

TD. T5.- Ciclos de Potencia

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

TD. T5.- Ciclos de Potencia

Objetivos:

Este tema es el más extenso del bloque, en él se estudian los ciclos termodinámicos, destinados a la obtención de potencia o trabajo. En primer lugar se abordan los ciclos de vapor, para finalizar con los ciclos de gas. Se estudiarán tanto los ciclos simples como los mejorados con recalentamiento, regeneración, extracción, o refrigeración intermedia

El tema se complementa con una práctica de laboratorio sobre la simulación por ordenador de ciclos termodinámicos de potencia

2

1.- Introducción

2.- Ciclos de Vapor

- 2.1.- Ciclo de Carnot
- 2.2.- Ciclo Rankine
- 2.3.- Ciclo Rankine con recalentamiento
- 2.4.- Ciclo Rankine con regeneración
- 2.5.- Ciclo Rankine con regeneración y recalentamiento
- 2.6.- Ciclo Rankine supercrítico
- 2.7.- Pérdidas en el ciclo Rankine

3.- Ciclos de Aire

- 3.1.- Compresores
- 3.2.- Ciclo de aire estándar
- 3.3.- Ciclo de Carnot
- 3.4.- Ciclo Otto
- 3.5.- Ciclo Diesel
- 3.6.- Ciclo Dual
- 3.7.- Ciclos Ericson y Stirling
- 3.8.- Ciclo Brayton
- 3.9.- Ciclo Brayton regenerativo
- 3.10.-Ciclo Brayton con recalentamiento
- 3.11.- Ciclo Brayton regenerativo con recalentamiento y refrigeración

4.- Ciclo Combinado

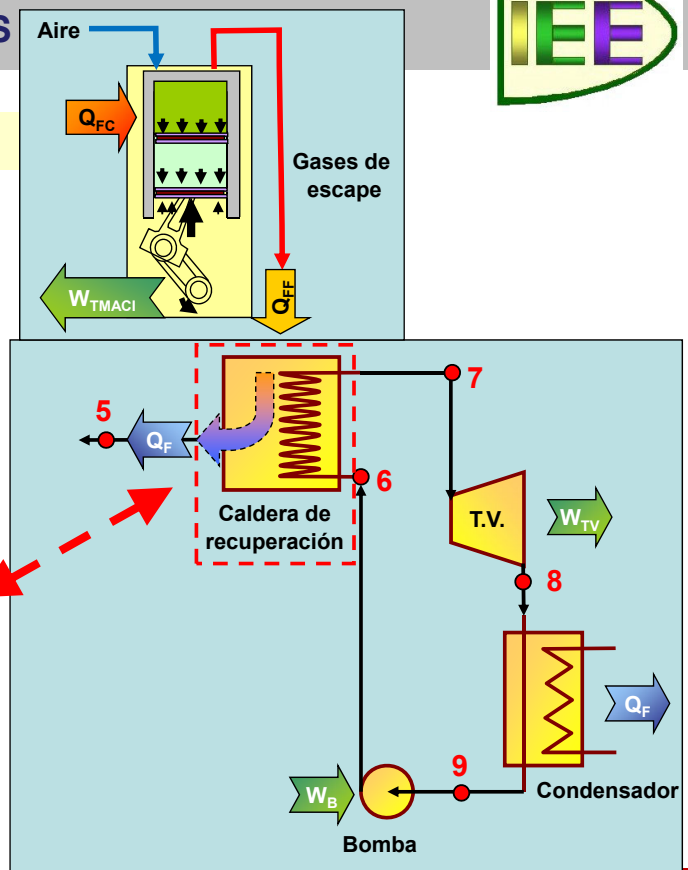
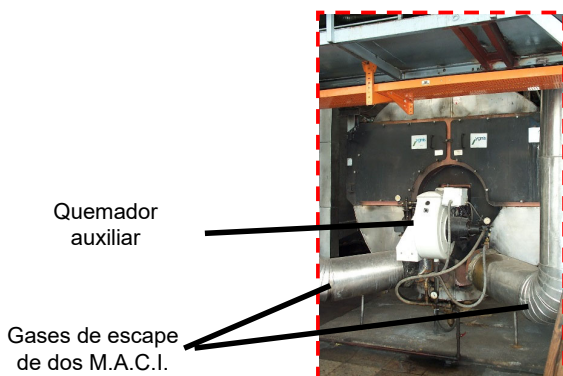
5.- Cogeneración

6.- Máquinas Térmicas

- 6.1.- Turbinas de vapor
- 6.2.- Motores de combustión
- 6.3.- Turbinas de gas
- 6.4.- Motor Stirling

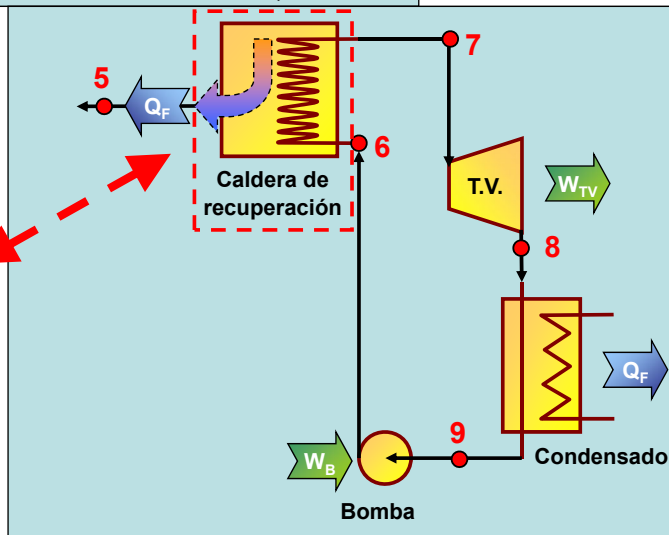
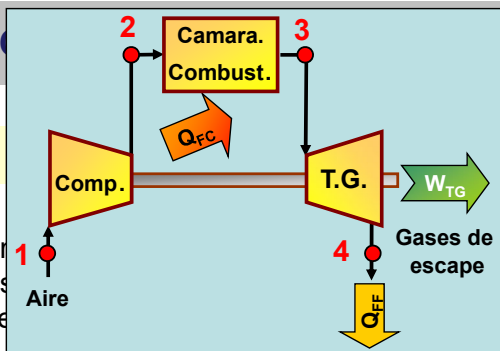
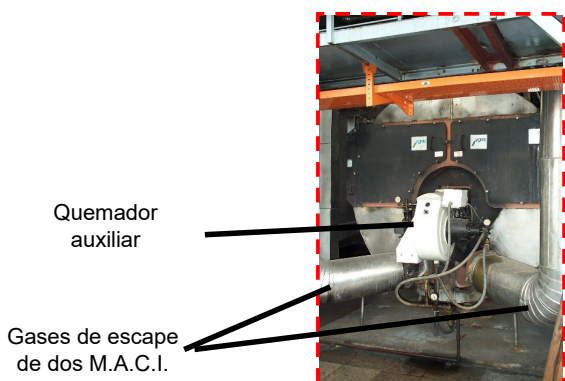
4.- Ciclo Combinado (I)

Los gases de escape de un motor de combustión o de una turbina de gas se emplean para alimentar térmicamente una caldera de recuperación de un ciclo de vapor



4.- Ciclo Combinado (I)

Los gases de escape de un motor de combustión o de una turbina de gas emplean para alimentar térmicamente una caldera de recuperación de un ciclo de vapor



4.- Ciclo Combinado (II)

Ideal:

$$T_5 = T_6 \text{ y } T_7 = T_4$$

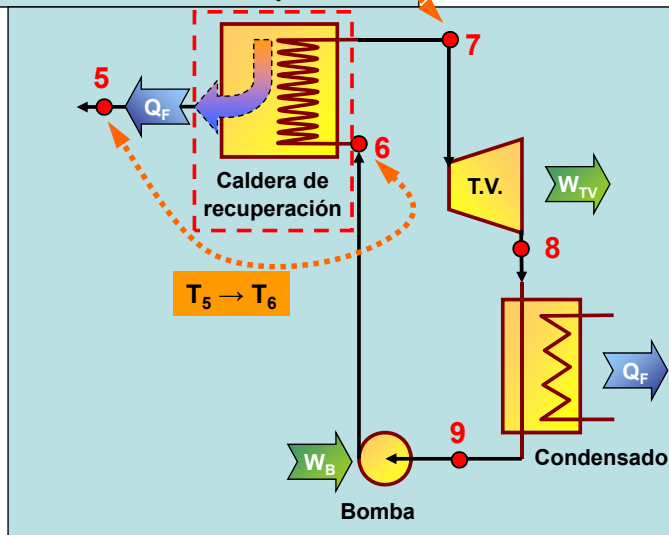
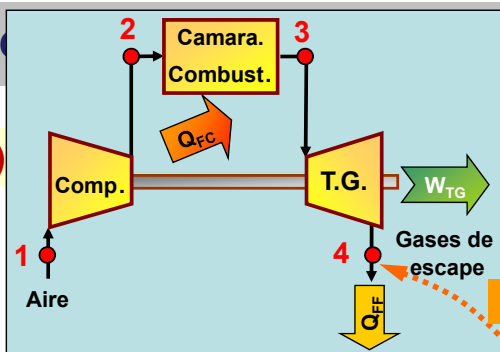
$$p_4 = p_5 \text{ y } p_6 = p_7$$

$$m_{\text{aire}} \cdot c_{\text{paire}} \cdot (T_4 - T_5) = m_{\text{vapor}} \cdot c_{\text{pvapor}} \cdot (T_7 - T_6)$$

$$m_{\text{aire}} \cdot (h_4 - h_5) = m_{\text{vapor}} \cdot (h_7 - h_6)$$

$$\eta_{\text{Ciclo Comb [MACI]}} = \frac{W_{\text{MACI}} + W_{\text{TV}}}{Q_{\text{FC}}}$$

$$\eta_{\text{Ciclo Comb [TG]}} = \frac{(W_{\text{TG}} - W_{\text{cmp}}) + W_{\text{TV}}}{Q_{\text{FC}}}$$



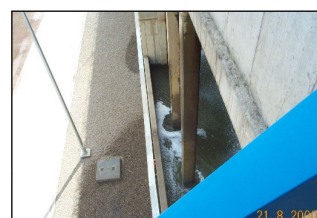
**Central Térmica de Ciclo Combinado (I)
Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)**



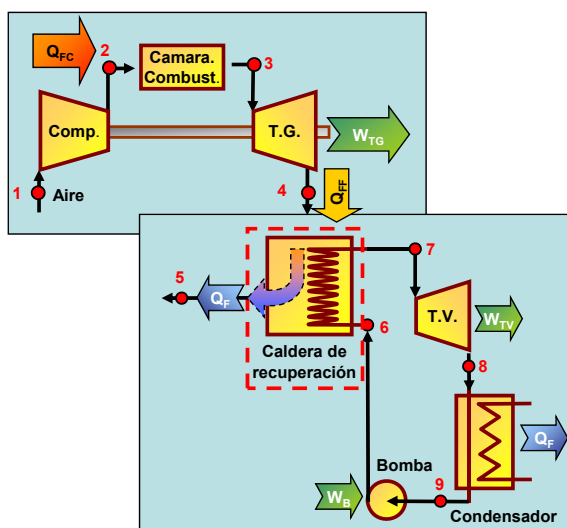
**Central Térmica de Ciclo Combinado (II)
Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)**



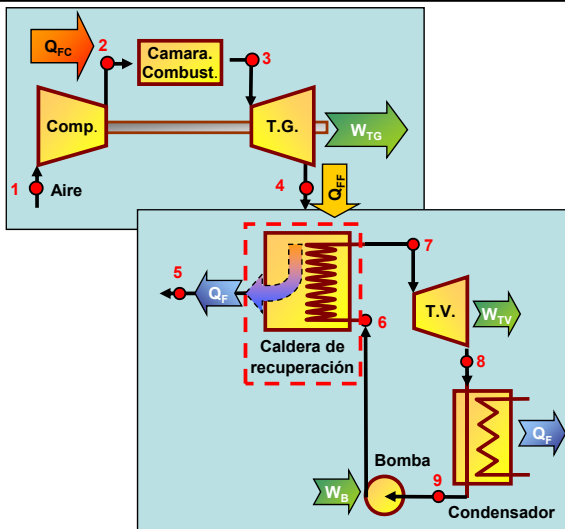
**Central Térmica de Ciclo Combinado (III)
Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)**



Una planta simple de potencia de vapor funciona entre las presiones de 10 kPa y 4 MPa con una T^a máxima de 400°C. La potencia obtenida en la turbina de vapor es de 100 MW. La energía suministrada a la caldera se toma de una T.G. que toma aire a 100 kPa a 25°C, tiene una relación de presiones de 5 y una T^a máxima de 850°C. Los gases de escape salen de la caldera a 350K. Determinar el rendimiento del ciclo combinado (Brayton-Rankine)

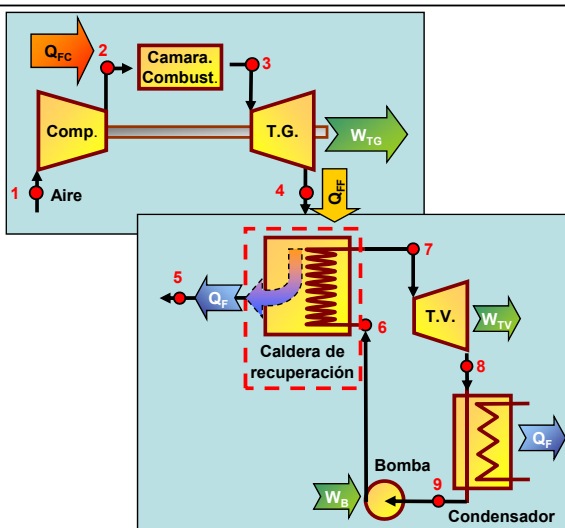


En un ciclo combinado los gases de escape de la **TG** (que entrega en el eje **100 MW**, de los que parte son absorbidos por el compresor) se aprovechan en una caldera de recuperación para producir vapor de agua y alimentar una TV. El compresor tiene una relación de presiones de 5 y toma aire a 100 kPa y 25°C, siendo la T alcanzada en el combustor de 850°C, y saliendo los gases de escape de la caldera de recuperación a 80°C. El vapor se obtiene a 8,6 MPa y 300°C, y la condensación del ciclo se produce a 10 kPa. ($W_{bomba} = 0$, y turbinas y compresor son ideales, $s = cte$; $\gamma_{aire} = 1,4$; $Cp_{aire} = 1,1 \text{ kJ/kg.K}$)



- Relación de acoplamiento en la T.G.
- El rendimiento del ciclo Brayton
- Masa de aire en kg/s
- Trabajos desarrollado por la TG, absorbido por el compresor, y entregado en el eje por el grupo
- Calores a comunicar en el combustor y extraído en el escape de la TG
- Masa de vapor
- Trabajo desarrollado por la T.V.
- Rendimiento del ciclo combinado

En un ciclo combinado los gases de escape de la **TG** (que entrega en el eje **100 MW**, de los que parte son absorbidos por el compresor) se aprovechan en una caldera de recuperación para producir vapor de agua y alimentar una TV. El compresor tiene una relación de presiones de 5 y toma aire a 100 kPa y 25°C, siendo la T alcanzada en el combustor de 850°C, y saliendo los gases de escape de la caldera de recuperación a 80°C. El vapor se obtiene a 8,6 MPa y 300°C, y la condensación del ciclo se produce a 10 kPa. ($W_{bomba} = 0$, y turbinas y compresor son ideales, $s = cte$; $\gamma_{aire} = 1,4$; $Cp_{aire} = 1,1 \text{ kJ/kg.K}$)



Pa	Vapor seco	
	10 10 ³ Pa	
	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
45°C	188	6,4
300°C	3.080	9,3
Pa	8,6 10 ⁶ Pa	
	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
45°C	196	0,64
300°C	1.350	3,3

°C	Vapor húmedo			
	Líqu.		Vapor	
	10 10 ³		8,6 10 ⁶	
h (kJ/kg)	188	2.580	1.350	2.750
s (kJ/kg.K)	0,64	8.2	2,3	5,7

5.- Cogeneración (I)

Aprovechamiento térmico del calor residual de un ciclo de potencia

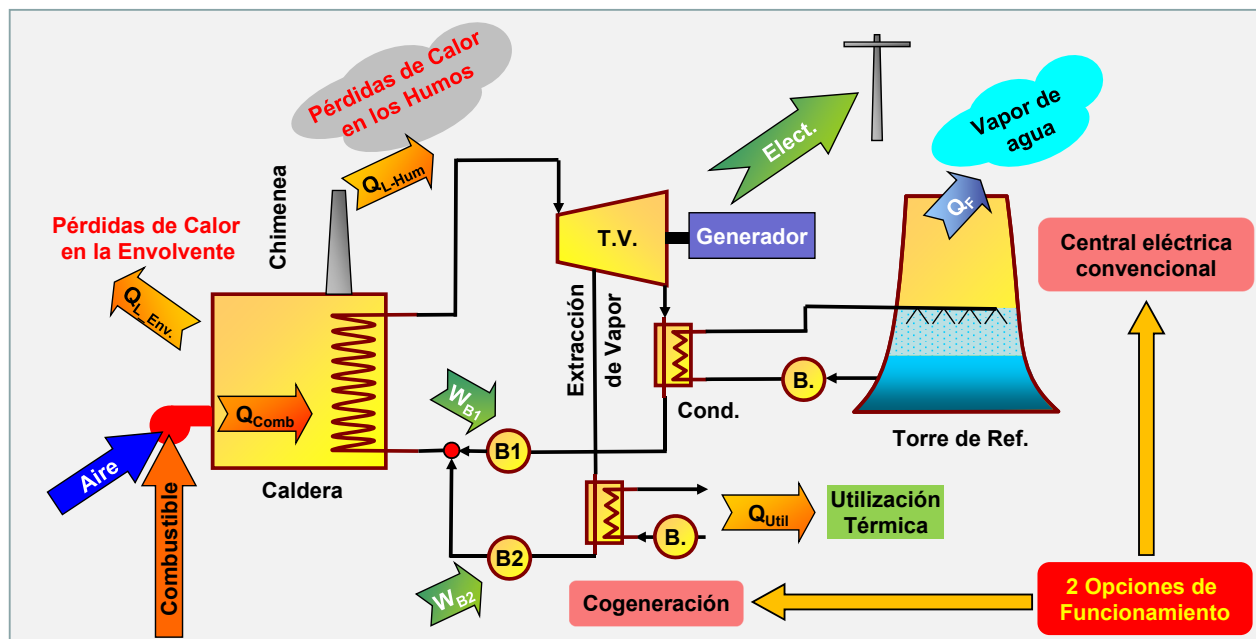
- Del calor cedido en el condensador
- De los gases de escape de un motor o turbina
- De la refrigeración de la lubricación de un motor

TRIGENERACION:

Aprovechamiento del calor de calor de cogeneración para producir frío con un sistema de absorción (T6)

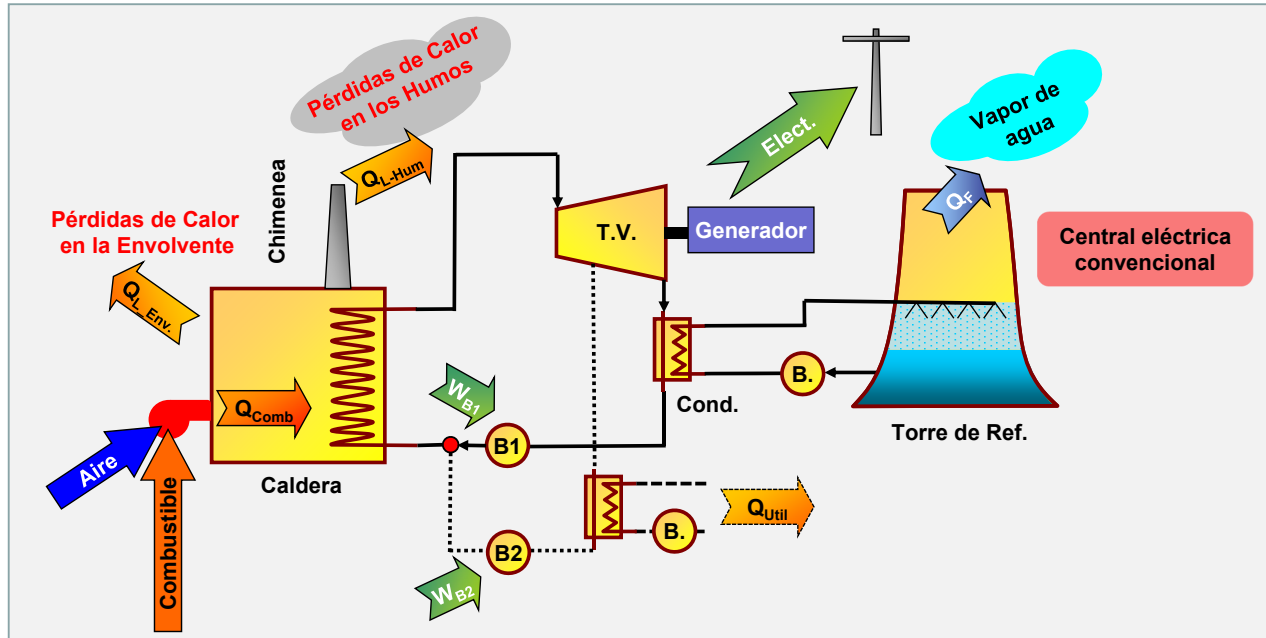
5.- Cogeneración (II)

Centrales de Extracción



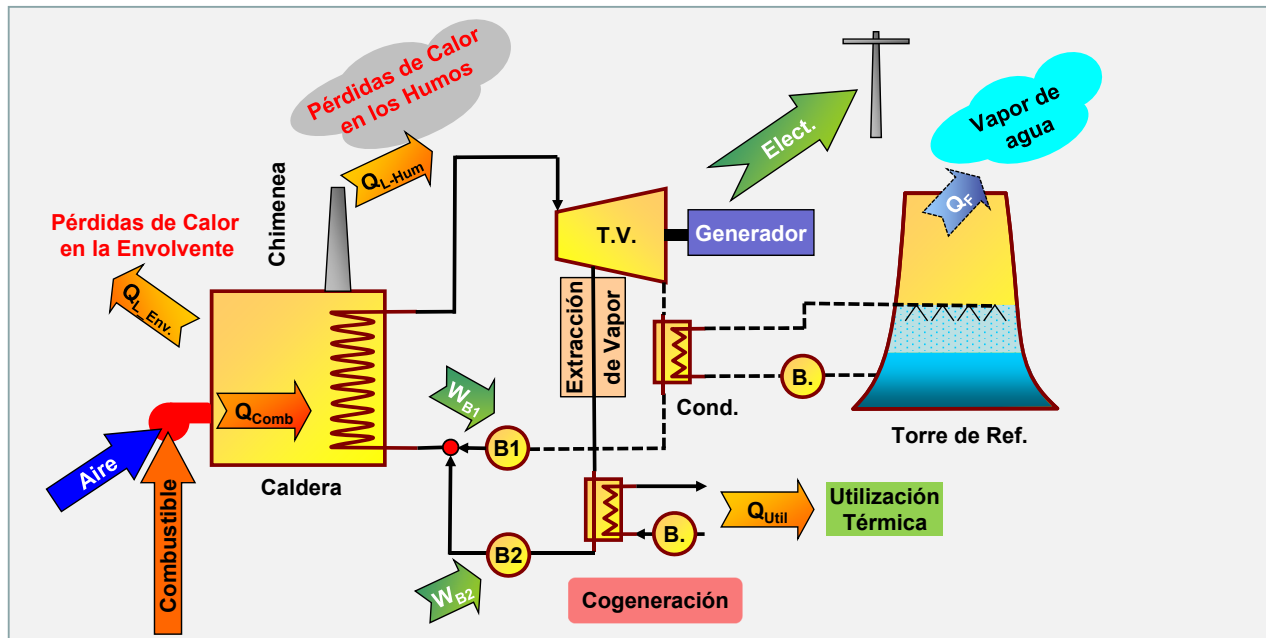
5.- Cogeneración (II)

Centrales de Extracción



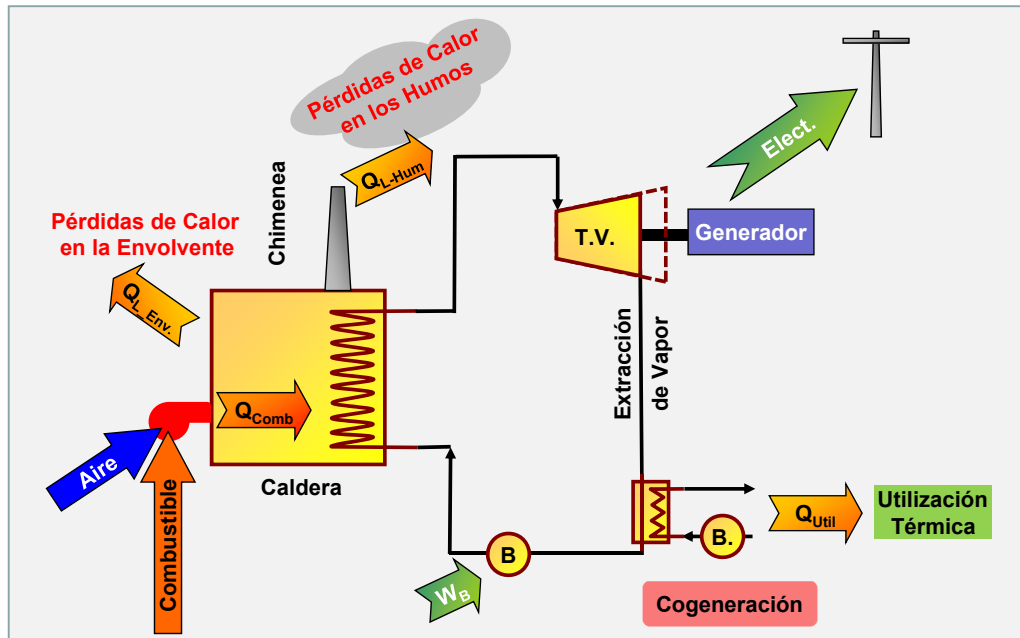
5.- Cogeneración (II)

Centrales de Extracción



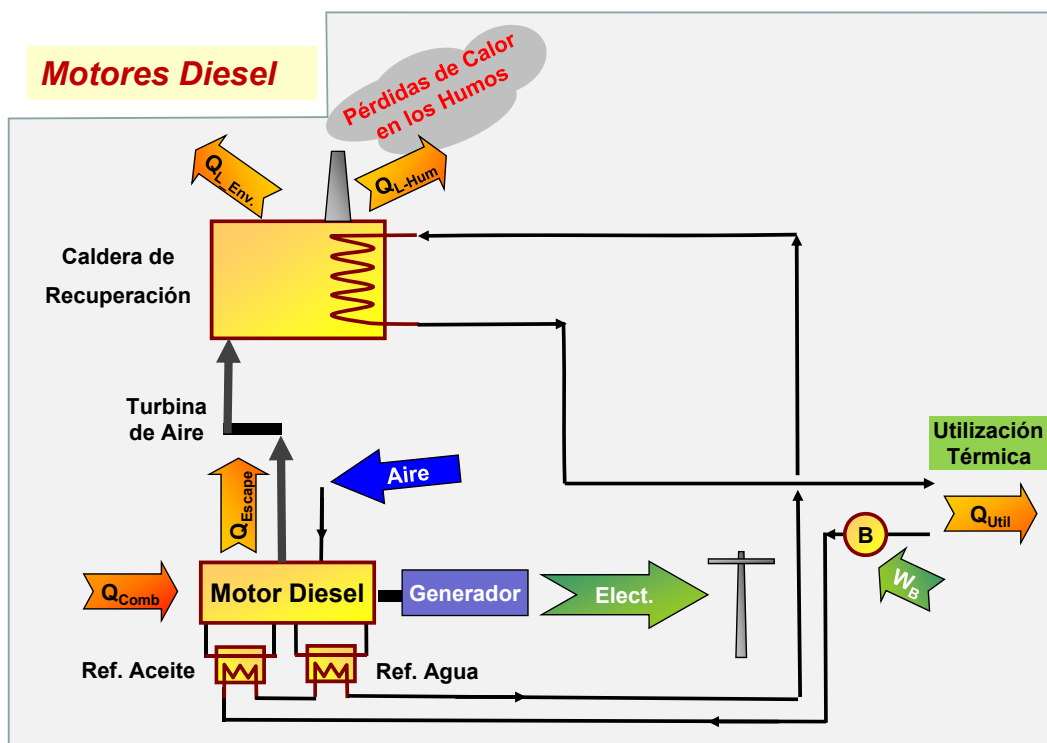
5.- Cogeneración (III)

Central Back-Pressure o Contrapresión

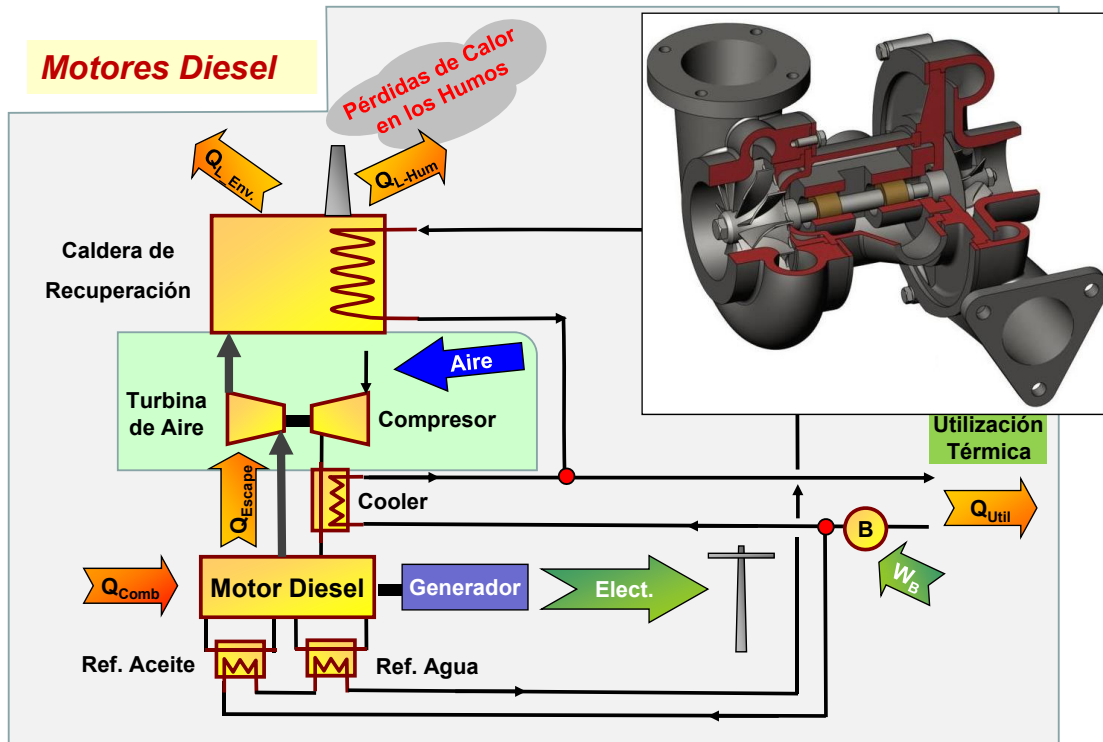


5.- Cogeneración (IV)

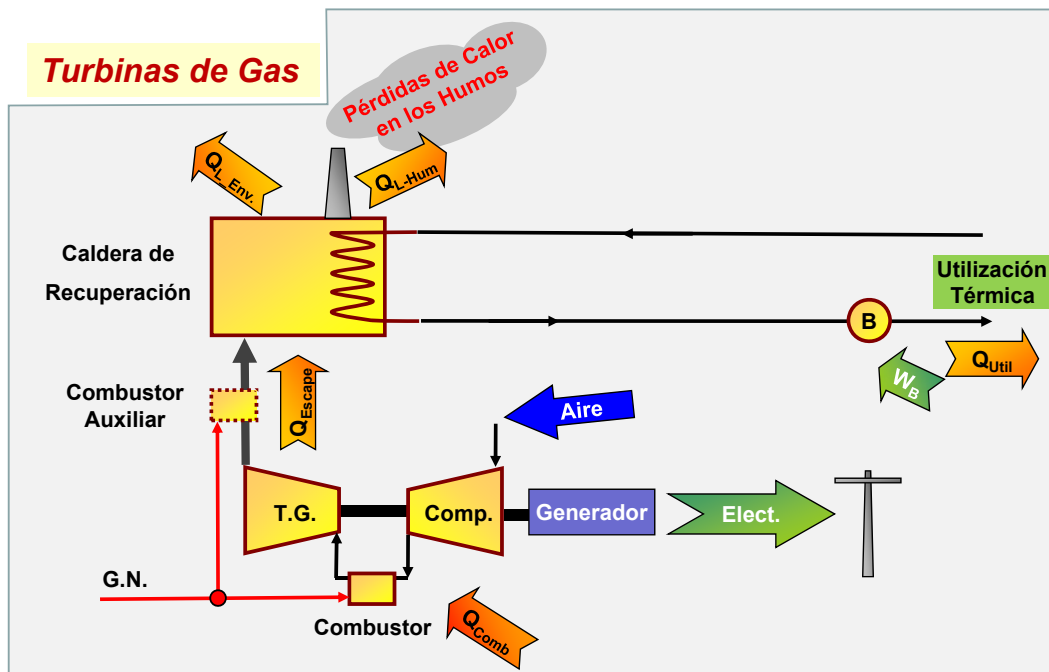
Motores Diesel



5.- Cogeneración (IV)

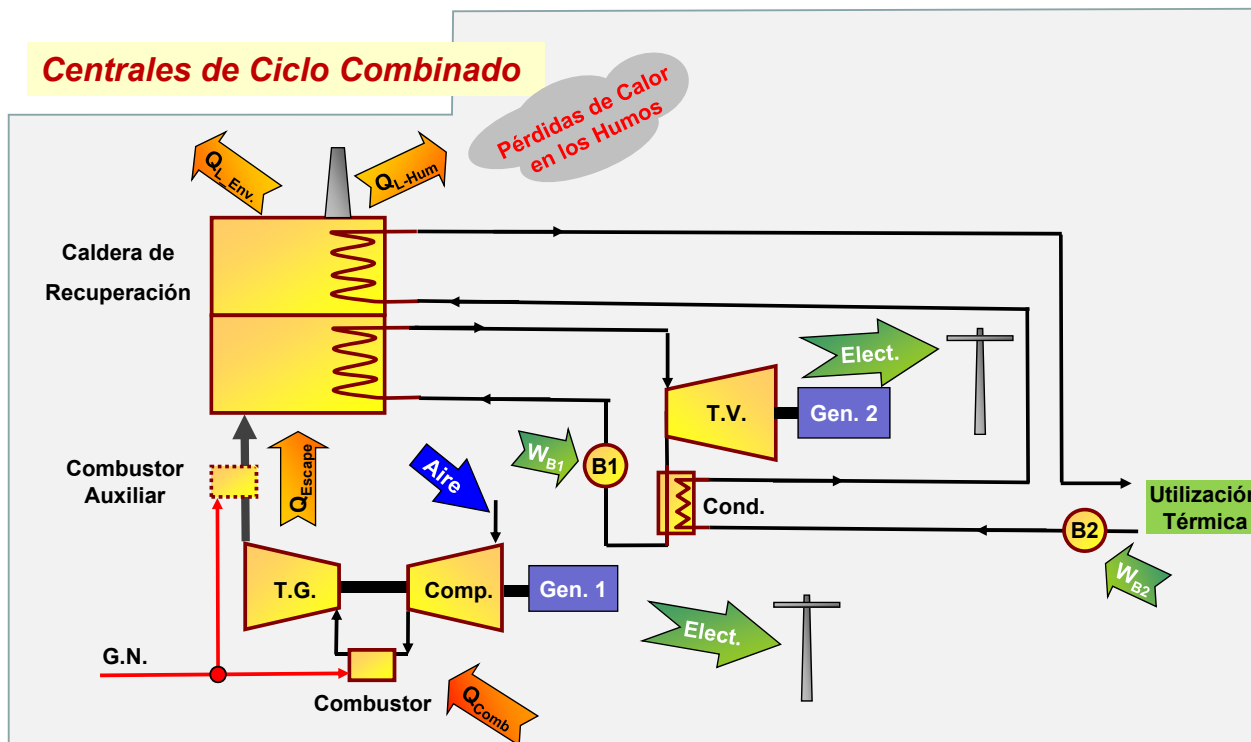


5.- Cogeneración (V)



5.- Cogeneración (VI)

Centrales de Ciclo Combinado



5.- Cogeneración (VII)

	T. Gas	Motor Diesel
Rendimiento mecánico	35%	40%
O ₂ en los gases de escape	14%	1-2%
Nivel entálpico de la energía térmica	Alto	Alto en gases de escape Bajo en refrig. del motor
Coste económico	Alto	Medio
Costes de mantenimiento	Alto	Medio
Respuesta a los cambios de potencia solicitada	Mala	Buena
Ruidos y vibraciones	Alto	Medio
Contaminación atmosférica	Similar	

5.- Cogeneración (VIII)

	Rendimiento anual		Ratio Electricidad/Calor	
	Combustible líq o gas	Combustible sólido	District Heating	Industrial
Turbina de vapor de contrapresión	85 %	84 %	0,45	0,30
Turbina de vapor de condensación y extracción	85 %	84 %	0,45	0,30
Turbina de gas	86 %		0,55	0,40
Ciclo combinado	88 %		0,95	0,75
Motor de combustión	84 %		0,75	0,60

5.- Cogeneración (IX)

Presión salida (bar)	Ratio Electricidad / Calor para turbinas de vapor						
0,4	0,33	0,41	0,45	0,48	0,50	0,5	0,62
0,4 a 0,8	0,31	0,38	0,42	0,45	0,47	0,55	0,58
0,8	0,3	0,35	0,40	0,43	0,45	0,52	0,55
1,5	0,26	0,32	0,35	0,38	0,41	0,47	0,49
2	0,24	0,29	0,32	0,36	0,40	0,44	0,47
3	0,21	0,26	0,30	0,33	0,38	0,40	0,43
4	0,19	0,24	0,28	0,30	0,35	0,37	0,40
5		0,22	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38
6		0,21	0,24	0,26	0,29	0,33	0,36
8		0,18	0,22	0,24	0,27	0,31	0,33
10			0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
12			0,18	0,21	0,23	0,26	0,28
14			0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
16				0,18	0,21	0,23	0,24
Presión vapor (bar) vivo / reinjectado	40	60	80	100	120	140/40	180/45
Tª vapor (°C)	450	480	500	520	530	535	535
Tª agua alimentación (°C)	140	180	200	210	225	240	260
Potencia entregada (MW)	10	20	30	35	40	100	150

5.- Cogeneración (X)

	Caldera de Gas	Motor GN	Microtur. GN	Turbina GN	Turbina de vapor	Caldera Biomasa	Turbina Biogas	Motor Biogas	ORC	Pila Comb.
Potencia (kW_e)	5-600	5-8.000	30-200	1-450	100-12.000	6-6.000		60-3.000	250-2.000	5-300
Rend_e (PCI)		25-43	25-33	30-40	15-45		27-33	25-43	10-20	30-65
Rend_{Th} (PCI)	80-100	49-76	60-74	60-65	60-74	80-95	68-77	28-48		
Dispon. (%)	98	92-97	90-98	90-98	98	95	92-97	92-97	98	95
Superficie (m²/kW_e)	0,1 (m ² /kW _{Th})	0,025	0,12	0,051	0,01	0,026	0,02-0,03	0,04-0,07	0,06	0,15
Coste (€/kW_e)	80-112 (€/kW _{Th})	1.100	2.200	900	1.200	110-850	175-200	1.200	3.300	
Mant. (€/kW_e)	0,1-2,5 (€/kW _{Th})	0,009	0,005	0,005	0,003	0,26-0,58	0,54-0,7	0,1	0,002	

25

6.- Máquinas Térmicas (I)

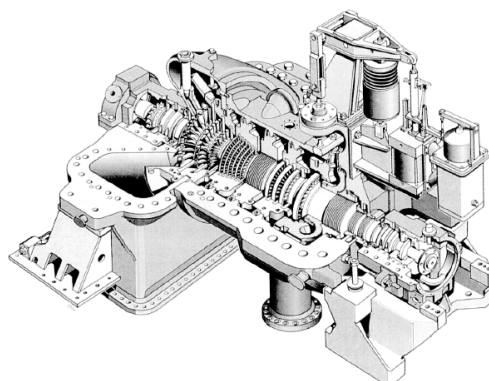
6.1.- Turbinas de Vapor (I)

Transforma la entalpía del vapor de agua en energía mecánica en su eje

Su rendimiento es el más bajo de todas las máquinas térmicas cíclicas

Según el número de etapas se pueden clasificar en:

- Turbinas simples o monoetapas poseen un único escalonamiento
- Turbinas compuestas o multietapa con varios escalonamientos



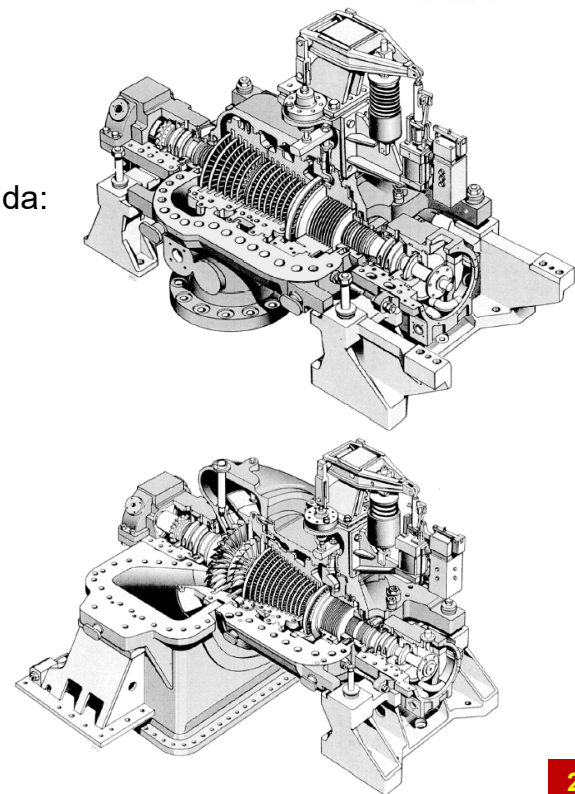
26

6.- Máquinas Térmicas (II)

6.1.- Turbinas de Vapor (II)

En función de la presión del vapor a la salida:

- Turbinas de contrapresión; el vapor se extrae a $p > p_{atm}$, el vapor tras su paso por la turbina tiene un aprovechamiento
- Turbinas de condensación; el vapor sale a $p < p_{atm}$, llegando a salir vapor húmedo



27



28

6.1

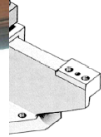
En

•

e

l:

•

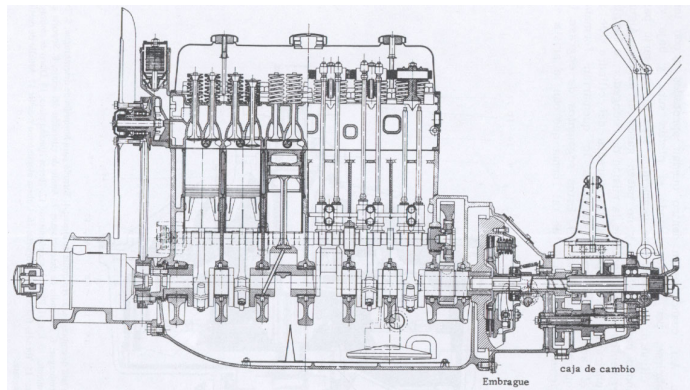


6.- Máquinas Térmicas (III)

6.2.- Motores de Combustión (I)

La combustión del combustible se realiza en el interior de un cilindro, cuyo cierre lo forma un émbolo que lo recorre (pistón)

- Gasolina
- Diesel (autodetona por compresión)
- Gas



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Potencia} \propto \text{Diámetro Cilindro}^2 \\ \text{Cilindrada} \propto \text{D.C.}^3 \\ \text{Masa Motor} \propto \text{D.C.}^3 \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Potencia (kW)}}{\text{Cilindrada (cc)}} \propto \frac{1}{\text{D.C.}} \\ \frac{\text{Potencia (kW)}}{\text{Masa (kg)}} \propto \frac{1}{\text{D.C.}} \end{array} \right.$$



↓ al ↑ D.C

6.- Máquinas Térmicas (IV)

6.2.- Motores de Combustión (II)

- De 4 tiempos; (mayor peso y mayor rendimiento)
- De 2 tiempos; admisión-compresión y expansión-escape
con = cilindrada y rpm, desarrolla más potencia (trabajo en cada carrera)
⇒ cortocircuito admisión escape
⇒ OTTO desperdicio de combustible

	2T	4T
OTTO	Pot Bajas (ligeros)	Pot Medias
DIESEL	Pot Altas (tamaño)	Pot Medias

6.- Máquinas Térmicas (V)

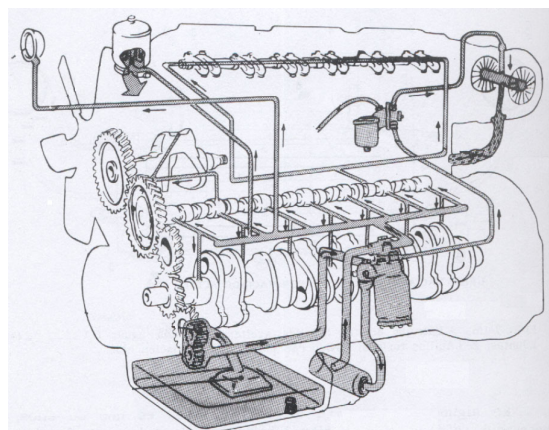
6.2.- Motores de Combustión (III)

Los motores pueden tener aspiración natural o ser sobrealimentados

Necesitan refrigeración, lubricación y salida de gases (se puede extraer el calor)

Los gases están a $T \approx 400^\circ\text{C}$, en una caldera se puede producir vapor o agua caliente de $0,45 \text{ kW}_{\text{th}}$ por cada kW_{eje}

De la refrigeración de las camisas se puede obtener agua caliente a $T \approx 80$ a 90°C de $0,5$ a $0,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ por cada kW_{eje}

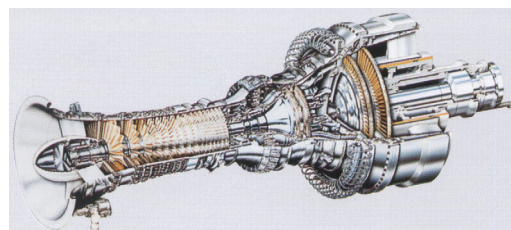


6.- Máquinas Térmicas (VI)

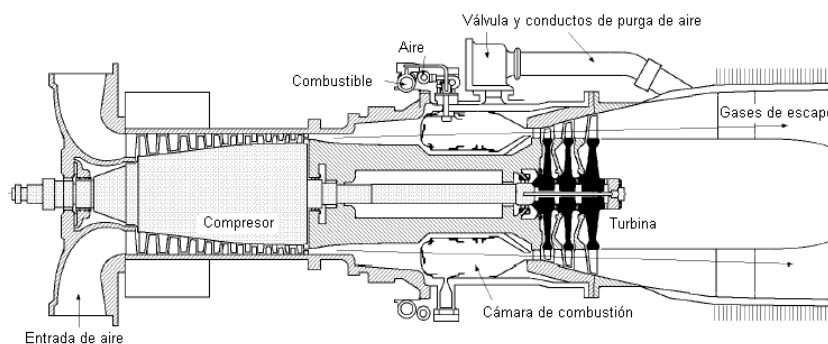
6.3.- Turbinas de Gas (I)

Se componen principalmente de tres elementos:

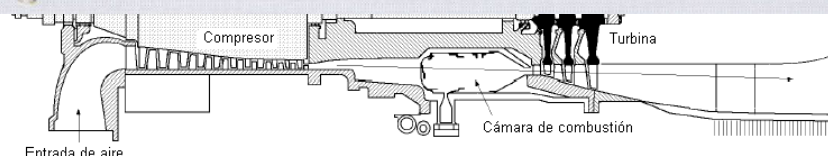
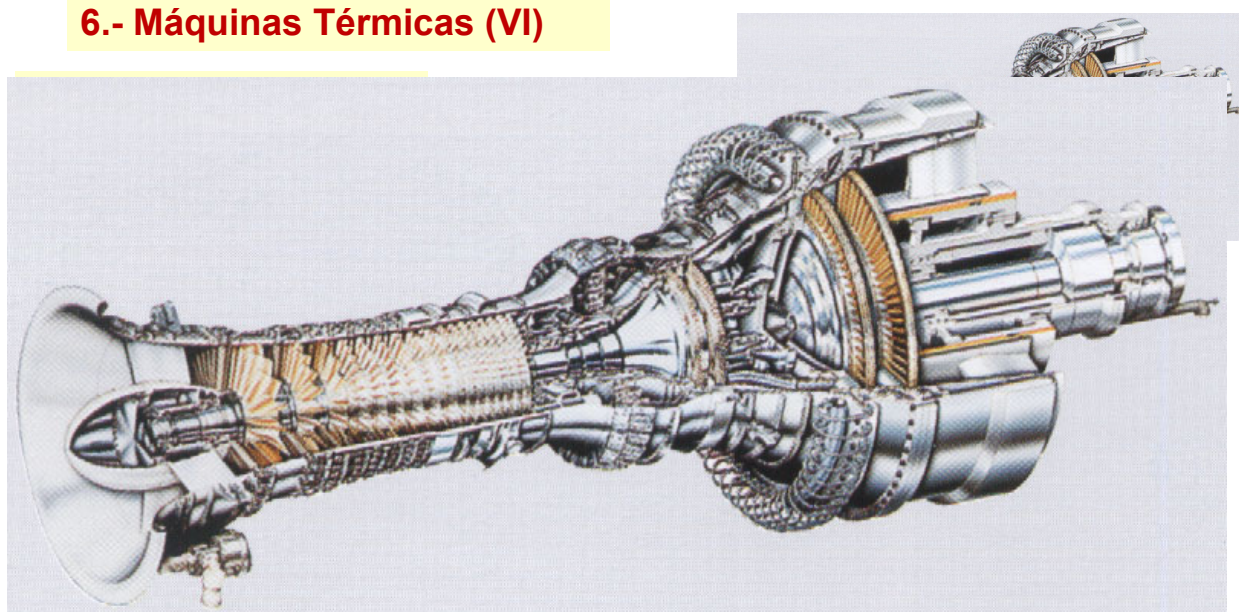
- Compresor, que comprime el aire comburente
- Cámara(s) de combustión, dispuesta(s) radialmente
- Turbina accionada por los gases

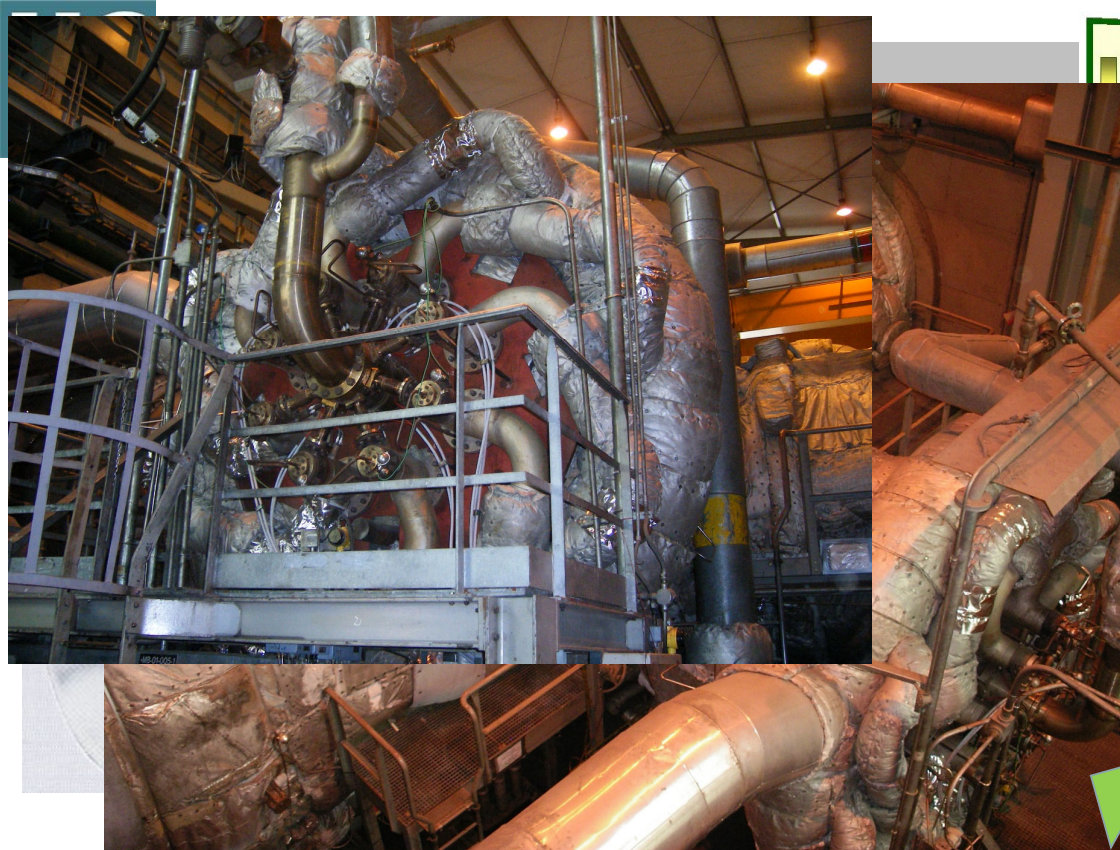


La turbina es serie de álabes con un cierto ángulo de inclinación ángulo, solidarios con una parte móvil, sobre los que incide el gas y hace girar



6.- Máquinas Térmicas (VI)





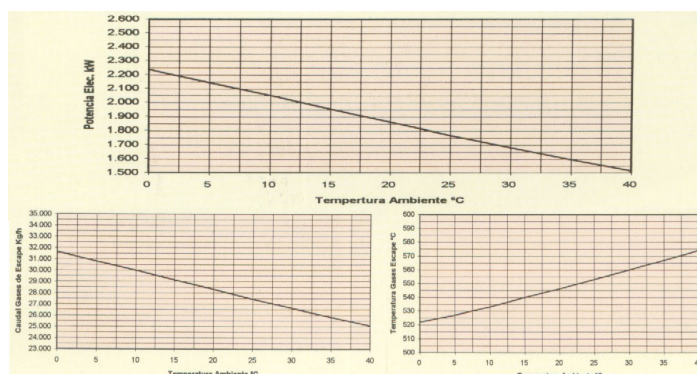
6.- Máquinas Térmicas (VII)

6.3.- Turbinas de Gas (II)

Giran a gran velocidad, peligro con los desequilibrio
Las partículas que pueda arrastrar el aire en la entrada son muy perjudiciales
El combustible debe estar perfectamente filtrado

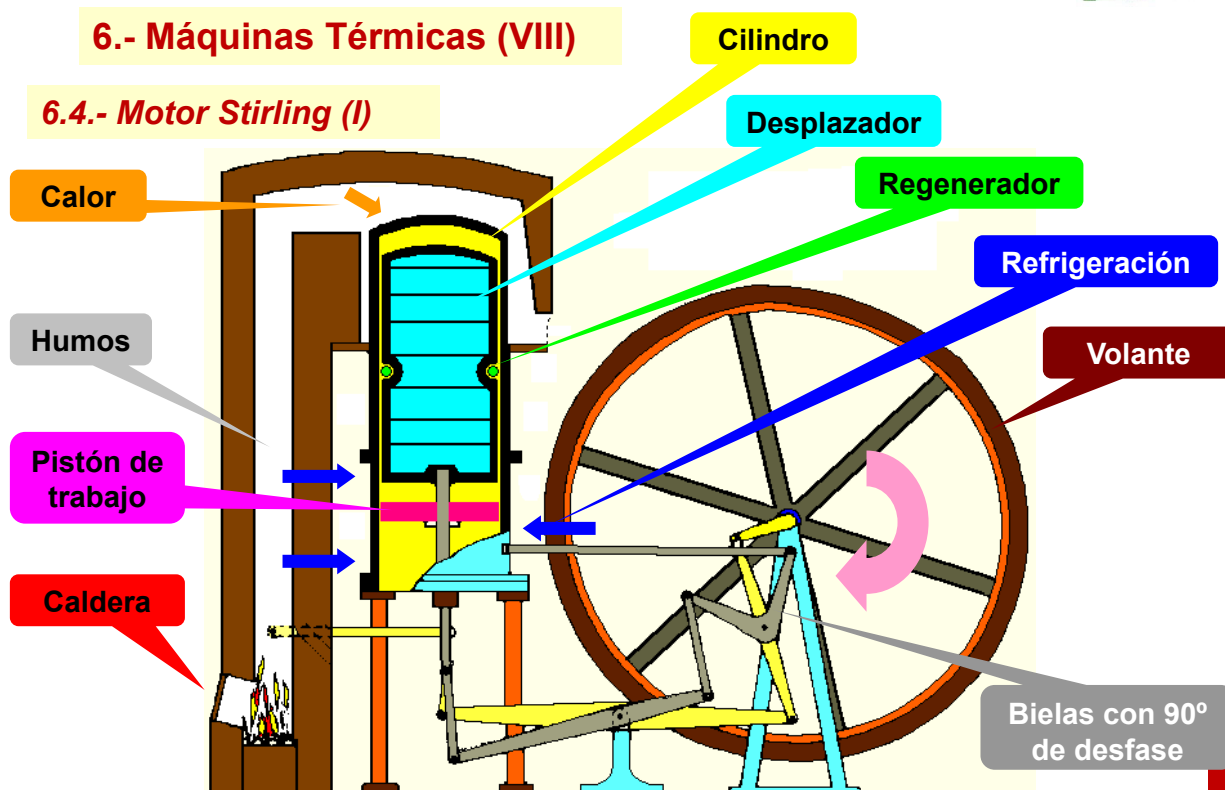
En los gases de escape está contenido el calor que cede la máquina térmica
Las turbinas de gas pueden tener varias etapas

↑T empeora su funcionamiento



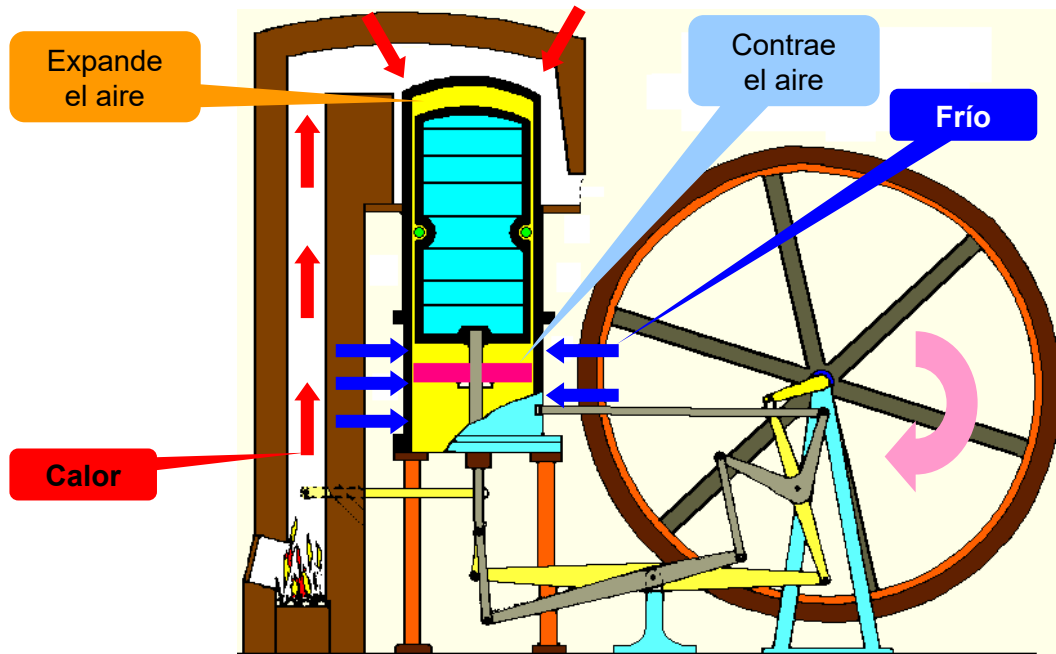
6.- Máquinas Térmicas (VIII)

6.4.- Motor Stirling (I)



6.- Máquinas Térmicas (IX)

6.4.- Motor Stirling (II)



39

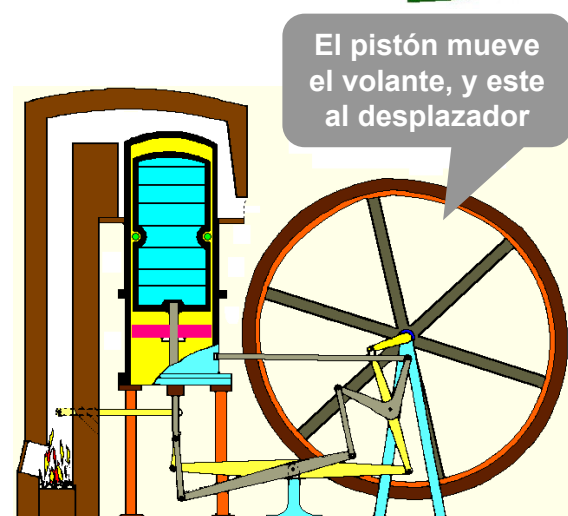
6.- Máquinas Térmicas (X)

6.4.- Motor Stirling (III)

El **desplazador** es liviano y no conduce fácilmente calor de un extremo a otro

Al medio existe un anillo de material capaz de absorber y ceder calor que es el **regenerador**

Cuando el desplazador se mueve hacia abajo, la mayor parte del aire dentro del **cilindro** queda en la zona caliente y se expande, empujando el **pistón de trabajo** hacia abajo



Aquí se entrega trabajo al exterior y gira el **volante**

Al suceder esto, una serie de **bielas** mueven el desplazador hacia arriba, desplazando la mayor parte del aire a través del regenerador hacia la zona fría

(**carrera desplazador > carrera del pistón; desfasadas 90° en adelante**)

Allí se enfría el aire, baja la presión, el pistón sube, y se repite el ciclo

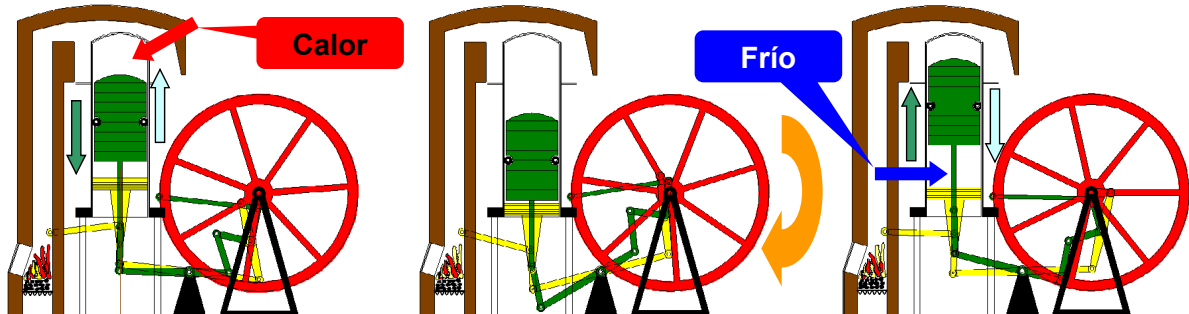
40

6.- Máquinas Térmicas (XI)

En movimiento en:

<http://www.moteur-stirling.com/Diapo8.gif>

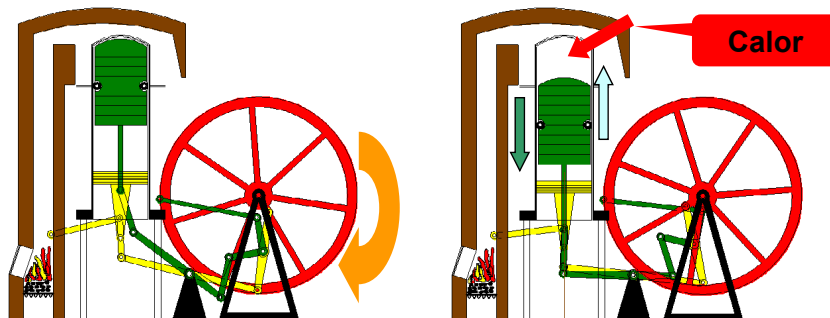
6.4.- Motor Stirling (IV)



Aire en el cilindro Inercia del volante mueve el desp.
Espaciador

El espaciador va en adelanto 90° respecto al pistón

El pistón tiene una carrera más corta que el espaciador

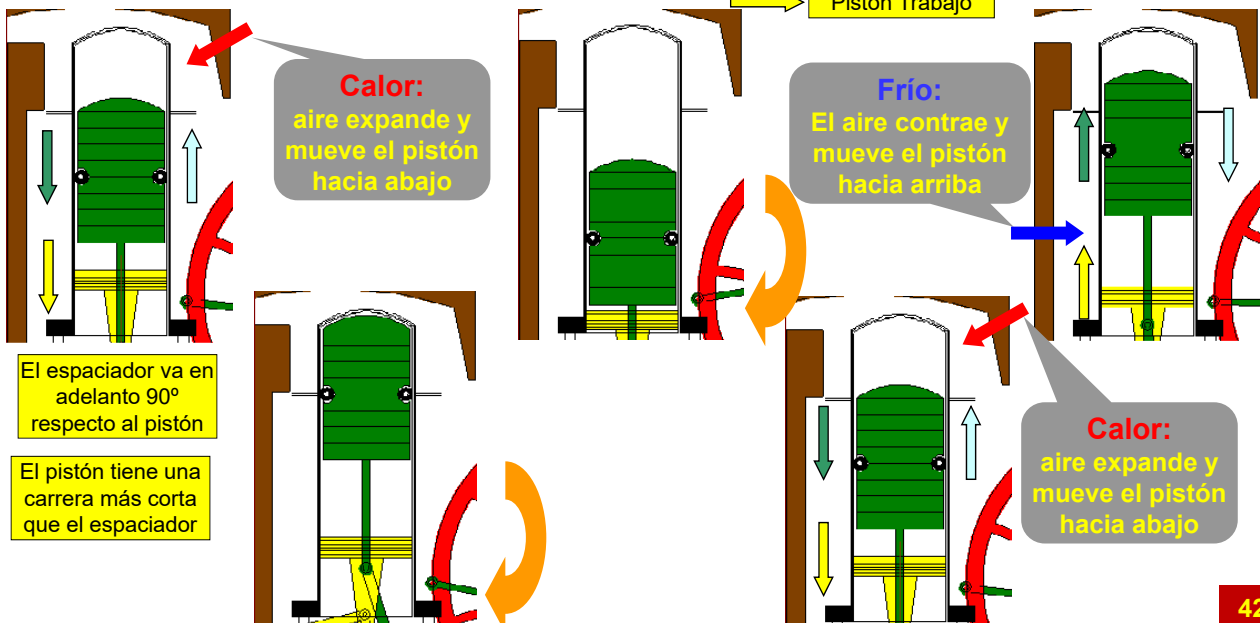


6.- Máquinas Térmicas (XII)

En movimiento en:

<http://www.moteur-stirling.com/Diapo8.gif>

6.4.- Motor Stirling (V)



Aire en el cilindro Inercia del volante mueve el desp.
Espaciador

Pistón Trabajo

Calor:
aire expande y mueve el pistón hacia abajo

Frío:
El aire contrae y mueve el pistón hacia arriba

Calor:
aire expande y mueve el pistón hacia abajo

El espaciador va en adelanto 90° respecto al pistón

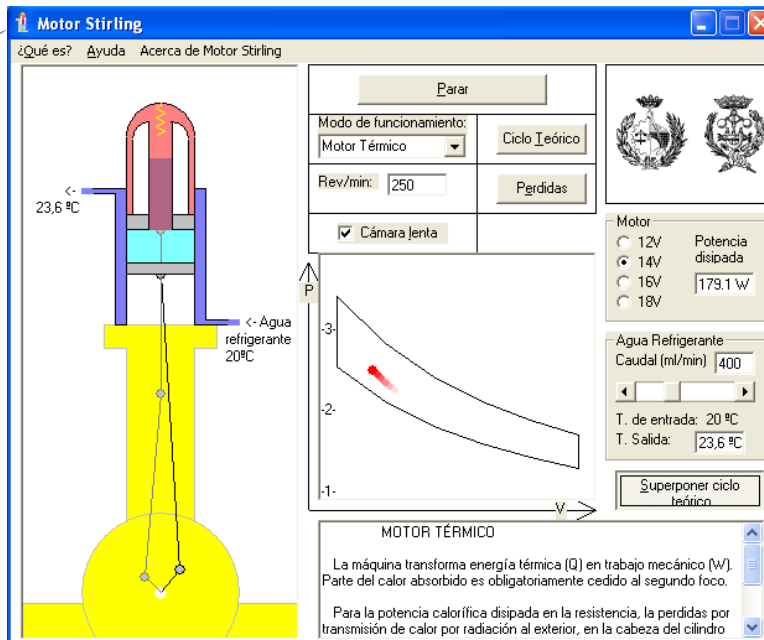
El pistón tiene una carrera más corta que el espaciador

6.- Máquinas Térmicas (XIII)

6.4.- Motor Stirling (VI)

<http://www2.ubu.es/ingelec/maqmot/>

Programa de simulación del funcionamiento de una Máquina Stirling



MOTOR TÉRMICO

La máquina transforma energía térmica (Q) en trabajo mecánico (W). Parte del calor absorbido es obligatoriamente cedido al segundo foco.

Para la potencia calorífica disipada en la resistencia, la pérdidas por transmisión de calor por radiación al exterior, en la cabeza del cilindro