

7. ACCIONES REALIZADAS.

7.1 Calibración de los Inyectores.

El consumo específico de combustible es un parámetro esencial en el funcionamiento del motor, por lo que es necesario conocer su valor en todo momento para poder valorar su rendimiento. Para ello es necesario caracterizar el comportamiento de cada uno de los inyectores y en cada sistema de inyección empleado, por lo que se determinó el caudal de inyección de cada uno de los inyectores en función del tiempo de duración del pulso de inyección.

La cantidad de gasolina inyectada en cada pulso de inyección tiene una gran dependencia del estado mecánico del inyector, debido a esto se caracterizaron los inyectores individualmente. También tiene una gran influencia la señal eléctrica de excitación, y al disponer de dos sistemas de generación de la señal los inyectores se calibraron por separado: la Jetronic de origen y el sistema de gestión no cartográfico. Finalmente, el otro parámetro básico a controlar es la presión de inyección, que en principio se podría mantener constante desconectando el regulador neumático de presión del combustible en la rampa de inyectores. Debido a las anomalías lógicas presentadas por el motor en estas condiciones, se optó por hacer las pruebas en los regímenes en que la presión de inyección era exactamente constante, esto es, 2 bares. La presión era registrada en todo momento por un manómetro colocado al efecto en el tapón drenador de la rampa de inyectores, como se explicó en el apartado 5.1.2.6.

7.1.1 Dispositivo experimental.

El dispositivo experimental para medir los caudales de los inyectores consistía en un quinto porta-inyector conectado en la rampa de inyectores del motor y que inyectaba sobre una probeta calibrada donde se tomaban las medidas. Cada uno de los inyectores del motor se conectaba precisamente en este quinto porta-inyector, funcionando el motor con sus cuatro inyectores. Al evaluar los inyectores fuera del colector del motor se corregía la imprecisión provocada por el vacío, ya que, en términos estrictos, el caudal inyectado depende no sólo de la presión y la duración del pulso de inyección, sino también de la presión relativa del medio donde se inyecta.

Al inyector a evaluar se le conectó un relé en serie con el cable de su señal de activación, de manera que mediante una señal analógica enviada por el ordenador se activaba y desactivaba este relé, controlando de esta manera exactamente los momentos de inicio y fin de la inyección.

En el ordenador se implementó (mediante software, figura 7.1) un contador de pulsos que recibía la señal de un encoder incremental del banco de pruebas conectado al cigüeñal del motor, que generaba 360 pulsos por vuelta. Dividiendo los pulsos contados por 360, se obtienen las vueltas del cigüeñal, que se correspondía con diferentes números de inyecciones según el sistema de inyección utilizado.

Con la Jetronic, los cuatro inyectores dan pulsos simultáneos para cada vuelta de cigüeñal, de modo que en el inyector evaluado se tiene una inyección por vuelta de cigüeñal. Por el contrario, con la inyección electrónica secuencial un mismo inyector sólo inyecta una vez cada dos vueltas de cigüeñal (una vez por ciclo), por lo que el número de inyecciones representa la mitad del número de vueltas del motor.

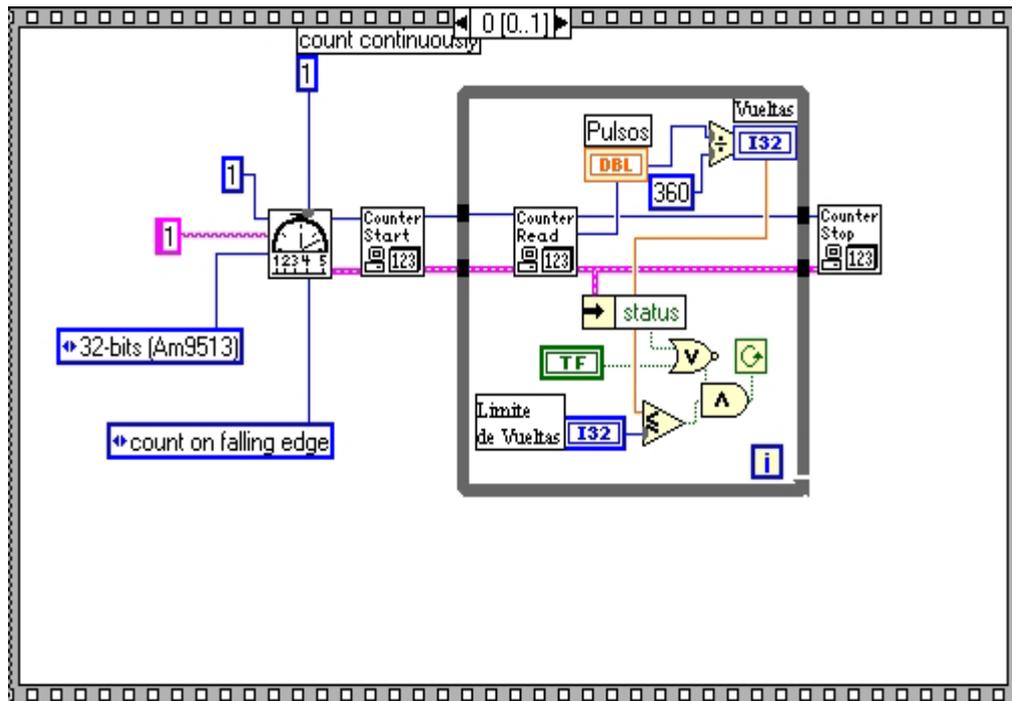


Figura 7.1: Contador de pulsos para la calibración de los inyectores.

La prueba se automatizó de manera que al poner en marcha el contador se envía una señal analógica que activa el relé del inyector a evaluar. Al contador se le fija un número de vueltas, y cuando llega a él, deja de contar y abre el relé, cesando la inyección. Con esto se asegura que los pulsos contados y las inyecciones coincidan exactamente, precisión imposible de conseguir de forma manual.

Para ambos sistemas de inyección se midieron 1000 inyecciones para diferentes pulsos de inyección, siempre a una presión de inyección constante de 2 bares.

Conociendo el caudal inyectado (Q_{iny}), el número de inyecciones (i), el pulso de inyección (t) y la densidad del combustible (ρ), ya se podía calcular el combustible inyectado por carrera C_i .

$$C_i = \frac{Q_{iny}}{i} \cdot \rho \quad (\text{miligramos / carrera}) \quad (7.1)$$

Posteriormente se tabularon los valores calculados de C_i respecto al pulso de inyección (t).

Las figuras 7.2 hasta 7.5 contienen las cuatro tablas comparativas del caudal inyectado por cada inyector, tanto en su instalación original con el sistema de inyección Jetronic como con la Inyección Electrónica desarrollada.

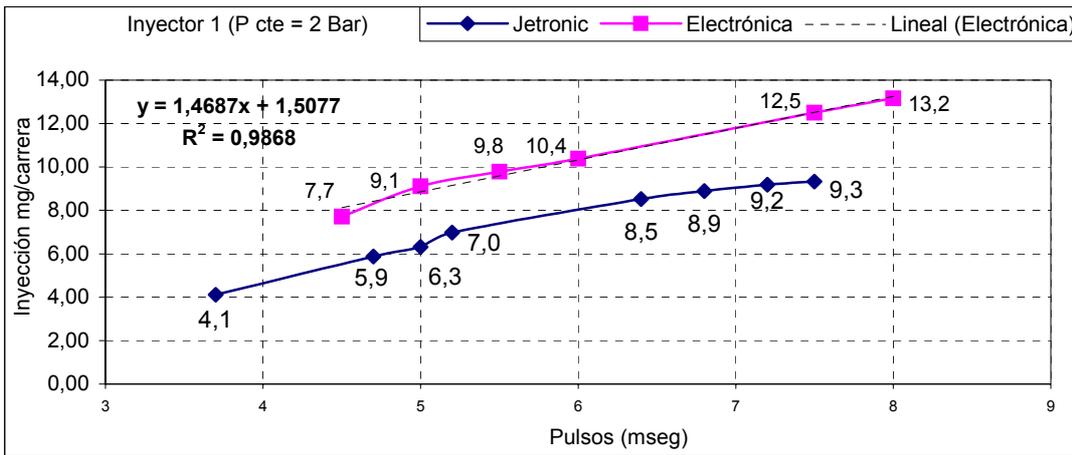


Figura 7.2: Calibración del inyector N° 1.

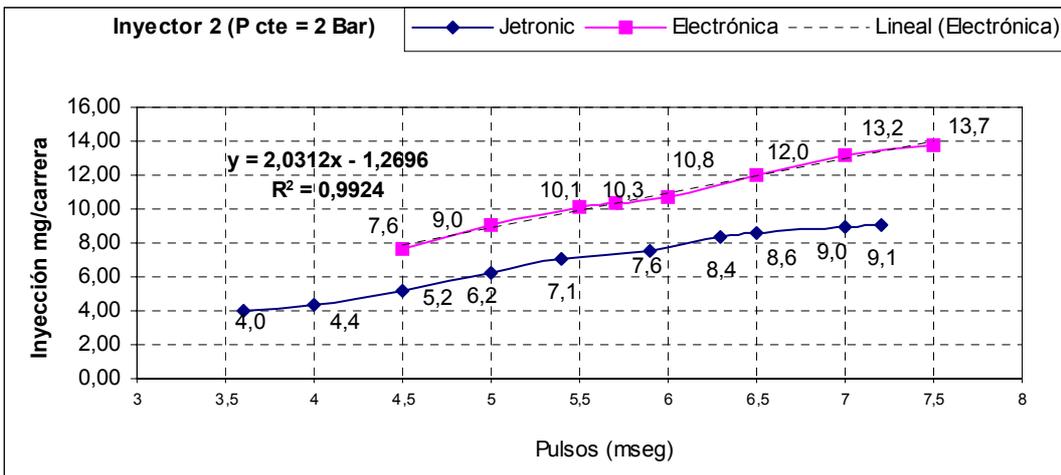


Figura 7.3: Calibración del inyector N° 2.

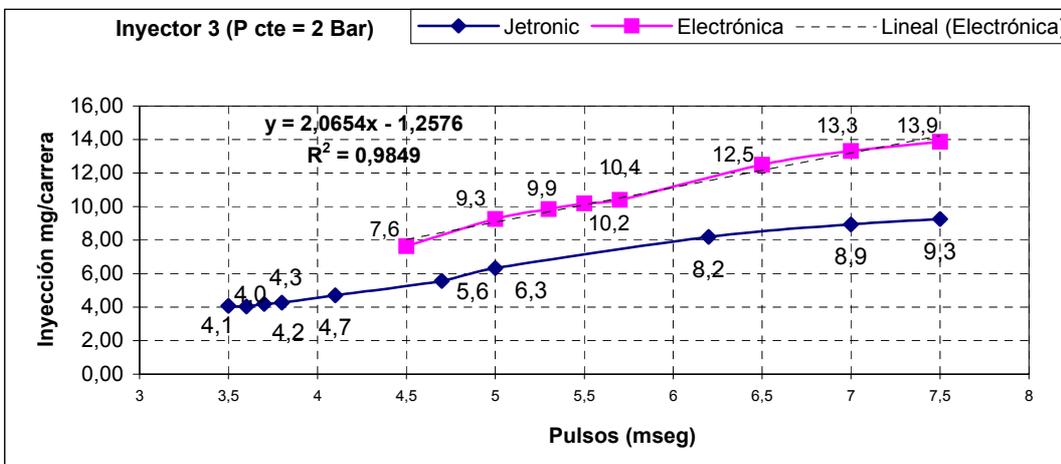


Figura 7.4: Calibración del inyector N° 3.

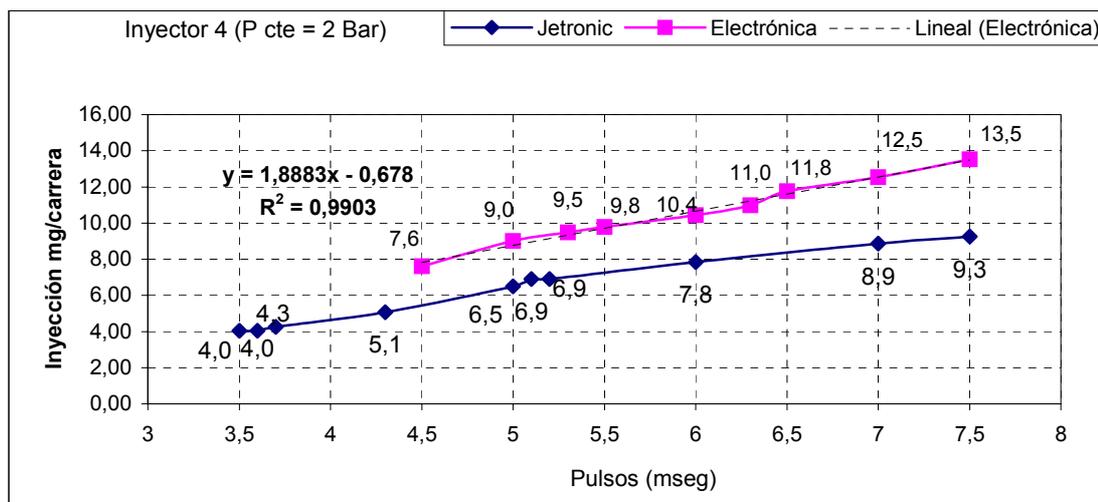


Figura 7.5: Calibración del inyector N° 4.

En estas figuras, además del caudal inyectado como función del pulso de inyección, se han representado también las ecuaciones resultantes del análisis de regresión de la curva de inyección del Sistema Electrónico para cada inyector, así como su tendencia. Este análisis de regresión se utilizó como base para el cálculo del consumo específico del motor, tal y como se explica en el capítulo 7.1.2 “Determinación del Consumo Específico del Motor”.

Para el trazado de la línea de tendencia de cada inyector se optó por un análisis de *regresión lineal*. Esto debido a que los inyectores del motor (del tipo EV 1.3 A) presentaban una relación lineal entre el caudal inyectado y el pulso de inyección en los catálogos de pruebas publicados por su fabricante, la firma BOSCH, como se muestra en la figura 7.6.

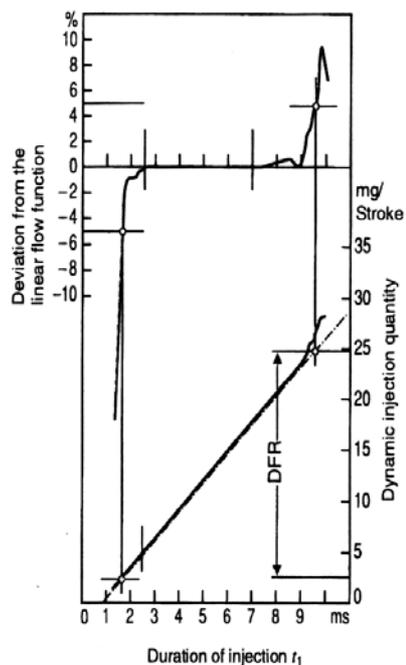


Figura 7.6: Caracterización original de los inyectores del motor de pruebas.

7.1.2 Validación de la Calibración.

Posteriormente se procedió a comprobar experimentalmente la exactitud de los valores del caudal inyectado determinados durante la calibración. Utilizando un caudalímetro en el circuito de alimentación de gasolina, que determina el tiempo que tardan en consumirse 100cc de combustible, se caracterizaron diferentes puntos de funcionamiento del motor y se calculó el consumo horario (G_h) en ese punto. La posterior comparación validaría la calibración.

➤ *Para el sistema de Inyección Jetronic:*

Parámetros de la prueba:

- RPM \Rightarrow 2530.*
- Potencia del Motor \Rightarrow 18,99 Kw.*
- Consumo de 100c.c. en 56,1 segundos.*
- Pulsos de inyección \Rightarrow 6 milisegundos.*

Aplicando (5.1) obtenemos $G_h = 4732.38$ g/h, y con (5.2) tenemos $g_e = 249.2$ g/Kw.h

➤ *Para el sistema de Inyección No Cartográfico Secuencial.*

Parámetros de la prueba:

- RPM \Rightarrow 2530*
- Potencia del Motor \Rightarrow 18,99 Kw.*
- Pulsos de inyección \Rightarrow 6 milisegundos.*
- Consumos:*
 - *1er Inyector: 8 miligramos / carrera.*
 - *2do Inyector: 7.58 miligramos / carrera.*
 - *3er Inyector: 8 miligramos / carrera.*
 - *4to Inyector: 7.84 miligramos / carrera.*

Considerando que es una inyección secuencial, tenemos que para 2530 r.p.m. habrá 151800 inyecciones por hora. Sumando los consumos de cada inyector tendremos:

$$G_h = 151800 \cdot (8 + 7.58 + 8 + 7.84) = 4769.55 \text{ g/h} \quad (7.2)$$

Comparando ambos consumos horarios obtenemos una diferencia de tan sólo **0.049 litros/h**, o sea, menos de un uno por ciento de diferencia, lo que demuestra que la calibración de los inyectores es correcta y fiable.

7.1.3 Determinación del Consumo Específico del Motor.

Con todos los datos experimentales se obtuvo una caracterización de cada uno de los cuatro inyectores con los dos sistemas de gestión. Mediante un análisis de regresión lineal se obtuvo una ecuación para cada inyector en la que se relacionan los miligramos inyectados en cada pulso en función de la duración en milisegundos del mismo.

Estas cuatro ecuaciones se incluyeron en el software de cálculo (figura 7.7), de modo que al conocer el consumo de cada inyector en cada ciclo se puede calcular el consumo horario del motor. Con los datos del par y el régimen del motor, se calculó el consumo específico instantáneo que se visualiza continuamente expresado en g / Kw h.

Para realizar este cálculo no se promedian los valores de cada uno de los inyectores, sino que se tratan por separado y se suman para evitar imprecisiones.

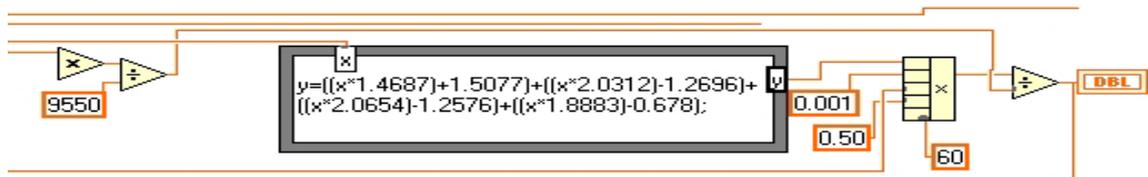


Figura 7.7: Cálculo del consumo específico de combustible en el software de control.

7.2 Plan de Ensayos sobre el Motor.

Seguido se describe la estructura organizativa de todas los ensayos efectuados en el motor de pruebas, gestionado primero por su sistema Jetronic y luego por la electrónica de control, así como sus diferentes etapas. En este capítulo sólo se describe la secuencia de estas pruebas, los resultados y las conclusiones derivadas de ello, se describen posteriormente en los capítulos 8 de Resultados y 9 de Conclusiones respectivamente.

7.2.1 Sistema de Inyección Cartográfico y Simultáneo.

Las pruebas experimentales sobre el motor con su sistema original de gestión de la inyección (LU-2 Jetronic) se dividieron en 3 etapas y en ese orden, las cuales fueron:

1º. Evaluación original del Motor de Pruebas:

En esta evaluación se registraron todos los parámetros de funcionamiento del motor en estacionarios, o sea, sus prestaciones, consumo y emisión de contaminantes sin alterar ninguna de las señales de los sensores y actuadores del sistema. Debido a la importancia de la temperatura del motor en su comportamiento, esta se mantuvo constante para todas las pruebas en un margen de valores entre 90 y 95 °C. La tabla 7.1 resume todos los parámetros evaluados en esta primera prueba.

Punto de Operación.	Prestaciones.	Contaminantes.	Consumo.
Mariposa desde 10° hasta 90°, evaluándose cada 10°. RPM desde 1250 hasta 5130, evaluándose cada 350 rpm aproximadamente.	Par (Nm), Potencia (Kw), RPM.	CO ₂ (%), CO (%), HC sin quemar (p.p.m).	Consumo horario (Kg/h), Consumo específico (g.Kw/h), Pulsos de inyección (mseg), Composición de la mezcla (A/F).

Tabla 7.1: Parámetros evaluados en el Motor de pruebas.

2°. Ajuste Estequiométrico de los Pulsos de Inyección.

Luego del estudio de los resultados de la caracterización original del motor de pruebas, se procedió a repetir las mismas pruebas también en estacionarios, pero esta vez con cambios importantes en su gestión. En esta segunda etapa se mantuvo constante el factor Composición de la Mezcla (A/F) en un valor de $14,57 \pm 0,1$. En el capítulo 5.1.4.2 se describen las actuaciones necesarias para estas modificaciones. Estas pruebas se efectuaron con el objetivo de comparar el comportamiento real del motor con su misma actuación forzando siempre la cantidad del combustible inyectado de forma que la mezcla siempre fuera estequiométrica.

3°. Comportamiento del Motor en el Ciclo Europa de conducción.

Las pruebas sobre el motor en las dos primeras etapas se efectuaron siempre en condiciones estacionarias. En esta tercera etapa se evaluó el comportamiento del motor en regímenes transitorios, tomando como referencia el referido ciclo de conducción en sus dos etapas. En el capítulo 7.3.1 se describe este ciclo. Seguido se analizan las condiciones de las pruebas del motor durante los transitorios del ciclo, debido a que los estacionarios ya se incluían en las pruebas de la 1ª etapa.

Para la simulación de cargas inerciales en un motor es necesario que el banco de pruebas sea de tipo inercial, ya que las cargas que debe oponer al motor deben ser variables respecto a su velocidad de giro. Esto es, si las cargas representan la resistencia total al movimiento del vehículo (rodadura, aerodinámica e inercia), la resistencia inercial, que es la más importante durante los transitorios positivos y negativos, debe variar respecto a la aceleración del vehículo, la cual guarda una relación lineal con la variación de las r.p.m del motor si consideramos una transmisión mecánica y una misma marcha conectada. Debido a que el banco de pruebas utilizado no puede simular una variación de la carga siguiendo una función exacta respecto a las r.p.m. del motor, durante las pruebas en transitorios se determinaron los estados iniciales y

finales del motor para cada recorrido en los transitorios del ciclo así como su duración, resultando imposible simular con exactitud la variación del par respecto a las r.p.m en cada recorrido.

Utilizando las ecuaciones 7.4 y 7.6 se determinó el par necesario a desarrollar por el motor, y mediante la ecuación 7.3 la correspondencia entre la velocidad lineal del vehículo en Km/h (especificada en el ciclo) y las r.p.m. del motor. Con estos parámetros se definieron los estados iniciales y finales del motor para cada trayecto, los cuales se resumen en la tabla 7.2. En la misma tabla, la acción “desembrague” representa un cambio de marchas en el vehículo hacia la marcha inmediata superior, mientras que la columna “Recorrido”, se refiere a las coordenadas de tiempo de la figura 7.9 y cuyos trayectos están resaltados en color rojo.

Etapa del Ciclo Europa	Estado Inicial		Estado Final		Tiempo (seg)	Recorrido (seg)
	Par (Nm)	RPM	Par (Nm)	RPM		
Primera Etapa.	Ralentí		32,04	1844	4	11-15
	Ralentí		22,54	1844	6	49-55
	Desembrague 4,8	Desembrague 1400	25,66	2216	6	55-61
	Ralentí		22,54	1844	6	117-123
	Desembrague 4,8	Desembrague 1200	20,9	2392	9	123-132
	Desembrague 4,8	Desembrague 1400	15,01	2297	11	132-143
Segunda Etapa.	Ralentí		19,48	4926	20	20-40
	Desembrague 4,8	Desembrague 3389	17,6	4751	21	40-61
	4,8	3413	18,56	4751	13	188-201
	Desembrague 6,27	Desembrague 3216	17,2	4603	35	251-286
	Desembrague 10,06	Desembrague 3382	21,53	4048	20	316-336

Tabla 7.2: Estados iniciales y finales del motor durante los ensayos en transitorios.

7.2.2 Sistema de Inyección No Cartográfico y Secuencial.

Continuando la experimentación sobre el motor, se conmutó hacia la gestión no cartográfica, tomando ella la gestión del motor.

4°. Comportamiento general del Motor en Estacionarios y Transitorios.

Antes de proceder a evaluar en detalle el comportamiento del motor y su nueva gestión no cartográfica, era necesario comprobar primero si efectivamente todo funcionaba normalmente. En esta cuarta etapa el motor se sometió a diferentes estados de operación sin un orden prefijado, o lo que es lo mismo, una conducción totalmente aleatoria.

Los oscilogramas de la figura 7.8 muestran el registro total del comportamiento del motor durante una sesión de pruebas. Las leyendas de los oscilogramas indican todos los parámetros registrados.

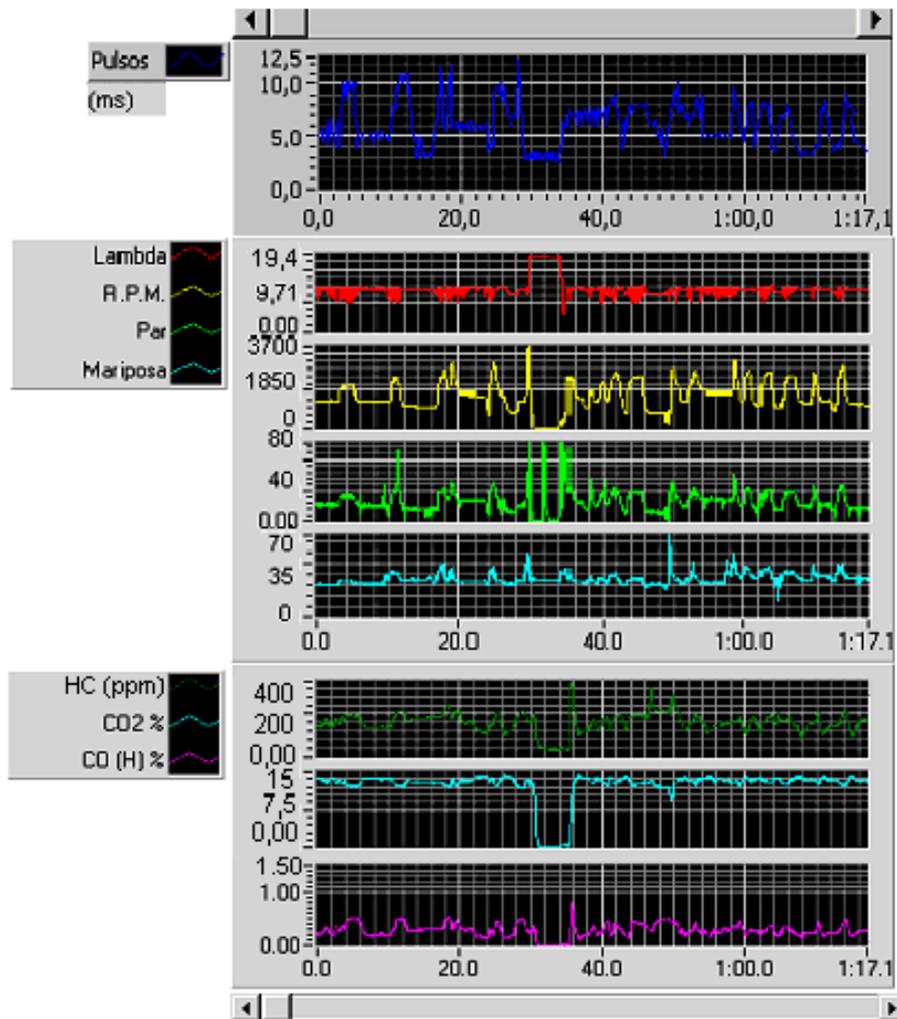


Figura 7.8: Comportamiento del motor durante pruebas aleatorias.

5°. Evaluación del Motor en Estacionarios del Ciclo Europa.

La siguiente fase de pruebas consistió en evaluar el motor en estacionarios. Aceptando que durante los estados estacionarios de un vehículo la fuerza total de resistencia al movimiento está constituida por las resistencias a la rodadura (constante) y la resistencia aerodinámica (proporcional al cuadrado de la velocidad lineal del vehículo), se concluye que la mayor resistencia será en la zona de mayor velocidad lineal del vehículo.

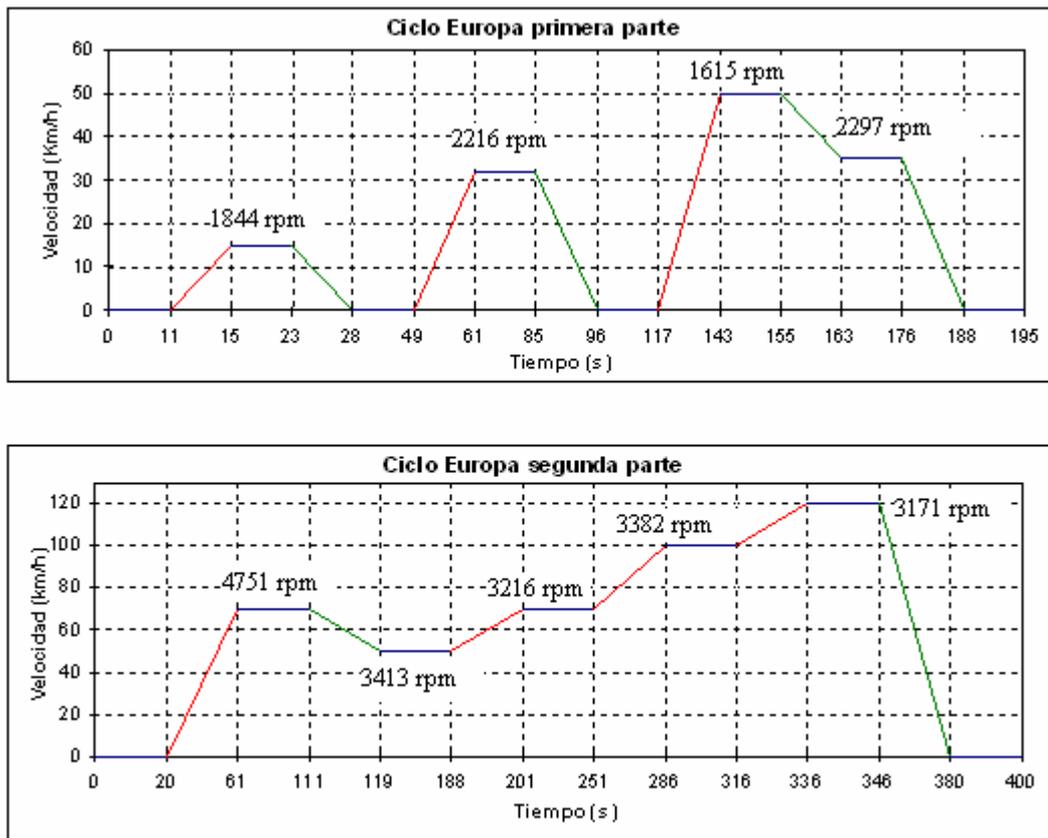


Figura 7.9: Recorrido del vehículo en el ciclo Europa. Rojo: Transitorios positivos, Azul: Estacionarios, Verde: Transitorios negativos

En la figura 7.9 se representan en trazo azul los estacionarios de ambas etapas del ciclo Europa. La mayor velocidad lineal se desarrolla en el tramo 336-346 segundos de la segunda etapa. Esta velocidad de 120 Km/h representan 3171 rpm del motor con la quinta marcha conectada, siguiendo las normas del ciclo. Aplicando la ecuación 7.4 y posteriormente 7.6, se obtiene que el par necesario que debe entregar el motor es de sólo 15,96 Nm, en un pavimento horizontal y en perfecto estado. Dado que este valor es relativamente pequeño, las pruebas en estacionarios abarcaron no sólo los estacionarios del ciclo, sino que se le aplicaron mayores cargas al motor de pruebas, como se muestra en el apartado 7.3.3.2.

6º. Evaluación del Motor en Transitorios del Ciclo Europa.

En la última fase de la etapa de experimentación se sometió el motor de pruebas con la gestión no cartográfica y secuencial a diferentes estados transitorios. En esta fase se recurrió nuevamente a los transitorios del mismo ciclo y en sus dos etapas, con el objetivo de comparar ambas actuaciones posteriormente, por lo que esta prueba se repitió exactamente como se describió en la tercera fase.

El ciclo europeo de conducción no intenta evaluar las prestaciones dinámicas de un vehículo sino sólo su emisión de contaminantes, por lo que no es muy exigente en las prestaciones solicitadas al motor. Debido a esto, una vez finalizadas las comprobaciones siguiendo los transitorios del ciclo, el motor se sometió a transitorios con mayores cargas, comentándose estas en el apartado 7.3.3.3.