

Motor HCCI

Mezcla pobre y homogénea encendida por compresión

El motor HCCI es una combinación de los actuales motores de gasolina y Diesel. En él, la mezcla de aire y combustible se realiza fuera de la cámara de combustión, como en los motores de gasolina de inyección indirecta. Pero no se enciende por una chispa, sino que se autoinflama por compresión, como en los motores de ciclo Diesel. Su rendimiento en carga media es mucho mayor que el de un motor de gasolina, y su emisión de NOx y partículas de hollín, mucho menor que el Diesel.

Actualmente varias universidades, centros de investigación y fabricantes de automóviles investigan este tipo de combustión; incluso ya hay un motor de dos tiempos en el mercado japonés. Posiblemente se convierta en el motor «puente» entre los actuales Diesel o gasolina, con la pila de combustible totalmente desarrollada.

HCCI es el acrónimo en Inglés de «Carga Homogénea Encendido por Compresión». Esta denominación implica que la carga de aire y combustible, mezclada homogéneamente, es inflamada por el calor de la compresión. Otro nombre que reciben estos motores es ATAC (Combustión por Atmósfera Térmica Activa), pero suele emplearse para motores de dos tiempos. Existen otras denominaciones: ARC (Combustión por Radicales Activos, Honda), Combustión TS (Toyota Soken), pero menos extendidas.

Hay pocos antecedentes de este tipo de motor. En 1957, Alperstein hizo experimentos de funcionamiento de un motor monocilíndrico Diesel, con cargas de hexano y aire mezcladas antes de la cámara de combustión. Durante los años 80 se realizaron varias investigaciones sobre este tipo de motores, pero ha sido en los últimos cinco años cuando han adquirido más relevancia. También se pueden considerar como precedentes los motores semi-Diesel o de «culata caliente» de principios de siglo, y los pequeños motores de modelismo a escala (aunque estos tienen una bujía permanentemente encendida como «punto caliente» de la cámara de combustión).

Las numerosas investigaciones en marcha indican que el motor HCCI tiene un futuro claro como paso siguiente en el desarrollo de los motores de combustión interna alternativos. El principal escollo a salvar para que estos motores puedan comenzar a verse en los salones del automóvil es controlar con precisión el momento de encendido.

Actualmente los motores HCCI adoptan múltiples configuraciones abiertas a futuros desarrollos. Sin embargo, la configuración que parece más interesante para un automóvil es un motor de cuatro tiempos, de gasolina que a carga parcial funcione con combustión HCCI y a plena carga funcione con encendido provocado por bujía y mezcla estequiométrica. Con ello se evita la detonación y se consigue mayor potencia, cuando el conductor lo demanda. Una gestión electrónica adecuada puede permitir el cambio de un tipo de combustión a otra cuando sea el momento apropiado. También la configuración de motor híbrido HCCI-eléctrico puede ser interesante para vehículos urbanos. La aplicación en masa del HCCI, podría obligar a modificaciones significativas en las características de los combustibles actuales.

En cualquier caso, las posibilidades de desarrollo del motor HCCI son mayores que las de muchos tipos de motores actuales. Por ejemplo, los motores gasolina de dos

tiempos y de cilindrada superior a 100 cm³ (apropiados para la mayoría de las motocicletas) no pueden cumplir con las especificaciones anticontaminación de EE.UU, y no se comercializan en este país.

- Según el tipo de encendido, hay dos tipos de motores: de encendido provocado o de encendido por compresión.

Motores de encendido provocado

En este tipo de motores, la combustión se inicia cerca del final de la carrera de compresión por causa de una o varias chispas. Dicha combustión se propaga en un frente de llama hacia el resto de la cámara. Según la mezcla, hay dos tipos de motores de encendido provocado: uno, los que trabajan siempre con mezcla estequiométrica; dos, los que lo pueden hacer también con mezcla pobre.

En funcionamiento con mezcla estequiométrica, una válvula de mariposa, controlada directa o indirectamente por el pedal del acelerador, es lo que varía la carga (salvo en el motor Valvetronic de BMW, que no tiene mariposa). Es decir, esta válvula deja pasar más o menos aire y, por tanto, varía el par que da el motor. Cuando la mariposa no está completamente abierta (que es lo más habitual) ese «estrangulamiento» disminuye el rendimiento del motor. En esas condiciones (carga baja o media), la mezcla de aire y gasolina se mantiene casi constante en una proporción estequiométrica (14,7 a 1).

En estos motores, la relación de compresión (y, por tanto, el rendimiento) está limitada por la aparición de la combustión detonante o «picado de biela». Este fenómeno, asociado al autoencendido, daña componentes del motor por las altas transferencias de calor que origina (puede fundir parte del pistón) y un aporte de energía desfasado respecto al movimiento del pistón.

Por otra parte, la asociación del aire y el combustible no es perfecta —sobre todo en los ciclos de dos tiempos— lo que aumenta la proporción de CO e HC en el gas de escape. Además, la combustión con alta temperatura provoca óxidos de nitrógeno NOx. Todo se ello debe corregir con el empleo de complejos y costosos sistemas de descontaminación.

Los motores que pueden funcionar con mezcla pobre son generalmente de inyección directa, aunque ni todos los inyección directa funcionan con mezcla pobre, ni todos los de mezcla pobre tienen inyección directa. Con cierta combinación de carga y régimen, estos motores no usan una mezcla homogénea, sino una pobre pero estratificada: muy rica en torno a la bujía, muy pobre en el resto de la cámara de combustión. En la zona rica, donde se inicia la llama, la temperatura es muy elevada y favorece la oxidación del nitrógeno. Como consecuencia de este fenómeno y de la atmósfera rica en oxígeno, los motores de inyección directa de gasolina emiten mas NOx que los indirecta.

Una de las principales ventajas de estos motores es que —cuando funcionan con mezcla pobre— no tienen las pérdidas por bombeo de un motor normal de gasolina. Como la variación de la carga se hace mediante el combustible (no mediante el aire), la mariposa está prácticamente abierta.

Motores de encendido por compresión, ciclo Diesel

En este tipo de motor, lo que entra en la cámara inicialmente es sólo aire; el gasóleo se inyecta más o menos cerca del punto muerto superior. El denso combustible —pulverizado pero aún líquido— debe vaporizarse, mezclarse con el aire y alcanzar las

condiciones de presión y temperatura apropiadas para inflamarse. El tiempo que lleva este proceso es el «retraso de autoencendido» y limita la velocidad a la que puede girar el motor y, por tanto, su potencia máxima. La carga varía modificando la cantidad de gasóleo inyectado; siempre entra la máxima cantidad que el motor admite en determinadas condiciones.

La alta temperatura de combustión en las zonas donde la mezcla es más rica provoca la asociación del oxígeno y el nitrógeno del aire dando lugar a emisiones altas de NOx. El hollín y los hidrocarburos (HC) que no han sido quemados se forman también en esas zonas y constituyen otra fuente de emisiones contaminantes.

En estos motores la mezcla de aire y combustible se realiza fuera de la cámara de combustión, con baja presión y de forma homogénea. Es decir, la mezcla se hace en el mismo lugar que en un motor de gasolina de inyección indirecta y mezcla estequiométrica. En cambio, la mezcla que aspira el motor HCCI es muy pobre en combustible.

Posteriormente, dicha mezcla entra en la cámara y es comprimida hasta que se autoinflama en combustión espontánea, cuando el pistón está próximo al punto muerto superior (como en los motores Diesel). Pero en los motores HCCI el encendido no ocurre en un punto localizado, como en el Diesel, sino casi simultáneamente en toda la cámara. Por tanto, no hay una propagación por frente de llama, ni estratificación de la mezcla.

Como en un Diesel, no hay una válvula de mariposa para variar la carga; el flujo de aire siempre será el máximo. La carga se controla variando la cantidad de combustible.

Es preciso emplear una relación de compresión elevada para prender una mezcla muy pobre, en torno al límite de inflamabilidad ($\lambda \approx 1,2$). Los diversos motores experimentales han trabajado con unas relaciones de compresión que varían entre 20: 1 hasta 30: 1.

En carga media y baja, el autoencendido de la mezcla no suele provocar detonaciones destructivas. La mezcla —pobre y homogénea— mantiene la temperatura máxima de los gases quemados relativamente baja y uniforme en toda la cámara. Sin embargo, a plena carga la temperatura es mayor y la mezcla más rica; pueden aparecer combustiones detonantes.

Según los experimentos realizados, los combustibles más apropiados para este tipo de combustión son: gasolina, gas natural, biogas y etanol. Pero también se han empleado otros. Un mismo motor podría emplear más de uno de estos combustibles.

	Motor gasolina inyección indirecta	Motor gasolina inyección directa y mezcla pobre	Motor Diesel	Motor HCCI
Lugar de	en el conducto de	en la cámara de	en la cámara de	en el conducto

formación de la mezcla:	admisión	combustión	combustión o en la precámara	de admisión
Distribución de la mezcla en el cilindro:	homogénea	heterogénea estratificada: rica en torno a la bujía, pobre en el resto de la cámara de combustión	heterogénea estratificada: rica en torno al punto de inyección, pobre en el resto de la cámara de combustión	homogénea
Proporción de la mezcla :	estequiométrica ($\lambda \approx 1$)	pobre o muy pobre	muy pobre	muy pobre ($\lambda \approx 1,2$)
Regulación de la carga:	mayor o menor cantidad de mezcla, con válvula de mariposa	mayor o menor cantidad de combustible	mayor o menor cantidad de combustible	mayor o menor cantidad de combustible
Tipo de Encendido :	chispa	chispa	autoinflamación	autoinflamación
Presión de inyección:	baja	alta	muy alta	baja
Relación de compresión aproximada:	entre 8 y 12 a 1	entre 10 y 13 a 1	Entre 17 y 23 a 1	Entre 20 y 30 a 1

Ventajas

- Mayor rendimiento que un motor de gasolina en carga baja y media, similar al de un motor Diesel, por causa de una combustión rápida, una elevada relación de compresión, empleo de mezcla muy pobre y una admisión de aire sin estrangular (sin válvula de mariposa). Consumo de combustible reducido.
- Emisión de NOx muy baja, debido al empleo de mezcla pobre y homogénea, que evita superar la temperatura crítica de aparición de estos gases (unos 1.550 °C). Esta temperatura se suele alcanzar en los frentes de llama de la combustión estratificada del motor Diesel y del inyección directa de gasolina.
- Menores emisiones de hidrocarburos sin quemar y partículas de hollín que el Diesel, debido al empleo de mezcla homogénea, pobre y con activación descentralizada, en donde no quedan zonas sin quemar. Una temperatura de combustión demasiado baja puede llegar a hacer inversa esta característica.
- Funcionamiento del motor más estable y suave en determinados regímenes y cargas de motor.
- Posibilidad abierta de emplear varios combustibles en el mismo motor.

Inconvenientes

- Dificultad para controlar el momento exacto del autoencendido. Es un parámetro fundamental de control del motor, que en estos motores ocurre de forma espontánea y

no se puede controlar por los medios tradicionales: salto de chispa en el motor de gasolina, inyección en el Diesel. En un motor multicilíndrico la transferencia de calor es aun más difícil de estabilizar y por tanto los puntos de encendido. Un cilindro que esté levemente más caliente que los otros puede comenzar la inflamación de su mezcla mucho antes. O el más frío puede incluso no quemar el combustible.

- Baja potencia específica, menor que un Diesel, debido al empleo de mezclas muy pobres y diluidas.
- Limitación de funcionamiento a cargas parciales, donde es posible la autoinflamación descentralizada de la mezcla homogénea, y la combustión no es detonante.

Actualmente se están desarrollando varios motores experimentales con combustión HCCI, pero el ejemplo más tangible lo encontramos en el mundo de la motocicleta: el motor Honda EXP-2. Es de dos tiempos, con 400 cm³ de cilindrada y monocilíndrico. Finalizó el Rally Granada-Dakar de 1997 en quinta posición absoluta con un consumo muy reducido y bajas emisiones contaminantes.

Con este motor se abre la posibilidad de retomar el empleo de motores de dos tiempos; más adecuados para las motocicletas que los cuatro tiempos, y que estaban condenados a desaparecer. En 1998 se lanzó al mercado el scooter Pantheon de 125 cm³ con este tipo de combustión.

La Universidad de Berkeley, conjuntamente con el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (EE.UU.), están desarrollando un motor híbrido (térmico/eléctrico) a partir de un HCCI. Es monocilíndrico y funciona con gas natural, butano y otros combustibles. Se puede modificar su relación de compresión y dispone de un calentador del aire de admisión de 6 kW. Las emisiones de NO_x y partículas son bajísimas y dispone de una potencia aceptable. También han modificado el motor 1.9 TDI de VW (Diesel, inyección directa, 4 cilindros, 8 válvulas). Ha funcionado correctamente con dos combustibles: propano y metano. El aire de admisión se calienta con un calefactor de 18 kW.

El SouthWest Research Institute ha desarrollado un motor HCCI, monocilíndrico, de gasolina, que reduce la emisión de NO_x e HC a cargas medias respecto al motor de inyección directa de gasolina.

La Universidad de Lund (Suecia), trabaja sobre un motor Volvo turbodiésel, modificado. Ha funcionado con gas natural, gasolina, gasoil, etc. Con y sin recirculación de gases de escape, relación de compresión variable y sobrealimentación.

La Universidad Politécnica de Madrid esta investigando este tipo de combustión tomando como base un motor Derbi de 50 cm³ de refrigeración por aire, al que se le ha acoplado una válvula de escape.

Varios fabricantes de automóviles, como PSA, Daimler-Chrysler o Ford, están actualmente investigando las posibilidades que ofrecen los motores HCCI.

El desarrollo futuro del motor HCCI pasa por controlar con precisión el momento del inicio de la combustión. Para ello se realizan predicciones de los mecanismos fisico-químicos de la combustión, la distribución de la temperatura y el origen de los contaminantes.

Se emplean complejos modelos informáticos de mecánica de fluidos y cinética química. Posteriormente los resultados se contrastan con experimentos en motores. Al no existir bujía o inyección directa en el motor HCCI, el encendido de la mezcla depende sobre todo de la relación de compresión y de la temperatura del aire de admisión. El control sobre estos dos parámetros puede permitir el inicio del encendido de la mezcla en un instante deseado.

Por ello se estudian motores que modifiquen su relación de compresión durante su funcionamiento; como el sistema por brazo articulado que sube y baja la culata: Saab SVC. Aunque un mecanismo de este tipo en un motor HCCI podría tener problemas de fragilidad, dadas las altas presiones internas.

Para variar la temperatura del aire de admisión, se estudia recircular más o menos gases de escape al colector de admisión, o calentar el aire de admisión con un calentador en el colector.

Otra investigación en marcha es evitar la aparición de la combustión detonante, que puede aparecer en altas cargas. De nuevo, se puede recurrir al empleo de motores con relación de compresión variable, o bien adelantar el cierre de las válvulas de escape y retrasar la apertura de las de admisión, con el objetivo de retener una cierta cantidad de gases ya quemados en la cámara de combustión.

Además, la apertura y cierre variable de las válvulas permitiría modificar el grado de carga, jugando con la cantidad de dichos gases residuales. También se favorecería la combustión descentralizada, por la presencia de gases calientes y bien esparcidos en la cámara de combustión. Pero para poder controlar este proceso de manera adecuada se hace casi imprescindible el empleo de un sistema de apertura de válvulas eléctrico, controlado por un módulo electrónico que vaya ajustando permanentemente la apertura y cierre de las válvulas. Otra posibilidad menos precisa sería instalar una válvula de mariposa en el escape.

También se analiza la posibilidad de, en combinación con la apertura variable de válvulas, optar por la inyección directa de combustible justo después del cierre de las válvulas de escape, para evitar la detonación.

Otro campo de investigación es el empleo de diferentes combustibles en un mismo motor. Es necesario emplear diferentes y adecuadas estrategias de control del motor. También se puede modificar el grado de carga por gases residuales, o variar la relación de compresión como en el motor SVC. En cualquier caso se requiere de una gestión del motor muy precisa y rápida.