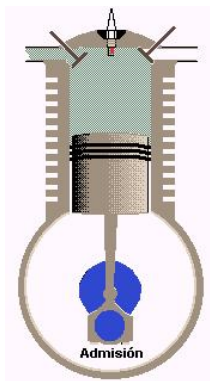


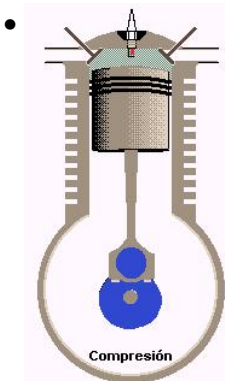
Actualmente, la construcción de motores de combustión para automóviles, lanchas, aeroplanos y trenes, lo mismo que para pequeñas plantas de energía, constituye una de las más grandes industrias en el mundo.

En un motor de combustión externa, los productos de la combustión del aire y el combustible, le transfieren calor a un segundo fluido, el cual se convierte en el fluido motriz o elemento productor del trabajo. En un motor de combustión interna, los productos de la combustión son, directamente, el fluido motriz. Debido a este rasgo simplificador y al alto rendimiento térmico resultante, el motor de combustión es una de las unidades generadores de trabajo más ligeras (en peso) que se conocen y, por lo mismo, su mayor campo de aplicación es, en la transportación.

El motor de cuatro carreras encendido por chispa(ECH).

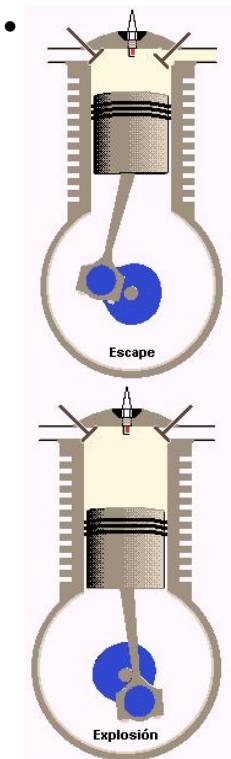


La mayoría de los motores de combustión interna, utilizan el principio del *émbolo reciprocante*, según el cual, un émbolo se desliza dentro de un cilindro hacia atrás y hacia delante y transmite fuerza a la flecha motriz, por lo general, mediante un simple mecanismo de *biela y manivela*. En 1862, Beau de Rochas propuso la secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo reciprocante, que aún hoy en día es típica de la generalidad de los motores encendidos por chispa (abreviados ECH) y que es:



Una *carrera de admisión* para inducir una mezcla combustible hacia el interior del cilindro del motor, Figura 1-1 (válvula de admisión abierta).

- Una *carrera de compresión*, para elevar la temperatura de la mezcla Figura 1-2 (ambas válvulas cerradas).



Al final de la carrera de compresión, ocurre la chispa y el incendio consecuente de la mezcla homogénea, liberando energía que aumenta la temperatura y la presión de los gases; enseguida desciende el émbolo en la carrera de expansión o de potencia, Figura 1-3 (ambas válvulas cerradas).

- Una carrera de escape, para barrer al

cilindro, dejándolo libre de los gases

quemados, Figura 1-4 (válvula de escape

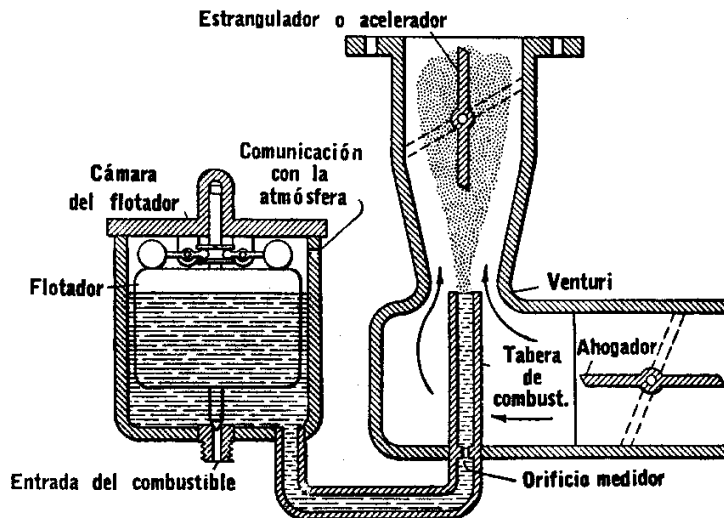
abierta).

En 1876, Otto, un ingeniero alemán, aprovechando el principio de Beau de Rochas, construyó un motor con ciclo de trabajo de cuatro carreras que resultó muy afortunado, habiéndose conocido el cielo de sucesos, como ciclo Otto.

Al tratar sobre el motor de émbolo reciprocante, se emplean frecuentemente los términos: *desplazamiento*, *volumen de compresión* y *relación de compresión o de expansión*, El desplazamiento (D), es el volumen (en cm³) (pig3) barrido por el émbolo en una carrera (*n* veces este valor para un motor con *n* cilindros); el volumen de compresión (*c*), es el volumen de los gases comprimidos y es también el volumen de la cámara de combustión; la relación de compresión o de expansión (*rv*) es igual a:

$$rv = c + D/c$$

En todos los motores de émbolo reciprocante, éste llega necesariamente a una completa inmovilidad, en dos posiciones particulares del cigüeñal antes de invertir la dirección de su movimiento. En la Figura 1-4, el émbolo ha pasado precisamente del límite inferior de su carrera; a esta posición se le llama punto muerto inferior (abreviado PMI). Existe una posición "muerta semejante, o etapa sin movimiento del émbolo, en el instante en que éste llega al punto muerto superior (abreviado PMS). Debido a esta posición "muerta", la combustión de la mezcla en el motor Otto ocurre prácticamente a volumen constante. En vista de que la carrera de potencia sólo existe en una parte del tiempo total del ciclo, se emplea un volante para hacer uniformes dichos impulsos, obteniendo así, esencialmente, una rotación uniforme del cigüeñal



Como una chispa puede encender solamente a una mezcla combustible, si se desea que la llama se propague a través de ella, deberán estar presentes en toda la cámara de combustión, las cantidades de aire y combustible en una proporción razonablemente definida (y homogénea) (aproximadamente ente 15 partes de aire por una de combustible, en peso). Un carburador, es el medio usual para obtener la relación *aire-combustible*. En la Figura 2 se ilustran las partes básicas de un carburador simple: un *venturi*, una tobera para combustible con orificio medidor, un recipiente para combustible en la cámara del flotador, un *acelerador* y un *ahogador*. Cuando el émbolo desciende en la carrera de admisión, aspira aire a través del venturi, aire que está a la presión atmosférica, aproximadamente. Debido al pequeño diámetro en la garganta del venturi, aumenta la velocidad del aire y por lo mismo disminuye su presión. Pero la presión en el extremo de la tobera, también es menor que la presión (atmosférica) dentro de la cámara del flotador. Por esta diferencia de presiones, el combustible es pulverizado dentro de la corriente de aire, en una cantidad tal, que es determinada por el tamaño del orificio medidor. Nótese que si aumenta la velocidad del motor, aumenta la cantidad de aire aspirado a través del venturi y, por lo mismo, se crea mayor caída de presión y proporcionalmente se pulveriza mayor cantidad de combustible, en el seno de la corriente de aire. En consecuencia, un carburador es hábil para mantener una relación aproximadamente constante, entre el aire y el combustible, en toda la amplitud de velocidades posibles del motor.

El esfuerzo de giro aplicado al cigüeñal, depende de la masa de la mezcla quemada en cada cilindro, por ciclo, y se controla, restringiendo la cantidad de mezcla (pero no necesariamente la relación *aire-combustible*), que entra al cilindro en la carrera de admisión. Esto se consigue mediante el empleo, en el carburador, de una válvula llamada *estrangulador* o *acelerador*, para obstruir el paso hacia el múltiple de admisión (Figura 2). En la carrera de admisión, si el acelerador está casi cerrado, entrará al cilindro solamente una pequeña cantidad de mezcla y la presión dentro de él estará muy por debajo de la atmosférica, con las correspondientes presiones de compresión y combustión, también bajas. La velocidad resultante del motor será lenta y si el cigüeñal no está acoplado a una carga externa, se dice que el motor está *en vacío*. Cuando el acelerador se abre gradualmente, la velocidad del motor irá aumentando, hasta un valor determinado por la carga externa acoplada a la flecha motriz. (La carga es un freno opuesto a la rotación de la flecha y puede ser suministrada. Por lo tanto la velocidad del motor se controla mediante las posiciones del estrangulado o acelerador, y también, por la magnitud de la carga. Puede mantenerse una velocidad definida, variando la posición del estrangulador con relación a la carga; o pueden obtenerse diferentes velocidades manteniendo constante la posición del estrangulador y haciendo variaciones en la carga.

El *ahogador* permite al motor recibir una cantidad adicional de combustible (mezcla "rica") para el arranque, cuando está frío. Nótese que al cerrar el ahogador, la succión del motor se ejerce directamente en la tobera del combustible, mientras que se restringe la entrada del aire.

El motor de cuatro carreras encendido por compresión (EC).

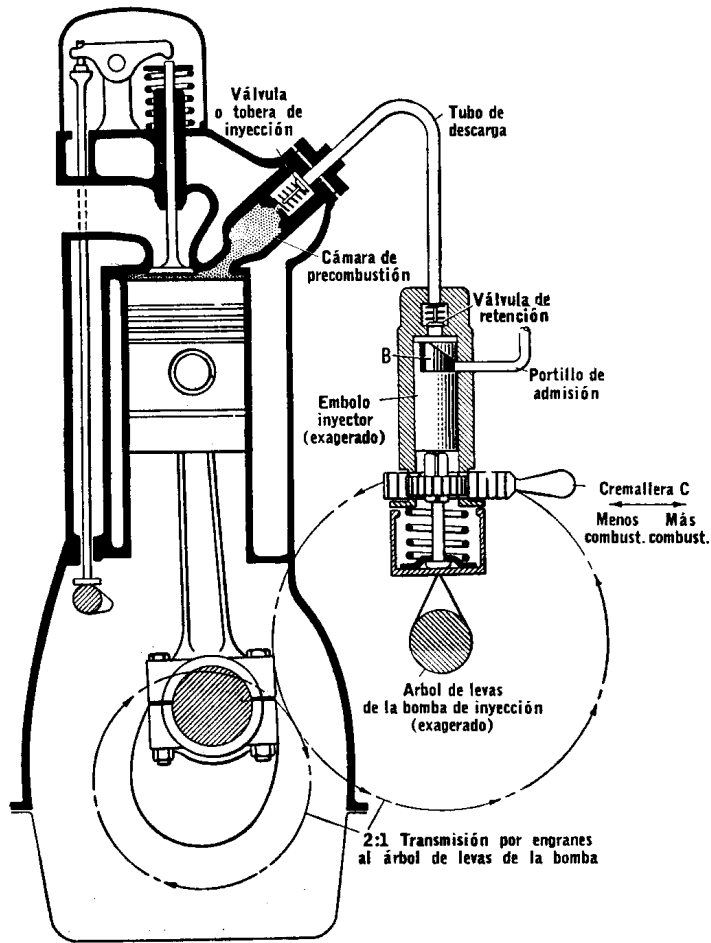
En 1892, Rudolph Diesel, diseñó un nuevo tipo de motor capaz de quemar polvo de carbón. El ciclo Diesel era similar al ciclo Otto, excepto que debía tenerse una alta relación de compresión, admitiendo solamente aire, en lugar de la mezcla combustible, en la carrera de admisión. Era bien sabido que la rápida compresión del aire hasta presiones elevadas, podía elevar su temperatura hasta un valor tal, que si se surtía dentro de la cámara de combustión un combustible, éste se incendiaba espontáneamente sin deponer de una chispa para iniciar la combustión o de una mezcla homogénea para propagar la llama. Diesel propuso al principio, regular la inyección del combustible para tener la combustión a temperatura constante, pero encontró que esto no era practico. Posteriormente, trato de regular la inyección del combustible para conseguir una combustión a presión constante, siendo mas afortunado este arreglo. Muy pronto encontró Diesel, que el polvo del carbón no era un combustible satisfactorio y que los combustibles líquidos darían un mejor resultado.

Se puede emplear las figuras 1 para visualizar el motor Diesel o de encendido por compresión (abreviado, EC), remplazando la bujía por una válvula inyectora de combustible y aumentando la relación de compresión hasta mas o menos 15 a 1. el afortunado motor Diesel incorpora los siguientes ciclos de sucesos:

- Una *carrera de admisión* para inducir dentro del cilindro, solamente aire Figura 1-1 (válvula de admisión, abierta).
- Una *carrera de compresión* para llevar al aire hasta una temperatura superior a la del punto de encendido del combustible (actualmente se tienen relaciones de compresión de 12-1 hasta 18-1), Figura 1-2 (ambas válvulas cerradas).
- Inyección del combustible durante la primera parte de la *carrera de expansión* con una rapidez tal, que la presión se mantenga en un valor constante, siguiendo la expansión, hasta el volumen inicial del cilindro Figura 1-3 (ambas válvulas cerradas).
- Una *carrera de escape* para purgar del cilindro los gases quemados Figura 1-4 (válvula de escape, abierta).

Uno de los primeros métodos empleados para inyectar combustible, fue el de valerse de una corriente de aire a presión, para arrastrarlo al interior de la cámara de combustión. Este método produjo buena atomización y buen control del proceso de combustión. No obstante, en la actualidad raramente se emplea la *inyección por aire*, porque es necesario disponer de un gran compresor que resulta un auxiliar costoso.

El método moderno de inyección es, el de comprimir y pulverizar solamente combustible dentro del cilindro; dependiendo de la alta presión de inyección [140.62-2109 kg/cm² (2000 a 30000 lb/plg²abs)] para la atomización del mismo. La Figura 3 es un dibujo esquemático de un sistema de inyección mecánico o solido. Cuando el émbolo inyector está en la parte más baja de su carrera (no mostrada), el combustible es forzado hacia el interior de la cámara del émbolo por el conducto de entrada A. En un instante conveniente del ciclo, se elevará el émbolo inyector, cerrando el conducto de entrada con la consecuente compresión del combustible. Este abrirá la válvula de retención, comunicando su presión al residuo de combustible detenido en la tubería de descarga. La misma acción se repite en la válvula de retención próxima a la salida de la *tobera*, siendo pulverizado el combustible desde el orificio de ella al interior de la cámara de combustión. El final del periodo de inyección, ocurrirá después que el conducto de entrada es descubierto por la ranura helicoidal del émbolo de la bomba, porque, la alta presión arriba del émbolo se comunicará con el conducto A.



La *duración* del periodo de inyección se determina mediante el diseño de la leva, del árbol de levas de la bomba de inyección; árbol que es movido por el motor mismo.

Si se presenta una carga menor, la cremallera C se mueve hacia la izquierda, haciendo girar al émbolo inyector con su ranura helicoidal. A continuación, al elevarse el émbolo, se inicia la inyección igual que antes, pero la descarga de presión se anticipa debido a que la ranura helicoidal coincide más pronto con el conducto A. Por lo tanto, la duración de la inyección se reduce para cargas parciales junto con la cantidad de combustible inyectado.

Cuando la cremallera C se mueve hasta su posición límite, la ranura B quedará alineada con el conducto A. En esta posición, que es la de parada, el combustible no será ni comprimido ni inyectado.

Debido a que la cremallera de control C gobierna la velocidad y la habilidad del motor para conducir cargas, se le llama el *estrangulador* o *acelerador*. Nótese que en el motor EC, no se estrangula el aire de entrada como un medio de control, a pesar del nombre del dispositivo. Con un motor multicilíndrico, cada cilindro tiene usualmente asociada una bomba de inyección, no obstante que se emplea una sola cremallera para todas las unidades.

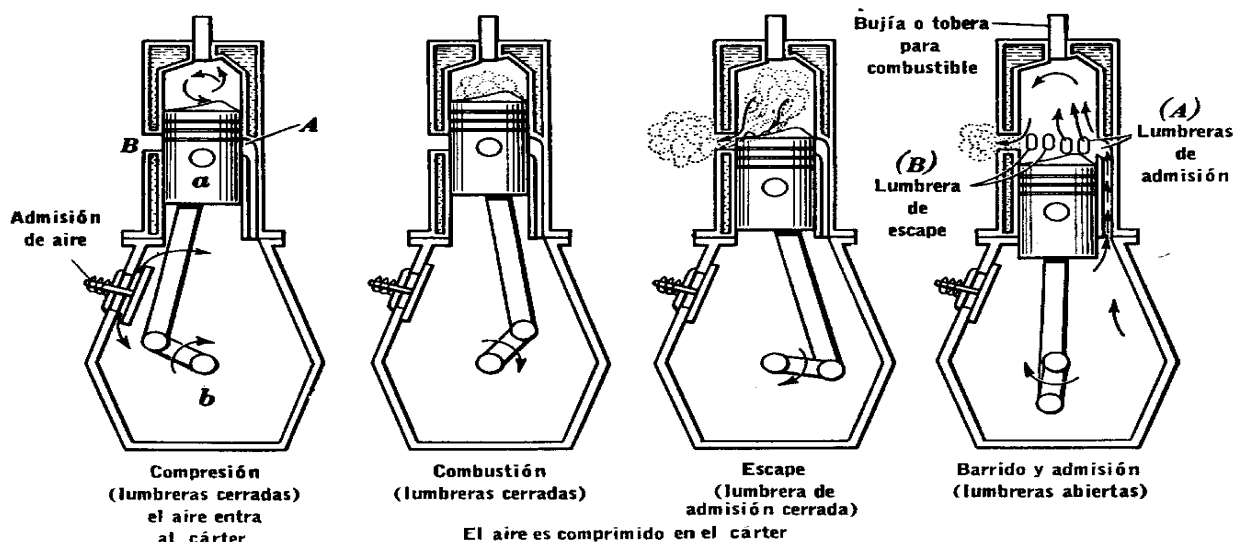
Se recordará que en el motor ECH, ha de mantenerse una relación definida entre las cantidades de aire y combustible para asegurar que la llama se propague a través de la mezcla. En el motor EC, no se requiere esa relación fija de aire-combustible, porque éste se inyecta en el seno de un aire extremadamente caliente, incendiándose en cualquier punto en el cual se forme la mezcla combustible. Con objeto de que se produzca la combustión, tampoco es necesaria la propagación de la flama. Por tal motivo, a plena carga, es deseable inyectar una cantidad de combustible tal como para que se queme todo el aire (oxígeno) que hay en el

cilindro. Prácticamente no se puede alcanzar este límite porque no es posible para el chorro localizado de combustible, encontrar a todo el aire, habiendo abundantes regiones ricas y pobres; razón por la cual, los gases de escape pueden tener coloración y ser de olor picante. En las cargas parciales, se inyectan solamente una fracción de la cantidad de combustible que es necesario a plena carga, en ciertas regiones de la cámara, la combustión se realiza con relaciones de aire a combustible entre 15 a 1, aun cuando la relación global sea mucho mayor (digamos 90 a 1). En la producción máxima del motor, la mayor parte del aire se emplea en la reacción química; en tanto que en las cargas parciales es necesario combinar tan sólo una fracción del aire con el combustible y por la combustión localizada, el proceso de admisión de aire no requiere estrangulamiento en ningún caso.

Un sistema de inyección como el descrito anteriormente, es costoso por las pequeñas tolerancias que deben mantenerse en la fabricación de las piezas y los altos costos de producción, inherentes a las partes de acero endurecido.

El cielo de dos carteras.

El cielo de cuatro carreras requiere dos revoluciones del cigüeñal por cada carrera de potencia. Con objeto de tener un mayor rendimiento con el mismo tamaño de motor y también una simplificación en las válvulas, fue diseñado por Dugald Clerk, en 1878, el cielo de dos carreras. Este cielo es aplicable tanto al motor encendido por compresión como al encendido por chispa, pero al principio, solamente tuvo éxito con el primero.



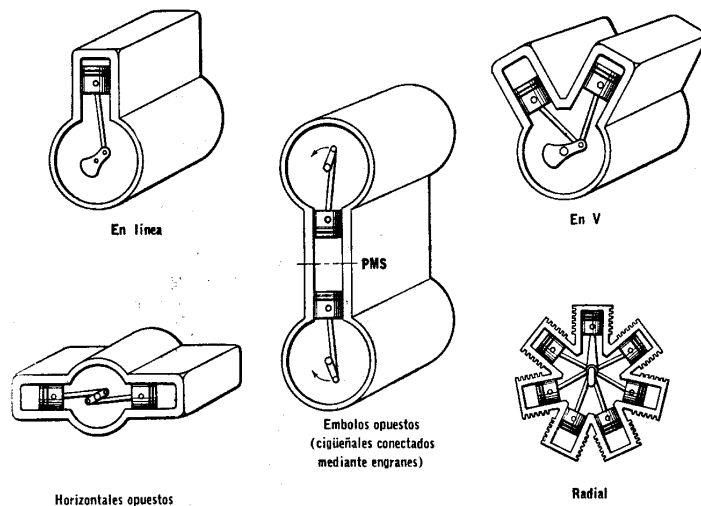
Refiriéndonos a la Figura 4, en el PMS se tiene el atomizado del combustible en el seno del aire caliente comprimido, o bien, el encendido por chispa de una mezcla de vapores que inician la combustión y liberan la energía para la carrera de potencia que es la siguiente. Próximo al final de esta carrera, el émbolo descubre una lumbrera o abertura en las paredes del cilindro en B, pasando la mayoría de los productos de la combustión al múltiple de escape. Inmediatamente después, en la carrera, es descubierta por el émbolo una segunda lumbrera en A siendo forzado hacia el interior del cilindro, ya sea aire o la mezcla gasolina-aire. Esto es un ejemplo del *barrido cruzado*. Se incorporan al émbolo unos deflectores para evitar que la carga admitida pase de largo a través del cilindro hasta el múltiple de escape a medida que el resto de los gases quemados están siendo barridos (extraídos) del cilindro. La carrera de regreso del émbolo es la carrera de compresión del ciclo. Debe notarse que todo el cielo se completa en una sola revolución del cigüeñal. Si las lumbreras de admisión se colocan próximas, en lugar de opuestas a las de escape, el aire admitido deberá describir un lazo completo, antes de llegar al conducto de escape; esto se llama *barrido de lazo*. La combinación de válvulas de escape en la cabeza y lumbreras de admisión en el cilindro, permite obtener el *barrido continuo* o de *flujo unidireccional*.

Si se emplea el ciclo de dos carreras para un motor carburado con gasolina, parte de la mezcla fresca será desalojada junto con los gases de escape. Es difícil conseguir una carga eficiente del cilindro sin grandes pérdidas de combustible. Por esta razón, los motores de dos carreras ECH son poco usados, excepto para motores pequeños de gasolina en los que la economía no es un factor vital; como en los motores fuera de borda para lanchas. En los motores EC o diesel, no existe la desventaja de la pérdida de combustible, porque se emplea solamente aire, y, por lo tanto, sólo se pierde aire en el barrido del cilindro.

Considérese que un motor, por razones de su gran tamaño, deba ser limitado a trabajar a velocidades bajas. En tales casos, puede usarse ventajosamente el ciclo de dos carreras para aumentar la producción de la potencia. Por otra parte, la tendencia de un motor para fallar por esfuerzos térmicos, está relacionada directamente con el número de carreras de potencia que se verifican en un intervalo de tiempo definido. Bajo este punto de vista, un motor con ciclo de cuatro carreras puede trabajarse a altas velocidades sin que experimente temperaturas excesivas, que ocasionen discontinuidad en la lubricación y rotura de las partes metálicas. Además, el motor con ciclo de dos carreras cuyo escape y proceso de barrido tienen rendimientos relativamente bajos, no puede normalmente inducir en la carrera de admisión tanto aire, como lo hace el motor con ciclo de cuatro carreras, a menos que se emplee una bomba suplementaria para el aire. Los más modernos diseños de motores EC, con ciclo de dos carreras, no emplean el método de comprimir la carga de aire en el cárter como se muestra en la Figura 4; en cambio, se emplean compresores movidos por la flecha principal del motor, para llevar el aire a una presión de 0.1406 a 0.3515 kg/cm² (2 a 5 lb/plg²) para el barrido y para surtir al cilindro del motor. Empero, la potencia para mover tales sopladores debe ser suministrada por el motor mismo.

Las denominaciones *motor diesel de dos carreras* y *motor EC de dos carreras* se emplean como sinónimos, igualmente el motor ECH de dos carreras se designa generalmente con el nombre de ciclo Otto de dos carreras.

Tipos de motores.



En vista de que la velocidad y consecuentemente la potencia de un motor son limitada por las fuerzas de inercia originadas al acelerar y desacelerar algunas de sus partes, es conveniente dividir el motor en un cierto número de cilindros individuales. Mediante este recurso, se reducen las fuerzas de inercia por cilindro; incluso, las fuerzas en uno de ellos pueden contrarrestarse o "balancearse, con un acomodo conveniente de los otros. En la Figura 5 se muestran diferentes arreglos. El motor en línea es el diseño usual para aplicaciones tanto estacionarias como de transportación, porque ofrece la solución más simple de construcción y mantenimiento. Un motor con menor longitud que el del tipo en línea y de la misma potencia, es el motor en V, que consiste en dos bancadas de cilindros en línea, colocadas una con respecto a la otra un cierto ángulo (generalmente 90°) para formar la letra V. En este caso se sujetan dos bielas a un muñón del cigüeñal. Cuando se presenta el problema de falta de espacio, como es el caso de los motores colocados en la parte posterior

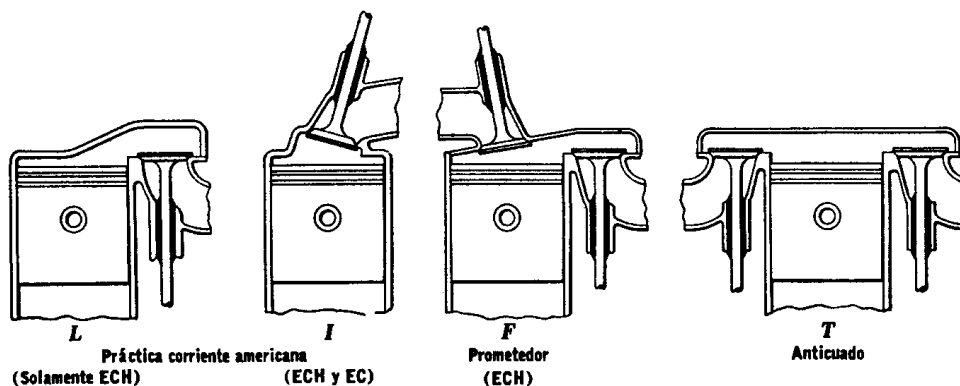
para accionar vehículos, puede ser preferible un motor plano con cilindros horizontales. En el motor *horizontal opuesto* de la Figura 5, los émbolos están desalineados y se requiere un muñón por separado para cada cilindro.

También se muestra un motor de émbolos opuestos y que consiste en un cilindro conteniendo dos émbolos. El émbolo superior, controla la lumbrera de admisión en tanto que el émbolo inferior, controla la lumbrera de escape. En esta forma se obtiene el barrido de flujo unidireccional o lineal. La disposición de cilindros radiales, con todos los cilindros en un plano y con igual separación angular entre sus ejes, es muy común para motores de aviación enfriados por aire.

El motor radial presenta el problema de sujetar 3, 5, 7 o 9 bielas a un solo muñón. Se emplea una *biela principal* para un cilindro, siendo acopladas a ella, otras bielas *articuladas*. Debe notarse que la biela principal ejecuta el mismo movimiento que el que ejecuta la biela de la mayoría de los motores, en tanto que una biela articulada sigue una trayectoria ligeramente diferente debido a que el punto de fijación no queda en el centro del muñón del cigüeñal. Cuando el cigüeñal gira 40 grados desde el PMS del cilindro principal, el émbolo número 2 no estará en el PMS, pero estará aproximadamente a 3 grados de él. Esta diferencia se ha de tomar en cuenta para el tiempo de encendido. Los motores en línea y en V pueden diseñarse para trabajar con el cigüeñal arriba de los cilindros, en cuyo caso se dice que el motor es *invertido*.

Todos los diseños anteriores pueden ser igualmente enfriados por aire o por agua. El enfriamiento por agua es el método más común, pero cuando se desea simplicidad (motores de motocicleta) o se requiere poco peso (motores de aviación), lo usual es el enfriamiento por aire. Todos los motores de transporte de carga y de pasajeros hoy en día en este país, son enfriados con agua.

Clasificación por la posición de las válvulas.



Se hace otra clasificación de los motores de combustión considerando la posición de las válvulas, Figura 6. El diseño más común es el del motor con válvulas en la parte superior y que se llama *motor de cabeza en I* o *de válvulas en la cabeza*; en las Figuras 7 y 8 se muestran algunos ejemplos. Las válvulas debajo de la cabeza o cabeza en L se ilustra en la Figura 8. Ocasionalmente se hace una combinación de estas dos posiciones para obtener una *cabeza en F*. En este caso, la válvula de admisión se coloca en la cabeza (arriba) en tanto que la válvula de escape se coloca en el bloque (abajo).

Sobrealimentación.

En el motor ECH, se puede mover la carga máxima cuando se quita del conducto de admisión la restricción impuesta por el estrangulador o acelerador. Teniendo el acelerador completamente abierto, se llena el cilindro con una mezcla que estará aproximadamente a la presión atmosférica y el rendimiento del motor será proporcional a la energía liberada al quemarse ese peso particular de combustible y aire. Para aumentar la producción de energía deberá forzarse al cilindro un peso mayor de mezcla. Cuando esto se realiza mediante

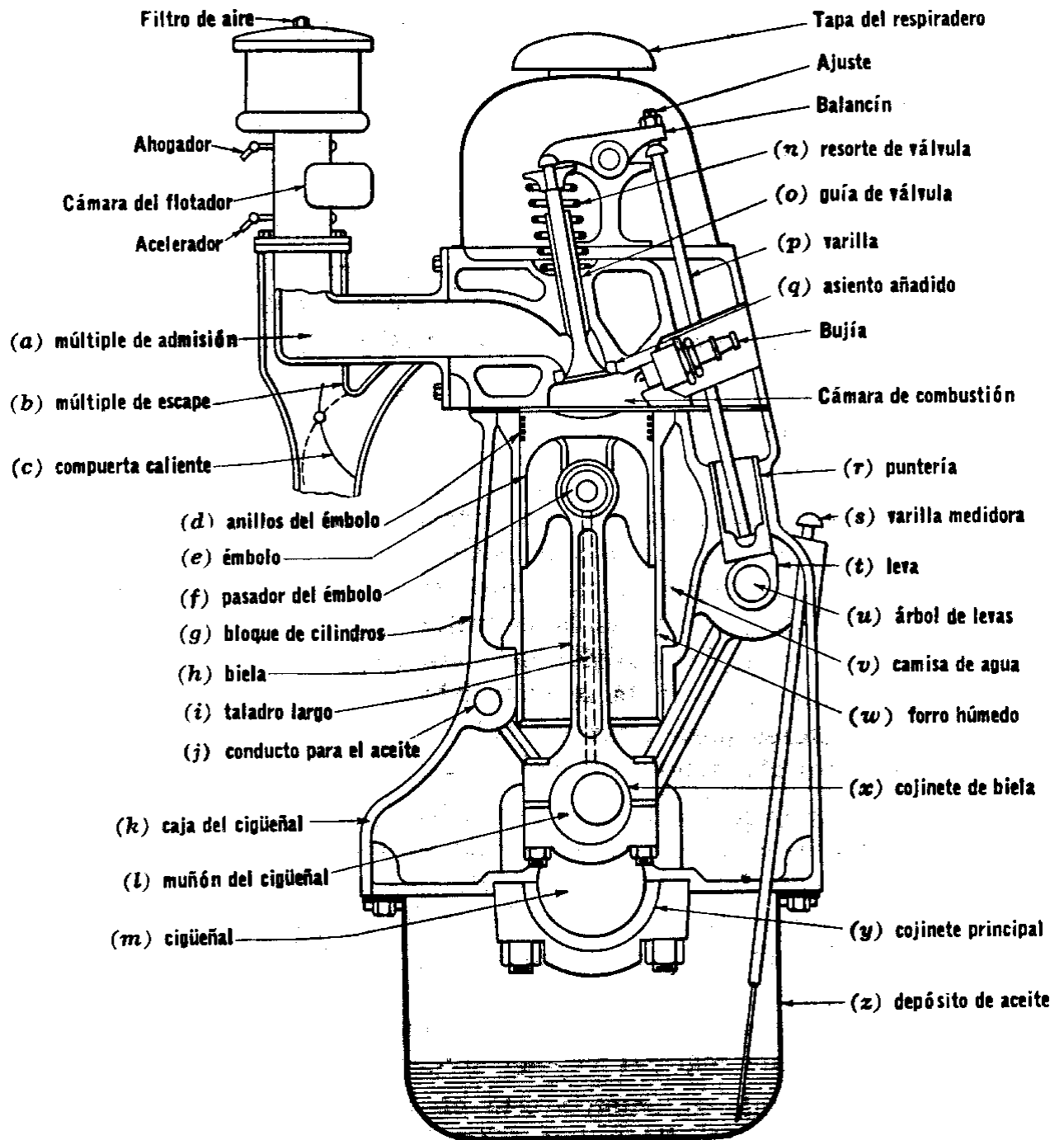
el empleo de un soplador o de cualquier otra forma de compresor, el proceso se llama *sobrealimentación*. Teóricamente, la potencia podrá aumentarse indefinidamente forzando más y más mezcla dentro del motor con una bomba auxiliar para aire (mezcla), pero el recalentamiento del motor limita la cantidad de sobrealimentación que realmente se puede intentar. Deberá notarse que un motor no sobrealimentado, teniendo el acelerador parcialmente abierto, tendrá en el múltiple una presión inferior a la atmosférica. En cambio, el motor sobrealimentado tendrá en el múltiple una presión ya sea positiva o negativa dependiendo de la posición del acelerador y de la capacidad de la bomba de aire.

El motor EC induce una cantidad constante de aire y se alcanza la carga máxima cuando la cantidad de combustible inyectado es demasiada para que sea quemada efectivamente por la cantidad de oxígeno en la cámara. Esto se evidencia por el humo (combustible no quemado) que aparece en los gases de escape. Un motor sobrecargado muestra humo negro desvaneciéndose el color hacia el gris a medida que disminuye la carga. Para sobrealimentar un motor EC debe forzarse dentro del cilindro una mayor cantidad de aire y, en correspondencia, una mayor cantidad de combustible en el seno del aire. El motor no sobrealimentado tiene, aproximadamente, la misma presión (atmosférica) en el múltiple en tanto que un motor sobrealimentado tendrá una presión positiva mayor, creciente a medida que aumente la proporción de sobrealimentación.

Partes y detalles del motor.

Las partes componentes del motor de combustión se construyen de diferentes materiales, en esta sección serán analizadas brevemente las funciones que realizan (las letras de identificación se muestran en las Figuras. 7 y 8).

CONJUNTO DE LOS CILINDROS. Los cilindros se mantienen en posición fija mediante el *bloque de cilindros g* el cual, en los motores pequeños, forma una sola pieza con el *cárter k* para obtener mayor rigidez. Esta estructura se hace generalmente de hierro fundido aun cuando en algunos casos se forma mediante placas de acero soldadas. Los *ductos j* (Figura 7) pueden ser hechos mediante corazones en el bloque al fundirlo y sirven para distribuir la lubricación a presión hasta los *cojinetes principales y*. Para vehículos de placer, o de bajo costo, los cilindros se taladran y asientan (rectifican) directamente en el bloque (Figura 8), siendo seguido este método en los motores de aviación (Figura 9) con objeto de reducir peso (y también se reduce peso en este caso, empleando cilindros delgados de acero endurecido o nitrurado, un procedimiento muy costoso para otros motores). Para motores de trabajo pesado se instalan forros que pueden reemplazarse cuando se desgastan. Dichos forros pueden ser *húmedos w* (Figura 7) o secos. Los forros secos son menos susceptibles a las fallas que los forros húmedos, los cuales deben independizar las *camisas de agua de enfriamiento v* (Figura 7) del *depósito de aceite z*. Por otra parte, el pequeñísimo espacio entre el forro seco



y las paredes del bloque obliga a tener una alta resistencia a la transmisión del calor, lo cual puede reducirse un tanto, cobrizando la parte exterior del forro.

Tanto para los forros, como para los cilindros, el material usual es la fundición gris por su buena resistencia al desgaste (que puede mejorarse mediante la adición de pequeñas cantidades de níquel, cromo y molibdeno). Aparentemente, esta resistencia al desgaste se alcanza por la habilidad del hierro fundido para formar una superficie tersa, durísima, cuando es sometido a fricción por deslizamiento. Así, cuando el motor es armado por primera vez, se sugiere correrlo a bajas velocidades y con cargas ligeras, para facilitar la formación de esa capa protectora. La duración de este periodo de "asentamiento" aumenta cuando las superficies en contacto son ásperas, pues con superficies ásperas sobreviene la soldadura superficial del metal (rayaduras). Para evitar las rayaduras y facilitar el periodo de asentamiento, se les da a los cilindros, levanta válvulas, émbolos y

anillos para émbolo, un tratamiento químico y se recubren superficialmente con estaño, cadmio o cromo.

El *cigüeñal m* es, generalmente, una pieza de acero forjado, sin embargo, el advenimiento de cigüeñales largos y rígidos en motores multicilíndricos con esfuerzos relativamente bajos, permiten emplear el hierro fundido como sustituto, con objeto de reducir costos. El cigüeñal se apoya en los *cojinetes principales y*; en los motores de servicio pesado, el número de cojinetes principales es igual al número de cilindros más uno. Después de la parte *concéntrica del cigüeñal* sigue el *muñón l* que conecta al *cojinete x de la biela*. Los cojinetes de las bielas y los principales son suplementos reemplazables con la parte posterior de acero o de bronce y con babbitt, cobre-plomo o aleaciones de cadmio usadas frecuentemente como materiales antifricción.

Un *depósito para aceite z* de acero estampado sella el conjunto del bloque y sirve como *colector de aceite* o recipiente para el aceite lubricante. Una *varilla medidora s* resulta un buen recurso para comprobar el nivel del aceite.

CONJUNTO DE LOS ÉMBOLOS Y LAS BIELAS. El *émbolo e* se construye de aluminio, acero fundido o hierro siendo su función principal la de transmitir a la *biela h* la fuerza originada en el proceso de combustión. Al realizar esto, las posiciones angulares de la biela permiten que se ejerza un esfuerzo considerable en un lado de las paredes del cilindro y este empuje es creado por el *faldón* del émbolo, esto es, la sección debajo de los anillos. No deja de ser común en los motores para altas velocidades cortar el faldón por debajo del pasador del émbolo obteniendo un émbolo de *patín*. (Figura 7).

El émbolo se provee de cuando menos tres *anillos*. Los anillos superiores se llaman anillos de *compresión* porque su función es la de detener los gases a alta presión dentro del cilindro y evitar en esa forma el *escape* de ellos hacia el interior del cárter en las carreras de compresión y de potencia. El anillo inferior generalmente es el *controlador del aceite*. El objeto de este anillo es el de quitar el aceite sobrante de la pared del cilindro y transferirlo a través de ranuras en el anillo hasta los agujeros de drenaje en el émbolo que permitan al aceite regresar al depósito.

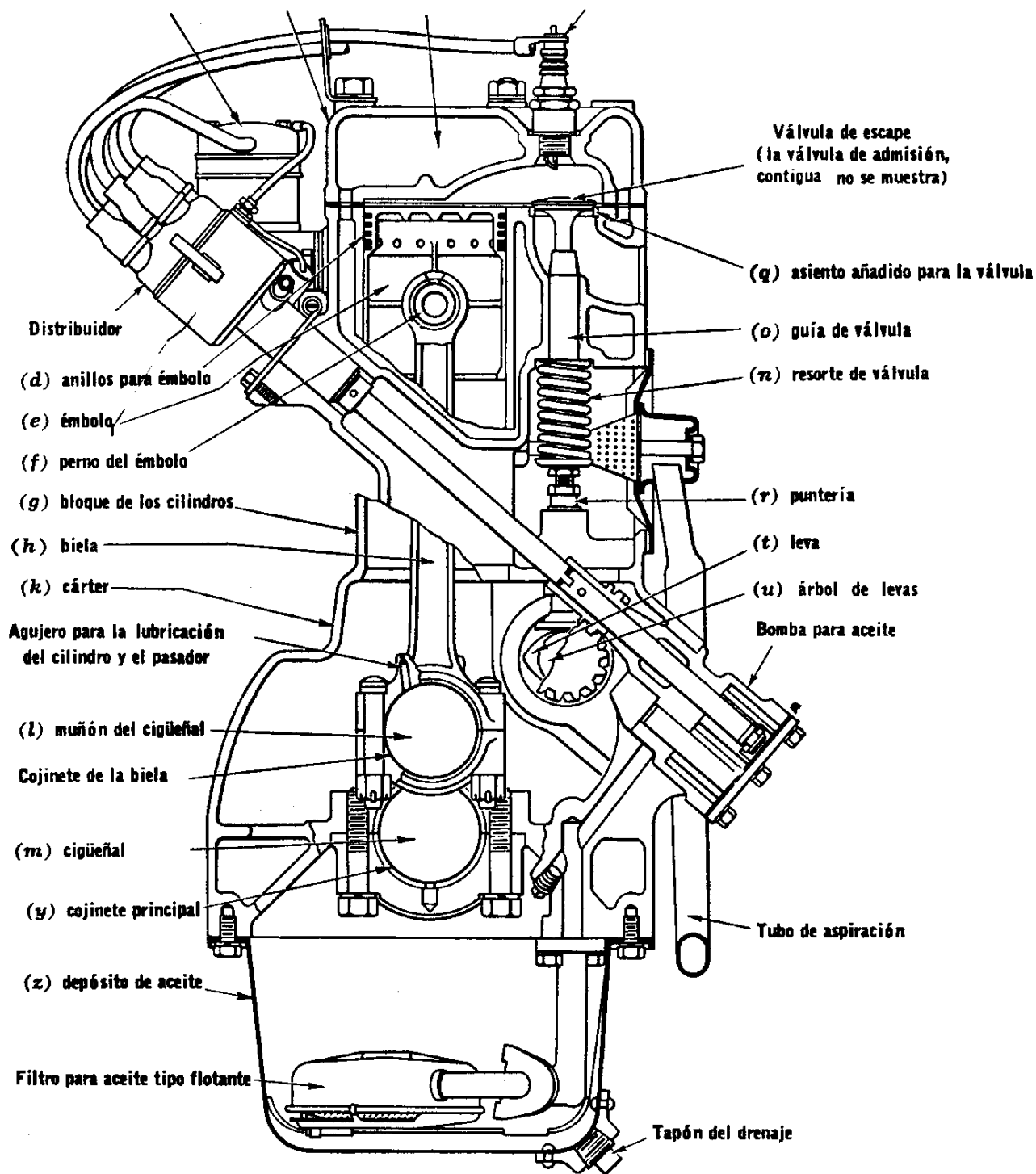
Cuando un vehículo automotriz está en movimiento, la corriente de aire que se desliza por el *tubo aspirante* (Figura 8) induce un vacío y así crea un flujo de aire desde la cámara de las válvulas y el cárter. El aire fresco es admitido al motor por el *respiradero* o tubo para surtir aceite (Figura 7). En esta forma se ventila el cárter eliminando los gases y el vapor de agua que invariablemente se colectan en esta región. La *biela h* de acero forjado, con sección de viga en I, une al émbolo y al cigüeñal. Puede tener un taladro a todo lo largo (Figura 7) para conducir el aceite lubricante desde el *cojinete x de la biela hasta el perno f del émbolo* o puede tener un pequeño agujero colocado como lo muestra la Figura 8 para atomizar aceite en el pasador del émbolo igualmente que el *árbol de levas u* y a las paredes del cilindro. En los motores de servicio pesado, la práctica común es conducir el aceite a través del taladro de la biela y luego atomizarlo contra el lado interior de la cabeza del émbolo. En esta forma se reduce grandemente la temperatura de los anillos y se obtiene una lubricación mejor.

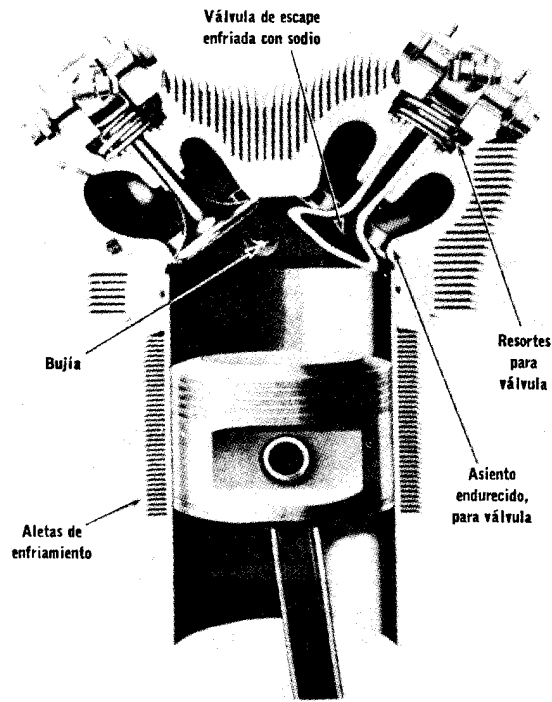
MECANISMO DE LAS VÁLVULAS. Las válvulas ilustradas en las Figuras 7 y 8 son *válvulas de vástago*, pero algunos motores se construyen con *válvulas deslizantes* o *válvulas rotatorias*. El mecanismo completo consta de un árbol de *levas u* que es movido por el cigüeñal mediante engranes o con una cadena de tiempo. Cada válvula en el motor es accionada mediante una *leva t* por separado. La leva levanta a la *puntería r* (que es un miembro importante introducido para absorber el empuje impuesto por la leva) y en los motores con cabeza en L (Figura 8) la puntería queda en contacto directamente con la válvula. La válvula es obligada a seguir el movimiento de la leva mediante el *resorte de válvulas n* (siendo común emplear dos resortes). En los motores de cabeza en I se requieren otros eslabones adicionales (Figura 7), como son: un *levanta válvulas* tubular p y un balancín. Se mantiene un pequeño juego en el conjunto de la válvula mediante un ajuste en la puntería (Figura 8) o en el balancín (Figura 7).

La *válvula de admisión* se hace de una aleación de acero al cromo-níquel, en tanto que la *válvula de escape* que es menor y que trabaja a temperaturas más elevadas (aproximadamente 660°C) (1 200°F) se hace de una aleación de cromosilicio. La *válvula de escape* realiza un trabajo particularmente severo porque se abre cuando los gases de la combustión están arriba de 1 650°C (3 000°F) y esta corriente de gases calientes pasa por su *cara*. Una *válvula de escape* de motor de aviación, debe tener un recubrimiento especial de cromoníquel en la cabeza y en las caras, para obtener resistencia a la corrosión y a la oxidación; el *vástago* nitrurado, para resistir la fricción contra la *guía de válvulas* o, que es de hierro fundido; el *puntero*, de acero para herramientas para acoplar el *balancín* y una cabeza hueca enfriada con sodio junto con un *inserto q para válvula*, que sirve de asiento, hecho de Stellite. En la Figura 9 la *válvula hueca* está parcialmente llena con sodio que se licua a la temperatura de trabajo de la *válvula*. El rápido movimiento de ésta al abrir y cerrar lanza al sodio metálico hacia el *vástago* transfiriendo en esa forma calor de la cabeza caliente al *vástago* frío. El *rotador*, es una innovación para evitar se quemen y atasquen las *válvulas*. Es un dispositivo que reemplaza al *resorte sujetador*. Cada vez que es elevada la *válvula* se le comunica una ligera rotación, frotando en esa forma al asiento evitándose también los depósitos en las *guías*,

LubRicación. Los motores modernos son lubricados ya sea mediante un sistema de circulación *alimentado a presión* o mediante una combinación de alimentación a presión y *salpicadura*. En un sistema completamente a presión, el aceite se pasa por un filtro (la Figura 8 muestra un tipo flotante) antes de pasar a la bomba del aceite que es movida por el *árbol de levas*. El aceite proveniente de la bomba se divide en dos o más flujos; uno de ellos entra al filtro y regresa al depósito de aceite, un segundo flujo va hasta los *cojinetes* principales y mediante conductos taladrados a través de los brazos del *cigüeñal* hacia los *cojinetes* de las *balas*, un tercer flujo continúa hasta los *cojinetes* del *cigüeñal*; puede llegar un cuarto flujo a una *flecha hueca* que soporta a los *balancines*, de ahí a los *cojinetes* de ellos y a la *junta* de los *balancines* y el *levanta válvulas*. El aceite que escurre por el *levanta válvulas* lubrica las *punterías* y las *levas*. Las paredes del cilindro reciben suficiente aceite de los sobrantes por exceso provenientes de los *cojinetes* de las *bielas*. Por esto, un *cojinete* de *biela* flojo puede sobrecargar a los *anillos* que controlan el aceite, como para que surja una falla de la *bujía*.

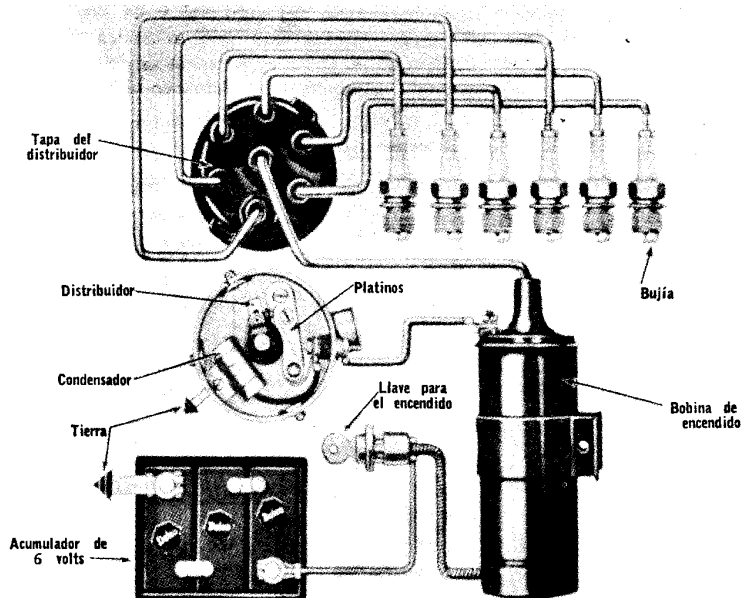
En vista de que es costoso el barrenado del *cigüeñal* y de las *bielas*, se pueden colocar debajo de cada *biela*, *artesas* que se mantendrán llenas de aceite proveniente de la bomba. Una saliente en el extremo de la *biela*, se sumerge en la *artesa* y forma un rocío de aceite para lubricar el *cojinete* de la *biela*, las paredes del cilindro y el *pasador del émbolo*.





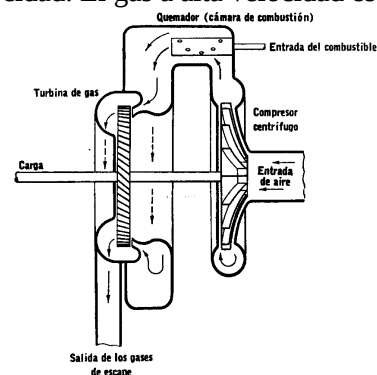
ENCENDIDO. El sistema de encendido consta de un acumulador, una bobina de encendido un distribuidor con levas y platinos y una bujía para cada cilindro (Figura 9). En el motor de cuatro carreras se requiere una revolución completa del cigüeñal por cada ciclo. Por esta razón deberá haber un chispazo en cada cilindro a intervalos de 720 grados de giro del cigüeñal

Para garantizar esta secuencia, el distribuidor se mueve mediante el árbol de levas a la misma velocidad obteniéndose una revolución del distribuidor por cada dos revoluciones del cigüeñal (para un ciclo de dos carreras el distribuidor deberá moverse a la velocidad del motor). En la flecha del distribuidor, debajo de éste se encuentra una leva con un lóbulo por separado para cada bujía. A medida que gira la flecha del distribuidor, los *platinos* (Figura 9) son separados por uno de los lóbulos de la leva siendo interrumpida la corriente que proviene del acumulador y pasa por la bobina. Debido a esta interrupción se induce un alto voltaje en la bobina. Este potencial es enviado al contacto central de la tapa del distribuidor y de ahí a la bujía conveniente. Debido a los muchos lóbulos de la leva pueden inducirse una serie de impulsos eléctricos correctamente sincronizados, que son luego dirigidos por el distribuidor hacia los diferentes cilindros.



La turbina de gas de combustión continua.

Una de las formas más antiguas de los motores de combustión, es la *turbina de gas*. Antecede con mucho, al motor de émbolos reciprocantes. Los componentes principales de la turbina de gas que se ilustran en la Figura 10 son: *un compresor, una turbina y una cámara de combustión*. Al funcionar el aire es inducido al compresor, allí es comprimido y pasado en parte a la cámara de combustión. Los gases a alta temperatura que deja la cámara de combustión se mezclan con el volumen principal de aire que fluye alrededor de ella. Estos gases calientes con su volumen aumentado considerablemente son dirigidos a la tobera en forma de anillo donde disminuye la presión y consecuentemente aumenta la velocidad. El gas a alta velocidad es dirigido contra la rueda de la turbina siendo utilizada la energía cinética



del gas en hacer girar la flecha motriz que a su vez mueve al compresor de aire. Es aparente una ventaja de este conjunto al ser eliminadas las partes reciprocantes del motor de émbolo. Por esta razón, no se usa el compresor de émbolo siendo preferible el de flujo continuo. Porque al ser la acción continua y girar el motor a altas velocidades, se puede inducir una gran cantidad de aire. Hay varios tipos de compresores en uso, la Figura 11 ilustra un compresor *centrífugo* simple.

Es importante notar que la potencia del motor de combustión está relacionada directamente con la cantidad de mezcla quemada en un periodo de tiempo y, por lo mismo, referida directamente a la cantidad de aire (y combustible) inducido en el sistema. La turbina de gas puede trabajar a mayores velocidades que otros motores por la ausencia de partes reciprocantes, y con flujo continuo en vez del flujo intermitente del motor de émbolo, se puede asegurar la obtención de mayor potencia de una máquina pequeña.

Pero el motor de émbolo reciprocante tiene una ventaja que no ha sido superado durante muchos años: la temperatura (y, por lo tanto, la presión) de la combustión pueden ser extremadamente elevadas porque se experimenta sólo durante un pequeño intervalo de tiempo. De aquí que, las temperaturas máximas de las

partes del motor son muy bajas, solamente unos cuantos cientos de grados (con algunas excepciones, como es el caso de la válvula de escape). En la turbina de gas la temperatura de combustión es igualmente una temperatura *continua* y por eso los conductos, toberas y aspas están expuestos continuamente a ella. Por esta razón la temperatura máxima en el sistema de la turbina de gas queda limitada a valores entre 540 a 815°C (1000 a 1500°F); compárense estos valores con los 2760°C (5000°F) que existen momentáneamente en el motor ECH.

El funcionamiento de la turbina de gas bajo cargas parciales puede visualizarse en la forma siguiente: Si se reduce la cantidad de combustible, disminuirá la temperatura de combustión y el gas que fluye a través de las toberas de área fija de la turbina, tendrá un volumen menor y una densidad mayor. Este efecto podrá aumentar momentáneamente la cantidad de gas que abandona al sistema disminuyendo así la presión que existe antes de las toberas. Pero este cambio en la presión *aumenta el volumen* y así contrarresta parcialmente el cambio en temperatura que *disminuye* al volumen. Por esta razón, la turbina de gas trabaja con cargas parciales mediante el *control de temperatura* experimentando también una reducción en las relaciones de compresión y expansión.

Para el completo entendimiento del motor de combustión, es un requisito necesario el conocimiento de la ciencia de la termodinámica. En este capítulo que ha sido tomado parcialmente de la Ref. 1, se hace una exposición de ciertos aspectos termodinámicos que serán de gran importancia en capítulos posteriores del texto.

Energía. El término *energía* implica que está presente una capacidad para la acción. Se define la Energía, como la habilidad latente o aparente para producir un cambio en las condiciones existentes.

Se hace evidente la existencia de otra forma de energía por los cambios en las características o en la composición de la masa bajo observación, por cuya razón a esta forma de energía se le llama *energía interna*. Toda la materia contiene energía interna en las formas química y molecular. Considérese una mezcla de aire y vapores de gasolina, mantenida bajo presión y confinada por un émbolo en un cilindro horizontal. En este caso, el émbolo está conectado mediante algún dispositivo, a una carga exterior que será elevada cuando se permita a la mezcla dilatarse. Examinando la mezcla antes y después de la expansión, no mostrará cambios en su composición pero sí un cambio definido en características tales como la presión y la temperatura. La energía interna ha sido liberada en una cantidad tal que puede ser medida por el cambio en energía potencial experimentado por la carga externa. Podrá moverse una carga mayor si en el mecanismo exterior se emplea una chispa para encender la mezcla gas-aire. En este caso, se desprende una mayor cantidad de energía interna debido a la reacción entre el aire y los vapores de gasolina teniendo lugar ahora un cambio en la composición de la mezcla. El término *energía interna*, se emplea para incluir todas las formas de energía contenidas dentro de la masa, bien sea que ocurran o no cambios químicos para liberarla.

El sistema.

Toda vez que un cambio puede ser analizado, es esencial que los concurrentes, la masa y la energía, sean conocidos e incluidos en el análisis. Para asegurar que se cumpla este requisito.

Se define el sistema como la región en la cual deben ser estudiadas las transferencias de la masa y la energía.

Tomando en consideración que tanto la masa como la energía pueden ser añadidas al sistema, un concepto especialmente importante viene a ser la superficie imaginaria que lo circunda y que se llama el límite. Todas las transferencias de masa y energía son valorizadas en el límite. La región exterior al sistema se llama los alrededores.

Se encuentran dos tipos de sistemas, los cerrados y los abiertos. Un sistema cerrado contiene una masa constante y solo se le permite a la energía cruzar el límite. Un sistema abierto tiene un flujo de masa, ya sea

hacia el interior o hacia el exterior o bien ambos flujos.

Propiedad, estado y proceso. Después que ha sido establecido el sistema, deberán reconocerse diferentes condiciones. Un sistema cerrado de gas tendrá una presión, temperatura y volumen definidos, pudiendo exhibir otras características en cualquier etapa de un experimento. Todas estas características, si son reproducibles, se les llama *propiedades* del sistema. Esto es, si sucede una serie de cambios hasta que finalmente se restablecen las condiciones originales, una de las propiedades volverá a ganar su valor primitivo de presión, temperatura, volumen, etc.. La condición o *estado* del sistema se identifica por las propiedades.

Una propiedad es una función del estado (función punto) y depende solamente de él y no del método de cambio entre dos estados.

Como una propiedad ayuda a identificar un estado particular, el cambio en valor de una propiedad entre dos estados cualesquiera, no dependerá del *proceso*.

Ocurre un proceso siempre que cambia el sistema de uno a otro estado.

Los procesos se denominan para mostrar la constancia de una propiedad: *volumen constante, presión constante, etc.*

Las *propiedades intensivas o potenciales* son independientes de la magnitud del sistema. Estos potenciales son los factores directivos que pueden ocasionar un cambio de estado. Las *propiedades extensivas*, tales como la energía, el volumen y el área, dependen de la magnitud del sistema. Los valores específicos de las propiedades extensivas (son los valores por unidad de masa) son mencionados más frecuentemente aun cuando la palabra específico no siempre se use.

Un sistema está en *equilibrio* cuando es incapaz de un cambio espontáneo, esto es, un cambio sin la ayuda de alguna influencia externa. Como un proceso pasa a través de una serie infinita de estados, cada uno de los cuales se identifica por sus propiedades, se desprende que un proceso debe efectuarse a una velocidad infinitamente pequeña, si cada estado esperado debe ser uno de equilibrio, que es un estado de constancia.

Calor y trabajo.

Si se colocan juntos dos prismas y uno de ellos está más caliente que el otro, cambiará la temperatura de ambos. Si se define que uno de los prismas sea el sistema bajo escrutinio (y el otro prisma, los alrededores) es evidente que la energía interna será transferida a través de los límites del sistema. La condición necesaria para esta transferencia de energías es la diferencia de temperatura entre el sistema (un prisma) y sus alrededores (el segundo prisma).

El calor es energía transferida a través de los límites de un sistema debido a la diferencia de temperaturas entre él y los alrededores.

Considérese el sistema perfectamente aislado de los alrededores formado por dos prismas, uno caliente y el otro frío. El término calor no puede aplicarse a esta situación, porque la energía dentro de este sistema es constante; sin embargo, la energía pasa del prisma caliente al frío consecuente con la diferencia de temperaturas, pero la energía no atraviesa los límites.

Por lo tanto, el calor es un término reservado para la transferencia de energía entre sistemas y alrededores en donde el factor director es una diferencia de temperatura. Nótese, sin embargo, que el calor puede identificarse sólo referido al límite del sistema y que un cambio de temperatura en él no necesariamente está referido al calor.

Con frecuencia se encuentran procesos que no involucran una transferencia de calor:

Un proceso sin transferencia de calor se llama un *proceso adiabático*.

El trabajo, como el calor, es de naturaleza transitoria y no se le puede almacenar en la materia o en un sistema. El trabajo existe o acontece sólo durante una transferencia de energía, entrando o saliendo del sistema y como el calor, se evidencia por un cambio en los alrededores. Después que el trabajo es cedido, no estará más presente, pero sí sus consecuencias: la energía. Puede hacerse una definición del trabajo parafraseando la definición del calor:

El trabajo es la energía transferida a través de los límites del sistema, debido a una considerable diferencia de una propiedad distinta de la temperatura, que existe entre el sistema y los alrededores

Unidades y medición del trabajo y el calor. En ingeniería mecánica el factor usualmente intensivo que ocasiona la transferencia de energía en forma de trabajo es la presión; la presión multiplicada por el área expuesta a ella, da una fuerza y el producto de la fuerza y la distancia de aplicación es energía.

Los históricos experimentos en 1840, de J. P. Joule, un físico inglés, mostraron que agitando agua mediante unas paletas y, por lo tanto, disipando trabajo mecánico, se podía calentar el agua y obtener el mismo resultado que se obtendría mediante la transferencia de calor. La relación entre las unidades térmicas y las mecánicas se llama el *equivalente mecánico J* o *equivalente de Joule*:

$$J = 778.2 \text{ pies-lb} / \text{Btu} \quad 1 \text{ Btu} = 778.2 \text{ pies lb} / \text{Btu}$$

La ecuación general de la energía.

Los trabajos de joule y otros investigadores condujeron a la gradual aceptación de la premisa llamada la Primera Ley de la Termodinámica:

La energía no puede ser creada ni destruida sólo puede convertirse de una forma en otra.

La primera ley establece que el resultado neto del calor o del trabajo será un cambio en la energía del sistema. La ecuación general de la energía es una expresión algebraica de la Primera Ley:

$$Q - W = \Delta E$$

En donde:

Q = calor transferido

+ para calor añadido al sistema

– para calor sustraído del sistema

W = trabajo cedido

+ para trabajo cedido por el sistema

– para trabajo cedido al sistema

E = símbolo general para denotar que la energía puede estar en diferentes formas

"Ealmacenada = $E_2 - E_1$ = diferencia entre las cantidades final e inicial de la energía almacenada dentro del sistema.

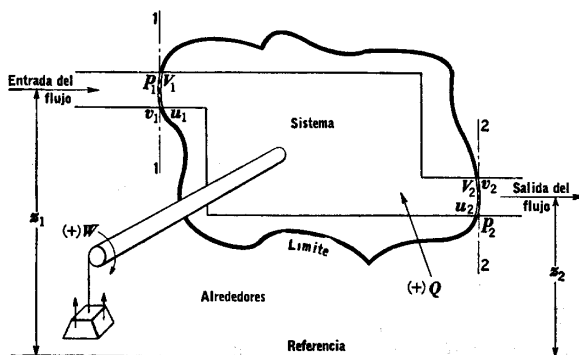
"Efluyendo = $E_{saliendo} - E_{entrando}$ = diferencia entre la energía que abandona al sistema y la que entra al mismo debido al flujo de masa.

Notaran que el cambio en la energía de todos los tipos es completamente un término del sistema y se mide por los cambios en las propiedades del mismo. El calor y el trabajo son efectos de la energía, exteriores al sistema y se mide mejor por la observación de los cambios en los alrededores. Por lo tanto, el símbolo para la energía de cualquier clase se puede reemplazar por el símbolo U de la energía interna:

$$E_{almacenada} = U_2 - U_1 = m_2 u_2 - m_1 u_1 \text{ (kcal)}$$

Pero en un caudal fluyendo, la energía puede existir en muchas formas:

1. *Energía interna u* o energía que reside en cada elemento fluido y de valor u .
2. *Energía cinética* o energía poseída por cada elemento del fluido debido a su velocidad y de valor V^2 kcal por Kg
3. *Energía potencias* o energía asociada con la altura z (m) (pies) del fluido y de valor zg/Jgc kcal/kg (Btu/lb).



4. La *energía del flujo*, ahora mencionada, es una forma que solamente se identifica cuando pasa un fluido por un sistema ya sea entrando o saliendo y de valor p/J kcal/kg (Btu/lb) (p kg/m²) y v (m³/kg) (p lb/pies²). Considérese un elemento del fluido que entra al sistema de la Figura 12. Para empujarlo al interior el fluido contiguo deberá ejercer una fuerza igual a pA a lo largo de una distancia dL , realizando así un trabajo:

$$W = pv/J \text{ kcal/kg (Btu/lb).}$$

También es conveniente introducir una nueva propiedad llamada la *entalpía* y definida como:

$$h = u + pv/J \text{ (kcal/kg), (Btu/lb)}$$

porque siempre que se tiene el flujo de un fluido, invariablemente ocurre la combinación de los términos u y pv .

Ecuaciones simplificadas de la energía. En algunos casos se encuentran procesos sin flujo. Para tales procesos las Ecuaciones se reducen directamente a:

$$Q - W = U = m(u_2 - u_1)$$

porque Efluyendo es cero. Para el proceso adiabático la transferencia de trabajo es igual al cambio en energía interna; si no hay transferencia de trabajo, el calor transferido es igual al cambio de energía interna.

En algunos casos, para sistemas abiertos ni la masa ni la energía almacenada cambian, obteniéndose las condiciones de flujo *estables*.

La ecuación de continuidad. Como al sistema abierto entra una cantidad unitaria de fluido, la condición para flujo continuo exige que en el mismo periodo de tiempo abandone al sistema una cantidad unitaria de fluido se le llama la *ecuación de continuidad* del flujo estable.

$$m_1 = A_1 V_1 / v_1 = m_2 = A_2 V_2 / v_2$$

El ciclo de potencia y el rendimiento térmico.

En algunas aplicaciones, principalmente en las instalaciones de vapor y en refrigeración, se puede identificar un *cielo termodinámico*:

Se dice que ocurre un cielo termodinámico cuando el fluido actuante de un sistema experimenta cierto número de procesos que eventualmente regresan al fluido a su estado inicial.

En las plantas de vapor se bombea el agua al interior de una caldera evaporándola mientras se suministra calor a alta temperatura. El vapor fluye hacia la turbina realizando un trabajo, siguiendo a un condensados donde vuelve al estado líquido con la consiguiente exclusión de calor Q hacia la atmósfera. Como el agua es regresado a su estado inicial, el cambio en energía es cero

Todos los cielos de potencia tienen un proceso de exclusión de calor como característica invariable, siendo el trabajo realizado, siempre menor que el calor suministrado.

El rendimiento térmico se define como la fracción de calor que suministrada a un ciclo termodinámico es convertida en trabajo.

El "rendimiento térmico de un proceso" tiene poco interés porque su valor puede ser menor o mayor que la unidad. Así, para el sistema émbolo-cilindro se realiza trabajo aun cuando

no se suministra calor, por lo cual el "rendimiento térmico será de valor infinito. Sin embargo, los motores de combustión tienen como

fuelle de energía, la energía química existente en el combustible.

La energía disponible y el proceso reversible.

No toda la energía contenida o asociada con la materia se puede convertir en trabajo aun bajo condiciones ideales; sólo una fracción de la cantidad absoluta queda disponible para ese objeto. La fracción que ha de convertirse en trabajo se llama la *energía disponible* y el resto la *energía no disponible*.

Evidentemente la guía para la perfección de un proceso, es asegurarse que ni el trabajo ni la energía disponibles sean empleados para efectuar un cambio que también pueda efectuarse mediante la transferencia de un interés más barato, el calor. De aquí que los procesos que involucran a la fricción mecánica o la turbulencia de un fluido no sean deseables, porque el trabajo o la energía disponible se disipa en producir un cambio que bien pudiera realizarse mediante la transferencia de calor. Adviértase también que la temperatura es el potencial impulsor que permite al calor ser transferido y utilizado, a mayor temperatura mayor capacidad para realizar trabajo. Siendo indeseable una reducción de la temperatura porque disminuye la capacidad para

producir trabajo. Si un proceso no implica ninguna de las pérdidas anteriores, será posible invertirlo y proceder en el orden inverso de los sucesos hasta alcanzar las condiciones originales mediante el retorno de la misma cantidad de calor o trabajo recibidos originalmente por los alrededores. Un proceso perfecto es un proceso reversible. Si el proceso es irreversible será necesaria una mayor cantidad de trabajo o de energía disponible que la que originalmente se suministró a los alrededores para conseguir restablecer las condiciones iniciales. La palabra reversible sirve como una expresión conveniente y concisa para negar la presencia ya sea de la fricción mecánica, de la fricción fluida o de una disminución de temperaturas o de cualquier diferencia de potencial que pueda ocasionar una pérdida de la energía disponible. Reversible y perfecto, como aquí se usan son términos sinónimos.

El trabajo y el sistema cerrado.

El trabajo de expansión para un sistema cerrado, se obtiene de; potencial de presión que mueve al límite contra una resistencia proporcionada por los alrededores. La fuerza proviene de la presión del sistema actuando sobre una área móvil del límite. la fuerza es igual a la presión multiplicada por el área. Esta será reforzada a través de una distancia L contra la resistencia de los alrededores y el trabajo máximo, que es el trabajo reversible, será

$$W = p \Delta L$$

Es necesario integrar porque la presión no es precisamente constante durante el proceso.

El trabajo y el sistema abierto.

En un sistema abierto el fluido circulante realiza trabajo no sólo por la expansión sino también por la conversión de las energías cinética y de flujo.

La Segunda Ley.

La Segunda Ley niega la posibilidad de

convertir alguna vez completamente todo el calor suministrado a un ciclo termodinámico en trabajo, no importa qué tan perfectamente sea diseñada o qué tan diestramente sea hecha una máquina. El enunciado de Plank de la Segunda ley es que en cualquier sistema operando en u. cielo y recibiendo calor mientras realiza trabajo deberá tener un proceso de rechazo de calor como parte del cielo.

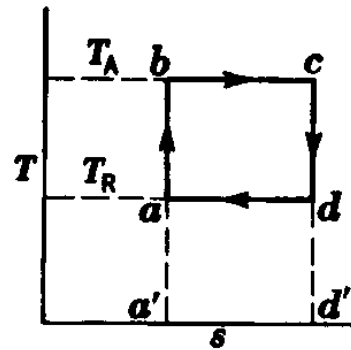
Entropía.

Desafortunadamente la transferencia de calor sólo se evidencia por una característica física, la temperatura. Concedamos que se propone arbitrariamente, medir la transferencia de calor como una función de dos propiedades del *sistema* la que es una nueva propiedad, llamada: *entropía*.

La propiedad de la entropía se define como el factor extensivo de la energía térmica.

Considerando el cielo reversible más simple, que pueda inventarse para trabajar entre dos temperaturas

definidas, se tendrá el Cielo de Carnot, de la Figura 13. En este



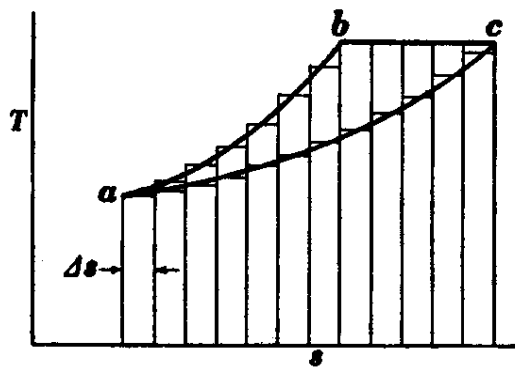
cielo, el medio ambiente es comprimido en forma adiabática y reversible hasta la temperatura T_A , correspondiente al calor añadido. Este proceso ha sido a entropía constante. En seguida se añade calor reversiblemente a temperatura constante (bc), con el consiguiente aumento de entropía. Luego se expansiona (cd) el fluido en forma adiabática y reversible hasta la temperatura declinada T_R otra vez, sin cambio en la entropía. Finalmente, el medio ambiente es enfriado reversiblemente a temperatura constante decreciendo la entropía (da) hasta el estado inicial.

Y una vez sustituidos valores en algunas ecuaciones se encuentra que para el cielo de Carnot,

$$t = \frac{Q_A + Q_R}{Q_A} = \frac{(T_A - T_R) \Delta s_{bc}}{T_A \Delta s_{bc}} = \frac{T_A - T_R}{T_A}$$

La escala (t) de temperaturas Fahrenheit es la de uso común. En esta escala la marca 32 grados corresponde a la temperatura de una mezcla de hielo y agua expuesta al aire a la presión atmosférica normal (14.696 lb/plg² abs) y la marca 212 grados corresponde a la temperatura de la condensación del vapor bajo una presión de

14.696 lb/plg² abs. Estas dos marcas arbitrarias determinan la magnitud del grado Fahrenheit.



Considérese que el cielo de Carnot puede experimentar aportaciones y rechazos infinitesimales de calor. Así, cualquier ciclo podrá trazarse en un diagrama de temperatura y entropía y considerarlo formado por un número infinito de cielos de

Carnot (Figura 14). De aquí que la importancia del ciclo de Carnot radica en el hecho de que puede ser considerado equivalente al elemento infinitesimal del cálculo integral.

El diagrama Ts y el proceso irreversible.

La entropía de un fluido en cualquier estado puede ser calculada basándose en las mediciones de calor y temperatura tomadas durante un proceso que

es realizado tan perfectamente como sea posible. Pero antes de que tales mediciones se hallan determinado, es posible asignar el estado identificando el valor de la propiedad de la entropía.

Se puede construir un diagrama Ts como el de la Figura 15 para mostrar las relaciones entre todas estas propiedades (y siempre para la cantidad unitaria de fluido). En un diagrama Ts se verá rápidamente la trayectoria de los procesos irreversibles si se conocen las propiedades de presión, temperatura o volumen en cada estado del proceso. Cuando no son conocidas, se muestra la trayectoria mediante una línea punteada para indicar lo incierto de los estados.

La variación en la entropía para el proceso irreversible se encuentra localizando los estados finales en el diagrama de propiedades; sin embargo, la variación de la entropía no podrá calcularse a partir de la transferencia de calor durante el proceso irreversible.

El trabajo y la energía disponible pueden ser disipados como fricción y turbulencia para producir el mismo efecto térmico que si se añadiera calor.

Un mol. Una unidad muy conveniente en diversos cálculos es la mol. Se define *la mol* como la cantidad de materia igual en valor numérico al peso molecular M de la sustancia. Cualquier unidad de masa puede incluirse en esta definición: una mol libra es M libras; una *mol gramo* es M gramos.

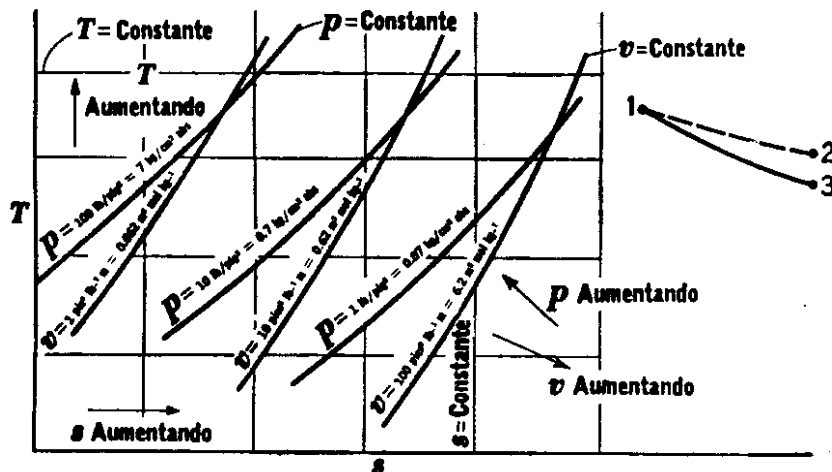
Capacidades de calor.

Los calores específicos a presión constante C_p , y a volumen constante C_v son de gran importancia. Las variaciones de los calores específicos para el aire con respecto a la presión y temperatura junto con la relación k definida como:

$$k = C_p / C_v$$

Por el hecho de no ser constante el calor específico, es conveniente emplear en algunos cálculos un valor *medio*. El *calor específico medio* se define como:

$$C_{mx} = 1/(T_2 - T_1) \int_{T_1}^{T_2} C_x dT$$



Para límites dados de temperatura, el calor suministrado a presión constante, es mayor que el calor suministrado a volumen constante debido al trabajo realizado por la expansión del fluido. Luego C_p , siempre es mayor que C_v ; incluso, para cualquier estado particular en el diagrama Ts (Figura 15) las líneas de volumen constante son más empinadas que las líneas de presión constante.

El gas ideal: ecuación del estado.

Un gas ideal queda definido por la siguiente ecuación del estado:

$$pv=RT$$

$$pV=mRT$$

R es la *constante específica del gas* y tiene valor diferente para cada *gas*. De la hipótesis de Avogadro: Iguales volúmenes de gases bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, contienen igual número de moléculas; es posible proponer una constante universal de los gases. Los pesos de dos volúmenes iguales de gases podrán referirse directamente a sus pesos moleculares

Los valores de la constante universal de los gases son:

$$R_o = 845.8 \text{ kg-m / mol kg}^{-\circ}\text{k} = 1.986 \text{ kcal / mol}^{-\circ}\text{k}$$

$$R_o = 1545 \text{ pie-lb / mol }^{\circ}\text{R} = 1.986 \text{ Btu / mol}^{\circ}\text{R}$$

La tobera y el Venturi.

Siempre en un fluido en flujo estable experimenta un cambio en la presión, también experimentará un cambio en la presión, también experimentará un cambio correspondiente en la velocidad. Será de interés deducir una ecuación de las relaciones entre la velocidad y otras propiedades del fluido. Considérese el paso de un fluido por una tobera desde un depósito de gran tamaño hasta una región de baja presión. Puede aplicarse a este proceso la ecuación de la energía para flujo estable:

$$Q - W = h_2 - h_1 + V_2^2 - V_1^2$$

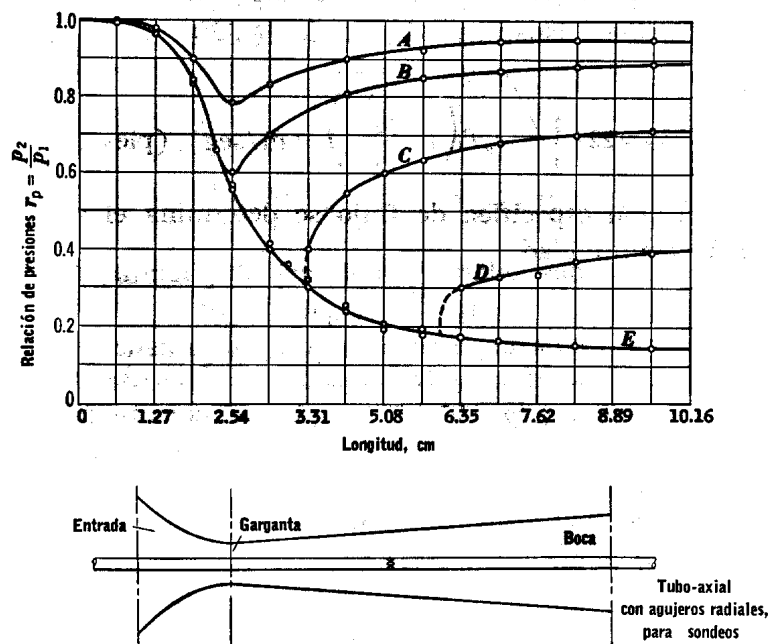
Cuando Q, W y V_1 son iguales a cero, se tiene que:

$$V_2^2 = 2g_c J(h_1 - h_2)$$

Para una relación específica de flujo se determina el área por la ecuación de continuidad en la que v_2 se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$A_2 = mv_2/V_2$$

Sin embargo, se encontrará que a pesar de que aumenta V_2 continuamente A_2 disminuirá, primero hasta un valor mínimo para aumentar después progresivamente a medida que la presión del escape es cada vez menor. La razón de este comportamiento está dada en la ecuación anterior; un aumento de V tiende a disminuir el área, un aumento en v tiende a aumentarla. Por lo tanto, disminuyendo primero la presión del escape, disminuye el área porque V aumenta en mayor proporción que v; pero, por debajo de cierta presión crítica se invierte este hecho, porque ahora v aumenta más rápidamente que V.



Sin embargo, una tobera convergente-divergente muestra algunas características distintas cuando es sometida a diferentes presiones de escape. Considérese la Figura 15, que muestra la relación de presiones que aparece en una tobera convergente-divergente. Cuando el área de escape está a la presión correcta y se ha diseñado la línea de expansión es la curva continua E (Figura 15) determinada con una prueba axial. Si la presión en el escape se eleva gradualmente, el fluido persistirá en expansionarse casi hasta la presión de escape anterior. Sin embargo, en cierta etapa D (o C) ocurrirá un impacto de *compresión* cuando la velocidad supersónica del fluido golpee al fluido más denso a la salida, o muy cerca de ella. En este caso, decrece abruptamente la velocidad hasta un valor subsónico en tanto que el fluido es comprimido irreversiblemente hasta una presión mayor. Después del impacto, la sección divergente actúa como *difusor*. Un difusor tiene características opuestas a las de una tobera; disminuye la velocidad del fluido con el correspondiente aumento de la presión. Si la presión se eleva hasta un valor próximo a la presión inicial, como en A (y probablemente en B) Figura 15, la tobera es llamada más propiamente un *venturi*. En el venturi la presión disminuye mientras que aumenta la velocidad en la sección convergente hasta que se alcanza un valor mínimo en la garganta; después de ella, las velocidades disminuyen en tanto que las presiones aumentan en la sección divergente.

Es oportuno notar con ayuda de la Figura 15 que. (1) las secciones convergentes reducen la presión y aumentan las velocidades subsónicas, o aumentan la presión y disminuyen las velocidades supersónicas; (2) las secciones divergentes reducen la presión y aumentan las velocidades supersónicas o aumentan y reducen las velocidades subsónicas. Con estos hechos en mente, es posible identificar ya sea un estado subsónico o uno supersónico observando los cambios en la presión, que acompañan a los cambios progresivos en el área del flujo.

Debe advertirse que la relación de flujo de una tobera, exhibirá un máximo de acuerdo con la misma ley que motiva una área mínima. Luego, en la Figura 15 la relación de flujo para una presión de escape igual a la presión inicial, será igual a cero. Si se disminuye la presión de salida, aumenta la relación del flujo porque la velocidad en cualquier sección se ha aumentado. Pero una vez alcanzada la velocidad sónica en la garganta, ninguna otra disminución en la presión de salida originará un aumento en el flujo porque la velocidad, el volumen específico y el área en la garganta son constantes. Luego las condiciones de la garganta para las etapas C, D y E son iguales (las mismas), por lo cual las relaciones de flujo de masa son iguales, aun cuando se tengan diferentes presiones de escape.

Figura 1-1

FIGURA 1-2

FIGURA 1-3

FIGURA 1-4

FIGURA 2

Figura 3

F I GUR4

F

I GU R

A 3

F

I

GURA 5

FIGURA 6

FIGURA 7

FIGURA 8

F I

GURA 9

F

I

GURA 10

F

I

GURA 11

FIGURA 12

FIGURA 13

FIGURA 14

F

IGURA 15