

## RESUMEN

Durante las últimas dos décadas, el desarrollo del motor de combustión interna ha seguido la evolución de las expectativas del cliente. Desde la carrera por la pura obtención de prestaciones, alta potencia y el fun-to-drive, perfectamente ilustrada por el fabuloso Mercedes 300 SL, el planteamiento se cambió hacia motores eficientes bajo la presión de los aún crecientes precios de petróleo. La bien conocida planta motriz Diesel, hasta este periodo limitada a vehículos industriales, de repente fue el objeto de muchas investigaciones, incluso para fabricantes de automoción, especialistas en coches deportivos. Los desarrollos tecnológicos, principalmente concernientes a sobrealimentación e inyección, permitieron la apertura del mercado de los vehículos automóviles a los motores de encendido por compresión debido a los niveles aceptables de ruido, potencia y su aún imbatible eficiencia. Por la parte de la gasolina, la inyección directa pasó de los coches de carrera a los utilitarios con la introducción de la combustión estratificada. Más recientemente se incrementó la presión para reducir la contaminación del aire tanto en zonas urbanas, limitando NO<sub>x</sub> y hollín, como a escala planetaria, para gestionar emisiones de CO<sub>2</sub> y por tanto aumentar los esfuerzos en la parte de eficiencia.

Los dos primeros sistemas de combustión descritos en este documento tratan las alternativas de guiado por chorro y guiado por aire para obtener una estratificación de combustible, y por tanto operar el motor de gasolina sin estrangulamiento de la admisión, con miras a conseguir mejor eficiencia.

El primer concepto, denominado MID3S, se basó en una cámara de combustión de 3 válvulas con una gran área de squish y una relación de compresión de más de 12; inspirado en el sistema May Fireball, se desarrolló con un inyector casero de alta presión operado hasta 80 bar con una aguja que se abría hacia afuera. Se formaba una mezcla inflamable ultra pobre con la mariposa totalmente abierta en las proximidades de la bujía para condiciones de operación tan bajas como ralentí, mientras que las prestaciones máximas estaban cerca del objetivo de 37 kW/l. El rendimiento se mejoró significativamente respecto a un motor de inyección multipunto, mientras que el CO y HC eran bastante aceptables. Por el contrario, los NO<sub>x</sub> y hollín tenían que mejorar. Desafortunadamente, la robustez del movimiento aerodinámico de squish estaba compensado por la sensibilidad del ángulo de chorro y la penetración a la contrapresión, y por tanto las inyecciones en tiempos tardíos creaban mojado y fallos de la bujía. La estructura de cono hueco del chorro de combustible era la responsable de este comportamiento, especialmente debido al efecto de englobamiento del aire dentro del chorro. El aumento de la presión de inyección de 30 a 80 bar, y probablemente por encima, habría reducido este efecto. Por lo que respecta a las metodologías, se diseñó una culata a propósito con dos accesos endoscópicos para visualizar la interacción entre el chorro, el aire, las paredes y la combustión (o más precisamente el hollín) con una cámara de alta velocidad operando en longitudes de onda visibles. La estructura del chorro, formada por una sucesión de ligamentos en la superficie del mismo, mostraba claramente las condiciones de operación atmosféricas.

El segundo diseño, denominado K5M, se basaba en un movimiento ajustable de alto tumble generado en el colector de admisión. Se utilizaba un inyector de Siemens

localizado entre las dos válvulas de admisión de la cámara de combustión tipo pent-roof, con una presión de hasta 80 bar. La preparación de la mezcla se confiaba a la interacción entre el movimiento del aire y el chorro, donde la velocidad del tumble desviaba las gotas hacia la bujía situada en el centro de la cámara. Se usaron simulaciones 3D CFD y técnicas de visualización PIV y LIF en un motor óptico en paralelo, para comprender la evolución espacial del dosado durante el ciclo, y la posibilidad de operar el motor con la mariposa totalmente abierta, incluso a carga parcial. A baja carga y velocidad, la reducción natural de la intensidad del tumble podría haber sido seguida por una reducción significativa de la presión de inyección, con el objeto de asegurar un balance exacto entre las dos energías de momento; desafortunadamente, tanto las altas fluctuaciones ciclo a ciclo, como la pobre atomización a 30 bar no permitieron alcanzar una estabilidad de encendido aceptable a baja carga debido a una mezcla demasiado pobre en las proximidades de la bujía. El uso de electrodos que sobresalieran podría haber sido una solución al problema, pero no se aseguraba un uso confiable en la vida de serie. Por el contrario, las prestaciones a media carga eran globalmente adecuadas.

El tercer concepto se refiere a la combustión Diesel que pretende conseguir muy bajas emisiones de NO<sub>x</sub> y hollín usando un sistema de inyección innovador. La idea básica se apoya en el uso de una combustión bastante homogénea a baja carga – denominada Mild HCCI – y en una de difusión a alta carga.

Basada en dos inyecciones cercanas entre ellas en las proximidades del PMS, la Mild HCCI permite moderar el ruido de combustión inherente a la fase de combustión premezclada, puesto que el combustible inyectado durante la segunda fase enfría la primera combustión; se mantienen las ventajas de las bajas emisiones de NO<sub>x</sub> y soot hasta 8 bar de PME. Por encima de este valor, el nivel de ruido llega a ser inaceptable para aplicaciones de automoción y se hace obligatorio volver a una combustión convencional difusiva. Basado sobre investigaciones académicas que señalan el efecto positivo de los orificios de tobera reducidos asociados a altas presiones de inyección en términos de hollín via una diferencia significativa entre la distancia de lift-off y la longitud de penetración líquida, se adaptó un sistema de inyección innovador a una cámara de combustión convencional.

La primera conclusión es una mejora significativa del balance NO<sub>x</sub>/soot a media y alta carga con tasas de EGR bastante usuales. Esta ventaja fue debida a una atomización mucho mejor unida tanto a los pequeños orificios como a las altas presiones.

La segunda conclusión se relaciona con la posibilidad de alcanzar una combustión “0 hollín/0 NO<sub>x</sub>” a alta carga, aumentando mucho el EGR y la masa de aire. En este caso se generó una combustión controlada por difusión con llama despegada, confirmando a escala de motor real los resultados obtenidos en investigaciones académicas. Sin embargo, el uso de simulaciones 3D permitieron demostrar que la preparación de la mezcla era solamente una parte del resultado; la localización de las diferentes etapas de la combustión en un diagrama de Kamimoto, muy lejos de la península de NO<sub>x</sub> y soot, señala el impacto de la termodinámica de la LTC (Combustión a Baja Temperatura). Desafortunadamente, a pesar de estos resultados los sistemas disponibles de EGR y aire no pueden proporcionar los gastos necesarios de masa.

Por lo que respecta a las herramientas, los pasos de desarrollo fueron seguidos por visualizaciones intensivas de chorro para las fases líquida y vapor, en condiciones cada vez más cercanas al motor real. Estas medidas permitieron evaluar precisamente el

impacto del diámetro, la presión de inyección y el contenido en oxígeno sobre la diferencia entre las longitudes líquida y de lift-off.

Finalmente, se ha enfatizado en la importancia de acoplar herramientas de investigación como visualización y simulaciones 3D en condiciones tan cerca como sea posible a las del motor real en términos de temperatura, presión y timing (p.ej. la posibilidad de registrar un ciclo completo de mezcla y combustión) para los futuros motores tanto de Encendido Provocado como por Compresión. En particular, el aumento predicho de presión de inyección llevará a reoptimizar los diferentes modelos disponibles de chorro y finalmente a readaptarlos en términos de los fenómenos físicos, debido a las grandes variaciones de la velocidad de chorro y del número de Weber. La presencia de cavitación en los orificios de la tobera también tendrá que ser tomada en cuenta, puesto que tiene un papel fundamental en lo que respecta al coking.

En conclusión, es evidente que el desarrollo de motores de gasolina de carga estratificada y Diesel de bajas emisiones se apoyará cada vez más en la preparación de la mezcla y en su asociación con las temperaturas de gas bajas.