



A Venissieux, donde estaba la fábrica de Renault Vehículos Industriales, viajé con cierta frecuencia. Me alojaba en un hotel de Lyon y, a mi regreso de fábrica, disfrutaba paseando por las orillas del Ródano y del Saona hasta la plaza peatonal de Carnot.

El Carnot de la plaza no es, ciertamente, éste de quien voy a hablar. La plaza lleva el nombre de su padre (nominado en el Arco de Triunfo de París) que también fue científico, matemático y general. Se le conoció como el Gran Carnot ... hasta que apareció su hijo, *el del ciclo*, que resultó más famoso que su padre en la comunidad científica, aunque no tanto en el callejero.

Carnot (1796-1832) diseñó su ciclo para las máquinas de vapor (que ya existían desde 1760 -Watt- y 1821- Stephenson-) aunque después se vio que era apto para cualquier máquina basada en principios termodinámicos. Por tanto, resulta ser el fundamento de los motores, tanto de gasolina (Ciclo Otto: Nicolaus Otto, 1876) como diésel (Rudolf Diesel, 1858-1913), con las debidas adaptaciones. Es decir, el ciclo de Carnot es válido tanto para las máquinas de combustión externa (vapor) como para los motores de combustión interna (gasolina, diésel).

Con las Figs. 1 y 2 he querido mostrar en correspondencia lo termodinámico (su diagrama en tres dimensiones P, V, T) con lo mecánico (el sistema biela-manivela: Cilindro / pistón con la biela propiamente dicha y la manivela materializada en la muñequilla del cigüeñal).

El ciclo está representado por un cuadrilátero espacial curvo cuya área evalúa el trabajo que puede extraerse de él. Sus lados opuestos son sendas hipérbolas equiláteras en el plano P, V (en rojo; presión \times volumen = constante del gas \times temperatura [que se mantiene constante]); la otra pareja de lados opuestos (en amarillo) está compuesta por sendas líneas adiabáticas: el gas está confinado, aislado del exterior (con sus válvulas cerradas).

El confinamiento, el aislamiento, la adiátesis viene determinada por el asentamiento positivo al cierre de las válvulas de admisión y escape, y por los segmentos elásticos alojados en el pistón para que rocen con el interior de la superficie cilíndrica (la camisa).

A la izquierda del cilindro están las dos fuentes de calor propias de una máquina de vapor: arriba la caliente F_1 correspondiente a la temperatura mayor T_1 y debajo la fría F_2 correspondiente a la temperatura menor T_2 .

Los motores de automóvil no necesitan fuentes externas. En vez de fuentes externas tienen manantiales internos de calor: el aire insuflado de gasolina que arde por efecto de una chispa eléctrica o el aire a muy alta presión al que se inyecta gasoil que explota espontáneamente en esas condiciones. En estos motores, la fuente fría es la atmósfera ambiente a la que se vierte el escape.

Etapa AB: En A se abre la válvula de admisión desde F_1 (roja). Expansión isoterma. Se produce en el plano $T = T_1$ (la temperatura de la fuente caliente $T_1 > T_2$). Hay expansión: el volumen V, que es mínimo en A va aumentando a medida que la presión P disminuye hasta la de B. Al expandirse el gas tiende a enfriarse pero absorbe calor de la fuente caliente y mantiene constante la temperatura T_1 gracias a que la válvula de admisión se mantiene abierta. La expansión es pues, isoterma. Siendo $P \times V = K T_1$ la etapa queda representada por una hipérbola equilátera. El calor absorbido se convierte íntegramente en trabajo externo al mantenerse constante la temperatura (se acepta que manejamos un gas ideal (o un vapor). Ese trabajo es positivo al ser positivo el incremento de volumen y

está representado en el plano $T = T_1$ por el área limitada por el tramo AB de la hipérbola y su proyección sobre el plano $P = 0$.

Etapa BC: En B se cierra la válvula de admisión (roja) y como la otra sigue cerrada, continúa la expansión que ahora será adiabática. Se produce desde la temperatura T_1 de la fuente caliente a la T_2 de la fuente fría como continuación de la expansión AB. Así se obtiene el volumen máximo en C. Como ahora no hay calor absorbido como antes, el gas seguirá expandiéndose a costa de su energía interna solamente; la entropía se mantiene constante. La etapa se puede llamar indistintamente adiabática o isoentrópica. Entropía $S = \text{Energía calorífica expresada en calorías, } Q / T$, temperatura absoluta. El trabajo del gas es positivo y viene representado por el área que determina el tramo de curva BC y su proyección sobre el plano $P = 0$.

Etapa CD: En C se abre la válvula (azul) que comunica el cilindro con F_2 para poner el gas a la temperatura fría $T = T_2$. A esa temperatura el gas se comprime isotérmicamente por la aplicación de un trabajo desde fuera sobre el pistón. Ello se produce en el plano $T = T_2$ (la temperatura de la fuente fría). La presión aumenta desde C hasta D, el gas se va comprimiendo pero no aumenta su temperatura porque va cediendo calor a la fuente fría. El trabajo del gas es negativo (el positivo es el que se ha hecho externamente). Ese trabajo negativo viene representado por el área del tramo hiperbólico de curva CD y su proyección sobre el plano $P = 0$.

Etapa DA: En D se cierra la válvula (azul). Hay compresión adiabática. Se produce desde la temperatura T_2 de la fuente fría, aumentando hasta la T_1 de la fuente caliente, como continuación de la compresión CD. Ha habido compresión porque la presión en A es mayor que en D. Como el sistema está aislado térmicamente, hay que comunicarle un trabajo desde fuera. Al no haber transferencia de calor, la entropía S no varía, resulta $= 0$. Cuando $S > 0$, la entropía aumenta; si $S < 0$, disminuye. El trabajo negativo está representado por el área de la curva DA y su proyección sobre el plano $P = 0$.

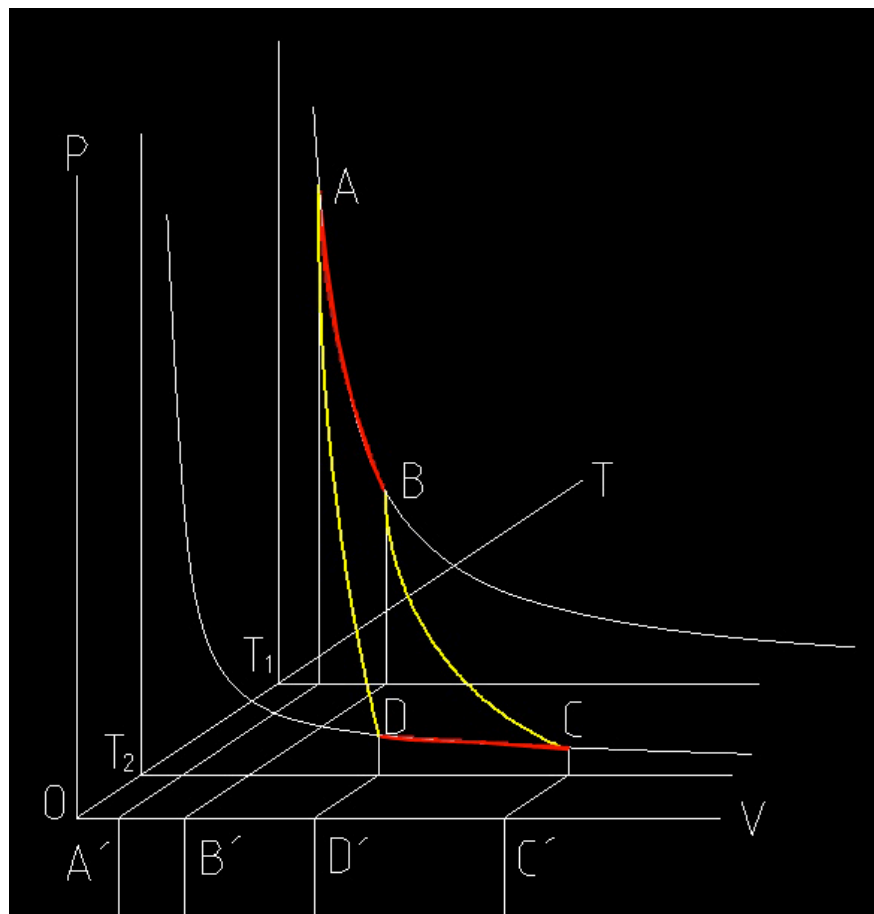


Fig. 1

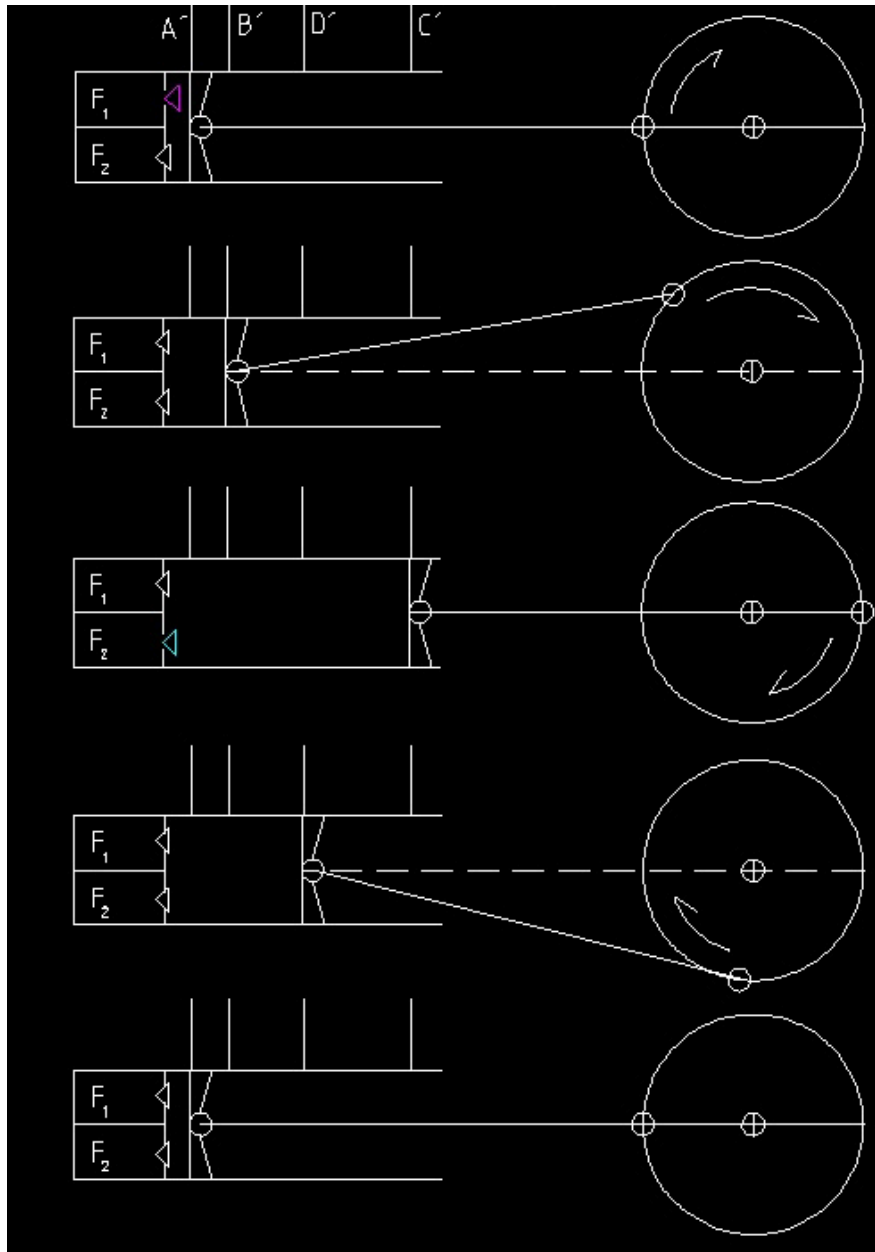


Fig. 2

Así se ha cerrado el ciclo que resulta ser reversible: de A a C y vuelta, de C a A, una rotación completa del cigüeñal.

Como se ha visto, en las etapas CD y DA se aplica a la máquina un trabajo de compresión desde fuera y cabe preguntarse, ¿Quién ha ejercido ese trabajo? La respuesta, para un motor de combustión interna, es: La inercia del sistema que se inicia con la actuación del motor de arranque eléctrico. En adelante, como ese trabajo externo es menor que el positivo que genera el gas, el funcionamiento resulta posible, si bien a costa del rendimiento total.

En las etapas BC y DA se habla de entropía y es conveniente hacer alguna reflexión sobre ello. Ma-

nejaré las ecuaciones de dimensiones según magnitudes del SIU (Sistema Internacional de Unidades).

TRABAJO = = ENERGÍA	$M L^2 T^{-2}$	Factor de INTENSIDAD	Factor de EXTENSIÓN (o de capacidad)
Mecánico	$F \times E$ $M L^2 T^{-2}$	Fuerza $M L T^{-2}$	Espacio L
<u>Hidráulico</u>	$D \times C$ $M L^2 T^{-2}$	Desnivel L	Caudal $M L T^{-2}$ (2)
Eléctrica	$P \times C$ V C (3)	Potencial eléctrico (diferencia de) V (Voltio)	Cantidad de electricidad C (Culombio)
Mecánica elástica (1)	$P \times V$ $M L^2 T^{-2}$	Presión $M L^{-1} T^{-2}$	Volumen L^3
Calorífica (4)	$K \times E$ $K \times S$	Temperatura (K) K	Entropía S

(1) (de gas o vapor)

(2) Cada litro del caudal caído equivale a un Kilo de fuerza energética, cosa a tener en cuenta en la ecuación de dimensiones.

(3) La potencia eléctrica W (en vatios) es igual a la tensión (o diferencia de potencial, o fuerza electromotriz) en voltios multiplicada por la intensidad en Amperios.

A su vez, la intensidad en Amperios es igual a la cantidad de electricidad o carga eléctrica C en Culombios dividida por el tiempo en segundos.

$$W = V \times I = V (C / T)$$

La energía eléctrica (en Kilovatios hora o vatios segundo) se representa como $W \times T = V \times C$

(4) En la energía Térmica (antes llamada Calorífica), se tiene para la constante de Boltzman este valor:

$$k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

Quiere ello decir que la relación entre la energía térmica expresada en julios y su temperatura asociada en grados kelvin es constante. Por consiguiente, será:

$$M L^2 T^{-2} = K \times S$$

Como

$$k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

También será constante $S = M L^2 T^{-2} K^{-1}$ (antes $S = Q / T$). Ello ya se vio en las etapas BC y DA.

Hay que añadir que, en cuestión de entropía, la diferencia de temperatura juega el mismo papel que la diferencia de potencial en la energía eléctrica: El calor se puede transmitir de un medio a otro cuando la temperatura del emisor es superior a la del receptor. En electricidad, la energía se transmite desde el potencial mayor al menor.