

8. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En el presente capítulo se evalúa el comportamiento de la gestión electrónica no cartográfica en varios estados de funcionamiento del motor de pruebas. Inicialmente se evalúa la respuesta del motor en estados estacionarios ajustando “manualmente” sus pulsos de inyección de forma que su combustión sea siempre estequiométrica. Posteriormente se evalúa la actuación del sistema de inyección no cartográfico y secuencial.

La evaluación del sistema de inyección no cartográfico y secuencial se efectúa en regímenes estacionarios y transitorios del ciclo europeo de conducción. Los estados seleccionados para la comparación han sido los más exigentes (en cuanto a prestaciones dinámicas) del ciclo en sus dos etapas, tanto para estacionarios como transitorios.

8.1 Ajuste Estequiométrico de los Pulsos de Inyección.

Como resultado del ajuste efectuado a los pulsos de inyección, siempre en *condiciones estacionarias*, se puede observar que no sólo disminuye el consumo de combustible y la emisión de contaminantes del motor, sino que inclusive se incrementa en algunas zonas el par entregado por el motor.

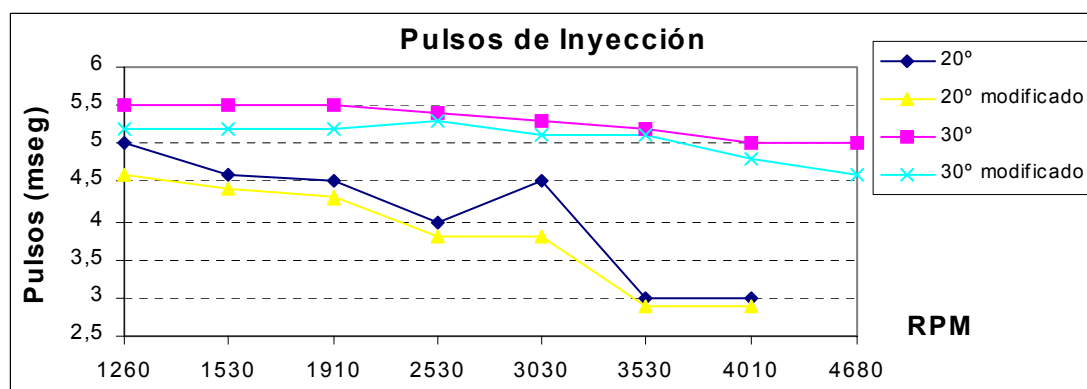


Figura 8.1: Pulsos de Inyección antes y después de la modificación.

En la figura 8.1 se muestra comparativamente la duración de los pulsos de inyección antes y después del ajuste, indicándose en la leyenda de la misma la abertura de la mariposa de gases del motor. Debe destacarse que para una abertura de la mariposa de 20° la mayor diferencia entre los pulsos la encontramos a medianas vueltas, siendo esta de casi un milisegundo, la cual es una cantidad significativa e incluso audible en el funcionamiento del motor. Para una abertura de 30°, el funcionamiento propio del motor era más próximo a la estequiometría, estando la mayor diferencia a altas vueltas, donde fue necesario un ajuste en el pulso de inyección de 0,5 milisegundos.

Con la variación de los pulsos de inyección y, por tanto, el combustible inyectado, se obtuvo una composición de la mezcla muy cercana a la estequiométrica en todo el rango de trabajo del motor estudiado, como se muestra en la figura 8.2.

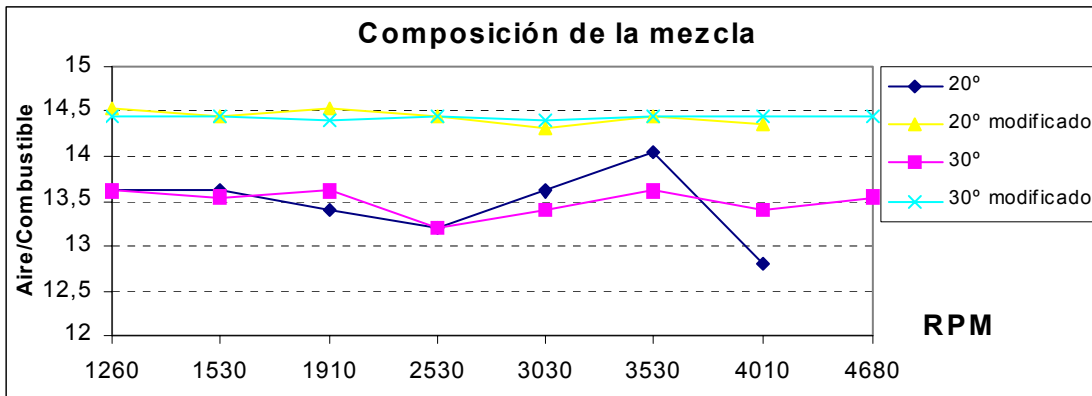


Figura 8.2: Composición de la mezcla de trabajo.

La utilización de una mezcla aire combustible prácticamente estequiométrica trajo consigo una mejoría en el proceso de combustión del motor, por lo que se logró inclusive incrementar el par entregado en algunas zonas de trabajo del motor de pruebas (figura 8.3).

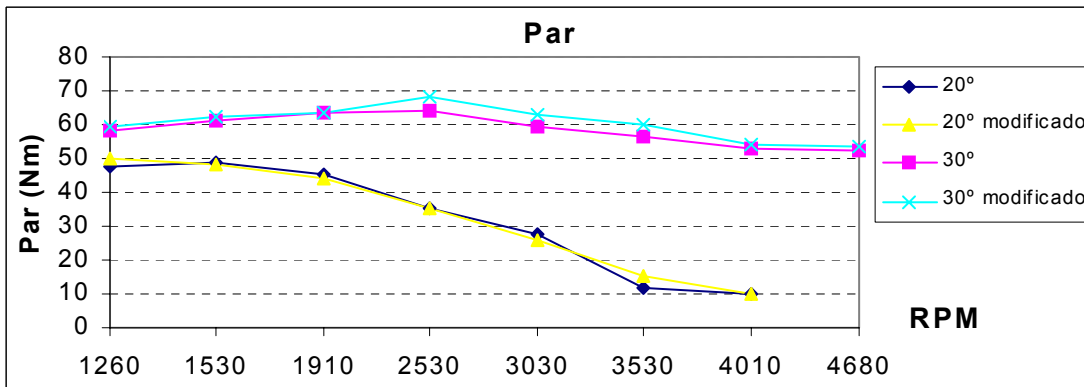


Figura 8.3: Par entregado por el motor.

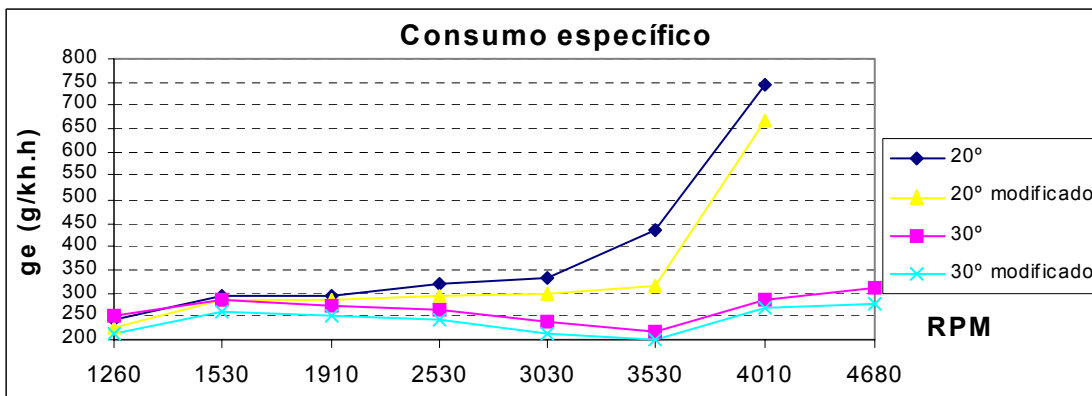


Figura 8.4: Consumo específico del motor.

La obtención de un mismo par (en algunos casos inclusive superior) con menos combustible y para las mismas RPM, lógicamente disminuyó el consumo específico de combustible, mostrado en la figura 8.4.

Al experimentarse una mejoría evidente en el proceso de combustión, era lógico esperar una disminución de los contaminantes emitidos por el motor, principalmente de los HC sin quemar, ya que se disminuía el combustible inyectado. La figura 8.5 muestra una importante disminución del monóxido de carbono emitido, pudiéndose apreciar que se obtuvieron niveles estables de emisión de sólo 0,1 %. La figura 8.6 muestra una considerable reducción también de los hidrocarburos sin quemar emitidos al exterior en los gases de escape. Se señala que durante estas pruebas no se varió el momento de inicio de la inyección, con lo cual podría reducirse aún más la emisión de HC sin quemar, ya que el *momento de inicio de la inyección es el principal parámetro ajustable que influye en la emisión de este contaminante*.

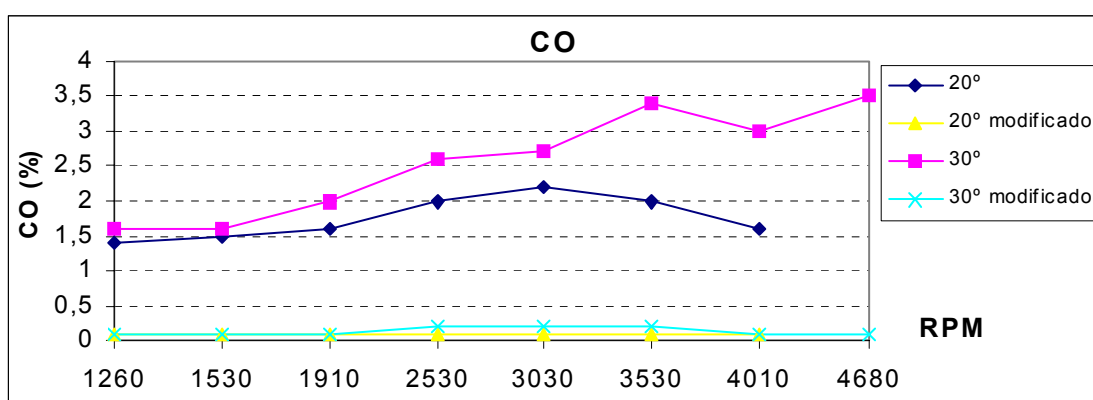


Figura 8.5: Emisión de CO en los gases de escape.

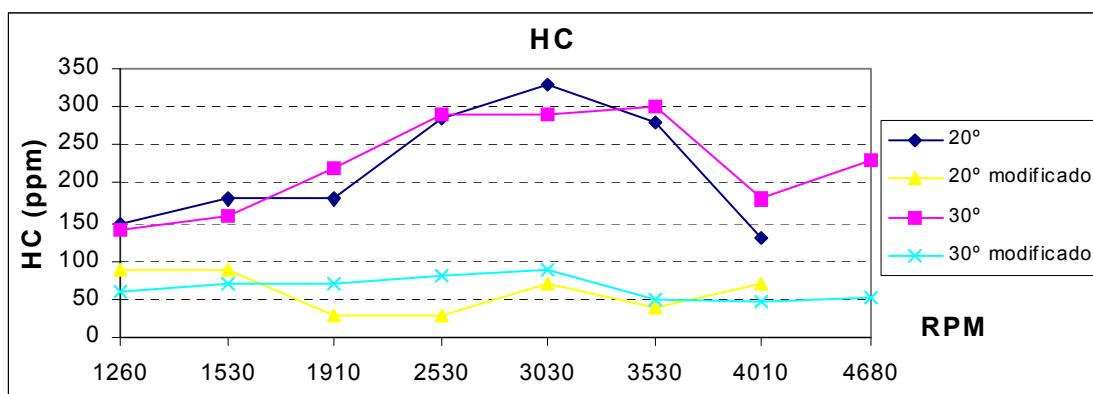


Figura 8.6: Hidrocarburos sin quemar emitidos al exterior en los gases de escape.

8.2 Sistema de Inyección en el Colector, No cartográfico y Secuencial.

8.2.1 Regímenes Estacionarios.

Igualmente en condiciones estacionarias, pero con el ajuste dinámico de los pulsos de inyección, se evaluó la actuación del sistema no cartográfico en dos estados estacionarios. El primero representa el trayecto desde los 336 a los 346 segundos del ciclo Europa en su segunda fase, siendo el mismo el estacionario más exigente de este ciclo. El segundo estado es aún más exigente (no está contemplado en el ciclo Europa), y representa la marcha del motor para medianas vueltas y medianas cargas.

8.2.1.1 Ciclo Europa. Estacionario 336-346 segundos 2ª Etapa.

La figura 8.7 presenta la variación de los principales parámetros del comportamiento dinámico del motor de pruebas para este estado, mientras que la figura 8.8 muestra comparativamente la emisión de contaminantes para este mismo estacionario.

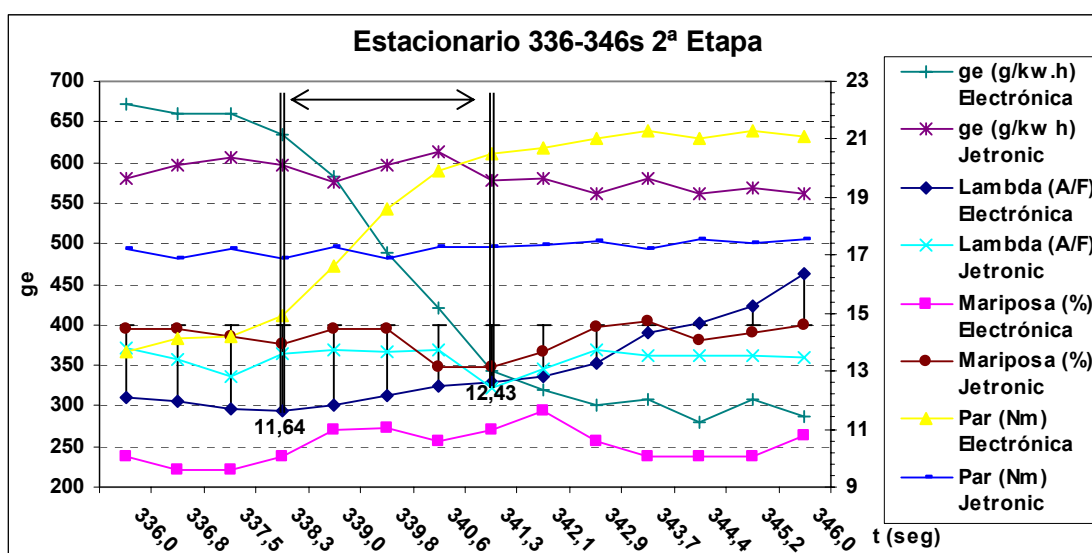


Figura 8.7: Trayecto en estacionario 336-346 segundos de la segunda fase del ciclo Europa de conducción. Parámetros dinámicos.

Para este estado (figura 8.7), la evolución del par de la gestión Jetronic fue prácticamente estable alrededor de los 17 Nm, con una calidad de mezcla rica y un consumo específico elevado en todo el estacionario.

Con el ajuste variable de los pulsos de inyección del sistema no cartográfico, que en estacionarios se efectúa en función exclusivamente de la composición de la mezcla, se mejoró notablemente el comportamiento del motor. El gráfico de la figura 8.7 muestra una tendencia de la composición de la mezcla hacia la estequiometría. En esta tendencia se aprecia, a través de las barras del error (en color negro y respecto a 14,57) de la lambda de la gestión electrónica, que la variación de los pulsos para el ajuste estequiométrico no es constante, sino que disminuyen en la medida que la lambda se acerca al valor de estequiometría.

En la misma figura 8.7 se resalta la zona en la que, para un ajuste de la composición aire-combustible de la mezcla desde 11,64 hasta 12,43, se registró un notable incremento del par así como una disminución significativa del consumo específico del motor.

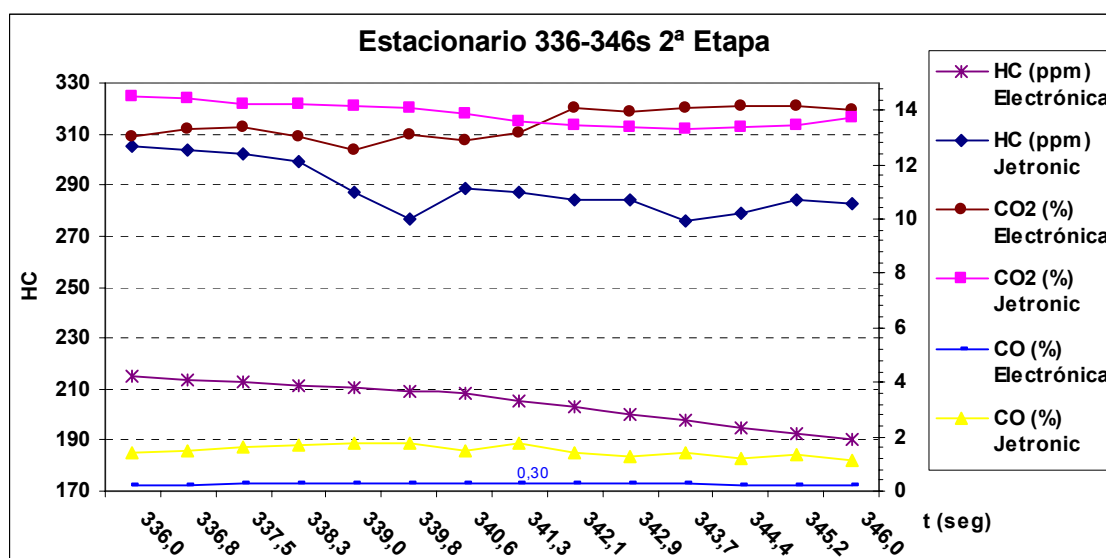


Figura 8.8: Trayecto en estacionario 336-346 segundos de la segunda fase del ciclo Europa de conducción. Parámetros contaminantes.

En la figura 8.8 se registran los contaminantes emitidos por ambas gestiones en el mismo estacionario. Los HC sin quemar expulsados por la gestión no cartográfica son significativamente inferiores que los de la gestión Jetronic, llegando a alcanzar, al final del estacionario, una diferencia de 93 ppm entre ambas gestiones. El CO₂ emitido por la gestión no cartográfica es inferior que el de la Jetronic hasta el segundo 341 aproximadamente, justo donde comienza un acercamiento más acelerado hacia la estequiometría. Lo anterior se aprecia claramente en el comportamiento de la mezcla de la gestión electrónica no cartográfica en la figura 8.7, a partir del segundo 341. A partir de este momento, la emisión de CO₂ de la gestión no cartográfica es superior. En todo el estacionario, la gestión no cartográfica registró menores valores de porcentaje de CO emitidos, siendo el valor máximo en todo el estacionario de tan sólo 0,3 %.

8.2.1.2 Estacionario medianas vueltas y medianas cargas.

Al incrementar la carga manteniendo las mismas condiciones que el estado anterior, se registraron los comportamientos mostrados en las figuras 8.9 y 8.10. Referido a la figura 8.9, se aprecia que el motor entregó un par mayor cuando estaba gestionado por Jetronic, pero a expensas de un mayor consumo de combustible (mezcla rica) que no justifica el excesivo consumo específico de combustible del motor.

Es interesante en esta misma figura el comportamiento de la lambda de la gestión Jetronic, convertida en una oscilación continua alrededor de un valor de equilibrio (*chattering*). Este valor de equilibrio se muestra como su curva de valor medio, con un valor de 12.9. Basándonos en valores picos del comportamiento de la lambda igual a 14.071, obtenemos que el *chattering* presenta desviaciones de un 9%.

El cálculo de la media móvil de la curva de la lambda de la gestión Jetronic se ha hecho de la forma:

$$F_t = \frac{A_t + A_{t-1} + \dots + A_{t-n+1}}{n} \quad (8.1)$$

Siendo número de puntos en la línea de tendencia de la media móvil igual al número de puntos en la serie menos el número especificado para el período, el cual es igual a 2 en nuestro caso.

Esta oscilación en ningún caso podría considerarse una oscilación provocada estratégicamente alrededor de la *ventana del catalizador*, ya que esta estrategia de protección del catalizador sólo se justifica si se alterna consecutivamente entre mezcla rica y pobre. C.D.Falk y J.J Mooney lo demuestran en [121], donde presentan un estudio detallado acerca de este fenómeno.

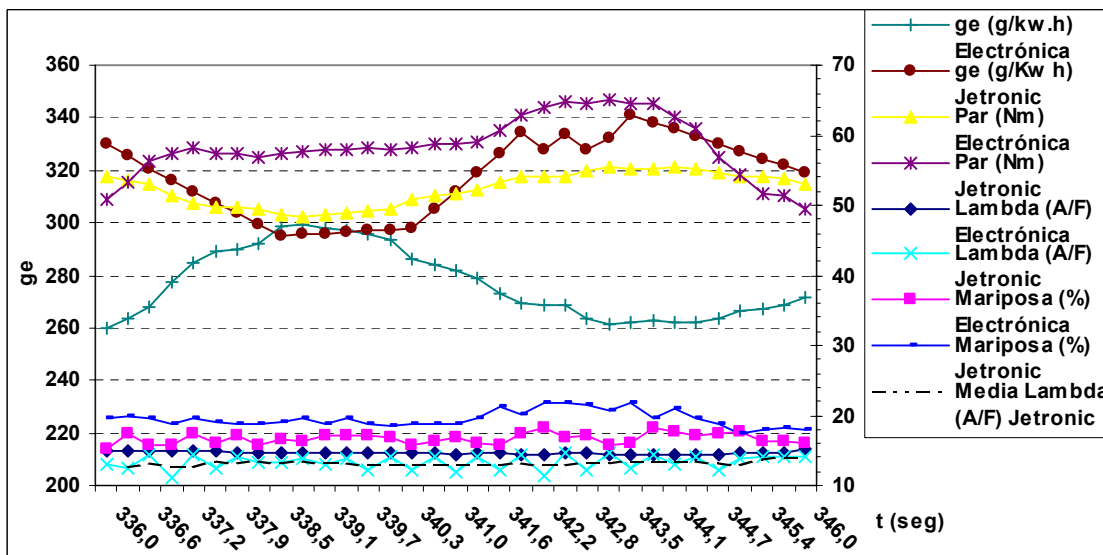


Figura 8.9: Régimen estacionario medianas vueltas y medianas cargas. Parámetros dinámicos.

Aunque el par entregado por el motor durante la gestión no cartográfica fue menor (figura 8.9), es de destacar que, en este período de ajuste, las pequeñas oscilaciones del par se corresponden con el comportamiento del consumo específico. Esto es, a partir del segundo 340, se observa que el ligero incremento del par trae consigo una disminución del consumo específico de combustible, lo cual justifica, desde el punto de vista del consumo, cualquier incremento del consumo horario que pudiese producirse. Por su parte, el comportamiento de la gestión Jetronic no justifica el incremento del par desde este punto de vista, ya que fue a expensas de un excesivo incremento del combustible inyectado, como lo demuestra el comportamiento de su consumo específico.

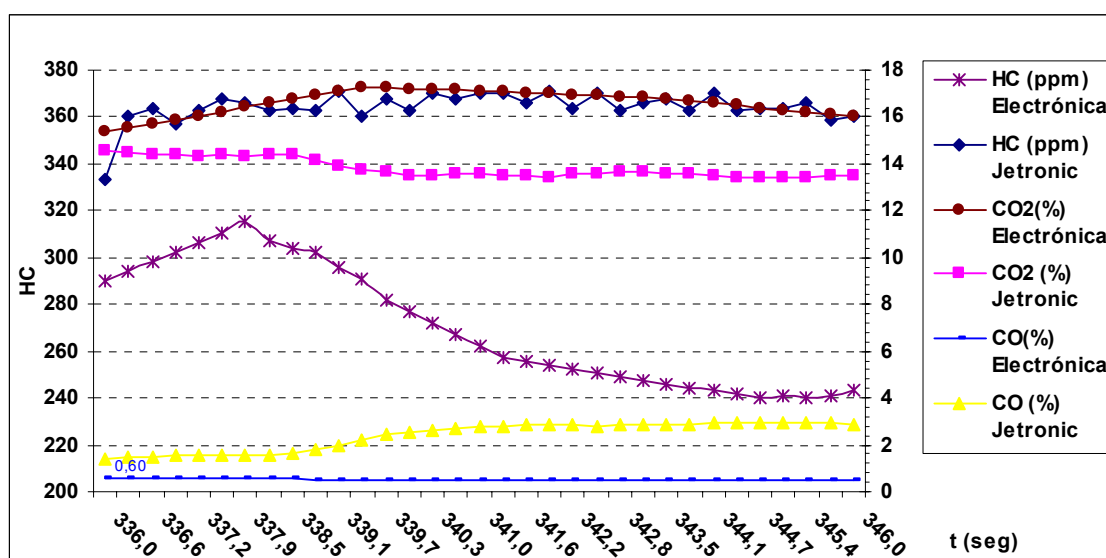


Figura 8.10: Régimen estacionario medianas vueltas y medianas cargas. Parámetros contaminantes.

El comportamiento de la emisión de contaminantes para el mismo estacionario queda resumido en la figura 8.10. La excesiva riqueza de la mezcla de la gestión Jetronic se demuestra (entre otros) por los altos valores de CO emitidos, superando el 2%, frente a un 0,6% máximo de la gestión no cartográfica. Se evidencia también las diferencias cuantitativas entre el CO₂ y los HC sin quemar por ambas gestiones. Respecto a este último, no puede ignorarse el estado técnico de la segmentadura del motor de pruebas, ya que una mayor hermeticidad hubiera mejorado todo el proceso de combustión y, por tanto, hubiese disminuido los HC expulsados sin quemar.

8.2.2 Regímenes Transitorios.

Mientras que para los regímenes estacionarios se analizaba el comportamiento del motor sin ninguna actuación externa, durante los transitorios es necesario estudiar la evolución de sus principales parámetros ante una actuación externa. Esta actuación, lógicamente, se resume en una *variación inmediata de la abertura de la mariposa de gases* frente a una solicitud de par por parte del conductor. Este principio, aunque correcto en nuestra gestión, no es del todo válido para las gestiones cuya mariposa de gases se acciona electrónicamente (Drive by Wire), como se explicó en el capítulo 3.3.1.6.

En todos los transitorios analizados se ha efectuado la comparación de sus principales parámetros mediante un ajuste polinómico de segundo grado del comportamiento de cada parámetro. En todos los casos, en el ajuste polinómico se calcula el número mínimo de cuadrados que encajan utilizando la ecuación (8.2):

$$y = b + C_1X + C_2X^2 + C_3X^3 + \dots + C_6X^6 \quad (8.2)$$

donde b y $C_1...C_6$ son constantes.

A estos ajustes, incluidos en los gráficos al igual que su ecuación, posteriormente se les calculó el valor de su pendiente para cuantificar su evolución.

En todos los casos, la ecuación para determinar la pendiente (b) del ajuste polinómico es de la forma:

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (8.3)$$

8.2.2.1 Ciclo Europa. Transitorio 55-61 segundos 1ª Etapa.

En la figura 8.11 se representa el comportamiento dinámico del motor en este estado transitorio positivo. Analizando los ajustes polinómicos del comportamiento del par de ambas gestiones, se observa un mayor crecimiento del par durante la gestión Jetronic. Esta gestión presenta un valor de su pendiente de 1,32 Nm/seg, mientras que la pendiente del ajuste polinómico de la evolución del par con la gestión electrónica no cartográfica fue de 1,09 Nm/seg. De lo anterior se deduce un mejor comportamiento dinámico de la gestión Jetronic.

En la misma figura se aprecia, no obstante, un mejor comportamiento del consumo específico de la gestión electrónica no cartográfica respecto a la gestión Jetronic.

Analizando la evolución de la Lambda de la gestión electrónica no cartográfica, se observa que la misma tuvo un comportamiento más estable que la gestión Jetronic (ambas en zona de riqueza). Esta estabilidad responde a los valores de ajuste del incremento de los pulsos (K+)=0,07. Incrementando este valor desde el propio software de control, se pudo obtener una mejor respuesta dinámica del motor, aunque a expensas de un incremento de los contaminantes, como se verá a continuación.

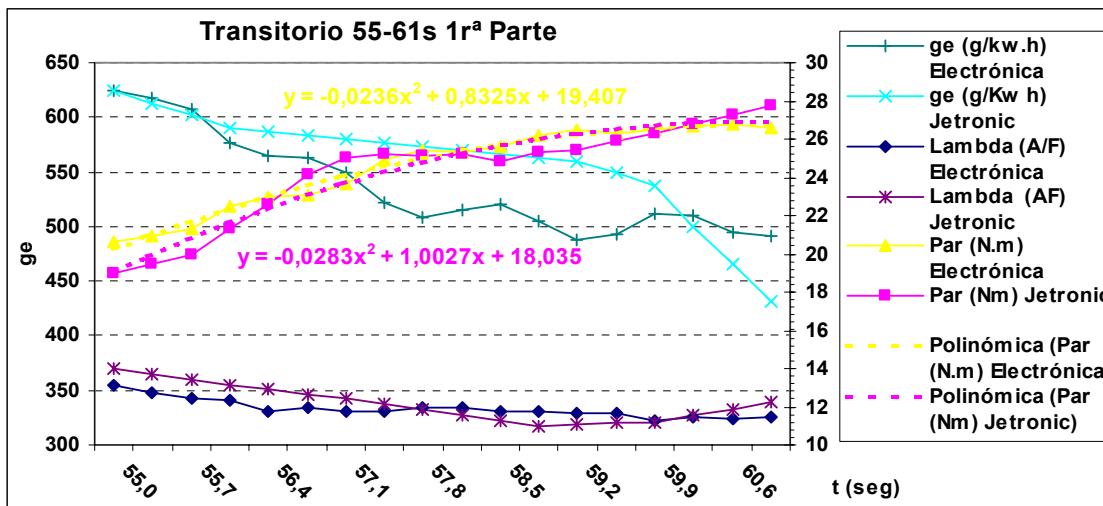


Figura 8.11: Régimen transitorio 55-61s 1ª Parte. Comportamiento dinámico.

El gráfico de la figura 8.12 muestra el incremento de los HC expulsados sin quemar por ambas gestiones. Calculando la pendiente del ajuste polinómico de los HC sin quemar de la gestión Jetronic obtenemos un incremento de 61,25 ppm/seg, frente a un 60,91 ppm/seg de la gestión electrónica no cartográfica. Lo anterior resume la comparación entre ambas gestiones durante

este transitorio: un mejor comportamiento dinámico de la gestión Jetronic a expensas de una mayor aportación de combustible.

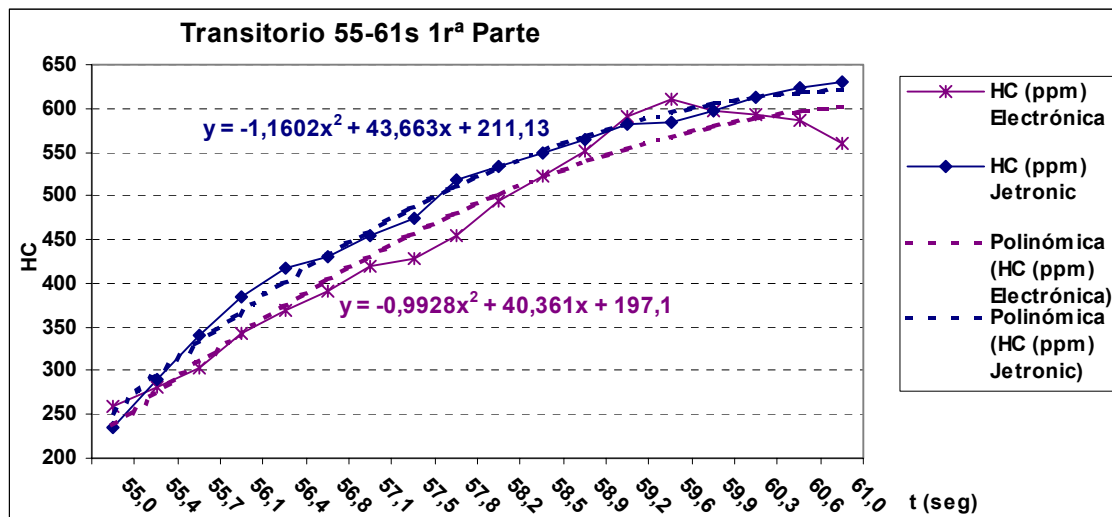


Figura 8.12: Régimen transitorio 55-61s 1ª Parte. HC sin quemar.

El comportamiento del resto de los contaminantes (CO_2 y CO) se grafica en la figura 8.13. Con el enriquecimiento momentáneo de la mezcla aire/combustible durante un transitorio positivo, es lógico un incremento del CO y una disminución simultánea del CO_2 en los gases de escape.

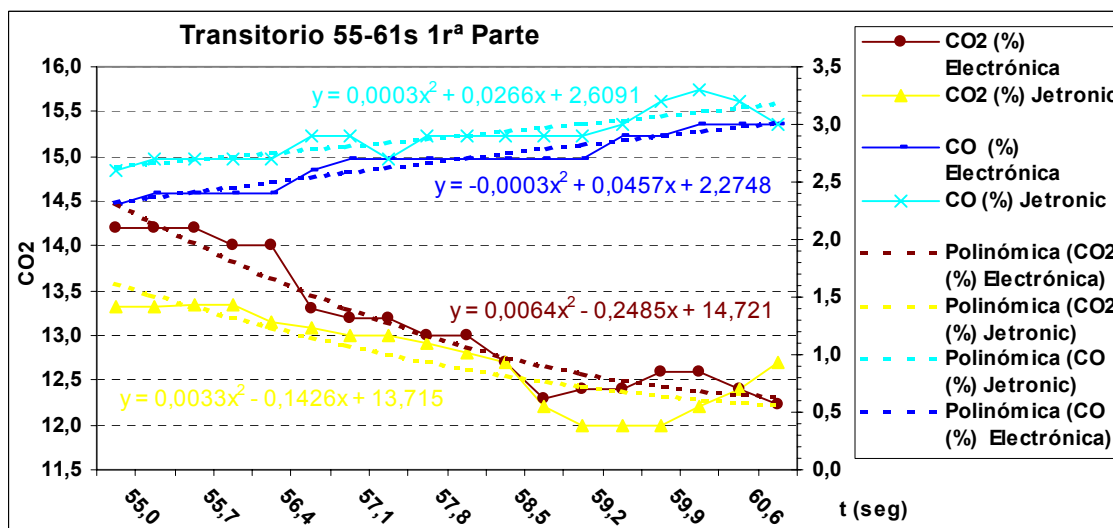


Figura 8.13: Régimen transitorio 55-61s 1ª Parte. Contaminantes.

Debido a un mayor enriquecimiento de la mezcla en la gestión Jetronic, su emisión de CO es mayor en todo el transitorio (figura 8.13). Comparando el valor de la pendiente del ajuste polinómico de ambas curvas obtenemos un mayor incremento del porcentaje de CO de la gestión Jetronic ($0,19 \text{ \%CO/seg}$) que la registrada por la gestión no cartográfica ($0,1 \text{ \%CO/seg}$).

Respecto al CO₂, el comportamiento fue aparentemente favorable para la gestión Jetronic. En efecto, la disminución del CO₂ durante esta gestión es menos acentuada que durante la gestión no cartográfica. Debido a que la gestión no cartográfica presentaba mayores valores iniciales que la Jetronic, es comprensible un mayor ritmo de disminución del CO₂ en esta gestión al enriquecerse la mezcla. Evaluando el ajuste polinómico de la curva del CO₂ de la gestión no cartográfica, el mismo presentó una pendiente negativa de -0,36 %CO₂/seg, mientras que el de la Jetronic fue de -0,22 %CO₂/seg. Resumiendo el comportamiento del CO₂ de ambas gestiones, podemos apreciar que en la gestión no cartográfica disminuyó más rápido, pero sus valores finales fueron incluso mayores que el de la gestión Jetronic.

8.2.2.2 Ciclo Europa. Transitorio 316-336 segundos 2ª Etapa.

El segundo estado transitorio seleccionado para la evaluación comparativa de ambas gestiones fue el comprendido desde los 316 segundos hasta los 336 segundos de la segunda etapa del ciclo europeo de conducción. En la tabla 7.2 se muestran los parámetros definitorios de este transitorio.

En este transitorio (figura 8.14) el rango de las r.p.m. del motor es mayor, desarrollándose el mismo desde las 3382 r.p.m hasta las 4048 r.p.m aproximadamente. El par entregado durante ambas gestiones tuvo un comportamiento bastante similar, apreciándose que hasta el segundo 333 el par entregado bajo la gestión no cartográfica fue ligeramente superior. Hasta este punto, en ambas gestiones ocurrió un empobrecimiento transitorio de la mezcla debido a un incremento brusco del aire en la admisión; pero la gestión Jetronic comenzó a enriquecerla antes (segundo 324 de la curva del comportamiento de la lambda de la gestión Jetronic), lo cual explica el mayor incremento del par de esta gestión. A partir del segundo 333 el par de la gestión no cartográfica es menor, coincidiendo con un mayor empobrecimiento de la mezcla por esta gestión, como se aprecia en las curvas del comportamiento de la lambda en ambas gestiones.

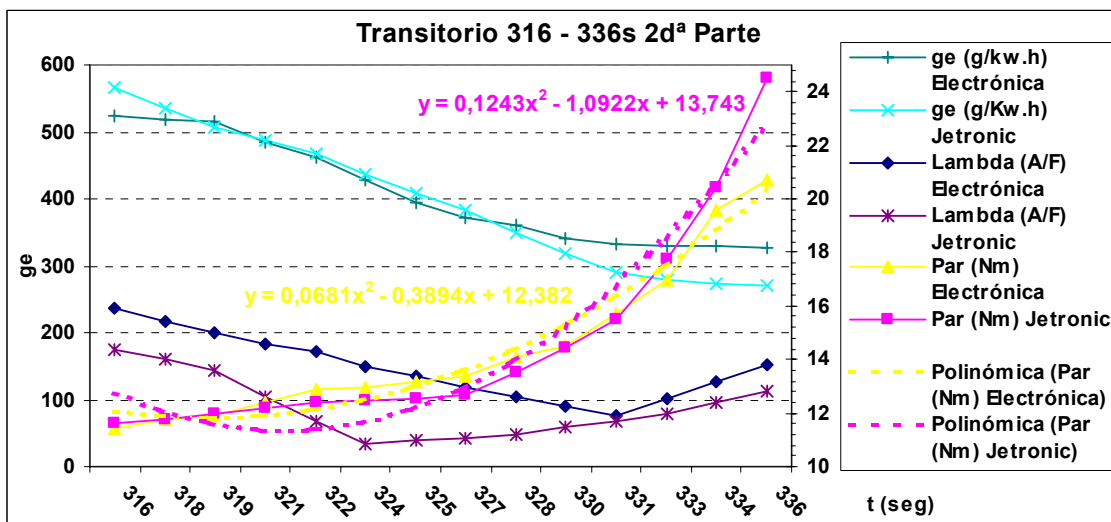


Figura 8.14: Régimen transitorio 316 -336s 2ª Parte. Comportamiento dinámico.

Evaluando el ajuste polinómico del comportamiento del par de ambas gestiones, obtenemos una pendiente de la gestión Jetronic de 0,50 Nm/seg, superior a los 0,41 Nm/seg de la gestión no cartográfica.

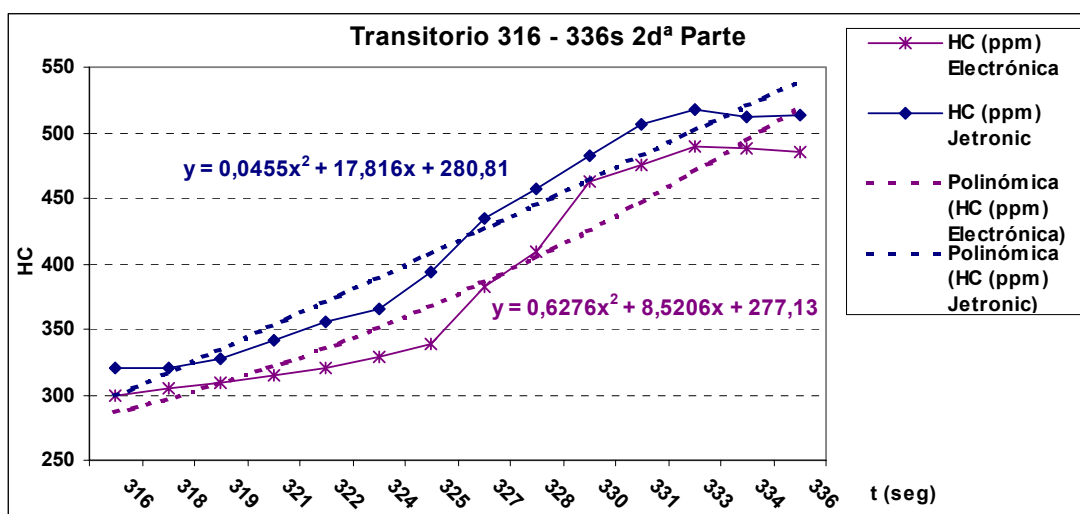


Figura 8.15: Régimen transitorio 316 - 336s 2ª Parte. HC sin quemar.

La figura 8.15 recoge la evolución de los HC sin quemar de este mismo transitorio. Como en el transitorio analizado anteriormente (apartado 8.2.2.1), la gestión Jetronic presenta un mayor porcentaje de HC sin quemar en los gases de escape, indudablemente debido a una mayor cantidad de combustible inyectado. En ambos casos se aprecia que a partir del segundo 331 ambas emisiones se estabilizan, estabilizándose también los consumos específicos a partir de este punto.

Recurriendo nuevamente a los valores de las pendientes de los ajustes polinómicos de las emisiones de HC sin quemar, también en este caso obtenemos una pendiente superior para el caso de la gestión Jetronic. En este transitorio su valor fue de 12,02 ppmHC/seg, mientras que el de la gestión no cartográfica fue de 11,65 ppmHC/seg.

Al igual que el transitorio anterior (apartado 8.2.2.1), podemos concluir de forma provisional, que también en este caso la gestión Jetronic tuvo un mejor comportamiento dinámico a expensas de una mayor aportación de combustible, con las consecuencias que conlleva respecto a los contaminantes emitidos.

Para concluir este análisis, en la figura 8.16 se muestra el comportamiento del resto de los contaminantes emitidos durante la gestión de ambos sistemas de inyección para el mismo transitorio evaluado.

Analizando la emisión de CO₂ de ambas gestiones se aprecia que en este transitorio ambas tuvieron un comportamiento relativamente estable, a pesar del incremento del CO en las dos gestiones. Este comportamiento parece deberse al hecho de que, aunque el transitorio ocurre en una zona de trabajo con mezcla rica, la riqueza de la misma en este caso es menor que el transitorio analizado anteriormente (apartado 8.2.2.1), como se observa comparando las lambdas de las figuras 8.11 y 8.14. La estabilidad del comportamiento del CO₂ en los dos casos, no obstante, tuvo una tendencia decreciente, como lo demuestran los valores negativos de las pendientes de los ajustes polinómicos en ambos casos: -0,0023 %CO₂/seg de la gestión Jetronic y -0,00036 %CO₂/seg de la gestión no cartográfica.

El hecho de que la pendiente de la gestión Jetronic sea notablemente superior, demuestra una disminución más brusca del % de CO₂ en el escape, debido a un mayor enriquecimiento de la mezcla de trabajo durante su gestión.

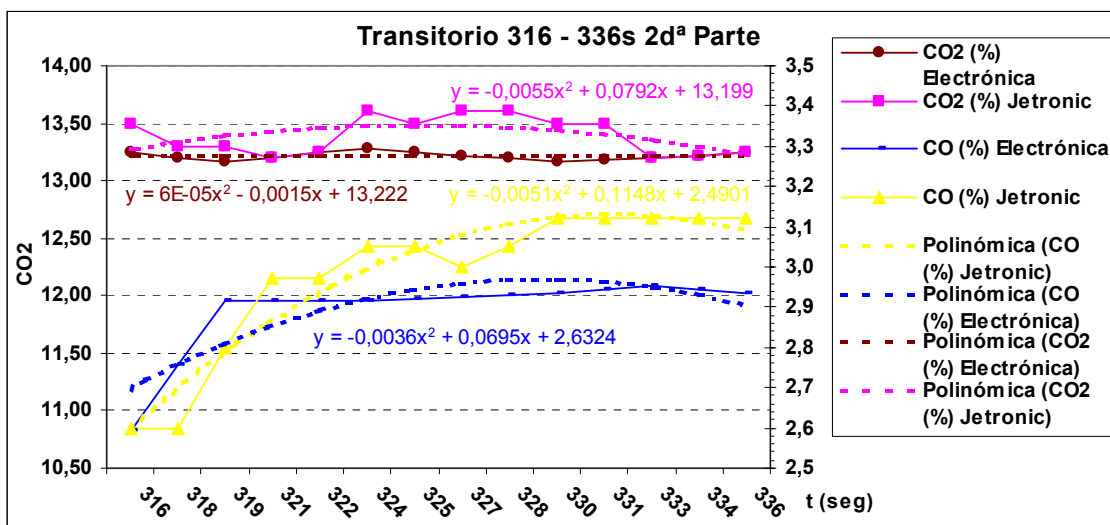


Figura 8.16: Régimen transitorio 316 - 336s 2ª Parte. Contaminantes.

En la figura 8.16 se muestra también el comportamiento del CO en el escape durante ambas gestiones. Como en el caso del transitorio anterior (analizado en el apartado 8.2.2.1), ambas presentan una lógica tendencia creciente, siendo mayor el incremento de la gestión Jetronic (pendiente de su ajuste igual a 0,024 %CO/seg) que el incremento de la gestión no cartográfica (pendiente de su ajuste igual a 0,01 %CO/seg). El mayor incremento del % de CO en el escape de la gestión Jetronic es síntoma inequívoco de una mayor riqueza en su mezcla de trabajo, y concuerda plenamente con su mayor disminución del % de CO₂ en el escape.