

6. GESTIÓN DEL MOTOR MEDIANTE EL SISTEMA DE INYECCIÓN EN EL COLECTOR, NO CARTOGRÁFICO Y SECUENCIAL.

El ordenador del sistema lee continuamente las señales analógicas de λ , r.p.m., par y posición de la mariposa, provenientes del motor, a través de una tarjeta de adquisición de datos analógicos. Seguidamente, por medio del algoritmo de aproximación del software de gestión, mostrado en la figura 6.1, y a partir de una λ de consigna establecida se genera un valor expresado en milisegundos de duración de los pulsos de inyección y el valor expresado en grados del instante de la inyección; este último tomando como referencia el PMI durante el escape, y cuya magnitud puede variar en $\pm 180^\circ$ a partir de esta referencia, lo cual representa desde el comienzo del escape hasta el final de la admisión de cualquier cilindro.

Una vez definidos estos valores por el algoritmo de aproximación, son convenientemente codificados digitalmente y enviados a la tarjeta de escritura digital, también instalada en el ordenador. Esta segunda tarjeta envía estos valores expresados en tiempo hacia la unidad de inyección electrónica, la cual es finalmente la encargada de enviar estos pulsos de inyección hacia los inyectores del motor.

El proceso descrito anteriormente, figura 2.1, se desarrolla de forma cíclica (retroalimentación continua) de manera que para cualquier estado de funcionamiento del motor se obtenga la composición de la mezcla deseada, en este caso la λ de consigna.

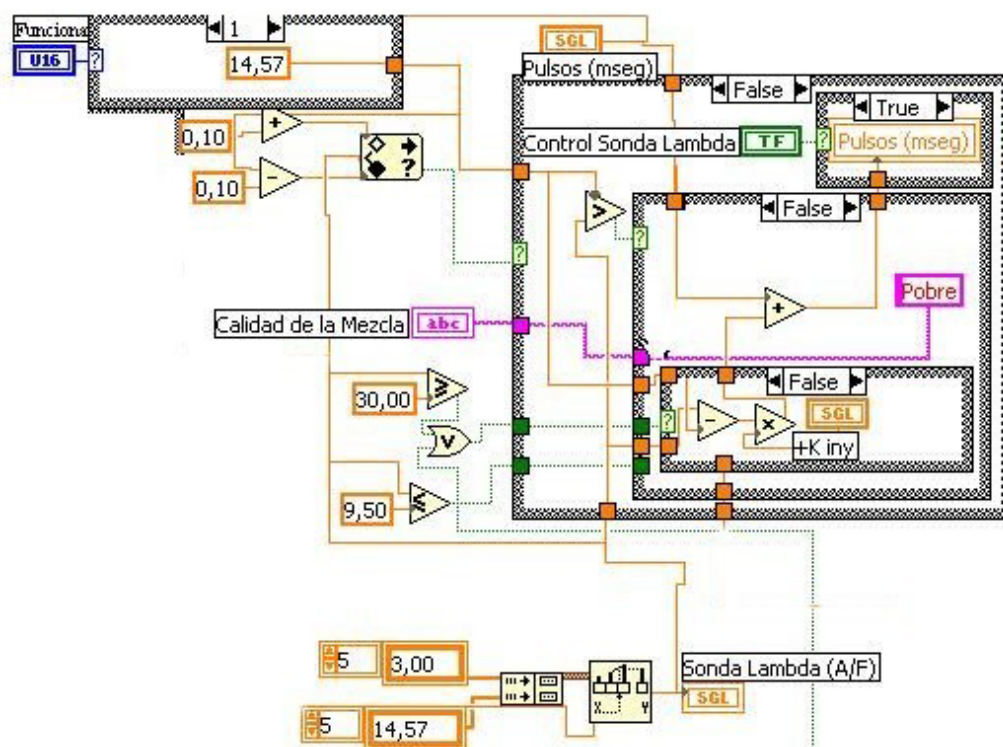


Figura 6.1: Algoritmo de Aproximación implementado en el Software de Gestión del Sistema.

Puede apreciarse (figura 6.2) que la actuación de la inyección electrónica a partir de la señal de la sonda lambda conlleva los retrasos cíclicos lógicos del motor, en cambio, con respecto a la apertura de la mariposa de gases esta misma actuación, convenientemente tratada, es prácticamente instantánea. Esta observación es especialmente importante para la gestión del sistema, como se verá más adelante.

6.1 Constatación del Retraso Físico de la Sonda Lambda en la Dinámica del Sistema.

La determinación experimental del retraso en la actuación de la sonda lambda se realizó mediante la lectura analógica continua de su señal, la abertura de la mariposa de gases y los pulsos de inyección a través del software de control, de manera que era posible monitorizar este retraso expresado en tiempo, y convertirlo en ciclos del motor posteriormente en función de las r.p.m. del motor.

El retraso dinámico de la respuesta de la sonda lambda es un fenómeno complejo y dependiente de muchos factores tales como la composición de la mezcla, la velocidad y temperatura de los gases de escape, la geometría del sistema de escape, las r.p.m. del motor, su estado de carga, etc. En [82], Jean Charles Bossert; Younggy Shin, y Wai K Cheng, del MIT muestran un estudio bastante amplio de este fenómeno. En este punto, nuestro objetivo no era un estudio detallado de la demora en la actuación de la sonda lambda para cualquier estado del motor considerando su estado de carga, comportamiento de los gases de escape, etc., sino constatar que efectivamente existía y sus consecuencias en la gestión del sistema.

La figura 6.2 muestra el comportamiento de los parámetros del motor para un transitorio positivo del motor desde 2140 r.p.m. y 36 Nm de par hasta 2800 r.p.m. y un par de 48 Nm. En el oscilograma se aprecia un retardo desde el comienzo de la abertura de la mariposa hasta la detección inicial de la sonda lambda del empobrecimiento de la mezcla de 0,2 segundos. Este retraso, considerando el régimen de 2140 r.p.m., representa 3.57 ciclos del motor.

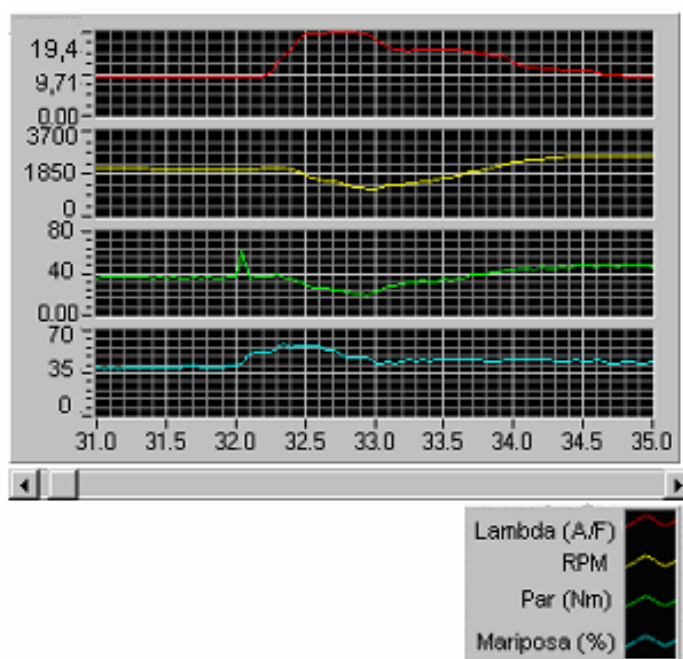


Figura 6.2: Oscilograma de un transitorio positivo del motor.

En la figura 6.2 se observa la *disminución transitoria del par durante el transitorio debido al empobrecimiento excesivo de la mezcla* al abrir repentinamente la mariposa de gases. Una de nuestras prioridades en la gestión de los transitorios positivos fue precisamente la *eliminación de este efecto sin recurrir a una inyección inicial excesiva de combustible*.

Como se explicó en el apartado 3.3.1.10.1, el retraso en la actuación de la sonda lambda es especialmente perjudicial durante los transitorios positivos. Esto se debe a que, durante los regímenes estacionarios y durante los transitorios positivos “suaves” (apertura paulatina de la mariposa de gases), el efecto del empobrecimiento inicial de la mezcla es corregido por el sistema. De esta forma no se aprecia una disminución instantánea y brusca del par, tal y como se muestra en la figura 6.3. En el apartado 6.2 se detalla la actuación del sistema durante los regímenes estacionarios.

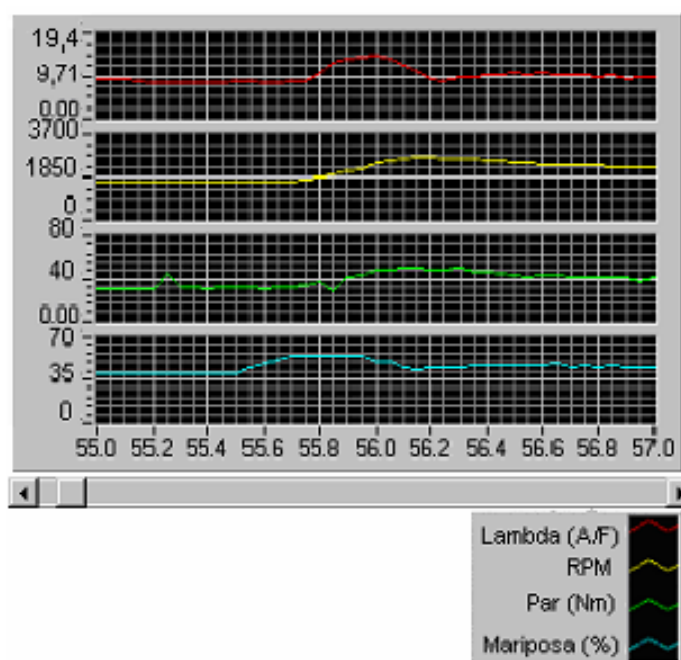


Figura 6.3: Oscilograma de un transitorio positivo del motor.

En esta prueba (figura 6.3) se muestra el comportamiento de los parámetros del motor para un transitorio positivo del motor desde 1900 r.p.m. y 32 Nm de par hasta 2360 r.p.m. y un par de 40 Nm. En el oscilograma se aprecia un retardo desde el comienzo de la apertura de la mariposa hasta la detección inicial de la sonda lambda del empobrecimiento de la mezcla de 0,25 segundos. Este retraso, considerando el régimen de 1900 r.p.m., representan 3.95 ciclos del motor.

No obstante, la gestión del motor no puede considerarse satisfactoria, ya que el incremento de los pulsos de inyección ante cualquier variación del estado del motor depende exclusivamente de la señal proveniente de la sonda lambda, con el consiguiente retraso de la actuación de los inyectores, como se demuestra en la figura 6.4. En este caso, existió un retraso de 0.12 segundos hasta la detección por la sonda lambda, más 0.06 segundos hasta la actuación de los inyectores. Considerando las 2300 r.p.m. de giro del motor, el primer retraso representa 2.3 ciclos del motor, y el segundo 1.15 ciclos. El retraso total desde la apertura de la mariposa de gases hasta la actuación de los inyectores fue de 3.45 ciclos.

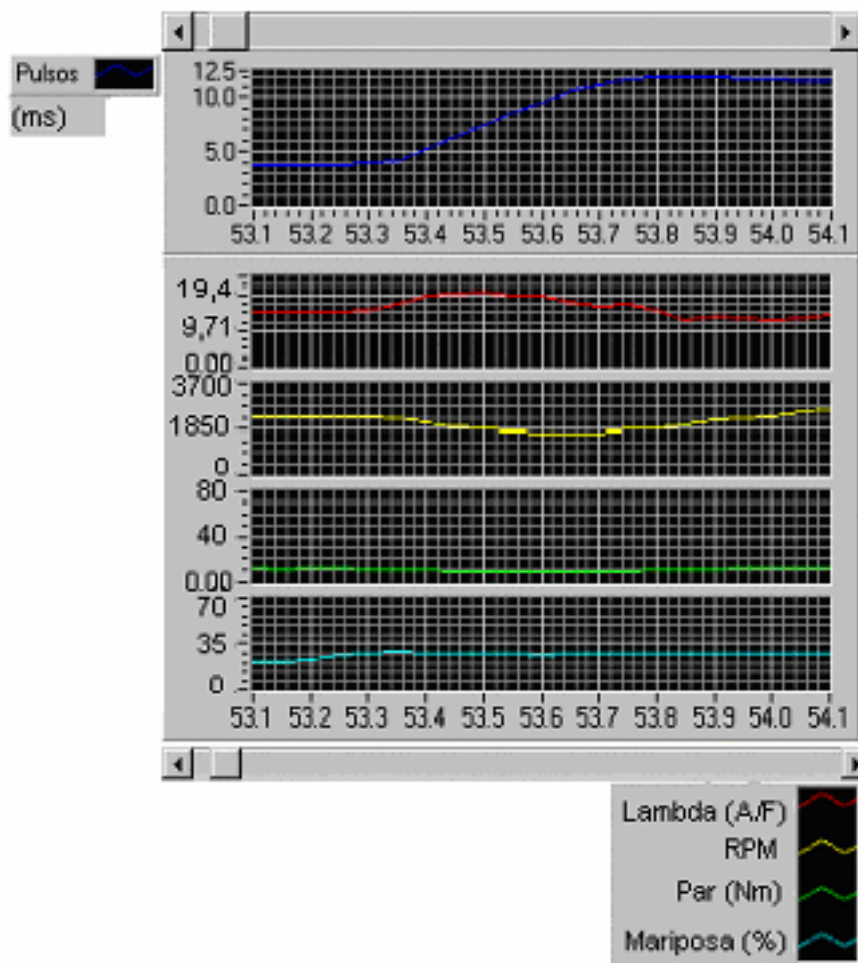


Figura 6.4: Oscilograma del retraso de actuación de los pulsos de inyección respecto a la apertura de la mariposa de gases del motor.

Si la actuación de los inyectores con respecto a la apertura de la mariposa de gases depende exclusivamente de la señal proveniente de la sonda lambda, siempre estará retrasada varios ciclos del motor después que se abra la mariposa de gases. Con el objetivo de eliminar este retraso, principalmente durante los transitorios del motor, se instaló un sensor de posición de la mariposa de gases del motor, como se explicó en el apartado 5.1.2.5.

En la figura 6.5 se muestra un transitorio positivo detectado por el sistema a través del sensor de posición de la mariposa de gases del motor. Puede apreciarse que el incremento de los pulsos de inyección es prácticamente simultáneo con la apertura de la mariposa de gases del motor, por lo que el incremento del pulso inicial para este estado no depende de la actuación de la sonda lambda. Se aprecia, además, que se corrige la disminución excesiva del par debido a un empobrecimiento de la mezcla. Este incremento, como se explicó en el apartado 3.3.3, no es excesivo, sino que se ajusta durante el propio transitorio con el fin de disminuir la emisión de HC sin quemar. Esto es, el primer escalón depende de la apertura de la mariposa de gases, y los sucesivos de la composición de la mezcla detectada por la sonda lambda. En el apartado 6.3 se detalla esta actuación.

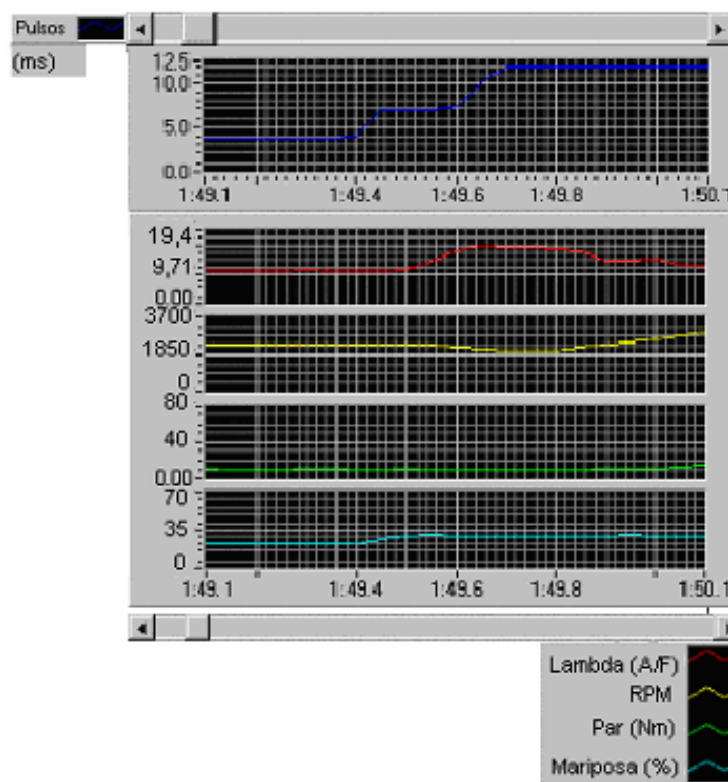


Figura 6.5: Oscilograma de un transitorio positivo gestionado a partir de la señal de apertura de la mariposa de gases del motor.

6.2 Estrategia de Gestión del Motor en los Regímenes Estacionarios.

En las primeras fases de la evolución del sistema de control de la inyección no se definían diferencias entre los estados del motor, por lo que la corrección de la cantidad a inyectar en cada ciclo se realizaba únicamente a partir de la lectura de la sonda lambda.

Con el valor obtenido de la sonda lambda, se detectaba si la combustión había sido pobre o rica; y mediante esta información se hacía la corrección del tiempo de inyección, similar a la actuación de un controlador I clásico con sensor EGO.

El primer método de corrección (sólo utilizado para pruebas preliminares), se basaba en la utilización de la sonda lambda como una sonda binaria. Así pues, la información que se obtenía de la sonda lambda era que la combustión había sido rica o pobre, pero no era determinante cuan rica ni cuan pobre.

La corrección se llevaba a cabo mediante la introducción de unos incrementos en el tiempo de inyección. Estos *incrementos eran fijos* para cada bucle de cálculo del ordenador; y así pues, si la señal de la lambda indicaba mezcla pobre, el tiempo de inyección se incrementaba en 0.2 milisegundos en cada bucle, y si era rica, se disminuía en 0.2 milisegundos.

El hecho de que los incrementos del tiempo de inyección fueran iguales para enriquecer y para empobrecer era puramente intuitivo, ya que en esta etapa todavía no se contemplaba la optimización del funcionamiento.

Para lograr que el sistema se estabilizara, se determinó experimentalmente un intervalo alrededor del dosado correspondiente a la lambda de consigna en que la combustión se consideraba estabilizada, y no se efectuaba corrección alguna. Este intervalo es de ± 0.1 alrededor del dosado real de la mezcla.

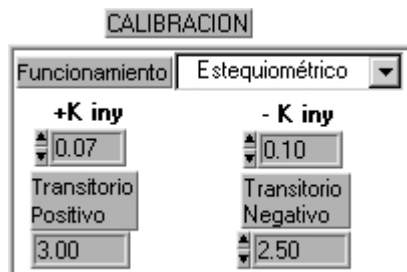


Figura 6.6: Ventana de calibración del Software de Gestión del Sistema.

La figura 6.6 muestra la ventana de CALIBRACION del software de gestión del sistema. En la opción de “Funcionamiento” el sistema permite definir tres regímenes de trabajo del motor, variando la lambda de consigna para cada uno de ellos, esto es:

- Funcionamiento **Estequiométrico**: λ de consigna = 1
- Funcionamiento **Mínimo Consumo**: λ de consigna = 1.04
- Funcionamiento **Máximo Par**: λ de consigna = 0.77

Los parámetros anteriores se obtuvieron experimentalmente acorde con el estado técnico del motor de pruebas, considerando no enriquecer excesivamente la mezcla en el funcionamiento de Máximo Par, ni empobrecerla en demasía para el Mínimo Consumo. El software de control ofrece la posibilidad de variar, de manera sencilla, estos parámetros, ya que los mismos dependen del estado técnico específico del motor cuya inyección se quiera gestionar.

La gestión del sistema en régimen estacionario con *incrementos y disminuciones constantes de los pulsos de inyección*, y sin actuar sobre la mariposa del motor ni sobre el par resistente, no lograba estabilizar los pulsos de inyección generados por el sistema (así como la lectura de la sonda lambda). Esto traía consigo que se produjera una ligera oscilación sinusoidal de tan baja frecuencia que era apreciable escuchando el funcionamiento del motor.

Una ligera oscilación era admisible ya que se corregía el tiempo de inyección mediante escalones constantes. El estrecho margen considerado estequiométrico debía permitir algún instante sin oscilación; pero de cualquier modo, la oscilación, en principio, tendría que ser tan pequeña que resultara inapreciable.

La justificación a esta oscilación tan grande la encontramos en el retraso físico de la sonda lambda.

Desde el momento en que el inyector pulveriza la gasolina en el colector de admisión, hasta que la sonda lambda (ubicada antes del catalizador) recibe la información referente a esa combustión, se ha producido un retraso de varios ciclos del motor.

La demora de la sonda lambda afecta de forma significativa al mecanismo de control de la inyección. En cada instante, el sistema corrige el tiempo de inyección basándose en la lectura de la sonda lambda, pero, por lo explicado anteriormente, esta lectura no es instantánea, ni tan

quiera del pulso anterior, sino que es la lectura de la combustión que se produjo varios ciclos antes.

El hecho de corregir la inyección actual con datos de combustiones pretéritas, provoca que el sistema de control de inyección funcione desfasado respecto la combustión real, de manera que nunca puede llegar a estabilizarse.

En realidad, la oscilación de un escalón arriba o abajo respecto a la consigna, que se produciría si todos los datos fueran en tiempo real, se convierte en una oscilación de varios escalones debido al retraso de la sonda lambda.

La figura 6.7 representa esquemáticamente el desfase entre la señal de salida del motor, observada por la sonda UEGO, y la acción de control, mostrando este concepto y los efectos de este retraso:

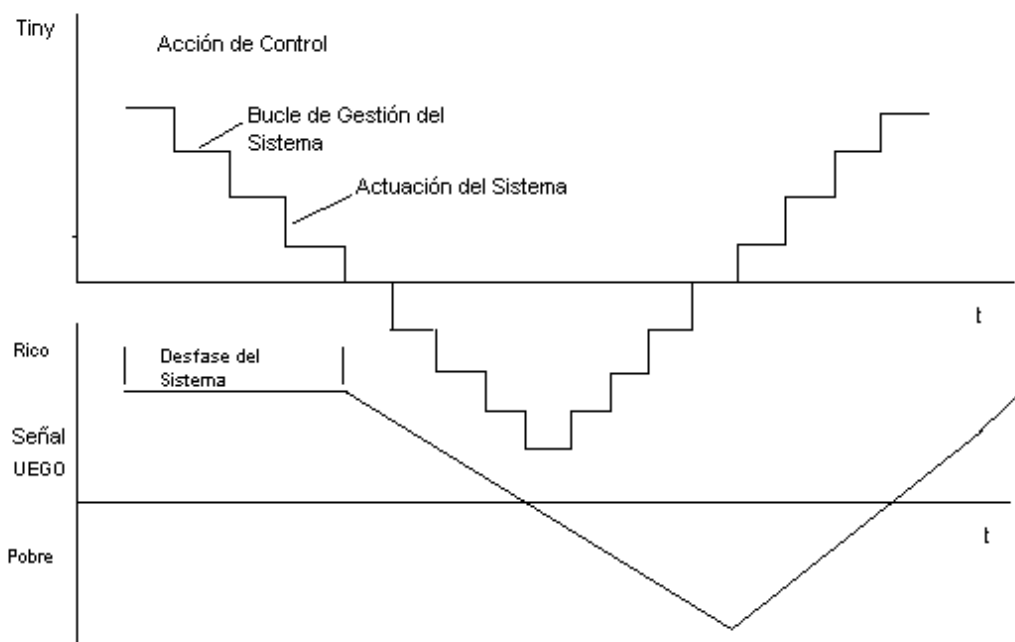


Figura 6.7: Retraso cíclico de la actuación de la sonda lambda (UEGO).

En este gráfico se observa que la lectura de la sonda lambda que llega al sistema lo hace con retraso respecto al punto donde se encuentra la inyección, que sería la situación real de la combustión que se produce. Esto se debe a que se toma como referencia de inicio de la sucesión de eventos la combustión real que se produce, y no su observador, que sería la sonda lambda colocada aguas abajo en el escape e inmediatamente antes del catalizador. Así, el sistema interpreta que hay una combustión determinada cuando en realidad los parámetros de la combustión son totalmente distintos.

En el ejemplo, nos encontramos en una situación de excesiva riqueza, suponiendo que el sistema estaba estabilizado. La lambda indica que la mezcla es rica y el sistema introduce un escalón negativo en el tiempo de inyección para compensar el exceso de combustible. En la siguiente lectura, el valor de la lambda es el mismo ya que todavía está leyendo valores de la combustión precedente, y se introduce nuevamente otro escalón negativo.

En la figura 6.7, se ha representado un retraso de cuatro ciclos, donde cada ciclo representa un escalón, coincidiendo también con la duración del bucle de gestión del sistema. No es hasta después de los cuatro ciclos iniciales que la sonda lambda detecta la composición de la mezcla del primer ciclo. A partir de aquí, la lectura de la sonda lambda reflejará la composición de la mezcla acorde con los pulsos de la inyección, pero con un retraso permanente, el cual es variable según el estado del motor, como se explicó anteriormente.

En el instante en que el tiempo de inyección sea el necesario para conseguir la lambda de consigna, el sistema no se detendrá, como sería conveniente, sino que al leer de la lambda que la mezcla aún es rica, seguirá introduciendo escalones negativos.

En este punto, el sistema continúa introduciendo escalones negativos, y seguirá en este estado hasta que llegue a la sonda lambda la composición de los gases de escape de la primera combustión pobre. Entonces se introducirá una corrección de sentido inverso, pero la combustión real, nuevamente, no es la leída por la sonda lambda.

El retardo permanente y el hecho de que el escalón sea constante provocan que el sistema no llegue a estabilizarse nunca, provocando unas oscilaciones en la actuación del lazo cerrado de la gestión que impiden que la acción de su controlador sea cero.

6.2.1 Temporización del Bucle de Gestión del Sistema.

Para la determinación exacta de la duración total del bucle de gestión del sistema es necesario conocer la duración de un ciclo de actuación de todos los elementos que intervienen en la gestión del motor.

En los capítulos 5.2 y 5.3 se detallan todos los elementos que intervienen en la gestión del motor. Resumiendo los elementos más sensibles al sistema en cuanto a su velocidad de actuación tendríamos:

- **Encoder Absoluto** (generación de la señal digital de reconocimiento de los cilindros).
- **Informática** (procesamiento de todas las señales del motor y escritura digital de los pulsos de inyección y su retraso).
- **Electrónica** (reconocimiento de los cilindros, conversión de la información digital de la informática en pulsos de abertura de los inyectores).

Tanto el encoder como la etapa electrónica tienen una velocidad de actuación del orden de las décimas de milisegundos, lo cual es muy inferior a la duración de un ciclo del motor a una velocidad inclusive de 6000 r.p.m. Esta conclusión es válida considerando los datos del fabricante en el caso del encoder, y del tiempo de respuesta de los componentes de la electrónica que participan directamente en la conversión y conteo de los pulsos de inyección (módulos de cuenta figura 5.40 y etapa de potencia figura 5.44).

La etapa informática es la más compleja por cuanto es la que mayor número de operaciones realiza, y su actuación es anterior y determinante sobre la electrónica, a diferencia de la actuación del encoder que es totalmente independiente. Para determinar la duración de un bucle completo de su actuación, se ha utilizado una herramienta del propio lenguaje de programación que permite determinar el tiempo real de ejecución de todas las funciones que intervienen en el algoritmo. La tabla 6.1 muestra un resumen del resultado de esta herramienta, donde se tabulan los nombres de las funciones y sus tiempos reales de ejecución.

InstrName	DS	VI	SubVIs	Total	n runs	avg	min	max	sizeAvg	sizeMin	sizeMax
Profile Data: all times in seconds											
Begin: dj., 8 / nov. / 2001 11:20:05.											
End: dj., 8 / nov. / 2001 11:23:15.											
Unaccounted for time: 130.9050											
AI Buffer Config.vi		0	0.0150	0.0000	0.0150	1	0.0150	0.0150	0.0150	2130	2130
AI Hardware Config.vi		0	0.0140	0.0000	0.0140	1	0.0140	0.0140	0.0140	5551	5551
AI Buffer Read.vi		0	22.8810	0.0000	22.8810	361	0.0634	0.0020	0.1020	4636	4636
AI Read.vi		0	22.8810	22.9920	361	0.0003	0.0000	0.0040	3220	3220	3220
AI Control.vi		0	0.1080	0.0000	0.1080	361	0.0003	0.0000	0.0460	1906	1906
AI Trigger Config.vi		0	0.0730	0.0000	0.0730	361	0.0002	0.0000	0.0040	3873	3873
AI Clock Config.vi		0	0.4440	0.0000	0.4440	362	0.0012	0.0010	0.0040	4296	4296
AI Start.vi		0.	0.6240	0.7980	361	0.0005	0.0010	0.0030	3402	3402	3402
AI SingleScan.vi		0	18.2700	0.0000	18.2700	0.0375	0.0487	0.0020	0.1480	2512	2512
Open/Create/Replace File.vi			2.0045	1.2930	0.0000	1.2930	339	0.0038	0.0030	0.0080	3029
Find First Error.vi		0	0.0840	0.0000	0.0840	339	0.0002	0.0000	0.0010	1269	1269
Close File+.vi		0	0.6750	0.0840	0.7590	339	0.0020	0.0010	0.0060	1348	1348
Write File+ (string).vi		0	0.6200	0.0000	0.6200	339	0.0018	0.0010	0.0050	1424	1424
Write Characters To File.vi			0.023	0.0010	0.0450	0.0460	6	0.0002	0.0000	0.0010	1338
Write To Spreadsheet File.vi			0.875	0.6100	2.6270	3.2370	333	0.0018	0.0010	0.0860	2384
Out Port.vi		0	0.0000	0.1200	1123	0.0001	0.0010	0.0010	802	802	802
AI Group Config.vi		0	0.0380	0.0000	0.0380	1	0.0380	0.0380	0.0380	1414	1414
Inyeccion.VI		0	5.5780	45.5310	51.1090	1	5.5780	22.8450	22.8450	2891511	2891511

Tabla 6.1: Tiempos reales de ejecución de las principales funciones del software de control.

Muchas de las funciones que se muestran en la tabla 6.1 son funciones de configuración de hardware, canales, etc, que *se ejecutan una sola vez en cada sesión de trabajo*. En la tabla 6.1 se resaltan con marcador las funciones que si tienen una ejecución continua en cada sesión de trabajo, siendo ellas las que determinan la duración de un bucle completo de procesamiento. Este procesamiento va desde la lectura analógica de sus ocho canales hasta la escritura digital del valor de los pulsos y su retraso en las direcciones de registro 772, 773 y 774. Estas direcciones son las asignadas a la segunda tarjeta digital que a su vez los transmite al módulo de conteo de la etapa electrónica.

Sumando el tiempo de ejecución de las funciones en ejecución continua se obtiene una duración total de *38.4 milisegundos*, que representa la duración de un ciclo de funcionamiento del motor de pruebas a *3125 r.p.m*. De lo anterior se concluye que, hasta esta velocidad, el ajuste de los pulsos de inyección se realiza en cada ciclo del motor. Por encima de esta velocidad del motor de pruebas, el ajuste de los pulsos de inyección se efectuará en el siguiente ciclo del motor, y nunca en el tercer ciclo. Esta condición es perfectamente admisible incluso para las gestiones cartográficas actuales instaladas en vehículos de la gama de turismo.

En el capítulo 9, dedicado a las Conclusiones de esta tesis, se proponen soluciones para incrementar la velocidad de actuación de la informática de control. Estas soluciones,

lógicamente, pasan por la utilización de un ordenador provisto de un procesador más rápido ó el empleo de una tarjeta de adquisición con procesador incorporado.

6.2.2 Desarrollo de un Controlador PI con sensor UEGO.

El modo más simple y efectivo de reducir las oscilaciones durante la estabilización del motor es variando continuamente los incrementos del tiempo de inyección en función del valor de la sonda lambda.

Mediante el valor numérico de la señal de la sonda lambda se varía el escalón con el que se ajusta el tiempo de inyección, de manera que cuanto mayor sea la diferencia entre la λ leída y la λ de consigna los escalones serán mayores, y se irán reduciendo a medida que disminuya la diferencia entre ellas. Esto permitió estabilizar la combustión rápidamente en el valor de consigna y mantener el pulso de inyección en el valor deseado. Este concepto engloba la principal diferencia entre esta gestión y las clásicas mediante los controles tipo I, P y PI con sensor EGO explicados en el apartado 3.3.1.11.1.

Para conseguir esta señal, se debe variar continuamente el *incremento del tiempo de inyección* en función de la diferencia entre el valor de la lambda leída y el de consigna, de manera que cuando los dos valores sean próximos el incremento tienda a cero. Esto se consigue con una función del tipo:

$$\Delta t_i = K(\lambda - \lambda_{consigna}) \quad (6.1)$$

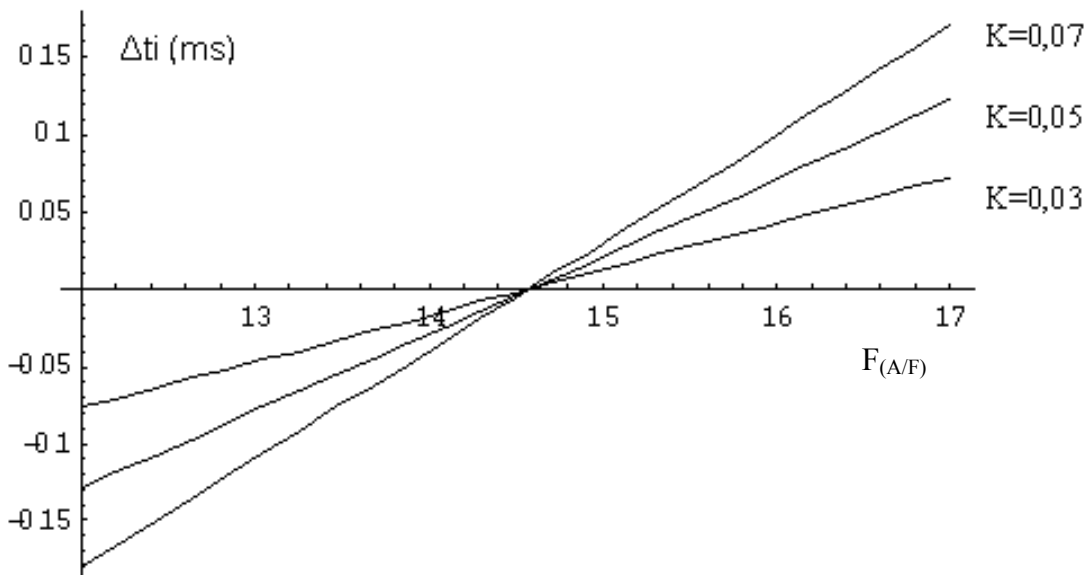


Figura 6.8: Evaluación de la ecuación 6.1

En la figura 6.8 se muestra el comportamiento de la variación del incremento de los pulsos de inyección para diferentes valores de K, evaluando el dosado real de la mezcla en el rango de 12...17 (A/F), y un valor de la lambda de consigna de 1. Es precisamente en este punto donde la variación de los pulsos de inyección es cero (eje X en la figura 6.8), o sea, se estabiliza la inyección.

La constante de proporcionalidad K seleccionada definirá la amortiguación de la onda obtenida y, a su vez, la pendiente de la actuación integral del controlador desarrollado, como se muestra en la figura 6.9.

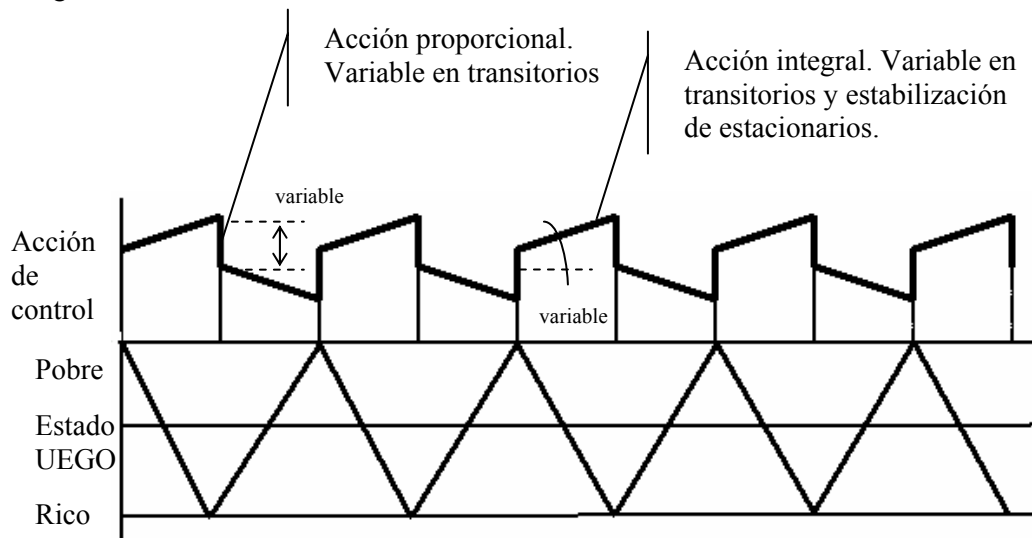


Figura 6.9: Controlador PI con sensor UEGO.

La variación de los pulsos de inyección (figura 6.9) será proporcional al tiempo de estabilización, por lo que la elección del valor de K deberá efectuarse experimentalmente por compromiso entre dos estados opuestos (figura 6.10):

- Mayor velocidad de estabilización del motor pero mayor número de oscilaciones.
- Menor velocidad de estabilización del motor pero menor número de oscilaciones.

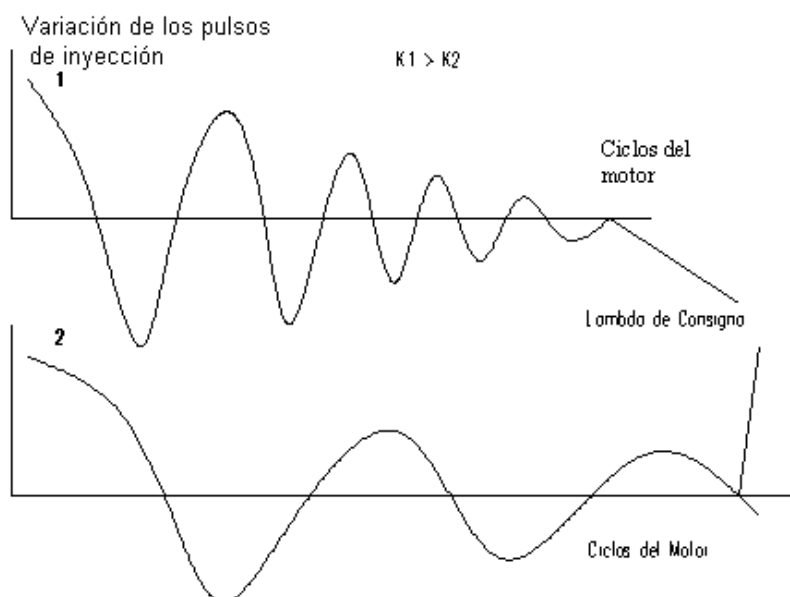


Figura 6.10: Comportamiento de la variación de los pulsos de inyección en los estados estacionarios.

Experimentalmente se deberá llegar a un valor K de compromiso que, sin provocar que el sistema tenga una respuesta demasiado lenta, no provoque unas oscilaciones de demasiada amplitud.

Con el objetivo de mejorar la estabilización de la lambda del motor hacia la lambda de consigna, en el software de control se han considerado dos variables K independientes, una para los incrementos del pulso de inyección y otra para su disminución. Estos valores se determinaron experimentalmente, valorando principalmente la estabilidad del motor, resultando K para los incrementos (K+) igual a 0.07, y K para las disminuciones (K-) igual a 0.1, como se muestra en la figura 6.6, siendo, además, fácilmente ajustables desde el software de control.

6.3 Estrategia de Gestión del Motor en los Regímenes Transitorios.

Solucionada la estabilidad de los estados estacionarios, es necesario ajustar la actuación proporcional del controlador (figura 6.9) con el objetivo de conseguir una respuesta ante los estados transitorios del motor lo más rápida posible. La forma más eficaz de detectar el inicio de un transitorio es mediante un potenciómetro instalado en la mariposa de gases, que permita en todo momento una lectura instantánea de su posición, comparándola continuamente con la posición que tenía en el bucle de gestión anterior.

6.3.1 Utilización del Angulo de Apertura de la Mariposa de Gases para el ajuste de la actuación proporcional del Controlador PI con sensor UEGO.

La lectura directa de la posición de la mariposa de gases permite gestionar la inyección del motor con independencia de la señal proveniente de la sonda lambda. Esto es posible ya que, por medio del software de control, se utiliza la señal de la mariposa en vez de la de la sonda lambda para determinados estados del motor, previamente definidos.

La forma de tratar la información de la mariposa será de forma diferencial. En todo momento se compara la lectura actual con la anterior para determinar el incremento que se ha producido en la apertura de la mariposa, y en función de este incremento, se producirá un aumento de la inyección para compensar el empobrecimiento instantáneo de la mezcla en el colector. Es correcto considerar únicamente los incrementos porque el tiempo de adquisición de datos del sistema es constante, de manera que para comparar velocidades sólo hay que evaluar los incrementos consecutivos de apertura de la mariposa, prescindiendo del factor incremento de tiempo.

Una vez finalizado el transitorio, será nuevamente la sonda lambda la encargada de estabilizar el sistema hacia la lambda de consigna.

La optimización de los transitorios positivos es fundamental, pues son los más críticos al producirse un incremento del carburante inyectado a la vez que hay una solicitud de prestaciones del motor. Por el contrario, en los transitorios negativos el corte de la inyección es suficiente, ya que el motor trabaja en retención. De hecho, esta solución es ampliamente utilizada en la mayoría de las gestiones de inyección electrónica de gasolina actuales en automóviles de la gama de turismo.

El incremento del tiempo de inyección necesario en un transitorio depende de muchas variables, y es difícil de determinar. Actualmente, los sistemas de gestión de la inyección interpretan una actuación brusca sobre el pedal del acelerador como una solicitud de par por parte del conductor, y se prioriza el incremento del par inyectando en el colector un exceso de combustible. Este exceso de combustible provoca que la repuesta del motor sea buena y rápida, pero en contrapartida, provoca un aumento del consumo y, sobretodo, de las emisiones contaminantes por hidrocarburos sin quemar, si bien estos mayoritariamente se oxidan finalmente en el catalizador.

El método alternativo expuesto a continuación propone que el incremento del combustible a inyectar no sea constante y excesivo, sino que dependa de la velocidad de apertura de la mariposa de gases, por ser ella el indicador por excelencia de una solicitud de prestaciones del motor en sistemas sin DBW.

Durante un transitorio positivo, en cualquier sistema de gestión de la inyección, el incremento de la inyección de combustible es imprescindible para corregir el empobrecimiento de la mezcla, originado por un incremento brusco de la cantidad de aire en el colector. *Cuando el sistema detecte un transitorio positivo sólo incrementará el pulso una vez, y en modo proporcional a la velocidad de apertura de la mariposa; después de este pulso inicial, el ajuste del tiempo de inyección será controlado nuevamente por la sonda lambda.*

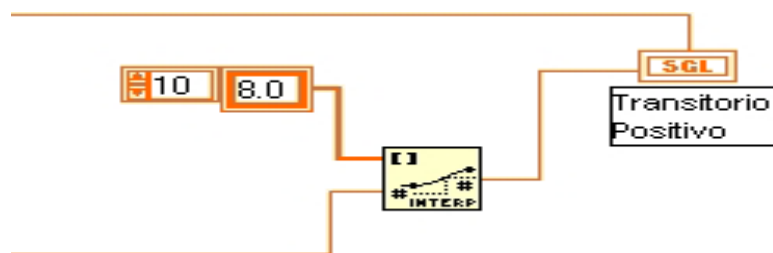


Figura 6.11: Función de interpolación del Software de Control que permite la variación del pulso inicial de inyección en los transitorios positivos según la apertura de la mariposa de gases.

El incremento del pulso inicial se obtendrá mediante un análisis de regresión sobre datos obtenidos experimentalmente de incrementos de inyección necesarios para diferentes velocidades de apertura de la mariposa, definiéndose de esta forma la actuación proporcional de nuestro controlador (figura 6.9). El ángulo que se abra la mariposa (además de la velocidad a la que lo haga), realmente sí afectará a la inyección, porque un mayor número de grados girados a una misma velocidad de la mariposa conllevará un tiempo mayor de duración del transitorio; ejemplificándolo:

El sistema detecta un transitorio, realiza su bucle de cálculo y determina un valor del incremento del tiempo de inyección en el primer pulso. Si en la siguiente lectura el transitorio ha finalizado, el control por sonda lambda pasará a estabilizar el sistema; si por el contrario el ángulo de apertura de la mariposa es muy grande, en la siguiente lectura todavía el sistema detectará transitorio y seguirá modificando el tiempo de inyección.

Con esto se reduce de manera muy importante el tiempo de respuesta de la inyección, ya que con la única corrección de la sonda lambda el incremento en el tiempo de inyección no es lo suficientemente rápido. El escalón inicial calculado permite aproximarse a la inyección que realmente sería necesaria, de manera que luego la actuación integral sólo tendría que corregir la ligera desviación que se haya producido entre los incrementos de tiempo calculados y los realmente necesarios.

En la figura 6.12 se observa que el tratamiento por etapas de los transitorios permite obtener una pendiente más pronunciada al inicio del transitorio que la que se obtendría mediante el control único con sonda lambda. La pendiente del comportamiento posterior del control de la lambda sólo indica la tendencia del valor, ya que realmente esta actuación tiene comportamiento de semejanza sinusoidal respecto al tiempo.

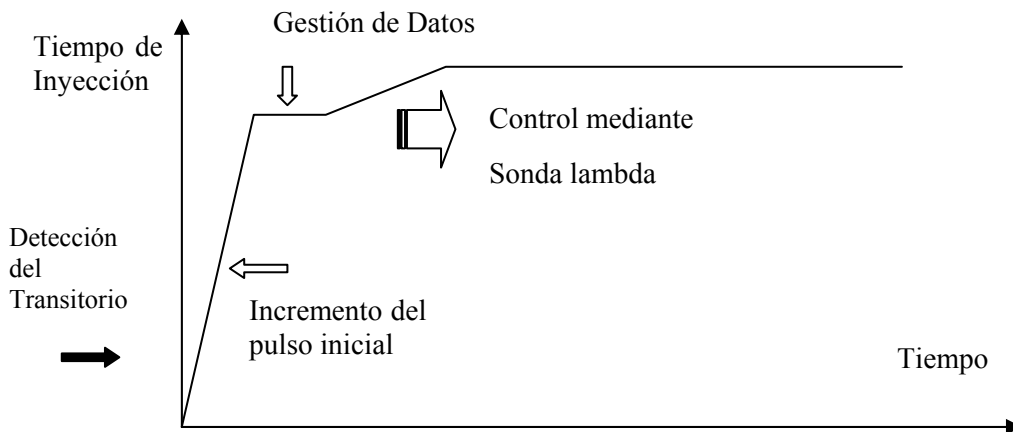


Figura 6.12: Estabilización del motor mediante la señal de la sonda lambda después del incremento del pulso inicial de inyección en un transitorio positivo.

Así mismo, la pendiente inicial, que representa el pulso inicial, se puede regular ajustando su ecuación, de manera que se obtienen varias familias de actuaciones, como se muestra en la figura 6.13.

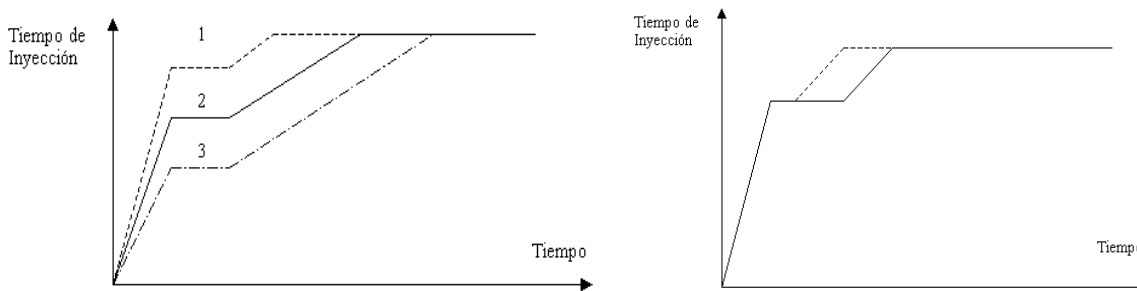


Figura 6.13: (Izquierda) Familia de actuaciones que caracterizan la gestión en los transitorios positivos (Derecha) Disminución del tiempo de procesamiento de datos en un transitorio positivo.

En un principio parece lógico que la actuación 1 (Figura 6.13 izquierda) sería la mejor de las tres, pues permite estabilizar el motor lo más rápidamente posible, pero es necesario evaluar como se comportan las otras opciones, o sea, considerar las de un ajuste menos drástico. Con las otras actuaciones se obtiene una respuesta aceptable sin aumentar excesivamente el tiempo de inyección, aspecto que tiene una especial influencia en las emisiones de contaminantes.

La otra opción es disminuir el tiempo de ejecución del bucle del sistema, siendo la actuación aún más rápida, como muestra el ajuste (en discontinuas) de la figura 6.13 derecha.

En la figura 6.13 (derecha) se aprecia perfectamente las ventajas de una actuación más rápida: por un lado el tiempo de gestión de datos se reduce y se pasa antes al control por la sonda lambda; pero, además, el control mediante sonda lambda se acelera pudiendo modificarse el tiempo de inyección en cada ciclo de funcionamiento del motor, dado que el bucle de cálculo sería más rápido que el ciclo del motor, corrigiéndose el tiempo de inyección en el mismo ciclo. Con esto se logra una mayor velocidad de regulación, que se traduce gráficamente en la trayectoria con líneas discontinuas. En este aspecto debe señalarse que, para nuestro caso específico debido al hardware de adquisición empleado, ya hay disponible en el mercado

tarjetas de adquisición que incorporan su propio procesador. Esta característica incrementa la velocidad de gestión del sistema, ya que, una vez que el software de gestión descarga sobre ella el código ejecutable que determina su actuación, la misma actúa con total independencia, haciéndolo totalmente independiente incluso del sistema operativo del ordenador donde se encuentre instalada.

Durante el funcionamiento del motor, una velocidad mayor de procesamiento de los datos hace que el motor se comporte mejor tanto en los transitorios, como en la estabilización de los estacionarios sucesivos mediante la actuación integral con sensor UEGO.

6.4 Estrategia de Gestión del Motor durante el Arranque y Calentamiento.

Al poner en marcha del motor, el sistema comienza el conteo de las 30 primeras revoluciones del motor, durante las cuales se mantiene constante un pulso de inyección de 9 milisegundos para el enriquecimiento inicial de la mezcla, independientemente de las señales provenientes del motor. Tanto el número de vueltas como la duración de la inyección se determinaron experimentalmente, con el único objetivo de garantizar la puesta en marcha del motor. Como se aprecia en la figura 6.14, ambos parámetros son fácilmente modificables desde el software de control.

Posterior a las 30 primeras revoluciones, y garantizado el arranque, el sistema nuevamente toma el control de la gestión a través de la señal UEGO, conmutando hacia la estrategia de gestión de regímenes estacionarios. Dada la sencillez y eficacia de esta estrategia, la misma es ampliamente utilizada, en idéntico concepto, en las gestiones de inyección en la industria automovilística contemporánea.

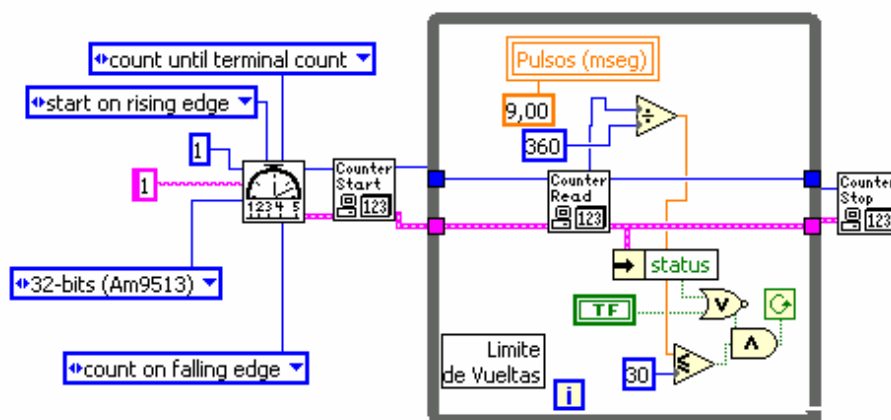


Figura 6.14: Configuración del contador de vueltas del motor durante el arranque..

La figura 6.14 muestra la implementación de esta estrategia en el software de control del sistema. Luego de configurar el primer canal counter de la tarjeta de adquisición analógica/digital, comienza la lectura de la señal proveniente del encoder proporcional instalado en el banco de pruebas (figura 5.1), el cual gira solidario con el cigüeñal del motor.