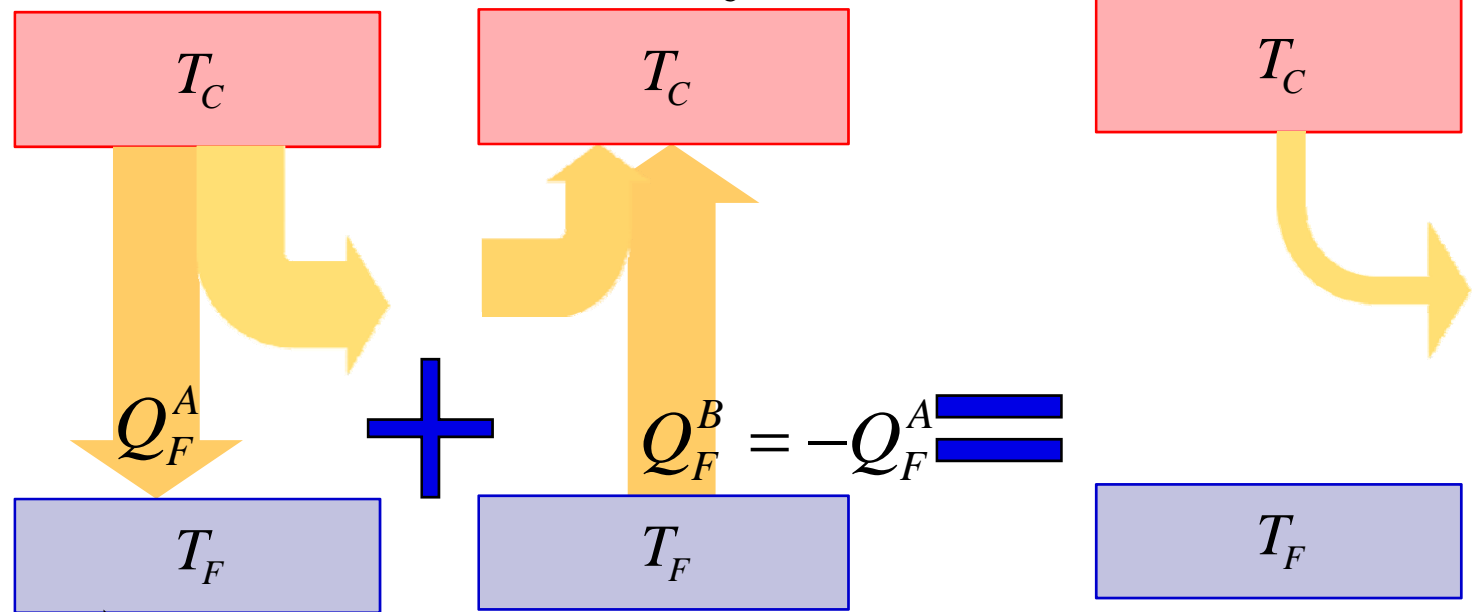
Suposem dues màquines tèrmiques entre els mateixos focus amb rendiments diferents



**No compleix
Kelvin Planck!!**

4.- Teorema de Carnot

$$\eta_A = 1 + \frac{Q_F^A}{Q_C^A} \qquad \eta_B = 1 + \frac{Q_F^B}{Q_C^B}$$



$\eta_A > \eta_B$ $\frac{Q_F^A}{Q_C^A} > \frac{Q_F^B}{Q_C^B} \rightarrow \frac{Q_F^A}{Q_C^A} > \frac{-Q_F^A}{Q_C^B} \rightarrow Q_C^B > -Q_C^A \rightarrow Q_C^B + Q_C^A > 0$

W_{TOT} $W_{TOT} = Q_C^B + Q_C^A + Q_F^B + Q_F^A = Q_C^B + Q_C^A$ **+**

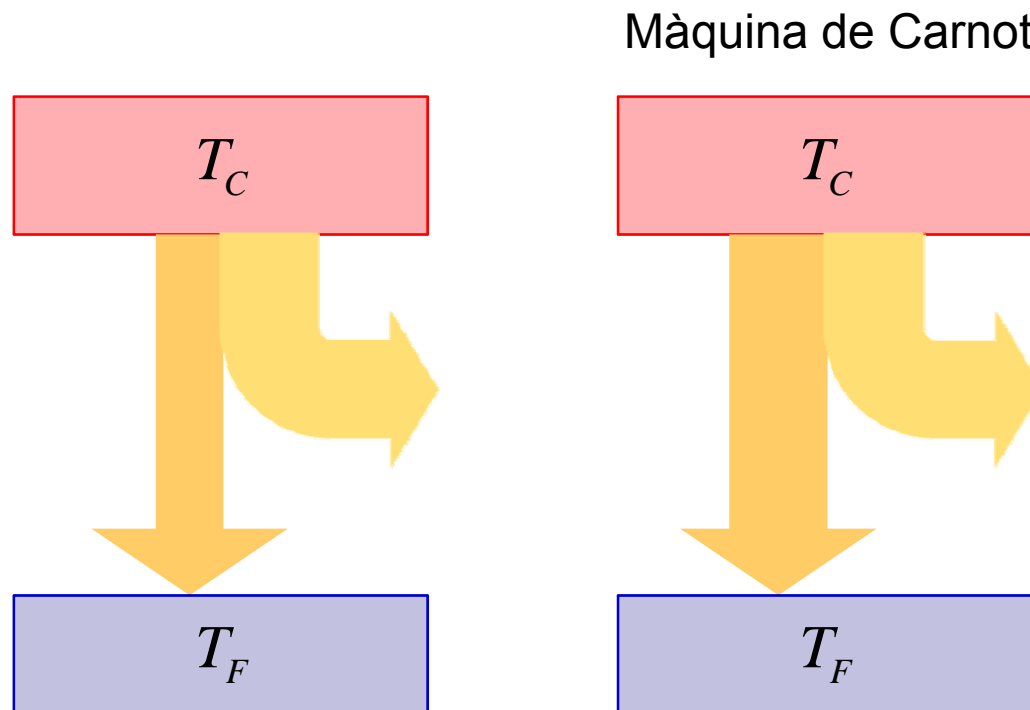
Obtenim treball amb Q d'un focus!!!
no compleix Kelvin-Planck!

$$W_{TOT} = Q_C^B + Q_C^A > 0$$

- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius**
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

4.- Teorema de Carnot

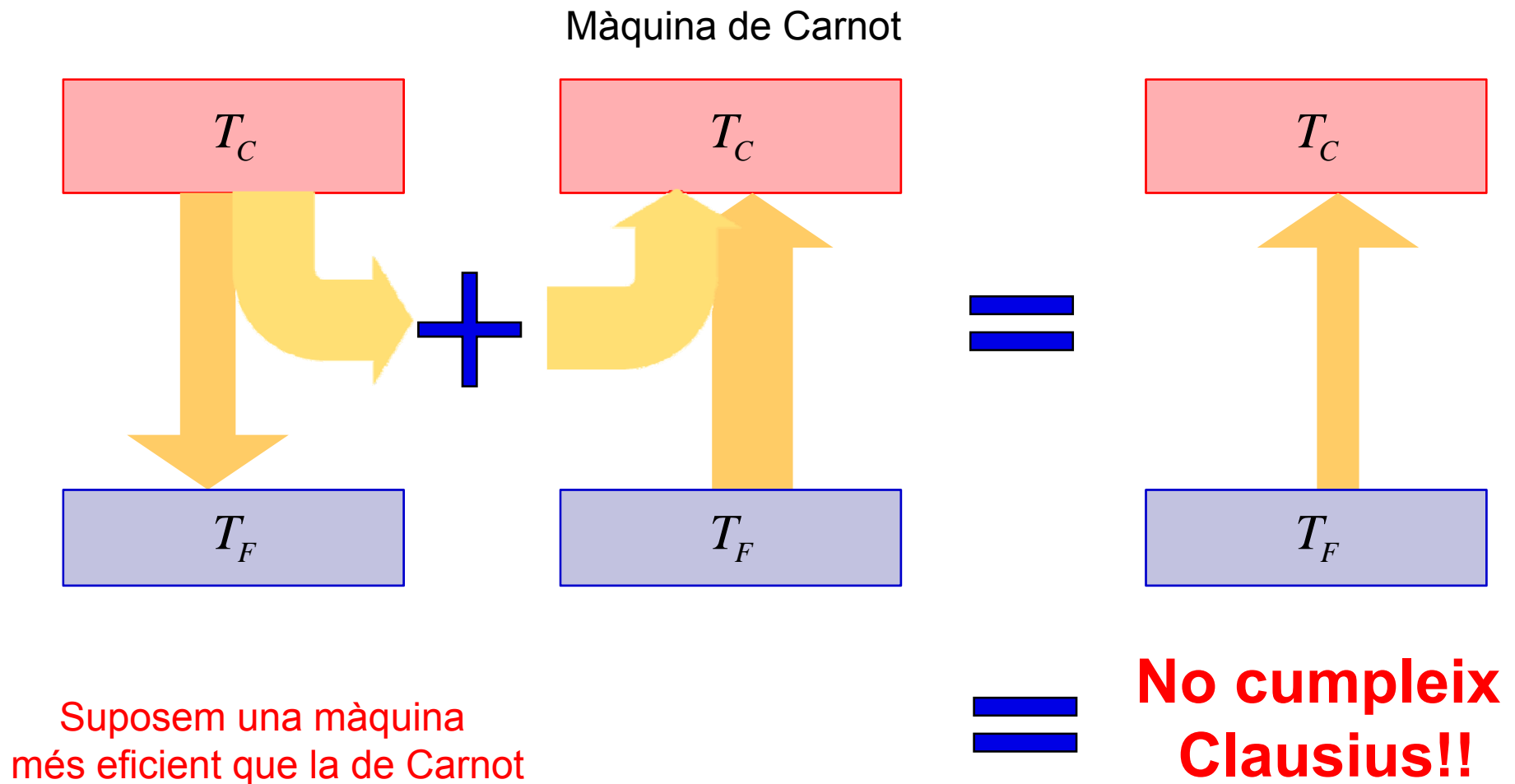
El rendiment d'una màquina de Carnot que treballa entre dues fonts tèrmiques es màxim i independent de la substància que recorre el cicle



Suposem una màquina més eficient que la de Carnot (és a dir que necessita menys Q_C)

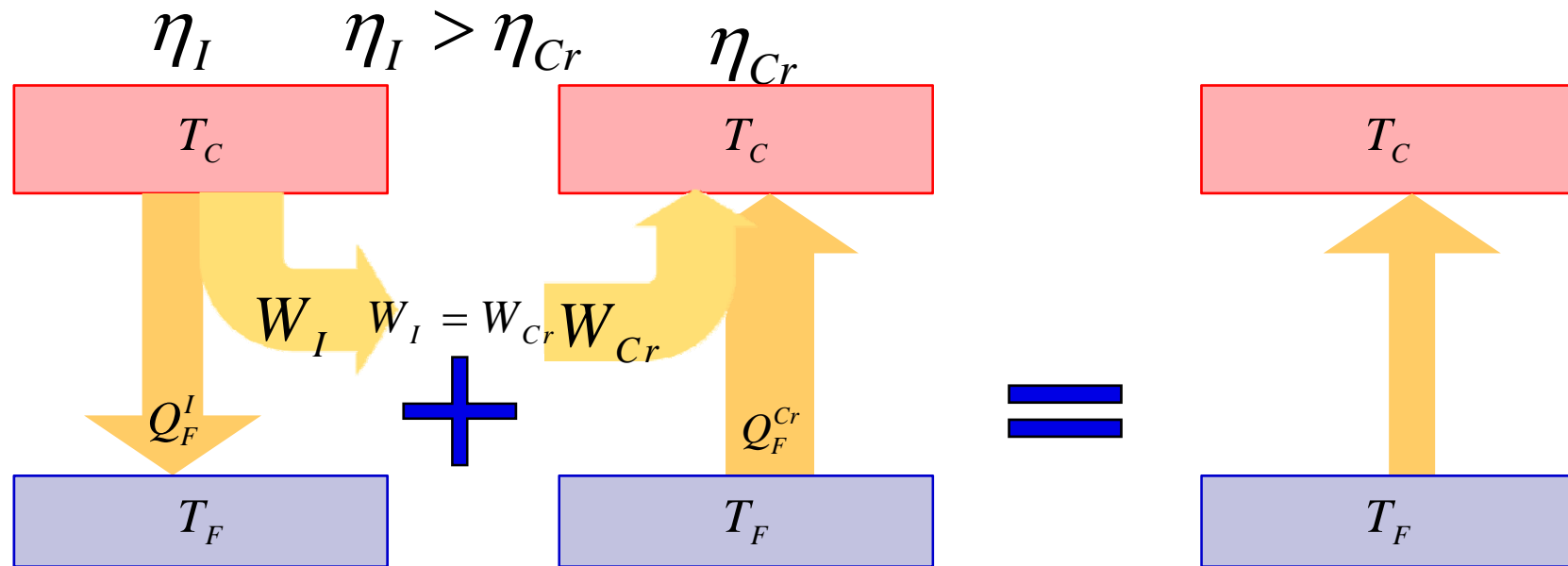
4.- Teorema de Carnot

El rendiment d'una màquina de Carnot que treballa entre dues fonts tèrmiques es màxim i independent de la substància que recorre el cicle



4.- Teorema de Carnot

més eficient que la de Carnot Màquina de Carnot



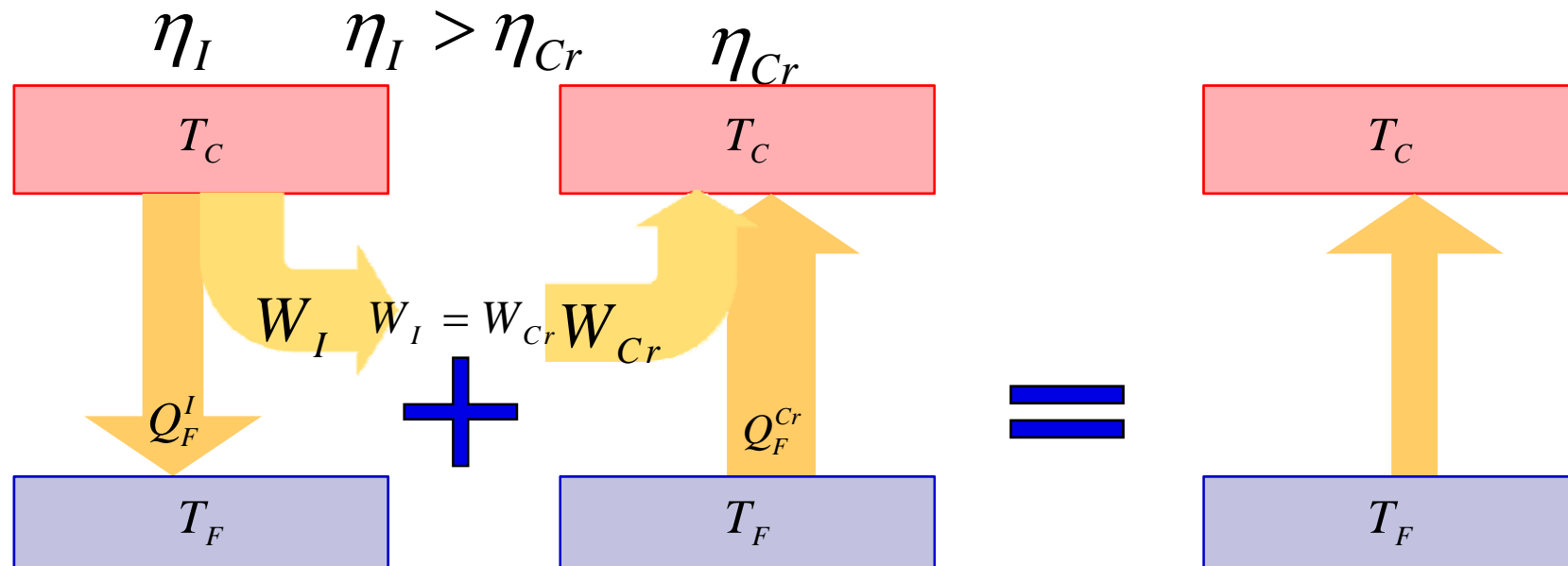
$$\eta_I > \eta_{Cr} \Rightarrow \frac{|W_I|}{|Q_C^I|} > \frac{|W_{Cr}|}{|Q_C^{Cr}|} \quad \frac{1}{|Q_C^I|} > \frac{1}{|Q_C^{Cr}|} \rightarrow |Q_C^I| < |Q_C^{Cr}| \rightarrow \underbrace{|Q_C^{Cr}| - |Q_C^I|}_{> 0}$$

$$W_I = W_{Cr} \Rightarrow |Q_C^{Cr}| - |Q_F^{Cr}| = |Q_C^I| - |Q_F^I| \quad |Q_C^{Cr}| - |Q_C^I| = |Q_F^{Cr}| - |Q_F^I| > 0$$

Fluxe de calor del focus fred al focus calent $|Q_C^{TOT}| = |Q_F^{TOT}| > 0$
 No compleix Clausius!!

4.- Teorema de Carnot

més eficient que la de Carnot Màquina de Carnot



Si la màquina és reversible podem invertir qualsevol de les dues de manera que

$$\left. \begin{array}{l} \eta_I \leq \eta_{Cr} \\ \eta_I \geq \eta_{Cr} \end{array} \right\} \eta_I = \eta_{Cr}$$

- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures**
- 7.- Motors
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Màquina de vapor
 - 7.3.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.4.- Motor diesel

6.- Escala termodinàmica de temperatures

Escala del gas ideal centígrada
(depèn de la substància termomètrica)

Fusió = 273.15K

Ebullició = 373.15K

El rendiment és independent
de la substància que recorre el cicle

$$\eta = 1 - \underbrace{\frac{Q_F}{Q_C}}_{\text{Ho mesurem}} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Punt triple
 $T_C = 273.16$

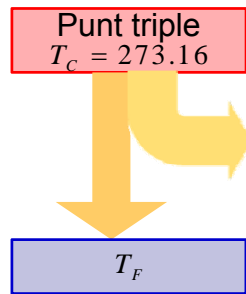
$$T_F = -T_C \frac{Q_F}{Q_C} = T_C \frac{|Q_F|}{|Q_C|} = 273.16 \frac{|Q_F|}{|Q_C|}$$

T_F

Escala Kelvin
Escala termodinàmica absoluta

6.- Escala termodinàmica de temperatures

Escala Kelvin



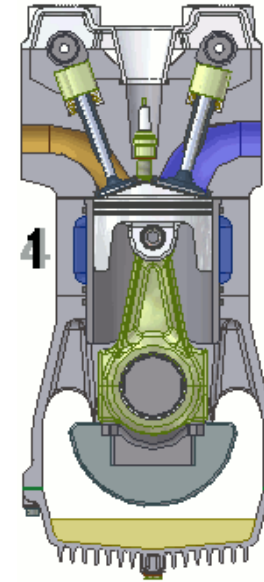
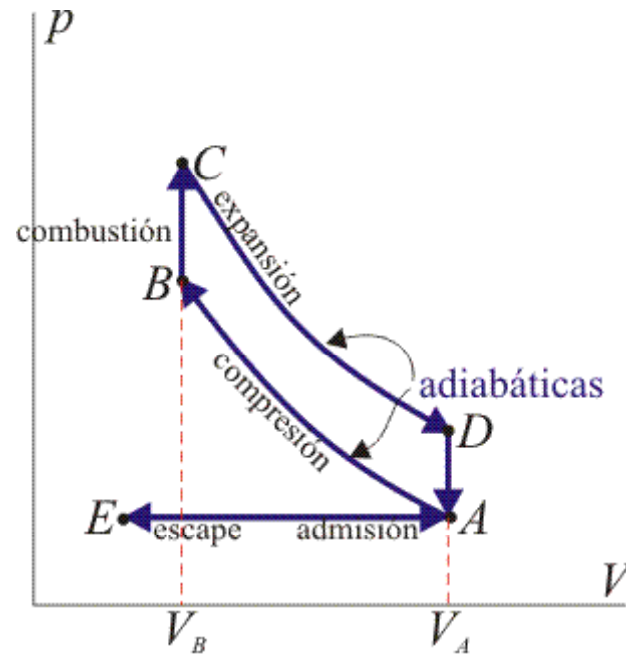
Escala termodinàmica absoluta

$$T_F = T_C \frac{|Q_F|}{|Q_C|} = 273.16 \frac{|Q_F|}{|Q_C|}$$

- La propietat termomètrica és Q
- El punt de calibració és el punt triple
- L'escala NO depèn de la substància
- És una escala termodinàmica=definida a partir de bescanvis de calor
- És una escala absoluta = existeix un "zero"
- El zero absolut es defineix per tant com:
és la temperatura per la qual un procés reversible isotèrmic no bescanvia calor

- 1.- Màquines tèrmiques. Rendiment i eficiència
- 2.- Cicle de Carnot
 - 3.1.- Rendiment del cicle de Carnot
- 3.- Segon principi de la termodinàmica
 - 3.1.- Enunciat de Kelvin-Planck
 - 3.2.- Enunciat de Clausius
 - 3.3.- Equivalència entre els dos enunciats
 - 3.4.- Mòbil perpetu de segona espècie
- 4.- Teorema de Carnot
- 5.- Teorema de Clausius
- 6.- Escala termodinàmica de temperatures
- 7.- Motors**
 - 7.1.- Motor de Stirling
 - 7.2.- Motors de combustió, Cicle d'Otto
 - 7.3.- Motor diesel

Cicle d'Otto (benzina)



- 1 E-A: admisió a pressió constant (renovació de la carrega)
- 2 { A-B: compressió adiabàtica
B-C: combustió, donem calor a volum constant. La pressió augmenta ràpidament abans de començar el temps útil.
- 3 { C-D: força, expansió adiabàtica: treball
D-A: Escapament, es dona calor a volum constant
- 4 A-E: Escapament, es buida el pisto a pressió constant



(1790-1878)

Motor de Stirling

