

# Màquines tèrmiques

Síto: [Cursos IOC - Batxillerat](#)

Imprimido por: Invitado

Curso: Tecnologia industrial (autoformació IOC)

Día: lunes, 31 de enero de 2022, 01:01

Libro: Màquines tèrmiques

## Tabla de contenidos

### 1. Tipus de màquines tèrmiques

1.1. Màquina de Carnot

1.2. Màquines tèrmiques generadores d'energia mecànica

1.3. Màquines tèrmiques consumidores d'energia mecànica

### 2. L'entropia



# 1. Tipus de màquines tèrmiques

Les màquines tèrmiques es poden classificar segons el segon principi de la termodinàmica de la següent manera:

**Màquines generadores  
d'energia mecànica**

- Motors de combustió externa

a.- Màquines de vapor

- Motors de combustió interna

a.- Motors Otto

b.- Motors Dièsel

c.- Turbines de gas

**Màquines consumidores  
d'energia mecànica**

a.- Màquines frigorífiques

b.- Bombes de calor

## 1.1. Màquina de Carnot

Cap màquina tèrmica que funcioni entre dues fonts tèrmiques pot tenir un rendiment superior al d'una màquina tèrmica reversible en el mateix context. La màquina reversible seria com la **màquina ideal**, sense pèrdues.

Una màquina tèrmica reversible funciona cíclicament, de forma que es pot anar del 1r estat al 2n i tornar del 2n al 1r sense pèrdues d'energia. Un exemple de màquina reversible i no tèrmica seria un pèndul sense cap mena de fregament. La reversibilitat en màquines reals és impossible perquè sempre hi haurà alguna mena de pèrdues.

Veiem el comportament d'una màquina tèrmica reversible a través dels seus cicles de funcionament:

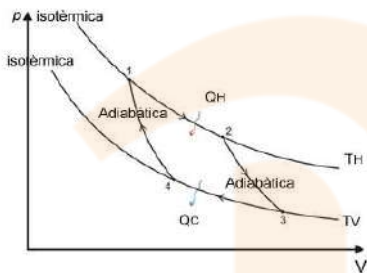
Procés **1→2** , expansió isotèrmica

Procés **2→3** , expansió adiabàtica

Procés **3→4** , compressió isotèrmica

Procés **4→1** , compressió adiabàtica

Aquest cicle tancat concret rep el nom de **cicle de Carnot**. L'àrea que es determina en el diagrama PV entre 1, 2, 3, i 4 serà el treball que realitza la màquina:



Procés **1→2** , expansió isotèrmica

- **Isotèrmic:**  $T$  constant, per tant,  $\Delta U=0$
- Expansió:  $p$  disminueix i  $V$  augmenta. Per tant,  $W>0$ .
- $Q=W$ , i  $Q_H>0$ . El sistema rep calor de l'exterior.

Procés **2→3** , expansió adiabàtica

- **Adiabàtic:**  $Q=0$ . El sistema ni dóna ni rep calor.
- Expansió:  $p$  disminueix i  $V$  augmenta. Per tant,  $W>0$ .
- $\Delta U=0-W$ , per tant  $\Delta U<0$ . El sistema disminueix la temperatura.

Procés **3→4** , compressió isotèrmica

- **Isotèrmic:**  $T$  constant, per tant  $\Delta U=0$
- Compressió:  $P$  augmenta i  $V$  disminueix. Per tant  $W<0$ . El sistema rep treball de l'exterior.

- $Q=W$ , per tant la  $Q_C < 0$ . El sistema dóna calor a l'exterior.

**Procés**  $4 \rightarrow 1$ , compressió adiabàtica

- **Adiabàtic:**  $Q=0$ . El sistema ni dóna ni rep calor.
- Compressió:  $P$  augmenta i  $V$  disminueix. Per tant  $W < 0$ . El sistema rep treball de l'exterior.
- $\Delta U = 0 - (-W)$ , per tant  $\Delta U > 0$ . El sistema augmenta la seva temperatura.

El treball total que dóna el sistema és l'àrea compresa entre 1, 2, 3 i 4.

Eficiència del cicle teòric reversible de Carnot (  $\eta_C$  )

Es tracta de donar l'eficiència (un concepte proper al de rendiment, però no igual) del cicle anterior, el qual es funció de les temperatures de la font freda  $T_C$  i de la font calenta  $T_H$ .

Si es considera la màquina aïllada de l'exterior, segons el 1r principi hi haurà conservació de l'energia, aleshores el treball de sortida ha de ser la diferència entre la calor que entra i la calor que surt.

$$W = Q_H - Q_C$$

$W$  = treball en J

$Q_H$  = calor de la font calenta en J

$Q_C$  = calor de la font freda en J

Rendiment tèrmic real o Eficiència tèrmica:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad ; \quad \eta_t = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

D'aquí es pot passar a una expressió en funció de la temperatura que és la important de retenir, que val:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Aquest serà el màxim rendiment que pot tenir una màquina tèrmica. És important destacar que el rendiment termodinàmic només depèn de les temperatures de la font calenta i de la font freda i res més.

Per aquest motiu sempre es busca millorar el rendiment de les màquines treballant a una temperatura  $T_H$  com més alta millor, i una  $T_C$  com més baixa millor, però aquestes estaran limitades per la pròpia resistència dels materials de la màquina.

Per les màquines reals, que tenen pèrdues, es fa servir un rendiment que compara el rendiment real que té una màquina amb el màxim pot tenir, que és el del cicle de Carnot. S'anomena "eficiència segons el segon principi",  $\eta_s$

S'expressa de la forma següent:

$$\eta_s = \frac{\eta_t}{\eta_c}$$

On:

- $\eta_s$ =eficiència segons el segon principi (eficiència de la màquina real en relació a la màquina amb cicle de carnot)
- $\eta_t$ =eficiència que té la màquina real
- $\eta_c$ =eficiència de la màquina ideal o de carnot

### Exercici d'exemple

Una màquina tèrmica treballa entre una font tèrmica alta a  $T_h=473^\circ K$  una altra baixa a  $T_c=303^\circ K$ . La font calenta dona  $Q_H=325 MJ$  d'energia i la font freda n'absorbeix  $Q_C= 250 MJ$ . Determineu el rendiment .

El treball realitzat serà la resta entre el que dona la font calenta i el que es perd a la font freda

$$W = Q_H - Q_C = 325 - 250 = 75 MJ$$

L'eficiència, en aquest cas, serà el treball útil W dividit pel treball subministrat  $Q_H$

$$\eta_t = \frac{W}{Q_H} = \frac{75}{325} = 0,2307$$

L'eficiència de Carnot en les condicions de l'enunciat serà:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{303}{473} = 0,3594$$

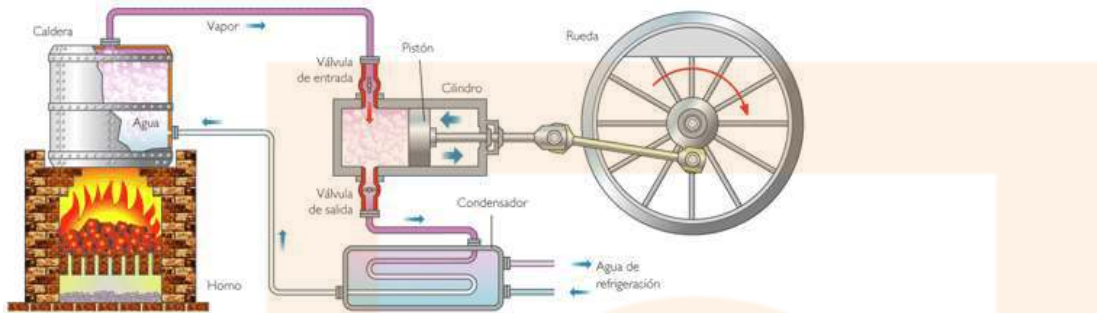
I l'eficiència segons el segon principi (que ve a ser el rendiment real) s'expressa:

$$\eta_s = \frac{\eta_t}{\eta_c} = \frac{0,2307}{0,3594} = 0,641 \quad (64,1\%)$$

## 1.2. Màquines tèrmiques generadores d'energia mecànica

### Màquina de combustió externa: La màquina de vapor

La màquina de vapor és una màquina de **combustió externa**, ja que la combustió té lloc a la caldera, fora de la màquina on es genera l'energia mecànica.



Màquina de vapor

### Màquines de combustió interna

#### ELS MOTORS DE COMBUSTIÓ

Classificació dels motors de combustió interna:

| Tipus               | Exemples                                                                                          | Combustible que fan servir                                |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Motors de dos temps | - Motors de petites motocicletes                                                                  | Benzina amb oli                                           |
| Motors de 4 temps   | - Motors Otto per a vehicles                                                                      | Encesa per bugia, benzina                                 |
|                     | - Motors Diesel per a vehicles                                                                    | Encesa per compressió, gasoil                             |
| Motors rotatius     | - Motor Wankel (molt pocs vehicles el fan servir)                                                 | Encesa per bugia, benzina amb oli                         |
| Turbines de gas     | - Reactors dels avions. Hi ha molts tipus de motors diferents, però destacarem el <u>Turbofan</u> | Encesa només inicial i després injecció continua, querosè |

### Nombre de cilindres i cilindrada

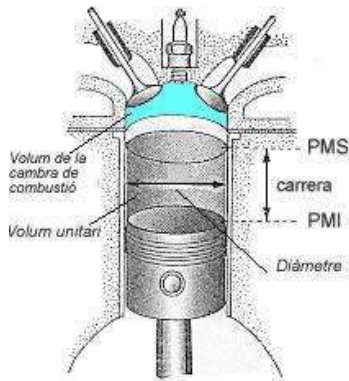
El motors actuals tenen normalment la següent constitució:

Motors d'un cilindre    Normalment motocicletes petites amb cilindrada fins a 250 cc

Motors de 4 cilindres    La major part de vehicles lleugers amb cilindrada inferior a 1800 cc

Motors de 6 o 8 cilindres en V    A Europa els vehicles de gamma alta solen portar motors de 6 cilindres en V, motors de més 2000 cc.  
A estats units, la majoria de vehicles porten motors de 8 cilindres en V i grans cilindrades.

Les fórmules bàsiques pel càlcul dels motors són la de la cilindrada, la relació de compressió, la velocitat de rotació, la potència, el parell i el rendiment. Un motor està format per un cert nombre de cilindres, i cada cilindre té un volum, que és el que genera l'èmbol en el seu moviment. El màxim volum es produeix entre el punt mort inferior i el punt mort superior de l'èmbol o pistó. La suma dels volums de cada cilindre rep el nom de cilindrada.



Cilindrada unitària

$$V_u = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot c \quad (\text{àrea de la base per l'alçada})$$

$V_u$ , cilindrada unitària  
 $D$ , diàmetre de l'èmbol  
 $c$ , carrera de l'èmbol

Cilindrada total

$$V_t = n \cdot V_u$$

$V_t$ , cilindrada total  
 $n$ , nombre de cilindres  
 $c$ , carrera de l'èmbol

Relació de compressió

Si  $V_c$  és el volum de la cambra de compressió, que és l'espai que queda en el motor quan el pistó està en el punt més alt, direm que la relació de compressió d'un motor és:

$$r_c = \frac{V_u + V_c}{V_c}$$

$r_c$ , relació de compressió

La relació de compressió no té unitats, és una divisió de volums

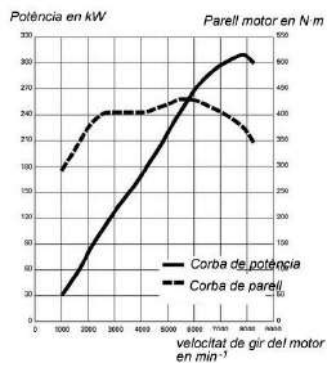
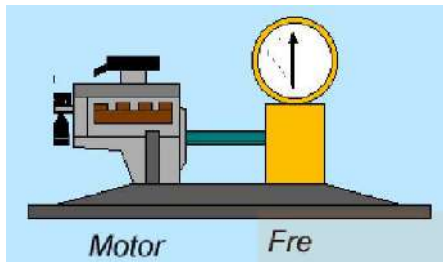
El motors de benzina solen tenir relacions de compressió que van de 6 a 11.

Els motors dièsel, que van amb gasoil tenen relacions de compressió més altes, normalment van de 16 a 20.

Això significa que en els motors dièsel les pressions són superiors i consegüentment el seu rendiment és superior al de benzina.

### La potència i el parell motor

El parell motor és una dada que obtenim en un banc d'assaigs de motors. Es col·loca el motor en un banc de proves amb un fre que mesura el parell. Es calcula a diferents revolucions del motor i es fan les corresponents gràfiques per les diferents velocitats de rotació del motor.



Recordem que la potència és el treball per la unitat de temps:

$$P = \frac{W}{t}$$

I des d'aquesta fórmula general podem arribar a la potència de rotació, que la relaciona amb el parell i la velocitat angular:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v = F \cdot \omega \cdot r = M \cdot \omega$$

Aquesta fórmula és particularment important per totes les màquines de giren: motors tèrmics i elèctrics.

$$P = M \cdot \omega$$

$P$ , Potència en Watts

$M$ , Parell o Moment en N·m

$\omega$ , velocitat de rotació en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

En comptes de la lletra  $M$  per representar el parell, també es pot fer servir la lletra  $\tau$ :

### La velocitat de rotació del motors

És típic parlar de la velocitat de rotació en **rpm**, que són les sigles de **revolucions per minut**, però no és una unitat del Sistema Internacional (SI). Podem parlar en certs casos de  $\frac{1}{\text{min}}$  o sigui, que la paraula revolució es perd quan parlem de les unitats.

Veiem ara la relació entre  $\text{min}^{-1}$  i  $\text{rad/s}$ , que és la unitat del SI. Donat que una revolució vol dir una volta, i una volta són  $2\pi$  radians:

$$1 \text{ min}^{-1} = 1 \frac{1}{\text{min}} = 1 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{60 \text{ s}}$$

Per tant, la velocitat de rotació dels motors es pot donar en  $\text{min}^{-1}$  o  $\text{rad/s}$ . No és correcte donar-la en rpm, tot i que us podeu trobar que la rebeu en aquestes unitats.

### Cicle termodinàmic del motor Otto

Els motors de benzina actuals són alimentats per un sistema d'injecció a una pressió aproximada de 2 bars al col·lector d'admissió. Tenen tants injectors com cilindres tingui el motor. Actualment els carburadors ja no es fan servir més que per motocicletes de petita cilindrada.

El motor de benzina té un cicle de termodinàmic de 4 temps, i el seu funcionament consta de les següents fases:

#### Admissió

El pistó està en el punt mort superior i baixa aspirant la barreja d'aire i combustible. Seria el moviment  $0 \rightarrow 1$  d'admissió. La vàlvula d'admissió està oberta i la d'escapament tancada.

#### Compressió

El pistó està en el punt mort inferior i quan puja comprimeix la barreja d'aire i combustible. Seria el moviment  $1 \rightarrow 2$ . Les vàlvules d'admissió i escapament estan tancades. La pressió i la temperatura augmenten al disminuir el volum.

#### Explosió (Combustió i expansió)

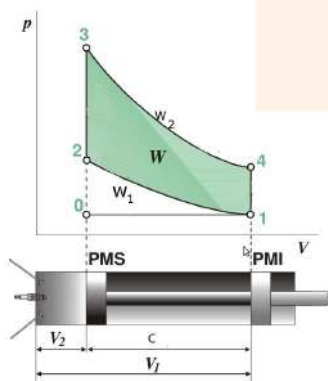
El pistó es troba en el punt mort superior i salten guspires a la bugia, el que produeix la inflamació de la barreja i la pressió puja molt ràpidament, de forma que el pistó pràcticament no s'ha mogut  $2 \rightarrow 3$ , seria la combustió a pressió constant.

Lavors, degut al fort increment de pressió de la combustió el pistó surt impulsat cap avall, del punt mort superior fins a l'inferior  $3 \rightarrow 4$  (expansió). Les vàlvules d'admissió i escapament estan tancades.

#### Escapament

Al final de la carrera d'expansió s'obre la vàlvula d'escapament i els gasos surten baixant la pressió  $4 \rightarrow 1$ , impulsats pel pistó que es mou del punt mort inferior al superior, el moviment  $1 \rightarrow 0$ .

Observeu que a l'única fase en la qual hi producció d'energia seria la de combustió i expansió en la resta dels moviments hi ha pèrdua d'energia.



La superfície de color verd serà el treball del cicle del motor de benzina.

$W_2$ , és l'àrea entre els punts 3 i 4 i l'eix d'abscisses, eix V

$W_1$ , és l'àrea entre 1 i 2 i l'eix d'abscisses

$W$ , és l'àrea en color verd  $W = W_2 - W_1$

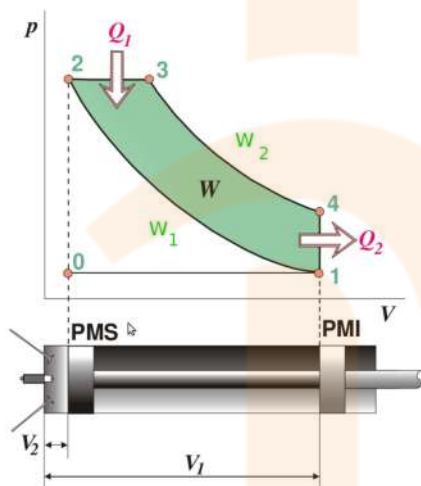
### Cicle termodinàmic del motor Dièsel

Els motors dièsel actuals són alimentats per un sistema d'injecció a una pressió molt elevada per una sistema format per una bomba i injectors que vaporitzen el combustible directament a la cambra de combustió. Tenen tants injectors com cilindres tingui el motor.

Els cicles del motor dièsel són pràcticament iguals (admissió, compressió, explosió o combustió-expansió, i escapament), llevat que la combustió no es produeix a volum constant sinó a pressió constant.

El funcionament és pràcticament el mateix, però no hi ha guspires per inflamar el combustible (no hi ha bugia). Simplement el combustible s'inflama per pressió; per aquest motiu la relació de compressió és més elevada que en els motors de benzina, i això fa que tinguin millor rendiment termodinàmic.

(La combustió és més lenta que al motor de benzina, comença quan l'èmbol està al punt mort superior amb un volum  $V_2$  i acaba quan ha baixat i el volum és  $V_3$ , i es considera que la combustió s'efectua a pressió constant.)



La superfície de color verd serà el treball del cicle del motor de gasoil.

$W_2$ , és l'àrea entre els punt 2, 3, 4 i l'eix d'abscisses, eix V.

$W_1$ , és l'àrea entre 1 i 2 i l'eix d'abscisses

$W$ , és l'àrea en color verd  $W = W_2 - W_1$

### Sobrealimentació de motors

Un motor sobrealimentat fa servir un turbo-compressor per introduir més aire a l'interior del cilindre (comprimit, n'hi cab més). Aquest compressor es mogut per la força dels gasos d'escapament. Aquests motors poden tenir més potència que els convencionals. Es fa servir per obtenir més potència en menys volum de motor i així són més compactes i més econòmics.



Turbo-compressor

### Treball dels motors tèrmics en funció del consum de combustible

La relació entre el treball que subministra un combustible i el consum del motor permet saber l'energia que consumeix (energia o treball subministrat):

$$W_{\text{subministrat}} = P_c \cdot c$$

$W_{\text{subministrat}}$ , és el treball en J, kJ o MJ que dona el combustible o que se subministra al motor

$P_c$ , és el poder calorífic, que pot ser en  $\frac{\text{J}}{\text{l}}$ ,  $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$ ,  $\frac{\text{MJ}}{\text{l}}$

$c$ , és el consum de combustible en litres (l)

Tenint en compte la fórmula del rendiment i la relació entre el poder calorífic d'un combustible i el treball que realitza el motor:

$$\eta = \frac{W_{\text{útil}}}{W_{\text{sub}}}$$

$\eta$ , és el rendiment del motor

$W_{\text{útil}}$ , serà el treball que realitza el motor

$W_{\text{sub}}$ , serà el treball que dona el combustible i que es posa al motor

I també podem fer servir la fórmula

$$W_{\text{útil}} = \eta \cdot P_c \cdot c$$

### El consum dels motors

El consum d'un motor es pot donar en litres per hora de funcionament (L/h) o també en kg per hora de funcionament. En els catàlegs de motors de vehicles es dona el consum urbà i els consum per carretera plana a 90 o a 120 km/h. Per exemple, el consum d'un vehicle és de 7 litres als 100 km anant a 120 km/h.

El poder calorífic dels combustibles és l'energia que dona el combustible per unitat de massa o volum. Així el poder calorífic d'una benzina la poden donar de les dues formes següents:

- En kJ/kg

$$P_c = 45529 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- O bé en kJ/l:

$$P_c = 30959,84 \frac{\text{kJ}}{\text{l}}$$

La relació entre els dos poders calorífics és la densitat de la benzina que fan servir, que sol estar entre 0,67 i 0,72 kg/L.

Per exemple, per una densitat de 0,68kg/L tindriem:

$$P_c = 45529 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{0,68 \text{ kg}}{1 \text{ l}} = 30959,84 \frac{\text{kJ}}{\text{l}}$$

### Turbines de gas

Actualment tenen dos usos molt importants:

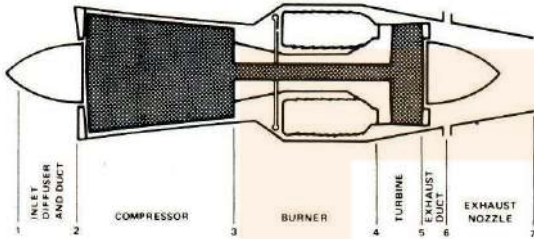
- Pels motors dels avions.
- En les centrals de cogeneració, on enormes turbines de gas connectades a generadors elèctrics produeixen energia elèctrica.

En aquests motors hi ha dues turbines, una davant i una darrera, unides pel mateix eix, i al mig de les dues hi ha la cambra de combustió, on s'injecta combustible de forma permanent. Els gasos cremats surten a elevada velocitat fent moure les dues turbines. La missió de la turbina anterior és absorbir i injectar aire a les cambres de combustió, i la missió de la turbina posterior és aprofitar els gasos que surten per fer moure les dues turbines.

Els dos tipus bàsics de turbines de gas són:

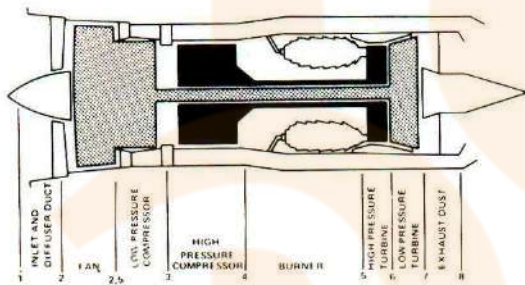
- El turbojet, amb un sol rotor pel compressor davanter i la turbina posterior.

### Single-Rotor Turbojet JT12, J60



- El turbofan, amb dos rotors concèntrics que permeten augmentar molt més la pressió de l'aire a l'entrada.

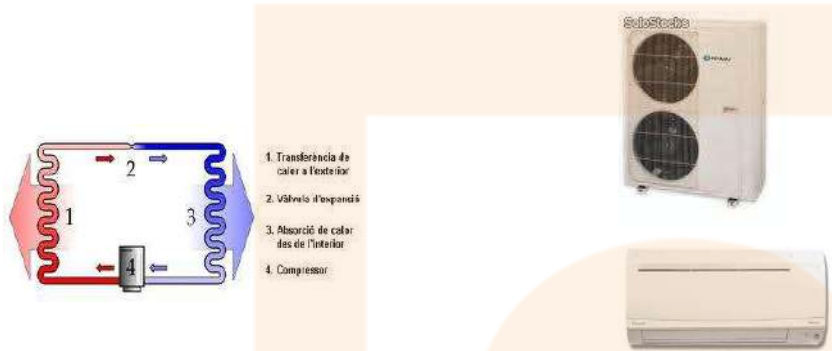
### Dual-Rotor Turbofan Full Duct JT8D



### 1.3. Màquines tèrmiques consumidores d'energia mecànica

Hi dos tipus bàsics de màquines que generen calor i fred. Són les **màquines frigorífiques i les bombes de calor**:

- Una màquina frigorífica és una màquina tèrmica que transforma l'energia mecànica en energia tèrmica per refredar recintes. Són mogudes per motors elèctrics. Són el tipus de màquines que fan servir les neveres.
- Les bombes de calor són molt similars però són reversibles, i permeten obtenir calor a l'hivern i fred a l'estiu en un mateix recinte.



Funcionament general de la màquina frigorífica o de la bomba de calor

#### Eficiència

En aquestes màquines per tenir una mesura de la seva eficiència, es treballa amb el que s'anomena Coeficient d'eficiència o Coeficient d'Operació: COP.

Aquí el que ens interessa, l'objectiu pel qual construïm una màquina d'aquest tipus, és perquè tregui una certa quantitat de calor d'un lloc fred ( $Q_C$ ) i el posi a un lloc calent ( $Q_H$ ).

*\*Fixeu-vos que si fos al revés no caldria cap màquina, perquè passar calor d'un lloc calent a un lloc fred és un fenomen espontani, només cal posar els dos llocs en contacte.*

Per tant l'objectiu és que la màquina extregui  $Q_C$ , però per poder-ho fer li hem de donar energia, el treball:  $W$ .

Així, el COP, ens dóna la relació entre el que volem obtenir ( $Q_C$ ) i el que subministrem ( $W$ ).

$$COP = \frac{Q_C}{W}$$

Podem calcular també el COP ideal, que és el COP d'una màquina de Carnot d'aquest tipus, i que es pot calcular directament amb les temperatures,

$$COP_C = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

I podríem, igual que a les altres màquines, trobar el COP segons el segon principi fent la relació entre el real i l'ideal, tot i que amb aquest tipus de màquines no se sol fer. Se solen fer els càlculs com si la màquina fos directament la de Carnot, ideal.

Per últim remarcar que la igualtat  $W = Q_H - Q_C$  segueix essent vàlida per aquestes màquines, ja que el balanç d'energia ha de continuar complint-se.



## 2. L'entropia

És el flux de calor que evoluciona d'un sistema a un altre de menys temperatura fins a arribar a l'Univers.

Si considerem un quantitat de calor  $Q$ , que passa o evoluciona espontàniament d'un sistema a un altre de temperatura més baixa, i emprem la temperatura per mesurar la calor  $Q$  que evoluciona, podem dir que a mesura que la temperatura disminueix, alguna cosa augmenta per tal que es conservi l'energia.

$$|Q| = T_1 \cdot \Delta S_1 = T_2 \cdot \Delta S_2 = T_3 \cdot \Delta S_3 \dots ; \text{ en que } T_1 > T_2 > T_3 \dots$$

$$\Delta S = \frac{|Q_i|}{T_i} \text{ (J/K)}$$

 Entropia\_v3

Els cicles a les màquines tèrmiques poden ser representats mitjançant diagrames pV i TS, equivalents a una màquina de Carnot.

En les expansions i/o compressions isotèrmiques la línia resulta horitzontal, mentre que a les adiabàtiques o isoentròpiques en resulta una línia vertical.

L'àrea fosca del diagrama TS representa el treball efectuat o la calor bescanviada per cicle.

$$W = T_H \cdot \Delta S_{1-2} - T_C \cdot \Delta S_{3-4} = |Q_H| - |Q_C|$$

on:

$W$  = Treball

$T_H$  = Temperatura de focus calent (Hot)

$T_C$  = Temperatura de focus fred (Cold)

$\Delta S_{1-2}$  = Increment d'entropia entre estats 1 i 2

$\Delta S_{3-4}$  = Increment d'entropia entre estats 3 i 4

$Q_H$  = Bescanvi de calor de focus calent

$Q_C$  = Bescanvi de calor de focus fred

En un sistema irreversible, la variació total d'entropia i el treball perdut en les irreversibilitats son, respectivament:

$$\Delta S_T = \Delta S_H + \Delta S_C$$

$$W_P = T_C \cdot \Delta S_T$$

On:

$T_C$  = Temperatura de la font freda correspon a l'Univers