

## **Estudio experimental de un motor diesel turboalimentado de automoción en condiciones dinámicas de operación**

*John R. Agudelo Santamaría\**

(Recibido el 16 de febrero de 2001)

### **Resumen**

Se presentan los resultados experimentales que se han obtenido de un motor IVECO turboalimentado de automoción, montado en banco de ensayos. El motor fue instrumentado con el fin de registrar dos condiciones de funcionamiento dinámico frecuentes durante la marcha: aceleración súbita en vacío y cambios de carga repentinos. Los resultados muestran un enriquecimiento rápido de la mezcla en el cilindro, reflejado en el incremento de la presión en cámara de combustión, debido a la pronta respuesta de la bomba de inyección de combustible. No obstante, la entrada de aire se hace más lenta debido a la inercia del turbocompresor y a las pérdidas de calor en el múltiple de escape. Se superponen los puntos de funcionamiento del motor sobre las curvas características del compresor con el fin de visualizar la intensidad del transitorio.

----- *Palabras clave:* régimen transitorio, motores diesel, combustión, turboalimentación.

## **Experimental study of an automotive IVECO turbocharged diesel engine, under dynamic operation conditions**

### **Abstract**

This paper describes the experimental test rig and results obtained in an automotive IVECO turbocharged diesel engine under transient conditions. The engine was mounted in an instrumented test bed in order to register two frequently dynamic operation situations: sudden free acceleration and load variation. Results show a fast mixture enrichment due to fast fuel pump answer. Nevertheless, air mass flow was slower due to turbocharger inertia and heat losses in exhaust manifold. This paper also shows the engine operations points superposed on the centrifugal compressor characteristics with the aim of visualizing the transient intensity.

----- *Key words:* transient regimes, diesel engine, combustion, turbocharging.

---

\* Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. [radian@udea.edu.co](mailto:radian@udea.edu.co).

## Introducción

Los motores diesel se caracterizan por su elevado rendimiento de transformación de combustible aun en condiciones de carga parcial. Esto se debe a la forma como se regula la carga y a su elevado rendimiento volumétrico. A diferencia de los motores de encendido por chispa, la carga se regula inyectando más o menos combustible al interior del cilindro según lo requiera el motor, sin tener que generar obstrucciones al paso de flujo durante la carrera de admisión. Este fenómeno, unido a la diferencia de costos entre la gasolina y el combustible diesel, explica el proceso de *dieselización* que ha sufrido Colombia en los últimos años. El uso de la turboalimentación mejora ostensiblemente la potencia específica del motor, permitiendo así conseguir motores más compactos con potencia y rendimiento volumétrico elevados. Esta situación supone un beneficio financiero para el propietario de los vehículos. No obstante, la carencia de un conocimiento mínimo de los procesos que afectan el correcto funcionamiento del motor, sumada a una pauta de conducción agresiva, pueden llevar a una respuesta ambiental nefasta.

En este trabajo se ha verificado experimentalmente que, cuando el motor se somete a una aceleración brusca o a un cambio de carga repentino, la amplitud del pulso de presión en el escape del motor aumenta rápida y significativamente siguiendo los niveles de presión en el cilindro que igualmente se han incrementado, por lo cual la energía se transmite rápidamente a la turbina durante el transitorio. Sin embargo, la inercia de los componentes en movimiento del motor y la del turbocompresor [1-2] ligadas a la compresibilidad de los gases de escape y a la inercia térmica del colector de escape y de carcasa de turbina, hacen que éste no alcance a aumentar rápidamente el flujo de aire, con lo que se produce un enriquecimiento momentáneo de la mezcla que llevaría, de no ser por el dispositivo de control de humos por presión en la inyección (*Boost Control*), a unos niveles de emisiones contaminantes inaceptables por las actuales restricciones medioambientales. En nuestro medio, este tipo

de elementos anticontaminantes se suelen retirar con frecuencia de los motores, con el ánimo de conseguir una respuesta rápida en las aceleraciones. No obstante, la emisión de material particulado se incrementa enormemente debido a la falta de aire suficiente para que se realice un buen proceso de combustión.

La importancia de este artículo radica en mostrar cómo influye la pauta de conducción directamente sobre la producción de emisiones contaminantes. Con una conducción sosegada, en la que se evite someter el motor constantemente a regímenes dinámicos se logra aprovechar las mejoras tecnológicas que están sufriendo actualmente los motores diesel de cara a la reducción de material particulado.

## Montaje experimental

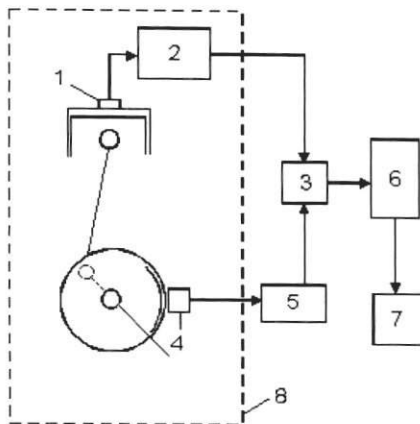
En la tabla 1 se describen las características técnicas del motor IVECO turboalimentado que se ha empleado para realizar las mediciones. Los ensayos se realizaron en un banco de pruebas del laboratorio de motores térmicos de la Universidad Politécnica de Madrid, el cual contaba con un freno dinamométrico de corrientes de *eddy* con capacidad de 450 kW.

**Tabla 1** Datos técnicos relevantes del motor de ensayos

| <i>Tipo de motor</i>      | <i>Diesel turboalimentado</i>     |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Número de cilindros       | 6 en línea                        |
| Ciclo                     | 4 tiempos                         |
| Suministro de combustible | Inyección directa, bomba en línea |
| Diámetro cilindro         | 112 mm                            |
| Carrera                   | 130 mm                            |
| Cilindrada                | 7.685 cm <sup>3</sup>             |
| Relación de compresión    | 17,6                              |

La instrumentación empleada era de respuesta rápida, debido a que los eventos que se registraban ocurrían en muy corto tiempo. El transitorio de aceleración tenía una duración promedio de 4 a 5 s y el transitorio de carga duraba en promedio

de 12 a 14 s. Se registraron señales de presión y temperatura en los puntos más críticos del motor, especialmente aquellos que permitían obtener información relevante como entrada y salida de compresor y turbina y presión en cámara de combustión. La presión en la inyección no se consideró una variable más porque en ensayos previos al régimen transitorio se había determinado que el avance a la inyección de este motor era estático e igual a  $9^\circ$  antes del punto muerto superior (PMS). La presión en el cilindro se registró mediante un captador piezoeléctrico de presión con circuito de refrigeración interna. En la figura 1 se muestra esquemáticamente el montaje experimental requerido para adquirir esta señal. Las presiones en los múltiples de admisión y escape se registraron mediante captadores de presión extensiométricos compensados para cambios de temperatura. Las temperaturas en ambos colectores se registraron mediante termopares de muy baja inercia térmica (0,5 mm de diámetro) conectados a través de un acondicionador de señal a la tarjeta de adquisición de datos. Las velocidades del motor y del turbocompresor se registraron mediante captadores inductivos conectados a la tarjeta de adquisición de datos a través de dos convertidores



**Figura 1** Montaje de la cadena de adquisición de la señal de presión en cámara de combustión 1: captador de presión piezoeléctrico, 2: amplificador de carga, 3: tarjeta de adquisición de datos, 4: codificador angular, 5: fuente de alimentación, 6: computador, 7: unidades de salida, 8: límites de la celda de ensayos.

de frecuencia a tensión. Finalmente la posición de la cremallera se registró mediante un aparato divisor de tensión potenciométrico, esta señal se empleó para extrapolar la entrega de combustible de régimen estacionario a dinámico, y conocer así el consumo de combustible en todo momento.

## Descripción de los experimentos

Se realizaron numerosos ensayos previamente diseñados tanto en régimen estacionario (motor funcionando en condiciones estables) como en régimen dinámico. Los resultados del ensayo estacionario sirvieron para poner a punto el programa de diagnóstico experimental de la combustión y además para obtener las curvas de consumo de combustible y aire, las cuales se emplearon posteriormente para leer los consumos de combustible en condiciones instantáneas.

Se registraron dos tipos de operación dinámicas frecuentes en automoción: un transitorio de aceleración libre desde el ralenti o marcha mínima (625 r.p.m.) hasta el régimen máximo (2.550 r.p.m.) sin carga durante el ensayo y un transitorio de carga. Este último consistía en poner carga súbitamente al freno dinamométrico, estando el motor a 2.000 r.p.m., con carga o sin ella, y registrar la evolución de los siguientes parámetros: presión en el cilindro, régimen de giro del motor, presión en el colector de admisión, presión en el escape antes de la turbina, presión en el escape después de la turbina, temperatura en el colector de admisión, temperatura en el escape antes de la turbina, posición de la cremallera y régimen de giro del turbocompresor. No se midieron emisiones contaminantes durante los ensayos.

## Resultados

### *Aceleración súbita con el motor en vacío*

La figura 2 muestra el registro de un transitorio de aceleración libre. Las condiciones de partida son: temperatura en el colector de admisión de  $38^\circ\text{C}$ , temperatura en el escape de  $111^\circ\text{C}$ , y

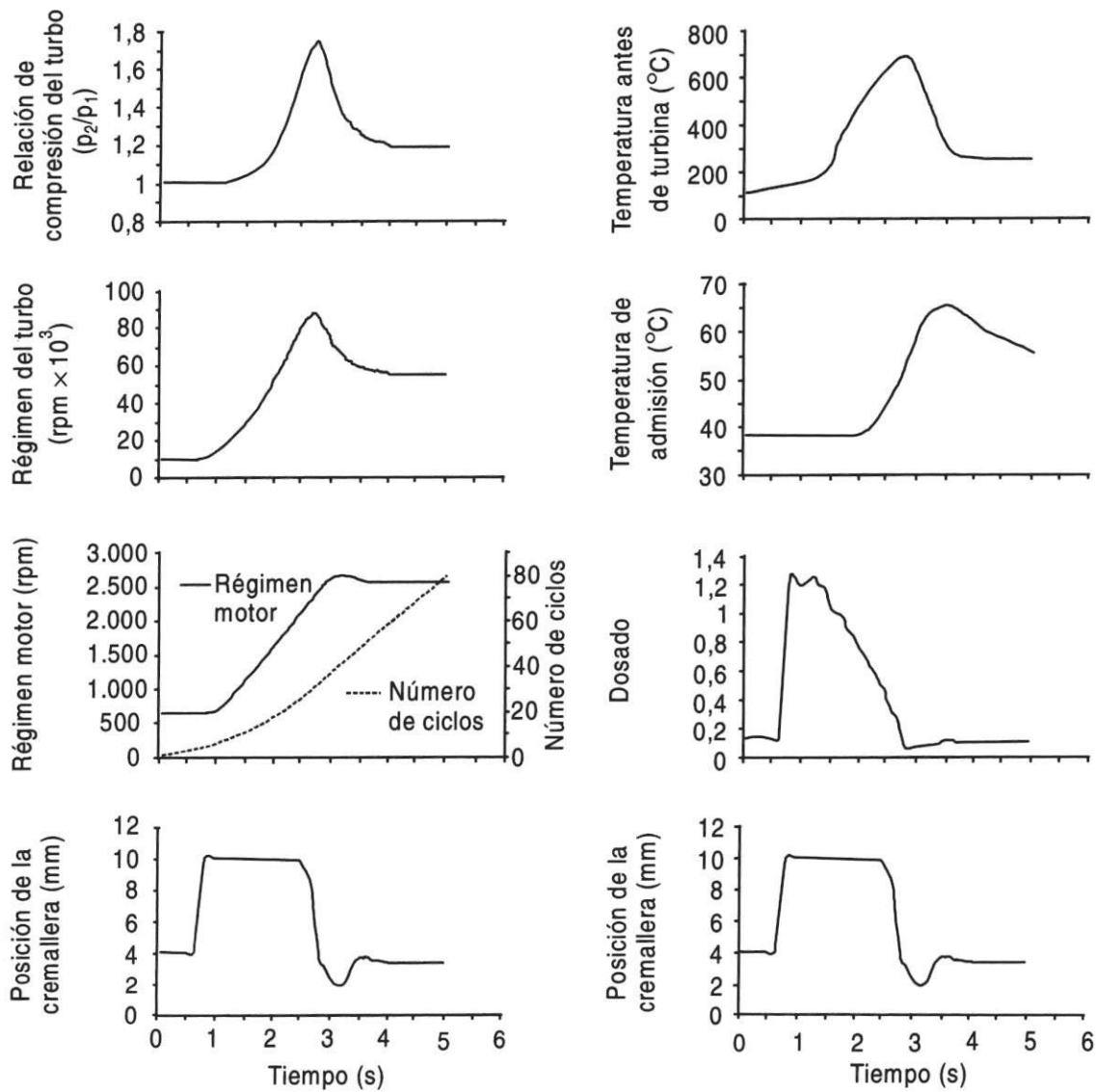


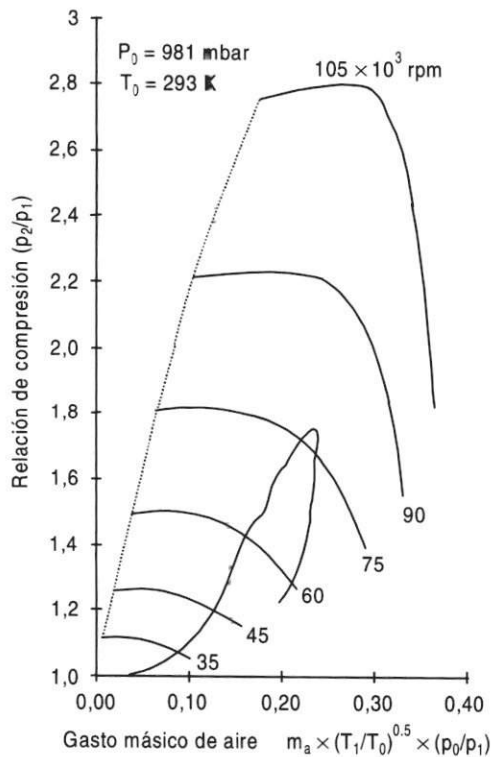
Figura 2 Respuesta del motor en régimen transitorio. Ensayo de aceleración libre

“dosado relativo”<sup>1</sup> = 0,14. El turbocompresor funciona a un régimen de 9.960 r.p.m. y una relación de compresión ( $p_2/p_1$ ) de 1,006. La cremallera está en la posición de 4 mm. En el momento  $t = 0,8$  s se lleva súbitamente el acelerador al máximo y se mantiene fijo en esa posición. La

cremallera se desplaza desde la posición del ralenti (4 mm) hasta la posición máxima (10 mm) en 0,2 s. El dosado (relación combustible-aire) aumenta instantáneamente alcanzando su valor máximo debido a que aumenta la masa de combustible inyectada. El dispositivo de control de humos por

1 Dosado relativo: es la relación combustible-aire de funcionamiento respecto a la relación combustible-aire estequiométrica. Un  $F_R = 1$  significa que el motor está quemando en proporciones estequiométricas. Si este valor es menor que 1 la mezcla es pobre (exceso de aire). Si es mayor que 1, la mezcla es rica (defecto de aire). Los valores normales en motores diesel para carga parcial están en torno a 0,15; no obstante, en plena carga este valor se limita a valores por debajo de 0,8 debido al exceso de formación de material particulado.

presión en el colector de admisión (*Boost-control*) había sido previamente desmontado, por esta razón se pueden alcanzar valores tan altos de dosado. La inyección de tal cantidad de combustible aumenta rápidamente la energía disponible en el escape. La temperatura en el escape antes de turbina crece 73 °C en medio segundo. Esto hace que el régimen del turbo empiece a aumentar antes, incluso, que el régimen del motor. La relación de compresión empieza a incrementar 0,4 s después del régimen del turbo, débilmente al principio, acelerándose luego cuando el turbo supera 60.000 r.p.m., en este momento el punto de funcionamiento del motor está dentro de la isla de máximo rendimiento en las curvas características del compresor (véase figura 3), para llegar a su máximo ( $p_2/p_1 = 1,74$ ) en un tiempo  $t = 2,7$  s, al mismo tiempo que el régimen del turbo ( $n_{TCm\acute{a}x} = 87.600 \text{ min}^{-1}$ ). En este punto, también la temperatura en el escape alcanza un máximo (690 °C).



**Figura 3** Superposición sobre las curvas del compresor del funcionamiento del motor durante la aceleración libre

Cuando la cremallera se ha estabilizado en su máximo, después de un segundo, el motor empieza a acelerar, aumenta su régimen de giro a partir del régimen de ralenti de forma lineal con el tiempo hasta que, pasados 2,1 s desde la aceleración, vuelve a decaer debido a la influencia del regulador de la bomba de inyección. El regulador de la bomba de inyección modifica la posición de la cremallera de tal modo que disminuye la entrega de combustible, impidiendo así que el motor gire por encima del régimen máximo (2.670 r.p.m.) aun manteniendo el acelerador al máximo. Este es un mecanismo típico de protección de los motores diesel.

En el ensayo, tras mantenerse durante 1,45 s, la posición de la cremallera retrocedió más de 6 mm en 0,4 s, para seguidamente oscilar durante un segundo hasta estabilizarse en su posición final. Desde el momento en el que el dosado relativo alcanza su máximo ( $F_R = 1,27$ ), y tras unas oscilaciones, su tendencia es a disminuir. Alcanza un mínimo cuando la cremallera llega por primera vez a su posición de equilibrio final.

El comportamiento de la temperatura de entrada a turbina durante el transitorio es controlado principalmente por el movimiento de la cremallera y por el flujo de aire. El incremento brusco inicial de la temperatura se debe al incremento de combustible. Luego la caída después de unos 2.79 s se debe a la respuesta del regulador; la reducción gradual se debe al incremento del gasto másico de aire. La misma explicación se aplica para el comportamiento de la caída del régimen de giro y de la relación de compresión del turbocompresor y para el régimen de giro del motor, la cual sin embargo se empieza a notar a los 3.29 s, es decir, medio segundo más tarde que las magnitudes anteriores.

La evolución de la temperatura en la admisión es mucho más lenta. No empieza a aumentar hasta que la relación de compresión es de 1,2 pasados 2 s y alcanza su máximo (65 °C) casi un segundo después que las otras magnitudes del turbo (la máxima relación de compresión de este turbocompresor está en torno a 2,8). Por esta razón, y debido a la



inercia del sistema, el régimen de giro máximo del cigüeñal se alcanza medio segundo más tarde que el del turbo, y cuando la cremallera está en su posición de mínima entrega.

En general, se aprecia que desde que se produce el desplazamiento brusco de la cremallera al inicio del ensayo, los valores medidos del turbo y del motor tienden a aumentar con una velocidad de reacción variable, hasta que la acción del regulador de la bomba de inyección vuelve a desplazar la cremallera. A partir de ese momento, las variables alcanzan su valor máximo y tienden a disminuir hasta estabilizarse en su nuevo punto de equilibrio.

### **Análisis del proceso de combustión**

De los 180 ciclos en el interior de la cámara de combustión, que se registraron durante el ensayo, se hizo una selección de aquellos más representativos, en función de las variaciones que mostraran las curvas de presión analizadas con el programa de diagnóstico experimental de la combustión en una inspección visual de cada curva registrada. Se escogieron 12 ciclos, los situados en las posiciones: 3, 5, 6, 10, 15, 18, 23, 30, 33, 40, 45 y 70. En las figuras 4 y 5 se puede observar la evolución de la presión en el cilindro y de la tasa de calor liberado aparente, respectivamente, durante el ensayo en régimen transitorio de aceleración libre.

En el ciclo 3 ( $t = 0,44$  s) el motor se encuentra al ralentí en régimen estacionario. En el ciclo 5 ( $t = 0,82$  s) la cremallera se ha desplazado a su posición de máxima entrega y el dosado está también en su máximo (por encima de 1,2). En este ciclo se aprecia el brusco aumento de presión en el cilindro. La presión máxima de combustión ha aumentado en más de  $4.000$  kPa de un ciclo a otro. En el ciclo 6 ( $t = 0,98$  s) la cremallera se ha estabilizado en una posición ligeramente inferior a la anterior y la presión máxima de combustión decae alrededor de  $1.000$  kPa. En los ciclos del 10 ( $t = 1,42$  s) al 30 ( $t = 2,66$  s) se distingue muy bien cómo hasta pasados  $360^\circ$  de ángulo de giro del cigüeñal no tiene lugar la combustión. Se puede ver el inicio tardío de la combustión como un segundo pico.

En la figura 5 se observa cómo influye el transitorio sobre las curvas de tasa de liberación de calor aparente. El incremento brusco de la cantidad de combustible entre el ciclo 3 y el ciclo 5 sin una respuesta inmediata del turbocompresor hace desplazar el inicio de la combustión por premezcla hacia la derecha un par de grados (de  $354$  a  $356$ ). A partir de aquí, y debido a la inestabilidad de la mezcla, el ángulo de inicio de la combustión empieza a oscilar hasta llegar a  $365^\circ$  en el ciclo 6 y disminuye luego hasta alrededor de los  $363^\circ$ . En el ciclo 33 (2,79 s), cuando actúa nuevamente el regulador disminuyendo bruscamente el gasto másico de combustible, se observa una fuerte disminución en la tasa de liberación de calor aparente, que se recuperará más tarde cuando el motor alcance las nuevas condiciones de régimen estacionario.

El análisis de la combustión durante el transitorio verifica las observaciones expuestas en su momento por Winterbone y Tennant [3]. Existe un deterioro de la combustión debido a la falta de un buen mezclado entre el aire y el combustible. Existe un desfase entre las cantidades óptimas de la mezcla que se puede explicar de la siguiente manera: al iniciar el transitorio se inyecta súbitamente (en 0,2 s) una cantidad considerable de combustible que no es compensada inmediatamente con el aire del compresor, lo que genera una riqueza excesiva de la mezcla. Por esta razón se produce una diferencia del orden de  $4.000$  kPa en la presión máxima de combustión entre los ciclos 3 y 5. Cuando empieza a actuar el regulador a los 2,5 s, el turbocompresor ya ha alcanzado unas relaciones de compresión elevadas (del orden 1,8) lo que descompensa también la mezcla debido a que se tiene más aire del necesario para el combustible inyectado.

### **Cambio repentino de carga**

En la figura 6 se observa como partiendo desde  $2.000$  r.p.m. sin carga hasta  $1.170$  kPa, el motor tarda del orden de 14 s en recuperar su estado estacionario final; en este período de tiempo su régimen de giro se reduce hasta  $1.600$  r.p.m. La temperatura en el escape ha aumentado del or-

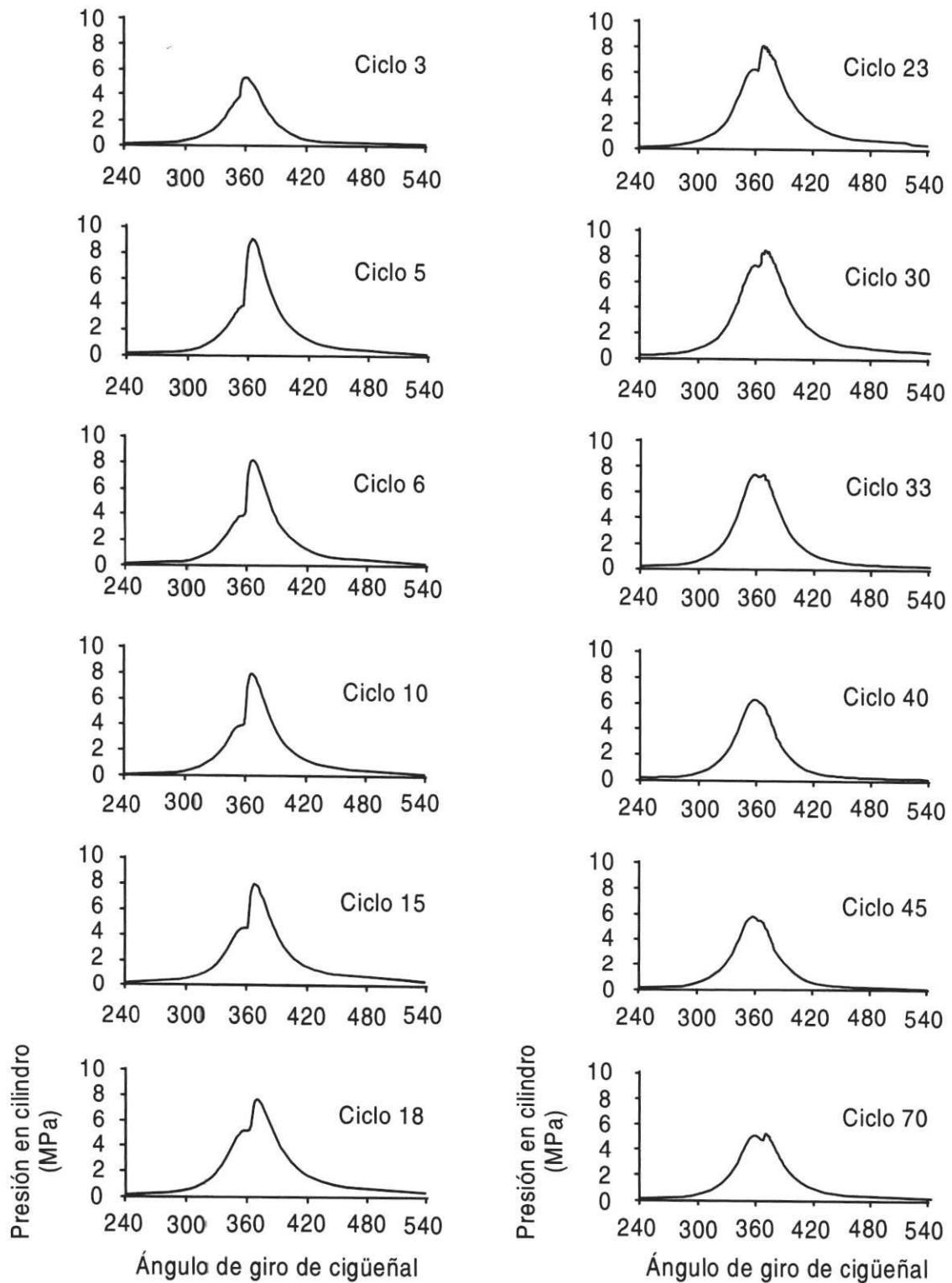


Figura 4 Evolución de la presión en la cámara de combustión durante un transitorio de aceleración libre

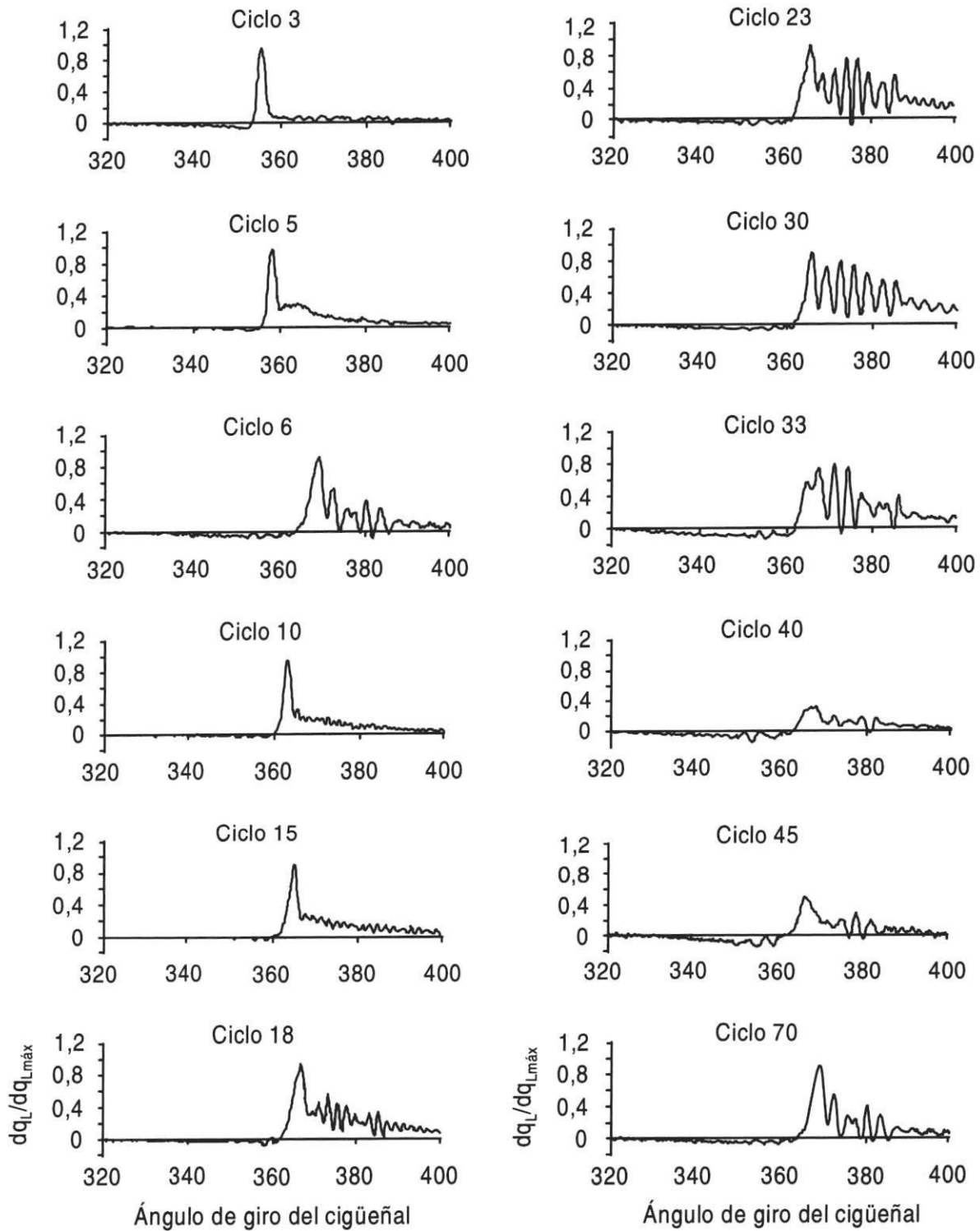


Figura 5 Evolución de la tasa de energía liberada en el cilindro durante un transitorio de aceleración libre



den de 400 °C, mientras que la temperatura en la admisión ha subido 30 °C. Cuando entra a operar bruscamente la carga sobre el motor, el régimen de giro del motor disminuye paulatinamente, la respuesta del turbocompresor es también

lenta, pero incrementa la masa de aire debido a la mayor energía disponible en el escape. El dosado relativo no supera en ningún caso el valor de 0,7, lo cual es un indicio de que no se genera mucho material particulado en el escape.

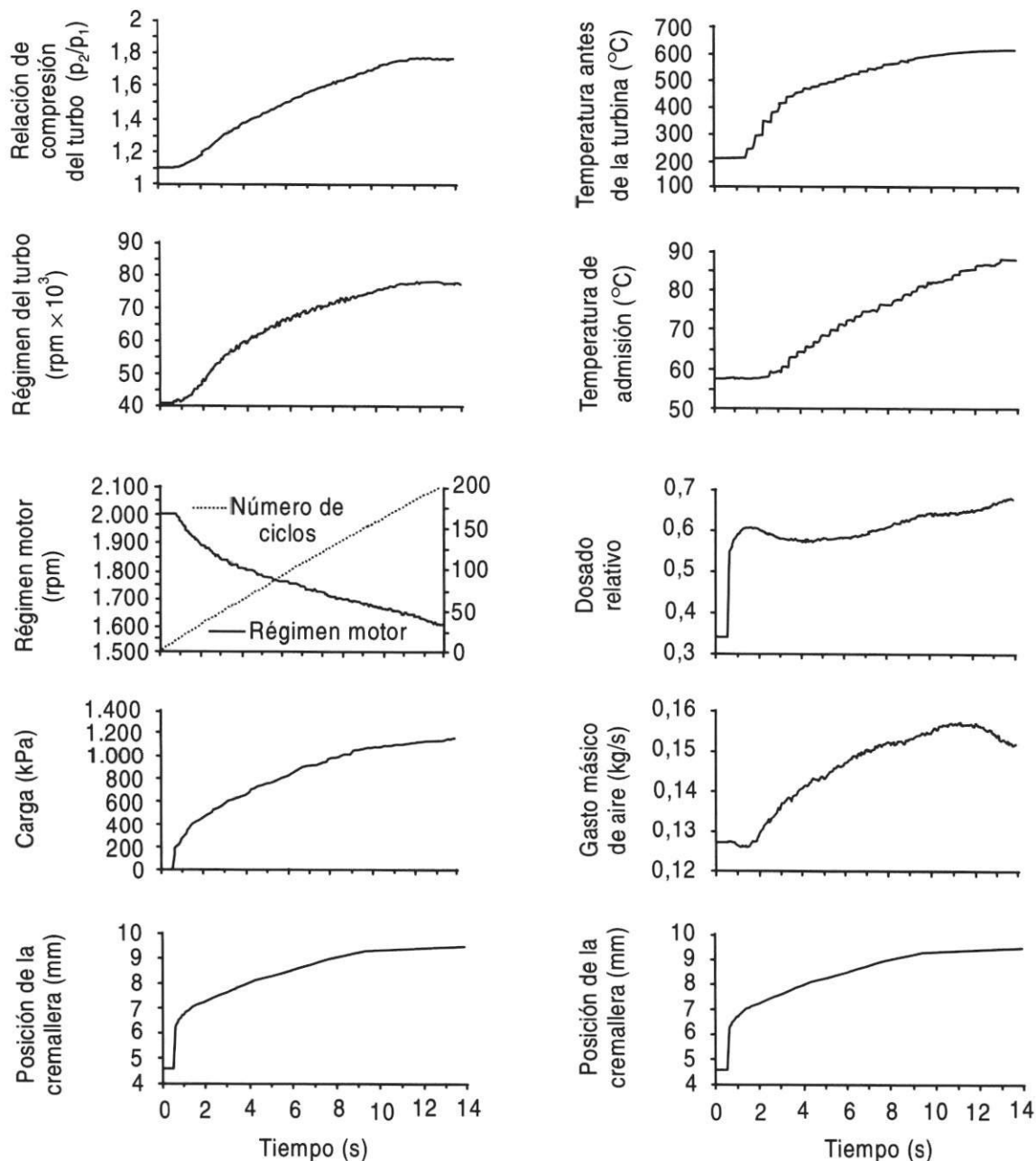
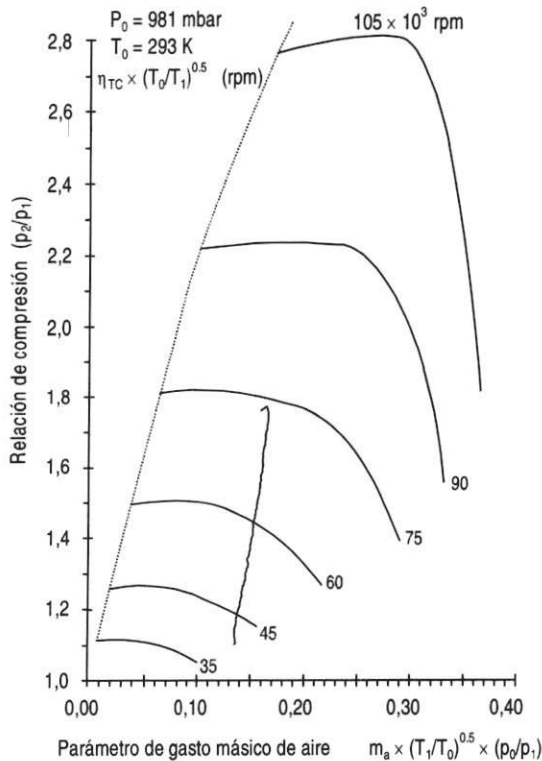


Figura 6 Transitorio de carga a 2.000 rpm. Desde 0 kPa hasta 1.170 kPa de presión media efectiva

En la figura 7 se ha superpuesto el funcionamiento del motor sobre las curvas características del compresor centrífugo. Se produce un incremento del gasto másico de aire debido a un aumento cercano al 40% en la relación de compresión y en el régimen de giro del turbocompresor. El punto de partida del ensayo se ubica sobre una relación de compresión cercana a 1,1 y un gasto másico de aire corregido cercano a los 0,14 kg/s. Cuando inicia el transitorio se observa una variación pequeña del gasto másico, mientras que se produce un fuerte cambio en la relación de compresión; el comportamiento es casi lineal con una pendiente muy aguda. El punto final se ubica dentro de la isla de máximo rendimiento del compresor (0,76) con un régimen de turbo corregido cercano a 75.000 r.p.m.



**Figura 7** Superposición sobre las curvas del compresor del funcionamiento del motor durante una variación repentina de carga

## Conclusiones

- Someter un motor diesel turboalimentado a condiciones de marcha agresivas (regímenes dinámicos) provoca un deterioro del proceso de combustión debido al enriquecimiento súbito de la mezcla aire-combustible, lo que se refleja en elevadas emisiones de material particulado a la atmósfera, típico de los motores diesel.
- En la aceleración brusca en vacío se observó que la bomba de inyección mecánica entregaba inmediatamente el combustible (0,2 s). Sin embargo, la respuesta lenta del turbocompresor (2,7 s más tarde) hizo que el dosado se incrementara a niveles anormales respecto al correcto funcionamiento de un motor diesel.
- Un cambio brusco de carga es bien soportado por el motor; en este caso no se produce un enriquecimiento sustancial de la mezcla, pero la respuesta del motor es mucho más lenta. El dosado relativo nunca supera 0,7, por lo que las emisiones de material particulado son más controladas.
- A diferencia del transitorio de aceleración libre, en el transitorio de carga el regulador se queda prácticamente en el mismo sitio una vez alcanzadas las condiciones estacionarias finales. Por esta razón no se observan las tendencias de subida y luego bajada tanto en los parámetros del turbocompresor como en los del propio motor.

## Referencias

1. Marzouk, M. y Watson, N. "Load acceptance of turbocharged diesel engines", *Proc. I. Mech. E.*, C54/78 (1978).
2. Winterbone, D.E., *et al.* "Transient response of turbocharged diesel engines" *SAE paper* No. 770122 (1977).
3. Winterbone, D.E. y Tennant, D.W.H. "The Variation of Friction and Combustion Rates During Diesel Engine Transients", *SAE paper* No. 810339 (1981).