

Introducción

La legislación anticontaminación se ha ido endureciendo progresivamente tanto en Europa como en los Estados Unidos de Norteamérica en los últimos años. Hasta ahora ha sido suficiente la generalización del uso del catalizador de tres vías, o pequeñas mejoras en el rendimiento, para que los nuevos motores instalados en los automóviles de turismo cumplieran unas leyes cada vez más exigentes. Sin embargo, los límites que se prevé que entren en vigor a principios del próximo milenio estarán fuera del alcance de los actuales motores de inyección indirecta de gasolina, especialmente debido a que las nuevas leyes restringirán también las emisiones de CO₂. Puesto que el dióxido de carbono no puede ser eliminado de los gases de escape mediante oxidación o reducción alguna y toda combustión de hidrocarburos lo produce, se hace imprescindible reducir la cantidad de combustible que se quema en los motores. Si se pretende mantener los actuales niveles de potencia y prestaciones no queda otro remedio que aumentar el rendimiento global del motor de una manera sustancial, cosa no posible si no se varía el concepto básico de los motores actuales. Una de las más claras alternativas para conseguir esta mejora son los motores de mezcla estratificada, capaces de funcionar con un dosado relativo muy variable, desde mezclas extremadamente pobres (con FR en las proximidades de 0,15), hasta dosado estequiométrico o ligeramente rico.

Aunque ha habido algunos intentos, por parte de fabricantes como HONDA, TOYOTA o CHRYSLER, de realizar un motor de mezcla estratificada con inyección indirecta mediante la adición de una pequeña válvula auxiliar en las proximidades de la bujía, el concepto moderno de mezcla estratificada supone también la adopción de inyección directa. La idea del uso de la inyección directa no es nueva; diversos estudios y prototipos se han construido con éxito en las últimas décadas, pero sólo ahora parece posible desarrollarla lo suficiente como para hacerla llegar a la gran producción.

En Septiembre de 1995, tres fabricantes europeos de automóviles de gran peso y prestigio en el mercado mundial acordaron el comienzo de un programa conjunto para el desarrollo de una gama de motores de gasolina de inyección directa para su instalación en automóviles de turismo. Para este proyecto requirieron la colaboración de un importante fabricante de componentes y electrónica para el automóvil y de la Cátedra de Termodinámica Aplicada (*Lehrstuhl für Angewandte Thermodynamik* o LAT) perteneciente a la Universidad Técnica de Renania Westfalia (*Rheinisch–Westfälische Technische Hochschule Aachen*) en la ciudad alemana de Aquisgrán. Estos dos últimos miembros del consorcio serían los encargados de diseñar, fabricar y probar los distintos prototipos para el sistema de inyección directa de gasolina que alimentaría los futuros motores.

El consorcio formado por estos cinco miembros se basó en investigaciones previas realizadas individualmente por los tres fabricantes de automóviles, así como en los resultados de un proyecto previo llamado GADI, para estructurar un completo programa de desarrollo con una duración prevista de cuatro años, subdividido en distintos proyectos, que desembocará en la construcción de los primeros prototipos de estos motores. Una vez construidos estos prototipos serán necesarios otros dos años para las correspondientes pruebas en carretera y últimas mejoras de los diseños, así como un año más para su puesta en producción. Como consecuencia, la entrada definitiva en el mercado de los automóviles equipados con estos motores de inyección directa y encendido provocado tendrá lugar unos siete años después del comienzo del proyecto, es decir, en torno al año 2002 ó 2003.

El desarrollo de un nuevo tipo de motor, que introduce grandes cambios con respecto al concepto básico de los actuales motores de gasolina de inyección indirecta, supone el replanteamiento de muchos de los componentes que actualmente son indispensables para la industria del automóvil. Como consecuencia, el consorcio europeo recién formado puso en marcha seis proyectos diferentes, cuyo objetivo principal es el desarrollo de la tecnología necesaria para establecer el potencial de los motores de inyección directa, tanto de encendido provocado como por compresión, para conseguir unas cifras muy bajas en las emisiones de CO₂, CO, hidrocarburos sin quemar, óxidos de nitrógeno, partículas y ruidos. Además, la información obtenida de

estos proyectos servirá también al Parlamento Europeo para ultimar las nuevas leyes anticontaminación previstas para el año 2000. Los proyectos que componen este programa son los siguientes:

- ADVACO (*ADvanced VALve COntrol system* o Control Avanzado de Válvulas)
- ELSEC (*IntEgrated ELectronic system for dynamic Emission COntrol* o Sistema Electrónico Integrado para el control dinámico de las Emisiones)
- ADIGA (*ADvanced Direct InJECTION GASoline engine* o Motor Avanzado de Inyección Directa de Gasolina)
- DINOISE (*Direct InJECTION diesel Noise and vibration control technologies* o Tecnologías de Control de Vibraciones y Ruidos en motores Diesel de Inyección Directa)
- DITREAT (*IntEgrated aftertreatment of Direct InJECTION Diesels for cars* o Tratamiento de Gases Integrado para motores Diesel de Inyección Directa)
- ADDI (*ADvanced Diesel Direct InJECTION with high pressure control* o Inyección Directa Avanzada en Motores Diesel con Control de Alta Presión)

El presente Proyecto de Fin de Carrera se realizó en el LAT durante el primer semestre del año 1997 y cubre una parte de las pruebas realizadas en este centro dentro del proyecto ADIGA. Es, por lo tanto, un proyecto eminentemente práctico, que muestra los resultados de seis meses de pruebas continuas, así como de trabajo de mantenimiento y mejora de un sistema complejo y frágil como la cámara de medida de alta presión. Al mismo tiempo, por tratarse de una iniciativa completamente privada, sometida a un contrato, gran parte de los resultados expuestos en este proyecto han sido también presentados a los miembros del consorcio que desarrolló el programa en los plazos y formatos convenidos. Además, la comunicación con el fabricante de los inyectores era continua, a fin de acelerar el desarrollo de futuras generaciones de este sistema. La segunda generación de inyectores, recibida en marzo de 1997 ya incorporaba algunas mejoras basadas en los resultados obtenidos en el LAT en los primeros meses de pruebas.

La misión del LAT en esta parte del proyecto era realizar pruebas de evaporación y comportamiento del spray con los primeros prototipos de inyectores suministrados por el fabricante. A tal efecto se utilizó una cámara de medida de alta presión, que será descrita con detalle en el Capítulo 3 de este proyecto, en la que se podían simular las condiciones de presión y temperatura que se pueden encontrar dentro de un cilindro en un motor real en el momento de la inyección. Como será brevemente explicado más adelante en esta introducción y con mayor detalle en sucesivos capítulos de este proyecto, la mayor ventaja de la inyección directa de gasolina frente a la inyección tradicional (por encima de la válvula de admisión), es que permite inyectar el combustible en distintos momentos de la carrera del cilindro, tanto en su carrera descendente (coincidiendo con la admisión del aire fresco, como en un motor de inyección indirecta), como en la carrera ascendente (durante la compresión) o incluso cuando el pistón se encuentra cerca de su punto muerto superior. Esto hace que las condiciones que encuentra el combustible al entrar en el cilindro sean muy diferentes de un caso a otro, ya que una inyección temprana encuentra una presión aproximadamente igual a la del ambiente (en motores atmosféricos) y una temperatura relativamente baja, mientras que una inyección tardía encontrará una presión muy superior (por encima de los 20 bar para una relación de compresión normal en este tipo de motores) y una cámara calentada durante la compresión. Este hecho obligó a realizar las pruebas con los inyectores a distintas presiones y temperaturas. Al comienzo del periodo de pruebas se diseñó un programa de medidas (expuesto en su totalidad en el Capítulo 4) en el que se conjugaban todas las variables que iban a ser analizadas:

- Presión en la cámara (P_{ch}).
- Temperatura en la cámara (T_{ch}).
- Duración de la inyección (t_{inj}).
- Presión en la línea de combustible cuando este es inyectado o "presión de inyección" (P_{inj}).
- Presencia o no de turbulencia en el interior de la cámara en el momento de la inyección.

La cámara de alta presión en la que se realizó la práctica totalidad de las pruebas fue originalmente diseñada para estudiar el comportamiento de inyectores Diesel de inyección directa, por lo que era capaz de simular

temperaturas y presiones muy superiores a las máximas utilizadas durante este período de pruebas. Antes de comenzar éste, la cámara hubo de ser modificada y acondicionada para su nuevo cometido. También fueron instalados (y en algunos casos diseñados y fabricados), nuevos equipos y componentes que se utilizarían por primera vez en este banco de pruebas, como por ejemplo el sistema de vídeo de alta velocidad o distintos módulos en la cabeza de la cámara, como será explicado en el capítulo 3 de este proyecto. Todos estos nuevos sistemas hubieron de pasar por un periodo de adaptación y ajustes hasta que llegaron a funcionar correctamente.

El LAT recibió el primer grupo de prototipos para el sistema de inyección en el segundo semestre de 1996 y sus pruebas comenzaron a principios del año 1997. En una primera fase sólo se pretendió estudiar el comportamiento del spray de combustible (siempre se utilizó gasolina sin plomo comercial con un índice de octano de 97) al ser inyectado en la cámara de medida de alta presión ante la variación de alguna de las variables anteriormente expuestas. A este efecto se utilizó un sistema de vídeo de alta velocidad que permitía registrar imágenes aisladas de una duración extremadamente corta (hasta 1µs) y con un retardo preciso y conocido, pero variable a voluntad del usuario, respecto a una señal exterior. Para cada punto definido en el programa de medidas (ver Capítulo 4), se obtuvo una secuencia de imágenes separadas por un intervalo temporal definido que dependía de la duración de la inyección en ese punto. Las imágenes así obtenidas podían ser inmediatamente transferidas a un ordenador y almacenadas en su memoria, mediante el software adecuado, para su posterior tratamiento y análisis. Éste comenzaba con el cálculo de la media de treinta imágenes tomadas consecutivamente, en el mismo instante de la evolución de la inyección y con las mismas condiciones. De esta forma se obtenía una sola imagen que caracterizaba un cierto instante de la evolución del spray para unas condiciones de contorno dadas, evitando el efecto de las variaciones entre ciclos. En esta primera fase de los ensayos se realizaron cerca de 10000 instantáneas que produjeron más de 300 "medias" que pasaron a la fase de análisis.

Puesto que carecería de sentido la impresión e inclusión en este PFC de todas estas imágenes, sólo se mostrarán aquellas que aclaren algún aspecto del comportamiento del spray, mientras que se adjunta un CD-ROM en el que se recoge la totalidad de las imágenes *mvsr* (*mittlere Versuchsreihe* o media de la tanda de ensayos) en formato GIF y TIFF.

Una vez obtenidas las imágenes *mvsr*, éstas pasaban a ser analizadas para poder comparar parámetros característicos del spray de la inyección. En primer lugar se utilizó un programa de diseño gráfico comercial para medir longitudes y ángulos característicos, tal y como se explicará en el Capítulo 5. Los datos así obtenidos se almacenaron en hojas de cálculo en formato EXCEL, de modo que posteriormente fuera más sencillo el acceso a los mismos para realizar los gráficos y comparaciones que se consideraron necesarios y que forman el cuerpo principal del Capítulo 5 del presente Proyecto Fin de Carrera.

A la vista de los resultados de este análisis, se observó la necesidad de obtener algunos datos adicionales para la mejor comprensión de la manera en que las condiciones de la cámara podían influir en el comportamiento del spray y, lo que es más importante, cómo podría verse afectada la ignición de la mezcla por las condiciones de la inyección y de la cámara de combustión. Como datos complementarios, obtenidos a partir de las mismas imágenes *mvsr*, se obtuvieron las áreas cubiertas por el spray en algunos de los puntos de medida y el porcentaje de esa área cubierto por puntos con una determinada intensidad luminosa. Este último dato es de especial importancia, ya que todas las imágenes obtenidas con el sistema de vídeo de alta velocidad dentro de este programa definido lo fueron mediante la técnica *Schlieren*, estricta en alemán, que muestra los cambios de densidad como cambios de intensidad luminosa en la imagen. De esta manera era posible obtener una idea de como se produce la evaporación del combustible inyectado.

Pero no fueron las instantáneas obtenidas con el sistema de vídeo los únicos datos utilizados para el análisis. Aparte de este sistema, que fue el más usado en la obtención de datos, se utilizaron otros, como:

- **Cámara de alta velocidad NAC**, capaz de superar los 10000 fotogramas por segundo, aunque para

estos ensayos solo se llevó hasta los 7200 fps. Con esta cámara se obtuvieron dos películas por cada punto de medición. Estas películas contenían el desarrollo completo de una única inyección cada una. Para obtenerlas se obtuvieron dos métodos *schlieren* diferentes, uno en color y otro en blanco y negro, que resaltaban diferentes aspectos de la evaporación. Algunos fotogramas procedentes de estas películas serán mostrados en un Anexo.

- **Técnica de iluminación por capas o *light sheet technique*.** Se utilizó una disposición muy básica de esta técnica que permite iluminar tan solo un plano del suceso que se va a registrar para obtener una "sección" del mismo. De esta manera se pretendía comprobar si el spray de la inyección era realmente un cono hueco, tal y como se preveía en las líneas maestras previas al desarrollo.
- **Fotografía directa.** Algunas instantáneas directas, obtenidas sin filtro *schlieren*, se realizaron colocando el inyector en distintas posiciones para ver el inicio del spray desde distintos ángulos.
- **Medidas de masa,** destinadas a conocer el flujo másico de combustible a través del inyector en función de la presión de inyección.

Todos los datos obtenidos con los sistemas anteriores han sido también analizados y serán presentados a lo largo del presente PFC, especialmente en el Capítulo 5, dedicado precisamente al análisis de los datos. De esta forma se obtuvo una impresión bastante completa del comportamiento del spray y de las variables que favorecen la evaporación de la gasolina, así como de los puntos y momentos en que ésta se produce. Este dato es de la mayor importancia, pues será necesario optimizar la combustión a todos los regímenes de funcionamiento del motor y a todos los niveles de carga. Si ésta ya es una tarea complicada en un motor de inyección indirecta tradicional, lo será aun más en un motor de inyección directa puesto que este avance permite modos de funcionamiento muy diferentes según la carga a la que está sometido el motor en cada momento. En términos generales se pueden distinguir dos comportamientos completamente diferentes:

- **A carga parcial** el motor operará sin ningún tipo de estrangulamiento en la admisión (lo que mejorará el rendimiento volumétrico y reducirá las pérdidas), con una mezcla extremadamente pobre. Este tipo de marcha se conseguirá con una clara estratificación de la carga, preparando una mezcla rica en torno a la bujía y muy pobre en el resto de la cámara de combustión. En un motor de inyección directa esto se consigue mediante la inyección muy tardía del combustible en el interior del cilindro, incluso cuando el pistón está cerca de su punto muerto superior. Para conseguir una ignición correcta en estas condiciones muchos de los sistemas de inyección directa propuestos hasta el momento colocan la bujía en las proximidades del inyector, lo que genera nuevos problemas de fallo en la ignición por el impacto del combustible en los electrodos de la bujía.
- **A carga total** el motor debe operar en condiciones estequiométricas o incluso ligeramente ricas para conseguir mejores prestaciones. Si se utiliza mezcla estratificada, se genera hollín en la zona rica, así que debe proveerse el suficiente exceso de aire en torno a esa zona para quemar el hollín. Por lo tanto, a plena carga lo más indicado es utilizar mezcla homogénea estequiométrica o ligeramente rica. En los motores de inyección directa esto se consigue con una inyección temprana (cuando el pistón recorre su camino descendente en el cilindro) y de mayor duración.

Se aprecia, por lo tanto, que los requerimientos del sistema de ignición a plena carga serán similares a los de un motor actual de inyección indirecta, ya que el pistón comprimirá una mezcla homogénea de aire y combustible, que será la que encuentre la chispa en el momento de saltar. No obstante, a cargas parciales el mecanismo de ignición cambia completamente, por lo que era necesario realizar las pruebas pertinentes. La segunda parte de este Proyecto Fin de Carrera recoge los primeros pasos de los ensayos que comenzaron a mediados de Mayo de 1997 y en los que se pretendía encontrar la posición óptima de la bujía, la duración e intensidad de la chispa, el momento en que debe saltar y demás datos necesarios para optimizar el comienzo de la combustión tras una inyección tardía. Estos ensayos se realizaron siempre con presiones medias y altas (típicamente 8 bar) en el interior de la cámara de medida, pues son estas las condiciones en las que se inyectará en un motor real al buscar mezcla estratificada. En el Capítulo 6 se abordará el problema de la ignición y se mostrarán los primeros datos obtenidos. Durante el siguiente período de ensayos (a partir de Septiembre de 1997) se pretende continuar con las pruebas de ignición. Algunos de los datos ya obtenidos no

han podido ser analizados, debido a que no podían ser procesados por los programas informáticos utilizados para los ensayos Diesel. Una de las primeras tareas en un futuro próximo será realizar las modificaciones pertinentes en estos programas para poder analizar los ensayos de extinción de luz descritos en el capítulo 6.

A lo largo de este PFC se usará normalmente la relación entre aire y combustible (A/F) para expresar el dosado, a fin de ser consecuente con la nomenclatura anglosajona utilizada habitualmente en la documentación interna del proyecto ADIGA. Recuérdese que la relación A/F para mezcla estequiométrica tiene un valor aproximado de 14,6 para una gasolina comercial común.

Para facilitar la comprensión de los gráficos y referencias a puntos concretos del programa de medidas, al final de este Proyecto se adjunta una hoja desplegable, que permite tener presentes las condiciones en las que se realizaron los ensayos mientras se observa un gráfico o tabla.

2

9

Introducción