

Capítulo 2:

Fundamentos del control de la mezcla

2.1. Fenomenología de la formación de la mezcla

2.1.1. Aportación del aire

2.1.1.1. Propiedades del aire

El oxígeno necesario para formar la mezcla combustible se toma en la práctica del aire atmosférico. El aire es un gas formado por varios componentes, siendo los más importantes de ellos el nitrógeno y el oxígeno, que juntos constituyen un 98,7% en masa del total. Se puede afirmar que hasta aproximadamente 15 km de altitud, la composición del aire es la mostrada por la siguiente tabla:

Gas	% volumen	% masa	Peso molecular (g)
N ₂	78,09	75,52	28,02
O ₂	20,95	23,15	32
Ar	0,93	1,28	39,95
CO ₂	0,03	0,05	44,01
Ne	0,0018	0,0012	20,18
He	0,0005	0,00007	4,003
Kr	0,0001	0,0003	83,80
Xe	0,000009	0,00004	131,3
H ₂	0,00005	0,000004	2,016
Aire seco	100	100	28,96

Tabla 2.1: Composición del aire seco [Lenz90Gemi]

En el caso de aire seco, la densidad se calcula en función de la presión y la temperatura atmosféricas de la siguiente forma:

$$\rho(P, T) = 1,2928 \cdot \frac{P}{1013} \cdot \frac{273}{273 + T} \quad (2.1)$$

La dependencia de las propiedades anteriores con la altitud, válida hasta 11 km, es:

$$\begin{aligned} T &= 15 - 0,0065 \cdot h \\ P &= 1013 \cdot \left(1 - \frac{0,0065}{288} \cdot h \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde P es la presión en mbar, T la temperatura en °C, h la altitud en m sobre el nivel del mar, y ρ la densidad en kg/m³. Si se considera la humedad ambiental, entonces la densidad se ha de corregir:

$$\rho_{\text{húmedo}} = \rho_{\text{seco}} \cdot \left(1 - 0,378 \cdot h_{\text{rel}} \cdot \frac{P_{\text{sat}}}{P} \right) \quad (2.3)$$

siendo h_{rel} la humedad relativa, y P_{sat} la presión de saturación de vapor, a la presión y temperatura consideradas.

El oxígeno está presente en una proporción del 20,95% en volumen, y del 23,15% en peso, si se trata de aire seco al nivel del mar. Puede considerarse constante hasta una altura de 15 km, a partir de la cual desciende 0,2% en volumen cada km.

2.1.1.2. Dosificación del aire

El llenado de los cilindros se produce por aspiración, durante la carrera descendente del pistón mientras la válvula de admisión está abierta, o bien comprimiendo previamente el aire, lo que se denomina sobrealimentación. A diferencia de un

motor Diesel, el motor Otto sólo puede regular la carga mediante la cantidad de mezcla introducida y quemada en el cilindro. Dado que el dosado ha de ser constante, el trabajo realizado por ciclo es función directa de la masa de aire, o lo que es lo mismo, la potencia desarrollada es función del caudal másico de aire.

La forma de regular el caudal de aire es mediante una válvula de mariposa, colocada en el colector de admisión, y accionada a voluntad por el conductor mediante el pedal del acelerador. La mariposa crea una pérdida de carga variable, de modo que aguas arriba la presión existente es aproximadamente la atmosférica, mientras que aguas abajo será siempre menor.

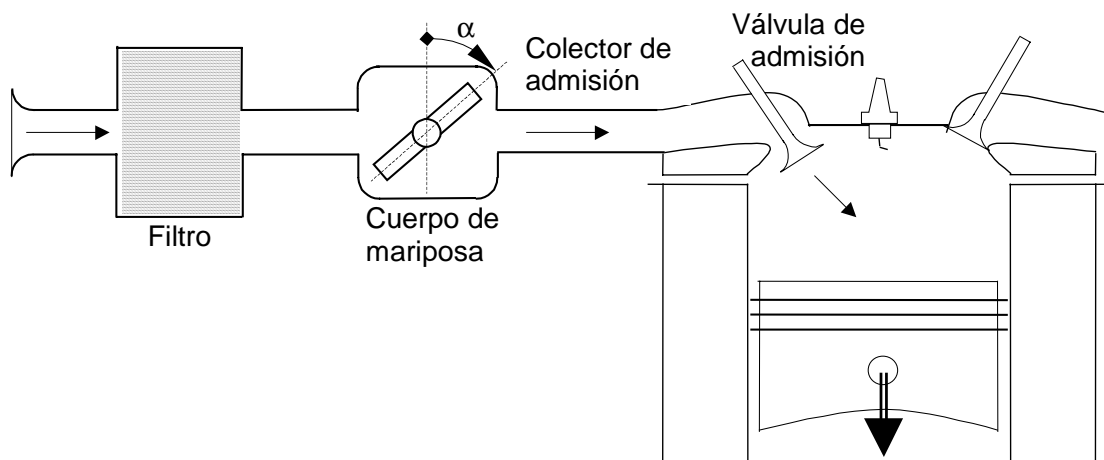


Fig. 2.1: Sistema de admisión de aire

Una válvula de mariposa dispuesta en un conducto cilíndrico viene caracterizada por la siguiente tabla:

α	K	α	K	α	K	α	K
0	∞	35	58,8	55	6,22	75	0,90
20	750	40	32,6	60	3,91	85	0,52
25	256	45	18,7	65	2,52	85	0,24
30	118	50	10,8	70	1,54	90	0

Tabla 2.2: Factor de pérdida de carga en la válvula de mariposa

siendo K el factor de pérdida de carga en la fórmula

$$\Delta h = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.4)$$

Δh la pérdida de carga, v la velocidad media en la sección normal del tubo, y g la aceleración de la gravedad. Se observa la poca linealidad resultante, aunque por su sencillez de accionamiento y buena estanqueidad es la utilizada normalmente para

la dosificación de los motores.

El grado de llenado del motor se mide con el parámetro denominado **rendimiento volumétrico** (η_{vol}). Representa el volumen de aire admitido en cada ciclo, respecto al teóricamente admisible, el cual coincide por definición con la cilindrada.

$$\eta_{vol} = \frac{V_a}{V} = \frac{m_a}{\rho_{adm} V} = \frac{R T_{adm}}{P_{adm} V} m_a \quad (2.5)$$

V_a y m_a representan respectivamente el volumen y la masa de aire admitido; ρ_{adm} , T_{adm} y P_{adm} son la densidad, temperatura y presión del aire en el colector de admisión, y V la cilindrada. Dado que las condiciones se miden aguas abajo de la mariposa, quedan incluidas las pérdidas de carga existentes en el colector y la válvula de admisión, pero no se tiene en cuenta la producida en la mariposa ni en el filtro. Si las condiciones se refieren al aire atmosférico en lugar de a la admisión, se habla de **rendimiento volumétrico global**, que es un valor mucho más pequeño en general, puesto que comprende todas las pérdidas de carga, incluida la mariposa.

El rendimiento volumétrico es el resultado de una serie de factores, tanto de diseño como de funcionamiento. Taylor [Taylor90The] analiza la dependencia con estos últimos factores, que son los únicos que hay que considerar si se trata de un motor concreto.

- **Número de Mach.** Se define como el cociente entre la velocidad en la mínima sección de la válvula, y la velocidad del sonido en las mismas condiciones. Es una función decreciente.
- **Cociente de presiones,** entre el escape y la admisión. Es una función lineal y decreciente, con una pendiente función de la relación de compresión del motor.
- **Número de Reynolds.** Es una medida adimensional de las fuerzas de inercia y viscosas. La influencia es pequeña.
- **Dosado.** Permanece constante hasta $\lambda=1,2$, valor a partir del cual aumenta linealmente.
- **Temperatura de admisión.** Aumenta con un factor $\frac{1}{2}$. Este parámetro depende de los cambios de fase que se produzcan en el combustible. Una gran vaporización hace descender la temperatura, y consecuentemente el rendimiento volumétrico.

Entre los factores de diseño, los principales son el diagrama de distribución, que representa la alzada de las levas en función del ángulo de cigüeñal, la relación de compresión, la relación carrera-diámetro del cilindro, y en general la geometría de los sistemas de admisión y escape.

2.1.2. Aportación del combustible

2.1.2.1. Propiedades de la gasolina

□ Composición

El combustible más habitual es la gasolina, consistente en las fracciones obtenidas por destilación del petróleo, a temperaturas comprendidas entre 20 y 150 °C. Está constituida por una mezcla de hidrocarburos en estado líquido para condiciones ambientales normales. Estos hidrocarburos pueden clasificarse desde el punto de vista químico en [Pisch88Ver]:

- **Parafinas o alcanos:** Están formados por cadenas saturadas unidas por enlaces simples, y responden a la fórmula C_nH_{2n+2} . Las cadenas pueden tener forma lineal (parafinas normales), como el n-heptano C_7H_{16} , o ramificada (isoparafinas), como el caso del iso-octano C_8H_{18} .
- **Olefinas:** Son cadenas insaturadas, con algún enlace doble. Se formulan como C_nH_{2n} (monoolefinas o **alquenos**) si tienen un enlace doble, y como C_nH_{2n-2} (diolefinas o **alcadienos**) si tienen dos enlaces dobles.
- **Naftenos o cicloalcanos:** Son cadenas anulares, con enlaces simples y fórmula C_nH_{2n} .
- **Aromáticos:** Son también cadenas anulares, pero con enlaces dobles. La base es el benceno (C_6H_6), que tiene tres enlaces dobles.

□ Densidad

La densidad de un hidrocarburo depende de su composición, y aumenta con el número de carbonos, como muestra el gráfico 2.2. Una gasolina comercial tiene una densidad de $\rho_{20}=0,73\div 0,78\text{ kg/dm}^3$, a 20 °C. La dependencia de la densidad con la temperatura del combustible (en °C) se puede representar de la siguiente forma:

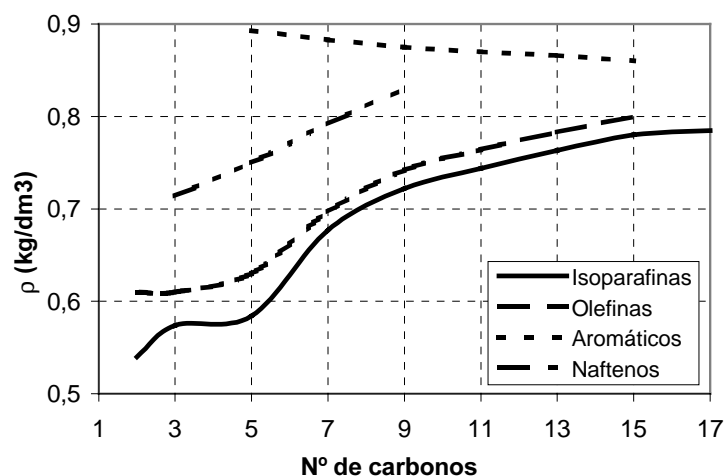


Fig. 2.2: Densidad de un hidrocarburo en función del número de carbonos a 20 °C [Pisch88Ver]

$$\rho(T) = \rho_{20} + 0,00075 \cdot (20 - T) \quad (2.6)$$

□ Poder calorífico

El poder calorífico utilizado para las gasolinas es el inferior, dado que el agua resultante de la combustión se considera en forma de vapor. La relación con la estructura molecular y el número de carbonos queda reflejada en la gráfica 2.3. Los valores habituales para las gasolinas oscilan entre 40,2 MJ/kg (benceno) y 45,4 MJ/kg (n-pentano).

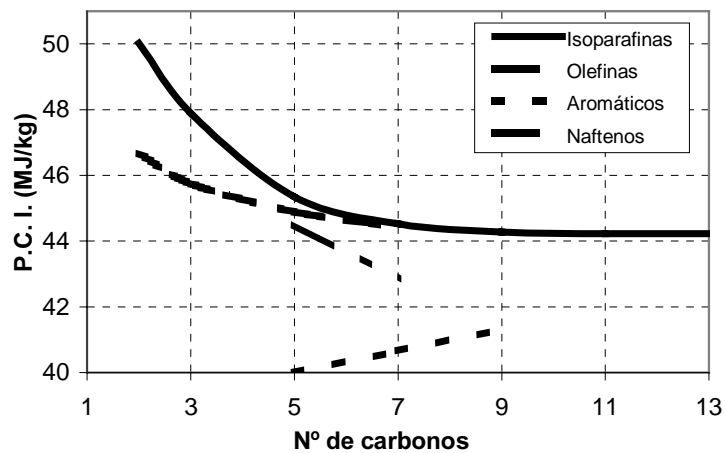


Fig. 2.3: Poder calorífico inferior de un hidrocarburo en función del número de carbonos [Pisch88Ver]

□ Volatilidad

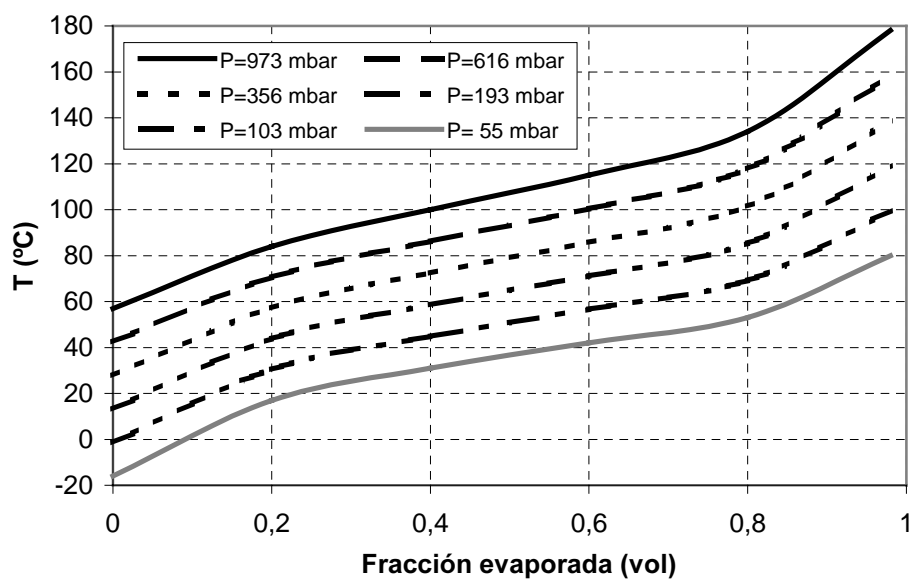


Fig. 2.4: Curva de destilación de la gasolina a diferentes presiones y temperaturas [Lenz90Gemi]

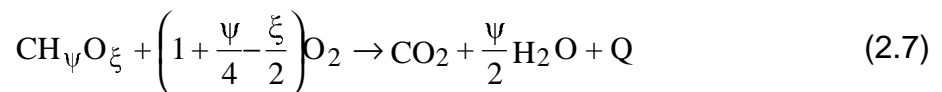
La gasolina es un fluido que mantiene siempre un equilibrio entre la fase líquida y de vapor. Dado que no se trata de un compuesto puro, la temperatura de ebullición de la gasolina no es un punto único, sino que depende de cada hidrocarburo que forma parte de su composición; en general es más alta cuanto mayor es el número de carbonos presentes. La gráfica 2.4 [Lenz90Gem] representa la curva de destilación para una gasolina comercial, donde figura la fracción en volumen evaporada, a distintas presiones y temperaturas.

□ Dosado estequiométrico

Considerando una gasolina cuya fórmula genérica es $C_xH_yO_z$, se definen los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}\psi &= y/x = (12,01/1,008) \cdot (H/C)_{\text{másica}} && \text{relación atómica hidrógeno/carbono} \\ \xi &= z/x = (12,01/16) \cdot (O/C)_{\text{másica}} && \text{relación atómica oxígeno/carbono}\end{aligned}$$

Entonces, la fórmula química de combustión completa es:



En este caso, se define el **dosado estequiométrico** (AFR_e) como la relación entre el caudal másico de aire y de combustible estequiométricamente necesario para su combustión completa, según la fórmula anterior. Teniendo en cuenta que el aire contiene un 20,95 % en volumen de O₂, la combustión de 1 mol de combustible requiere:

$$\frac{100}{20,95} \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right) = 4,773 \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right)$$

moles de aire. Para convertir los moles en masa de aire y gasolina:

$$1 \text{ mol aire} = 28,96 \text{ g}$$

$$1 \text{ mol gasolina} = (12,01 + 1,008 \psi + 16 \xi) \text{ g}$$

Dividiendo la masa de aire por la masa de gasolina resulta:

$$AFR_e = \frac{28,96 \cdot 4,773 \cdot \left(1 + \frac{\psi}{4} - \frac{\xi}{2}\right)}{12,01 + 1,008 \cdot \psi + 16 \cdot \xi} \quad (2.8)$$

Teniendo en cuenta que un valor habitual es $\psi=6,1 \div 6,2$ y $\xi=0$, se obtiene que AFR_e está comprendido entre 14 y 15, típicamente 14,7.

□ Propiedades de la gasolina Eurosuper

En el caso de la gasolina Eurosuper comercial, los parámetros más característicos se resumen a continuación:

Densidad a 20 °C [kg/m ³]	0,75
Presión de vapor Reid a 37,8 °C [bar]	0,6...0,9
Calor latente de vaporización [kJ/kg]	420
Viscosidad cinemática [cSt]	0,7
Poder calorífico inferior (líquido) [MJ/kg]	42,5...43,5
Número de octano Research	>95
Número de octano Motor	>85

Tabla 2.3: Propiedades de la gasolina Eurosuper comercial

2.1.2.2. Dinámica del combustible

Con independencia del sistema de formación de la mezcla, siempre se suceden unas fases desde que se aporta el combustible a la corriente de aire, en el colector de admisión, hasta que este entra en la cámara de combustión. En primer lugar se debe introducir el chorro de combustible, bien sea por succión (carburación), o mediante presión (inyección). Este combustible se pulveriza en forma de minúsculas gotas, las cuales se pueden descomponer en dos fases: líquido y vapor. La fracción de vapor penetra en el interior del cilindro tan pronto como le es posible, al igual que las gotas, arrastradas por la corriente de aire, mientras que la fracción líquida avanza muy lentamente. No obstante, parte de la fracción líquida vuelve a vaporizarse, de modo que mientras la válvula de admisión esté abierta, penetrará en el cilindro gasolina tanto líquida como en fase de vapor. El cuadro de la figura 2.5 resume todos los estados y fenómenos que se suceden, los cuales se describen en los apartados sucesivos.

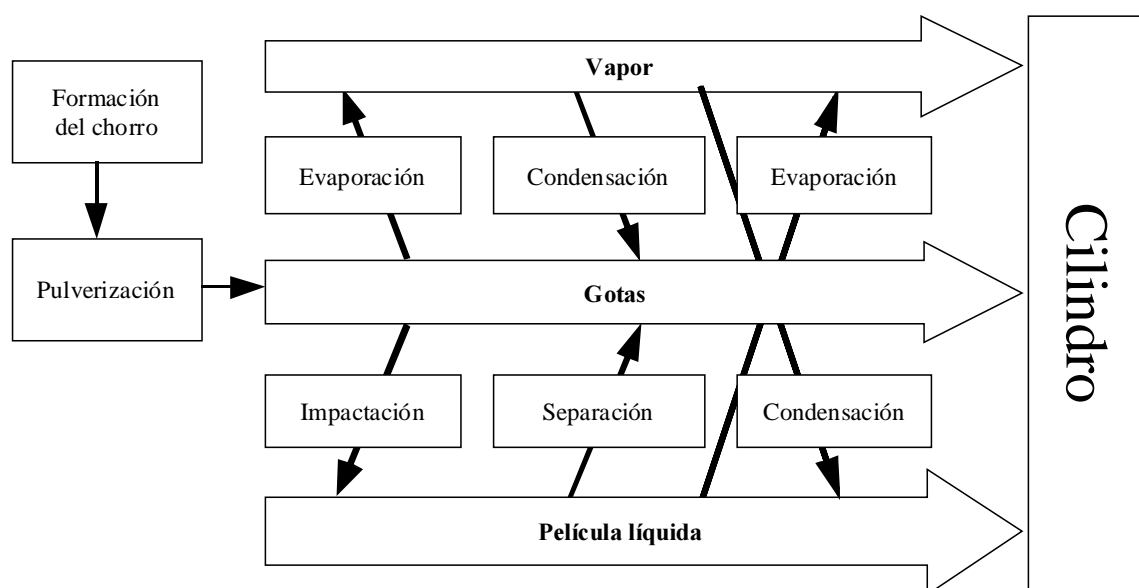


Fig. 2.5: Evolución de las fases del combustible, en el colector de admisión [Lenz90Gemi]

2.1.2.3. Formación del chorro

Desde que se abandonó el carburador, el único dispositivo empleado para la formación de la mezcla es el inyector, representado de forma esquemática en la figura 2.6. La particularidad más importante reside en que la cantidad de combustible aportado es totalmente independiente del caudal de aire, a diferencia de los carburadores, en los que ambos caudales están ligados por diversas leyes físicas.

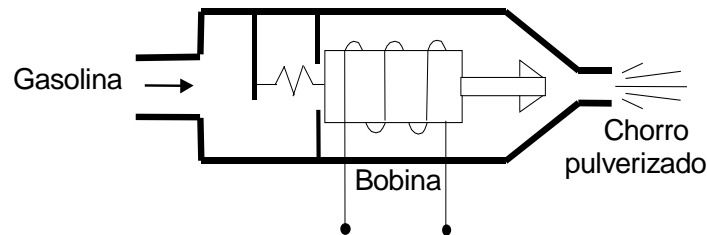


Fig. 2.6: Inyector de gasolina

La inyección se produce al llegar el combustible presurizado al inyector, gracias a una bomba eléctrica situada en el depósito. Una aguja, cuya punta es presionada contra el extremo del inyector por la acción de un muelle, bloquea los orificios de salida e impide la salida del combustible. Sólo cuando llega una señal eléctrica de la centralita, un electroimán vence la fuerza del muelle y levanta la aguja, dejando al descubierto los orificios. El número, tamaño y posición de estos permite lograr un chorro de combustible pulverizado, el cual se unirá a la corriente de aire que llega a través del colector de admisión, formando de esta manera la mezcla combustible. Es importante poder mantener constante la presión de alimentación respecto a la punta del inyector, o lo que es lo mismo respecto a la presión existente en el colector de admisión, lo cual se logra mediante un regulador de presión tarado. La gasolina sobrante es devuelta al depósito.

Atendiendo a diferentes criterios, se pueden clasificar los sistemas de inyección de la siguiente forma:

□ Por el número de inyectores

- **Monopunto** o central: un solo inyector para todos los cilindros, aguas arriba de la mariposa. Es en realidad una evolución del carburador, ya que comparte bastantes de sus ventajas e inconvenientes.
- **Multipunto**: un inyector por cilindro, aguas abajo de la mariposa. Esto permite acercar lo máximo posible la inyección a la cámara de combustión, con lo que el efecto de pared del combustible se reduce y la respuesta dinámica y en frío es mucho más precisa, aparte de permitir un rendimiento volumétrico más elevado. Los inyectores van alojados en una galería o regleta, que es la encargada de distribuir el combustible presurizado a los distintos inyectores. La figura 2.7 muestra ambos sistemas.

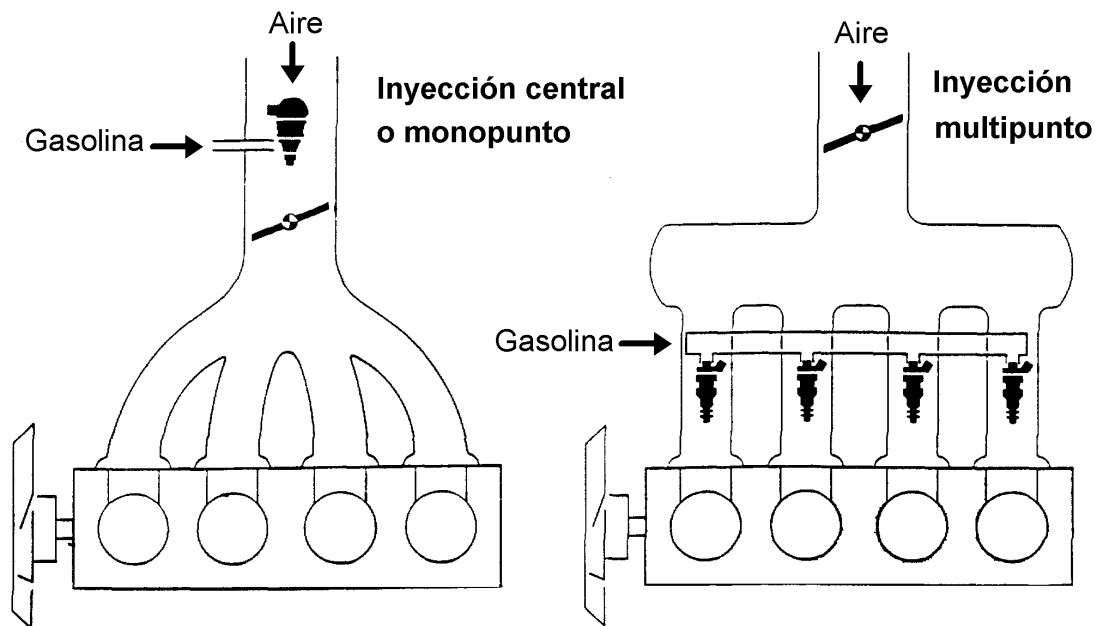


Fig. 2.7: Inyección monopunto y multipunto [Bosch90Man]

□ **Por el sincronismo de la inyección**

- **Simultánea:** todos los inyectores se abren a la vez. La gestión es más simple.
- **Secuencial:** cada inyector se abre en el momento óptimo que corresponde a cada cilindro respectivo, algo antes de que comience a abrir la válvula de admisión. Con ello se consigue una distribución de la mezcla más exacta, lo cual redundaría en un menor riesgo de detonación y menores emisiones de contaminantes. Requiere una capacidad de cálculo mucho mayor, pero debido al imparable avance de la electrónica, los sistemas digitales actuales ofrecen una capacidad sobrada.

□ **Por la posición del inyector**

- **Directa:** dentro de la cámara de combustión. Requiere presiones muy altas, de más de 100 bar.
- **Indirecta:** en el colector de admisión o la culata, sobre la válvula de inyección. Es la más generalizada.

□ **Por la regulación del caudal**

- **Continua:** el inyector produce un caudal variable continuo, regulado por tensión o por presión. En desuso.
- **Discontinua:** el inyector recibe un tren de pulsos de una determinada duración, por lo que está o bien totalmente abierto, o bien totalmente cerrado. Es la utilizada hoy en día.

2.1.2.4. Pulverización

El chorro de combustible introducido en el colector de admisión choca contra la corriente de aire que llega a través de la válvula de mariposa, a consecuencia de lo cual se pulveriza en pequeñas gotas. Para que esto suceda, se necesita una energía mínima, la cual tiene diversas procedencias:

- Energía aportada en la inyección (geometría, velocidad, turbulencia).
- Energía del aire en el que se inyecta (velocidad, presión y temperatura).

El objetivo es formar una mezcla bien pulverizada, para facilitar la posterior vaporización. El grado de pulverización se mide por el **tamaño medio de la gota**. Un tamaño pequeño favorece la combustión por un contacto más íntimo entre las moléculas de combustible y las de oxígeno. El tamaño final de la gota es el resultado del equilibrio dinámico entre dos fenómenos: atomización y coalescencia. La **atomización** es la tendencia a disgregarse una gota en gotas más pequeñas, debido a la energía del choque; la **coalescencia**, al contrario, tiende a agrupar las gotas en otras de mayor diámetro, a causa de la menor energía superficial obtenida así.

El proceso físico de formación del chorro a la salida del inyector es un fenómeno muy complejo, que viene descrito por varios autores: Kim [Kim91Three], Chen [Chen91A No], Yang [Yang91Non-], Gonor [Gonor84Spr], Kawasaki [Kawas Ana], Hirao [Hirao87Pre], Lenz [Lenz90Gemi], Giménez [Gimén97Car] .

De forma general, puede decirse que los principales factores que influyen en la pulverización del chorro son:

- **Características del combustible:** densidad, viscosidad, presión de vapor, presión de inyección, velocidad de salida.
- **Características del aire:** densidad, viscosidad, presión, velocidad.
- **Características comunes del aire y el combustible:** tensión superficial.
- **Características del inyector:** geometría de los orificios.

Todos los aspectos anteriores, se resumen en dos números adimensionales: **Reynolds** y **Weber**. El número de Reynolds considera la geometría del inyector y la turbulencia producida en este:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu_f} \quad (2.9)$$

siendo v la velocidad de salida del combustible [$m^2 s^{-1}$], d el diámetro característico del inyector [m], y ν_f la viscosidad cinemática del combustible [$m^2 s^{-1}$]. El número de Weber tiene en cuenta la dificultad a la penetración de las gotas que ofrece el aire:

$$We = \frac{d_g \rho_a v_{rel}^2}{\sigma} \quad (2.10)$$

donde ρ_a es la densidad del aire [kg m^{-3}], v_{rel} la velocidad relativa combustible-aire [m s^{-1}], y d_g el diámetro medio de las gotas de combustible [m].

Así pues, está demostrado que la pulverización total se produce cuando se cumplen dos condiciones, cuyos valores umbral dependen del autor [Gimén97Car]:

$$\begin{aligned} We &> 3,6 \div 8,4 \\ \frac{We}{\sqrt{Re}} &> 0,5 \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.1.2.5. Introducción en el cilindro

Una vez se dispone de una determinada cantidad de combustible pulverizado en el colector de admisión, las gotas pueden entrar directamente en el cilindro si encuentran la válvula de admisión abierta. En la práctica, la inyección suele finalizar un cierto ángulo ($\approx 60^\circ$ de cigüeñal) antes de que comience a abrirse la válvula, con objeto de permitir que las gotas tengan tiempo de vaporizarse y así se logre una mezcla mucho más homogénea entre el aire y el combustible. Sin embargo, otra parte de la gasolina se deposita en las paredes del colector, la mariposa (en el caso de inyección central), el conducto y la válvula de admisión, lo cual se denomina “**efecto de película de pared**”. La masa de líquido depositado en la película es función de los siguientes parámetros [Serra89Spr]:

- Temperatura del combustible.
- Densidad y viscosidad del combustible.
- Velocidad, presión y temperatura del aire.
- Tiempo y fase del proceso de admisión (velocidad del motor).
- Superficie de vaporización.

Durante el funcionamiento en régimen estacionario del motor, la masa de líquido es constante. Ahora bien, cuando la presión y la temperatura en el colector se ven alteradas, como sucede al variar la carga del motor o cuando todavía no se ha alcanzado la temperatura de trabajo, el equilibrio se desplaza en un sentido u otro, modificando así el dosado de la mezcla que llega a los cilindros.

En el caso de una aceleración, en que la mariposa se abre, aumenta la presión en el colector, desplazándose el equilibrio hacia la fase líquida. Esto produce un empobrecimiento brusco de la mezcla, que deberá ser compensado aportando una cierta cantidad adicional de combustible en el colector en el momento de la aceleración.

Por el contrario, al cerrarse la mariposa en las retenciones, la presión en el colector disminuye y el equilibrio se desplaza hacia la fase gaseosa. La mezcla, además de ser excesivamente rica, no se quema bien, por lo que habrá que actuar empobreciendo e incluso suprimiendo totalmente el combustible (*cut-off*) si no se quiere que la gasolina se queme en el catalizador y este quede irremisiblemente destruido. Para mantener el dosado constante, se debe compensar en sentido contrario.

Este combustible líquido tiene dos formas de llegar hasta el cilindro. La primera de ellas es por paso a fase de vapor, el cual se une al combustible que tras la pulverización se había vaporizado directamente. La otra es por transporte o avance lento de la película.

□ Vaporización

La vaporización del combustible se debe a la suma de dos fenómenos.

- **Evaporación o vaporización conductiva:** Cuando el combustible choca con una superficie caliente, se comienzan a desprender las fracciones con un punto de ebullición más bajo.
- **Vaporización convectiva:** Se produce debido a la turbulencia del medio, principalmente sobre la película de combustible líquido depositada en las paredes. Según Servati [Serva89Spr], la cantidad de gasolina vaporizada de este modo es función de los siguientes factores:
 - Temperatura del combustible.
 - Presión de vapor en la superficie del combustible.
 - Velocidad, presión y temperatura del aire.
 - Tiempo del proceso de admisión (velocidad del motor).
 - Superficie de vaporización.

□ Transporte

La película avanza muy lentamente hacia el cilindro, con una velocidad resultado de dos fuerzas: la de arrastre de la corriente de aire en la superficie del líquido, y la de rozamiento con las paredes del colector. Con la hipótesis de que la gasolina es un fluido Newtoniano y que avanza con régimen laminar, se obtiene un gradiente de velocidades a lo largo de una sección transversal, como se observa en la figura 2.8. Suponiendo que el colector de admisión tiene forma cilíndrica:

$$\tau = \eta_f \frac{dv}{dr} \quad (2.12)$$

donde τ es la tensión cortante en la superficie de la película [N m^{-2}], η_f la viscosidad dinámica del combustible [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$], y v la velocidad de la película [m s^{-2}] a una distancia r desde la pared hasta la sección considerada.

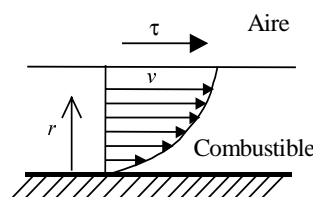


Fig. 2.8: Distribución de velocidades en la película de combustible [Lenz90Gemi]

2.2. Problemática de la gestión de la inyección

2.2.1. Fundamentos del control lambda

Una de las dificultades más importantes hoy en día en la gestión de un motor Otto es el control de la mezcla de aire y gasolina. Como se ha visto, la proporción de aire y combustible ha de mantenerse en todo momento dentro de unos límites bastante estrechos, lo cual no puede lograrse mediante un carburador. Los primeros sistemas de inyección conseguían formar una mezcla con un dosado mucho más preciso que un carburador, aunque no lo suficiente como para cumplir las limitaciones legales de emisiones. Ahora bien, la evolución de los controladores digitales y los ordenadores permitió aplicar algoritmos de control a los sistemas de inyección, por la facilidad de gobernar la cantidad de gasolina mediante una señal de pulsos. Nació así el denominado **control lambda** en lazo cerrado, por ser λ la variable controlada.

Un sistema de inyección consiste en un conjunto de sensores y actuadores, destinados a satisfacer los requerimientos de la mezcla en todo instante. La característica más importante es que no existe ningún fenómeno físico, como en el caso del carburador, que relacione el caudal de combustible con el caudal de aire.

El aire se introduce a través del filtro en el colector de admisión, y se dosifica mediante la válvula de mariposa. Esta suele ir gobernada directamente por el pedal del acelerador mediante un cable, aunque ya existen sistemas que disponen de mariposa accionada por un motor eléctrico, a través de la señal que llega de la centralita, la cual recoge la consigna de un potenciómetro instalado en el acelerador.

Por otro lado llega el combustible, que dentro del colector de admisión se une al aire, y esta mezcla es la que se introduce en el cilindro. Una centralita recibe la información de todos los sensores, y elabora la señal que ha de llegar al inyector, el cual debe aportar la cantidad necesaria para formar una mezcla en la proporción estequiométrica. No obstante, el hecho de utilizar un alto número de sensores supone una serie de problemas:

- No proporcionan el valor real de la variable medida, sino una aproximación.
- El valor no se obtiene de forma instantánea, sino tras un cierto retardo.
- Desde el punto de vista frecuencial, actúan como filtros pasabajo.
- Con el envejecimiento, se descalibran.
- A veces, por dificultades físicas, no pueden colocarse en el punto exacto donde interesa medir, sino en una posición diferente.

Por este motivo, dado el pequeño tamaño de la ventana del catalizador, no es suficiente con un sistema como el descrito, sino que es necesario contar con la información del valor efectivo de λ , medido en los gases de escape y antes del catalizador. Mediante un algoritmo de control se cierra el lazo, y la centralita actúa con una acción correctiva, que partiendo del valor de λ recién medido, compense el valor calculado de la señal del inyector, para obtener una mezcla exactamente

estequiométrica, según se representa en la figura siguiente.

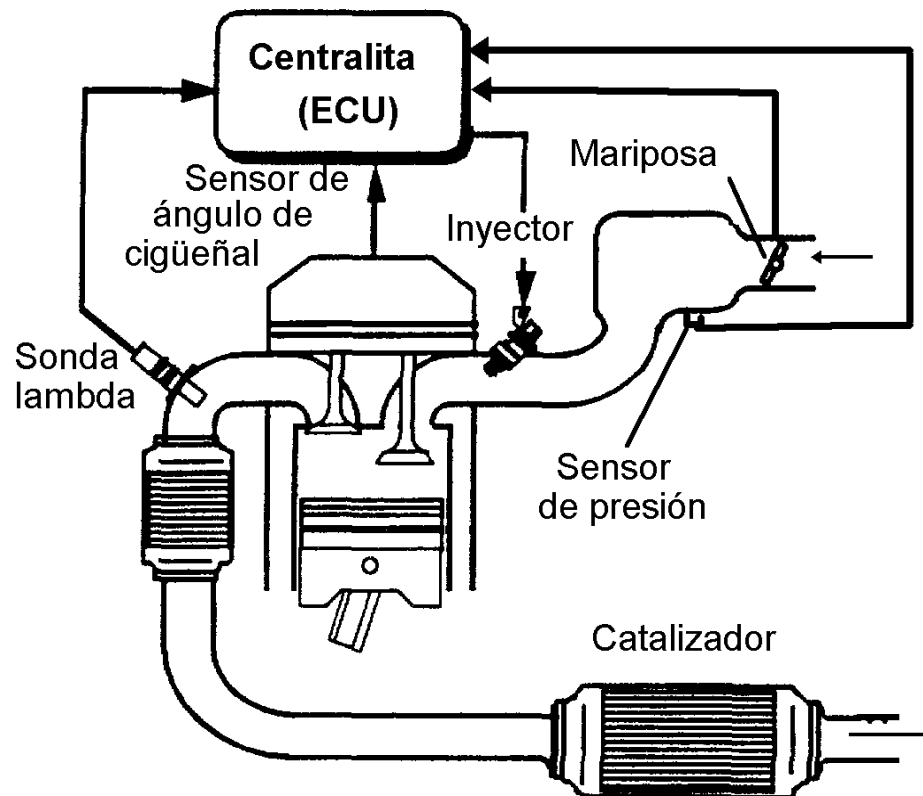


Fig. 2.9: Gestión de la mezcla de aire y combustible mediante control λ [lwata96Mod]

Las operaciones que la centralita debe realizar son las siguientes:

1. **Cálculo del caudal másico de aire.** Puede realizarse de forma directa, mediante un caudalímetro, o de forma indirecta, a partir del régimen de giro y un parámetro representativo del grado de carga, como puede ser el ángulo de la mariposa o la presión absoluta en el colector de admisión.
2. **Cálculo del caudal másico de combustible.** Este se realiza en lazo abierto y en dos fases. En la primera se calcula el valor estático, y dado que el dosado deseado es constante, se limita a multiplicar el caudal de aire por un factor. En la segunda fase, se realizan correcciones para compensar la dinámica del sistema, mediante otras variables adicionales, como la temperatura del aire, temperatura del refrigerante del motor, primera derivada del ángulo de mariposa, etc...
3. **Cálculo del tiempo de inyección.** En el caso de un sistema discontinuo, donde el inyector abre por completo durante una parte del ciclo, el tiempo es una función del caudal de combustible requerido.
4. **Cálculo del dosado real,** a partir de la concentración de oxígeno en los gases

de escape. Si el sensor es de tipo lineal, se tendrá información sobre el valor de λ , pero si es binario, sólo se sabrá el sentido de la desviación (rico o pobre).

5. **Corrección del tiempo de inyección**, a partir del error, cerrando el lazo mediante un controlador P, I ó PI.

2.2.2. Componentes físicos

2.2.2.1. Centralita

El programa de control se ejecuta en el microprocesador de la centralita, y debe ser lo suficientemente rápido como para poder efectuar todos los cálculos en un ciclo de motor. Además, la centralita contiene una memoria donde pueda almacenarse toda la información que requiere el microprocesador. Esta memoria puede ser de tres tipos:

- **RAM:** Es la memoria volátil, donde inicialmente se copia todo el contenido de la EPROM, y en la cual se almacenan las variables de estado.
- **ROM/EPROM:** Es una memoria programada eléctricamente por el fabricante, de sólo lectura. Consta de dos partes: programa y datos.
 - **Programa:** contiene el algoritmo de cálculo, en código ejecutable. Es diseñado por el fabricante del sistema de gestión, y no puede ser modificado más que por este.
 - **Datos:** contienen todos los parámetros utilizados por el programa, los cuales personalizan la aplicación y pueden ser modificados por el ingeniero responsable de la aplicación, mediante el equipo de desarrollo correspondiente.
- **EEPROM:** Es una memoria no volátil, en la que se guardan ciertas informaciones, como:
 - Historial de **errores** detectados, para su verificación posterior en taller.
 - Valores de **adaptatividad**, aprendidos durante el funcionamiento.
 - Valores **codificables** en taller (código, variante, etc.).

La centralita recibe las señales procedentes de una serie de sensores y suministra a su vez señales a los actuadores. Tanto unos como otros pueden ser de tres tipos, según el tipo de señal: analógicos, de frecuencia, o digitales.

Todos los sensores requieren una etapa previa de protección y adecuación de la señal suministrada a la electrónica utilizada. Posteriormente, la señal procedente de los sensores analógicos se muestrea mediante un convertidor analógico-digital; los de frecuencia requieren un convertidor de pulsos-binario, y los digitales se conectan al puerto de entrada. Los actuadores requieren un proceso inverso, debiendo pasar por una etapa de adaptación de impedancia y posteriormente algunos, como es el caso de las bobinas de encendido, por una etapa de potencia.

2.2.2.2. Medidor de caudal de aire

□ Medidor de trampilla

Consiste en una trampilla que intercepta el paso del aire de admisión. Por un lado, está sometida a la acción de un muelle, que la obliga a cerrar. Por otro lado, el aire incidente tiende a abrirla. La posición de equilibrio θ , que es medida mediante un potenciómetro, es una función del caudal másico. El principal problema es la alta restricción que supone al paso del aire, lo cual reduce la potencia máxima disponible, y sobre todo el alto tiempo de respuesta.

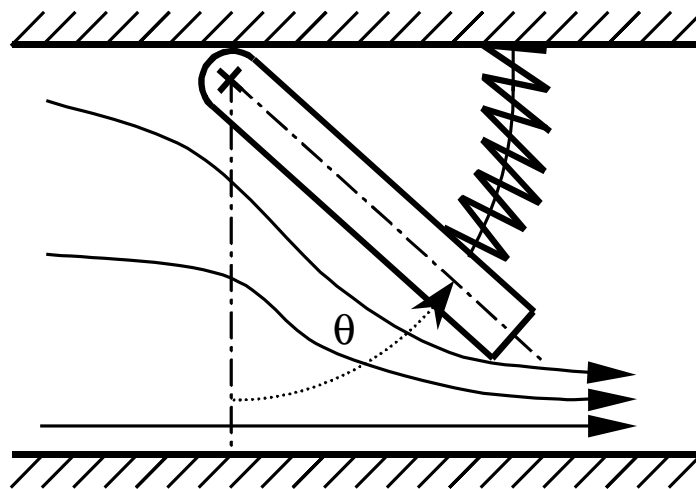


Fig. 2.10: Medidor de caudal de aire de trampilla

□ Medidor de hilo caliente

Es el más utilizado en la actualidad. Se basa en un conjunto de resistencias dispuestas en forma de puente de Wheatstone, dos de las cuales están expuestas a la corriente del aire de admisión. Teniendo en cuenta que el calor disipado en las resistencias es función directa del caudal másico de aire, si se intenta mantener una de ellas a temperatura constante, la intensidad eléctrica que debe atravesarla es también función del caudal. La señal de tensión proporcionada por el sensor tiene la siguiente expresión [Loesi89Mas]:

$$V = k_1 \cdot \dot{m}_a^{1/4} + k_2 \quad (2.13)$$

Al no haber partes móviles, la respuesta es muy rápida en comparación con los medidores de trampilla. Mientras que los anteriores tienen un retardo de aproximadamente 85 ms, en los de hilo caliente este se reduce a unos 20 ms [Loesi89Mas]. El error en la medición es del orden del 3%. Sin embargo, tienen una serie de inconvenientes:

- Alto precio.

- Son delicados.
- La medición es demasiado puntual, por lo que se intenta realizarla siempre fuera de la capa límite.
- Dado que es imposible detectar la dirección del caudal, sino tan sólo su valor, no pueden utilizarse en las zonas de funcionamiento del motor donde la fluctuación en el flujo de aire ocasionada por la apertura intermitente de las válvulas de admisión y el movimiento alternativo de los pistones es importante.

2.2.2.3. Sensor de presión

Los sensores de presión utilizados para la gestión de motores consisten en un chip con un conector, el cual se une mediante un tubo flexible al punto donde se desea medir la presión absoluta. En su interior hay una cápsula de vacío que sirve como referencia de la presión nula. La deformación de un diafragma por efecto de la diferencia de presión se detecta gracias a unos captadores piezoeléctricos, montados sobre el mismo diafragma, en configuración de puente de Wheatstone. El sensor puede ir encapsulado, lo que permite montarlo cerca del punto de medición, o incluso puede integrarse en la placa de la centralita. La precisión obtenida es del orden del 0,5%, que puede mejorarse hasta un 0,05% mediante compensación de la tensión de referencia en función de la temperatura, para un rango de medición de 170 a 1050 bar. El valor de histéresis, en el límite de la escala, es de $\pm 0,6\%$. El tiempo de respuesta suele estar por debajo de los 10 ms.

2.2.2.4. Sensor de posición de mariposa

Consiste en un potenciómetro de tipo lineal, fijado al cuerpo de mariposa, cuyo cursor gira solidario a la válvula. La señal proporcionada es la recogida por el cursor, el cual al desplazarse sobre una resistencia, actúa como un divisor de tensión entre la masa y una tensión de referencia. Para mayor precisión en los ángulos pequeños, a veces se utiliza una segunda pista, de menor recorrido pero mayor precisión. El error en la medida es normalmente menor del 3%, aunque la respuesta es inmediata.

2.2.2.5. Sensor de posición del cigüeñal

Consiste en una rueda metálica con 60 dientes rectangulares, a la que se le han suprimido dos contiguos. Un captador magnético situado a poca distancia de la rueda, la cual gira solidaria al cigüeñal, detecta el paso de un diente y produce una señal ondulada. El doble hueco permite referenciar el ángulo respecto al punto muerto superior, así como compensar las posibles faltas de sincronismo, durante cada vuelta de la rueda. Con este procedimiento, se puede calcular no sólo la posición instantánea del cigüeñal, sino también el régimen del motor, por derivación.

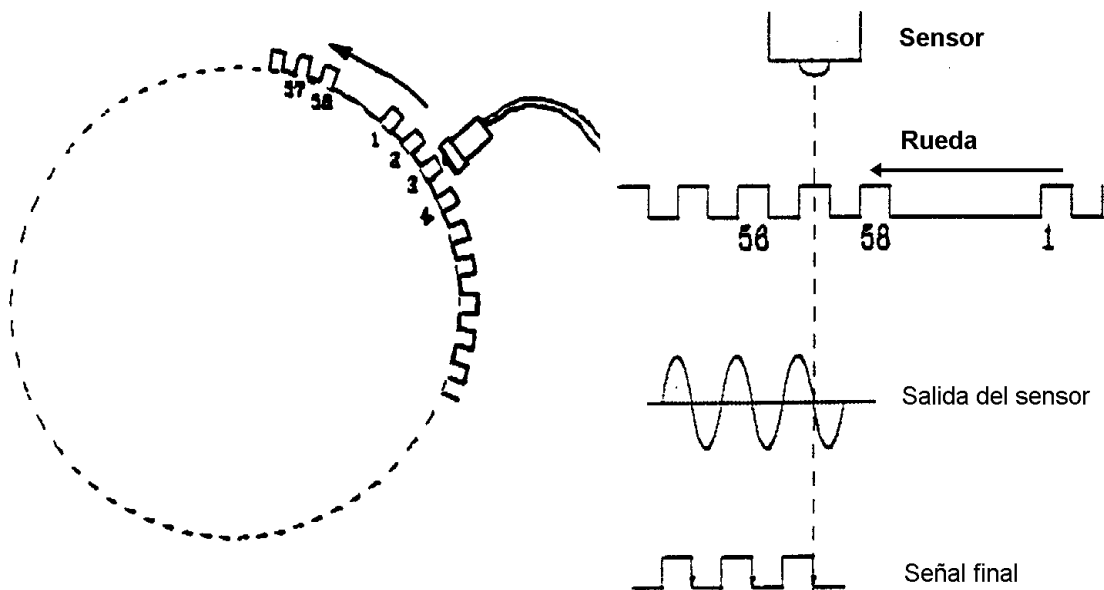


Fig. 2.11: Sensor de ángulo de cigüeñal mediante rueda fónica [Magneti Marelli]

2.2.2.6. Medición del dosado

Para la determinación de la concentración de combustible en la mezcla, existen varias técnicas, algunas de las cuales no son aplicables para el control:

- **Sensores ópticos:** permiten el análisis en tiempo real dentro del cilindro. Su alto precio y la instrumentación requerida impiden su uso para el control de forma industrial. Algunas variantes son:
 - **Dispersión Rayleigh** de láser [Kadot91Mix].
 - Evolución de la **intensidad luminosa** tras el salto de la chispa [Ohyam90Stu], [Nutt90Clo].
- **A partir de los gases de escape.** Tienen el inconveniente de un gran tiempo de respuesta.
 - **Cálculo indirecto:** Silvis [Silvi97An] expone diferentes fórmulas que permiten el cálculo de λ , a partir de la concentración de CO, HC, NO_x, O₂ y CO₂. Sólo puede realizarse en laboratorio, donde los diferentes analizadores de gases estén disponibles.
 - A partir de la **relación de pesos moleculares** antes y después de la combustión, también denominada "relación G" [Patri90A T]. No puede utilizarse para el control en tiempo real, por la complejidad de análisis requerida.
 - **Sensor de oxígeno:** es el único utilizado para el control de la mezcla en motores de serie. Consiste en un sensor de pequeño tamaño que mide la concentración de oxígeno en los gases de escape, la cual a su vez es función del dosado en la mezcla. Por esta razón se le denomina también **sonda lambda**. Su ubicación es en el tubo de escape, aguas arriba del catalizador.

Según la curva característica (figura 2.12), se distinguen dos tipos de sondas lambda: EGO (2 estados) y UEGO (lineal).

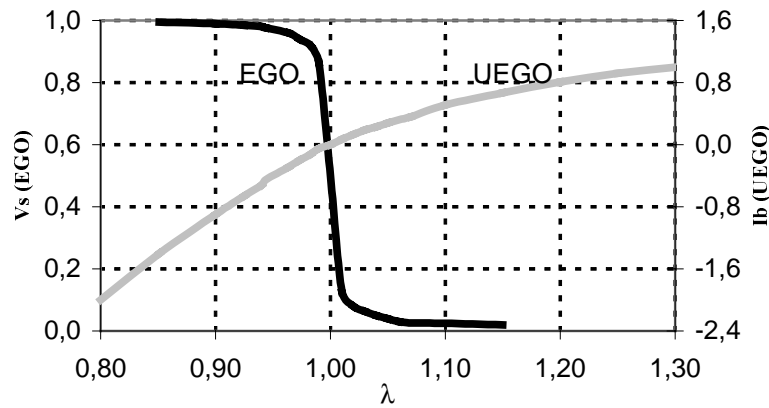


Fig. 2.12: Curva característica de la sonda λ EGO y UEGO

□ Sonda lambda de dos estados (EGO: Exhaust Gas Oxygen Sensor)

Lo más importante es que su curva característica sólo permite conocer el estado (rico o pobre) de la mezcla, pero no el valor exacto de λ , lo que obliga a usar un control de tipo cualitativo. Para evitar la imprecisión que supone la dependencia con la temperatura tanto de la característica estática como dinámica y del tiempo de respuesta, todo el cuerpo de la sonda está calefactado por una resistencia de tipo NTC, que la mantiene a una temperatura de funcionamiento constante. El tiempo de respuesta es relativamente alto, del orden de 100 a 300 ms, según la temperatura del gas y deterioración; además, es algo mayor para saltos de rico a pobre, que de pobre a rico. No obstante, por su bajo precio son las utilizadas comercialmente. Según la tecnología utilizada [Franx86Sen], pueden ser de ZrO_2 , basadas en la ley de Nernst, o de TiO_2 , y entonces funcionan según la ley de Faraday.

Las de titanio se basan en un disco de óxido de circonio con electrodos porosos, conectados a una fuente de corriente continua. Los iones de oxígeno son transportados desde el ambiente a través del disco, liberando en el ánodo una cantidad de oxígeno proporcional a la carga transportada que, de acuerdo con la primera ley de la electrólisis de Faraday, es:

$$N = \frac{i}{zF} \quad (2.14)$$

- i : Intensidad de la corriente.
- N : N° de moles de O_2 transportados por unidad de tiempo.
- z : Valencia iónica del oxígeno (4).
- F : Constante de Faraday (96.487 C/mol).

La corriente necesaria para mantener un transporte de oxígeno constante a través del disco TiO_2 es una medida de la presión del oxígeno circundante, y así actúa como una resistencia variable en función de la concentración de oxígeno.

Los sensores basados en la ley de Nernst emplean un disco de ZrO_2 , a modo de pila. Cuando las presiones parciales de oxígeno en cada lado del disco son desiguales, la tensión V_S generada a través del disco es proporcional al logaritmo del cociente de las dos presiones parciales, en el aire y en los gases de escape:

$$V_S = \frac{RT}{zF} \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{2.15}$$

- V_S : Tensión generada en el disco (tensión de Nernst)
- R : Constante universal de los gases (8,314 J/mol K)
- T : Temperatura absoluta del gas (K).
- p_1, p_2 : La mayor y la menor respectivamente de las dos presiones parciales de O_2 (aire p_{oa} , escape p_{oe}) a cada lado del disco.

Los sensores de este tipo requieren una concentración de oxígeno de referencia, lo cual implica que han de estar comunicados con la atmósfera, donde la concentración es prácticamente constante. La humedad relativa y el ensuciamiento limitan la precisión este tipo de sensor.

La figura siguiente muestra el principio de funcionamiento de ambos sensores.

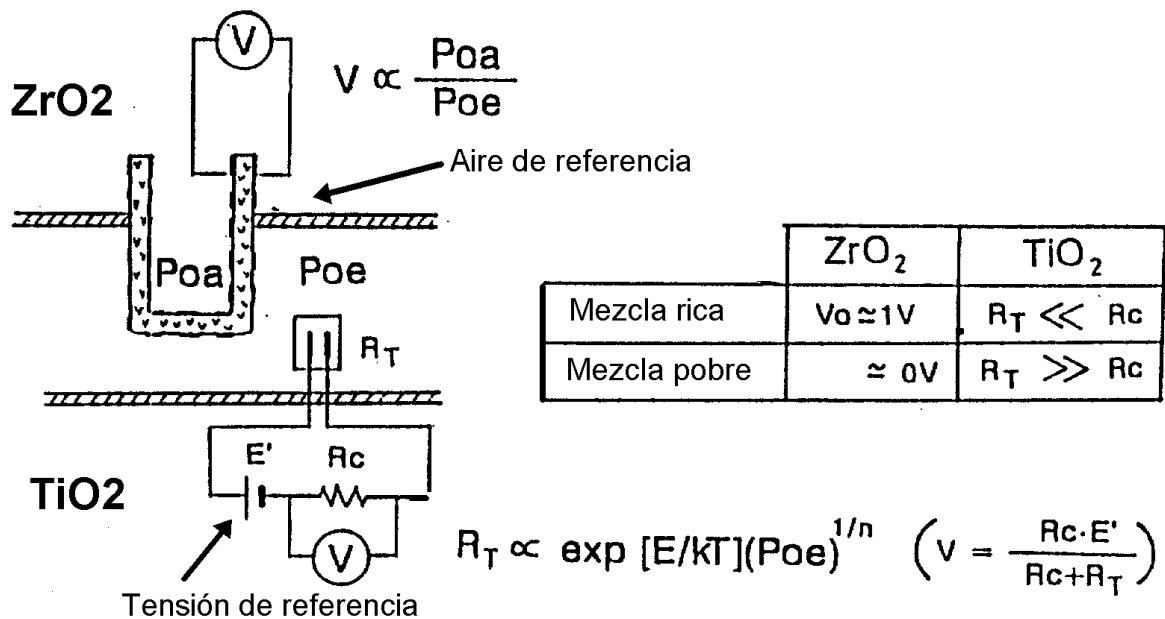


Fig. 2.13: Principio de funcionamiento de la sonda lambda de ZrO_2 y TiO_2 [NGK]

□ **Sonda lambda universal (Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor - UEGO)**

Consta de dos sondas EGO de ZrO_2 , dispuestas de tal modo que la característica resultante es prácticamente lineal, y la respuesta bastante rápida, menor de 100 ms [Yamad92Uni]. No obstante, su alto precio respecto a la EGO ha hecho que hasta ahora sólo se haya utilizado como instrumento de calibración, aunque ya se

empieza a usar cada vez más para control.

Como puede verse en la figura 2.14, existe una celda de bombeo, con dos electrodos, y una celda de medición, uno de cuyos electrodos está en contacto con el aire de referencia. Entre las dos celdas se dispone un conducto de difusión, a través del cual se llevan los gases de escape a los electrodos de ambas celdas. En función del dosado detectado en la celda de medición, se aplica una corriente controlada en lazo cerrado a la celda de bombeo, la cual bombea oxígeno al conducto de difusión, de modo que la concentración resultante en el mismo sea siempre la correspondiente a $\lambda=1$. El sentido de bombeo depende de si la señal procedente de la celda de medición indica que la mezcla es rica o pobre. La relación entre la corriente de carga y λ se muestra en la figura 2.12. Finalmente, un circuito electrónico se encarga de amplificar la intensidad de carga y proporcionar una señal de tensión a la salida del sensor.

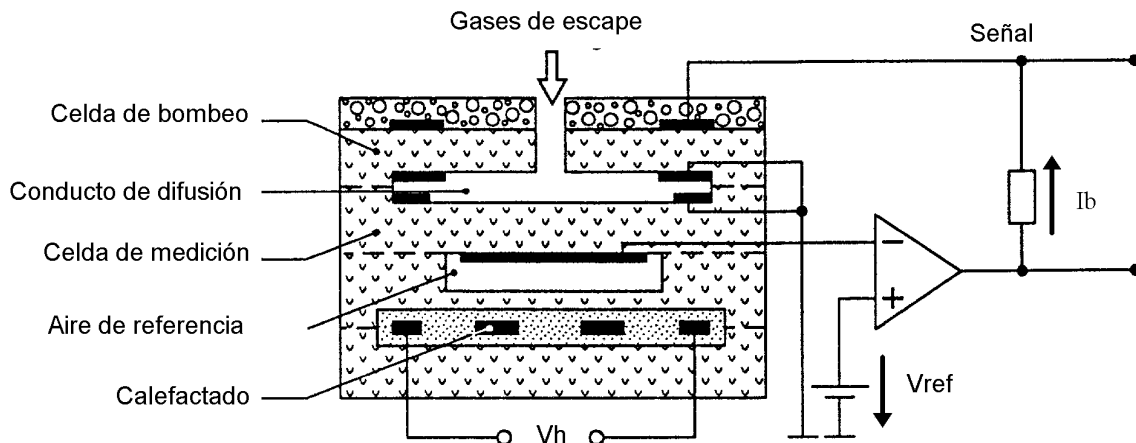


Fig. 2.14: Estructura de la sonda λ lineal [Bosch90Man]

El rango de medición habitual es de $\lambda=0,7\div 2,0$, con una precisión de $\pm 0,004\lambda$ en el punto estequiométrico. Desde el punto de vista frecuencial, ofrecen una ganancia de más de 15 dB, y una fase mayor de -165° . Las características de una sonda Bosch LSU 4 se resumen en la siguiente tabla, según datos del propio fabricante.

	$\Delta O_2/O_2$ (%)	$\Delta\lambda/\lambda$ (%), $\lambda=1,7$	$\Delta\lambda$, $\lambda=1,0$
Precisión	$\pm 2,0$	$\pm 1,4$	$\pm 0,004$
Dependencia con la presión ($\Delta P=\pm 50$ mbar)	$\pm 1,3$	$\pm 0,9$	≈ 0
Dependencia con la temperatura ($T=550\div 750$ °C)	$\pm 0,5$	$\pm 0,35$	$\pm 0,002$
Desviación tras 2200 h de envejecimiento	- 2,5	- 1,75	$\pm 0,001$

Tabla 2.4: Características de la sonda lineal LSU 4 [Bosch]

2.2.3. Dificultades de control

Un motor de combustión interna tiene unas características desde el punto de vista de sistema dinámico, que plantean una serie de problemas para el diseño del controlador de la mezcla de aire y combustible. Estas dificultades son las que se exponen a continuación.

□ **La complejidad de la planta.**

- El fenómeno de la formación de la mezcla es muy complejo, gobernado por numerosas leyes físicas en las que intervienen muchas variables.
- El orden del sistema real es desconocido.
- La dinámica es dependiente del punto de funcionamiento del motor, representado unívocamente por el grado de carga y el régimen de giro. Puede variar muy rápidamente en lo que se refiere a la carga del motor, y algo menos en régimen, por la propia inercia mecánica del conjunto motor más coche.
- El propio ciclo termodinámico en el que se basa el funcionamiento de un motor alternativo implica una discontinuidad en los procesos.

□ **La presencia de importantes retardos en el lazo de realimentación.**

Estos retardos, en algunos casos puros, en otros constantes de tiempo, tienen su origen en distintos fenómenos.

• **Retardos de cálculo**

Cuando la centralita dispone de todas las señales necesarias para efectuar los cálculos, esta requiere algunos pulsos de reloj para tratar las señales en el caso de que sea necesario (amplificación, conversión A/D, conversión de pulsos a digital, etc.), elaborar los resultados y generar la señal de mando a los inyectores. Aunque el tiempo es pequeño en comparación con el ciclo del motor, no es despreciable.

• **Dinámica del combustible**

El combustible pulverizado por el inyector no va a parar directamente al cilindro, sino que siempre hay una porción de combustible líquido depositado sobre el colector de admisión, a modo de depósito. Parte de este líquido vuelve a evaporarse y entra en el cilindro junto con la fracción de vapor, o bien lo hace directamente, pero con un retardo bastante mayor. Dado que la cantidad de combustible líquido es función de las condiciones ambientales en el colector de admisión (presión y temperatura), esto hace que a su vez dependa del punto de funcionamiento del motor. El proceso tiene asociada una constante de tiempo, que en el motor analizado vale del orden de 80 ms, para una temperatura de régimen.

• **Dinámica del aire**

El colector de admisión actúa como un depósito, donde el aire entra a través de la mariposa, y sale por la válvula de admisión. El comportamiento dinámico de

este proceso de llenado y vaciado equivale a un sistema de primer orden, con una variable de estado que es la presión, y constante de tiempo dependiente del punto de funcionamiento; su valor va desde 50 ms a 6000 rpm, hasta 300 ms a 1000 rpm.

- **Retardo de ciclo y transporte**

La proporción aire-combustible se calcula a partir de la concentración de oxígeno en los gases de escape, medida por la sonda lambda, la cual está colocada en el tubo de escape antes del catalizador. Esto supone que desde que se calcula el tiempo de inyección, hasta que el sensor detecta la variación en el dosado hay un retardo muy importante, debido a dos fenómenos. Por un lado, el correspondiente al propio ciclo Otto, que es igual al tiempo que transcurre entre la inyección, antes de abrirse la válvula de admisión, hasta que se abre la de escape y sale la mezcla quemada. Por otro lado, el retardo de transporte físico de los gases quemados desde la válvula hasta la ubicación del sensor. Mientras que el retardo de ciclo depende exclusivamente del régimen de giro del motor, el retardo de transporte depende de la temperatura y presión de los gases, lo cual es función dinámica del punto de funcionamiento, y con una componente de ruido (debido a fallos de encendido, irregularidades en la combustión, condiciones ambientales, etc.) muy importante. En este caso, los valores obtenidos a plena carga son 30 ms a 6000 rpm, y 180 ms a 1000 rpm.

- **Retardos en los sensores y actuadores**

Cualquier sensor o actuador tiene siempre un retardo propio, desde que se modifica la variable que este es capaz de medir, hasta que se genera la señal eléctrica correspondiente. Según la naturaleza del sensor, puede aproximarse a una constante de tiempo, o bien a un retardo puro, como se ha visto en el apartado 2.2.2.

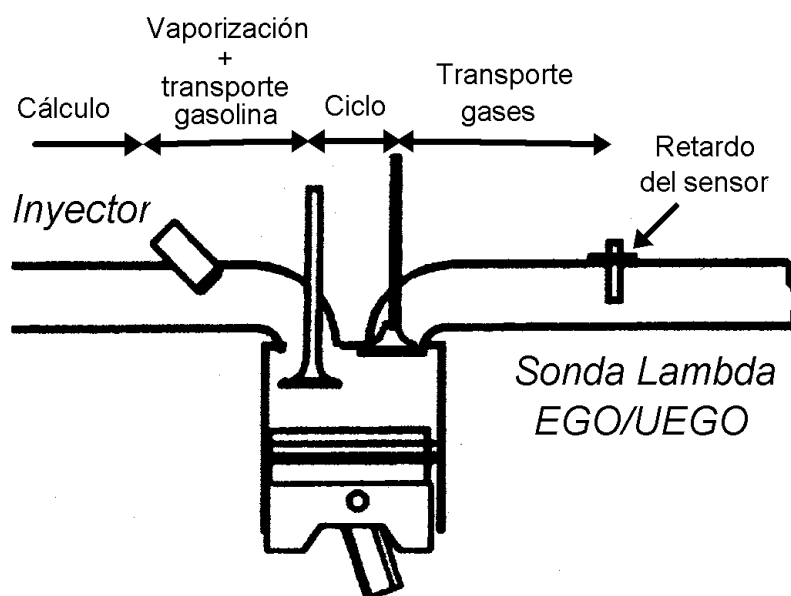


Fig. 2.15: Retardos puros y constantes de tiempo en el control de la mezcla [lwata96Mod]

Así, puede afirmarse en general que:

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{sensor}} + \tau_{\text{cálculo}} + \tau_{\text{actuador}} + \tau_{\text{mezcla}} + \tau_{\text{ciclo}} + \tau_{\text{transporte}} = f(\alpha, n) \quad (2.16)$$

□ **Naturaleza de las señales procedentes de los sensores**

La curva característica de la sonda lambda EGO presenta una pendiente muy alta en la proximidad del punto de consigna (fig. 2.12). Esto hace que la señal de error sea de tipo casi binario, lo cual implica un control en ciclo límite. El uso de una sonda UEGO, que tiene una característica más lineal, soluciona este problema.

Por otro lado, la señal de los sensores utilizados para el control contiene imprecisiones y no linealidades, según se ha visto en el apartado 2.2.2.

□ **Propiedades dinámicas del motor cambiantes en el tiempo**

• **Presencia de perturbaciones**

El funcionamiento del motor está sometido a múltiples perturbaciones, por las variaciones en las condiciones ambientales, o irregularidades en la propia combustión, donde fenómenos como la detonación afectan enormemente a las variables del proceso.

• **Variación de los parámetros con el tiempo**

El envejecimiento de los componentes, la deposición de carbonilla en la cámara de combustión y el desgaste mecánico hacen que los parámetros del motor evolucionen lentamente con el uso.

2.2.4. Control convencional

Tan pronto como se acciona la llave de contacto del vehículo, se pone en marcha el programa de gestión de la inyección, sucediéndose las siguientes operaciones:

1. **Copia** del programa y los datos de la ROM y EEPROM en RAM.
2. **Inicialización** de variables.
3. Se realizan los cálculos necesarios para que al accionar el motor de **arranque**, el motor pueda ponerse en marcha.
4. Comienzan las iteraciones de **cálculo** de las señales de salida en función de las entradas y las variables de estado. Aquí está contenido el **control** λ .
5. Al quitar la llave, todas aquellas variables cuyo valor interesa conservar para el siguiente arranque, son **grabadas** en la memoria permanente EEPROM (valores adaptativos, errores). Esto es posible gracias a un relé que mantiene la alimentación de tensión el tiempo necesario para que puedan realizarse estas operaciones. Finalmente, se desconecta la tensión.

2.2.4.1. Punto de funcionamiento del motor

Un motor de automóvil, a diferencia de un motor marino, está sometido a un modo de trabajo muy variable. Dado que el comportamiento dinámico del motor es muy dependiente del punto de funcionamiento, se requiere una cuantificación de este, de manera que el controlador conozca continuamente su valor. Los parámetros que determinan el punto de funcionamiento del motor son fundamentalmente dos: régimen de giro y grado de carga.

□ Régimen de giro

Se mide mediante un captador inductivo y una rueda dentada, según descrito en el apartado 2.2.2.5.

□ Grado de carga

La determinación del grado de carga, que tiene como objetivo el cálculo del caudal de mezcla que entra en el cilindro, puede hacerse de tres formas, según los sensores empleados, y por tanto las variables utilizadas, tal como se ha visto en el apartado 2.2.2.

• Caudal másico de aire

Consiste en colocar un sensor en el conducto de admisión, aguas arriba del cuerpo de mariposa, que proporcione información directa sobre el caudal másico de aire. El sensor más habitual en la actualidad es el de hilo caliente, habiéndose abandonado el uso de los sensores de trampilla. Sus características son:

- Es el método más directo y preciso.
- Se requieren sensores de alto precio y delicados.
- Los sensores introducen una pérdida de carga, que reduce la potencia.
- Permite el cálculo directo del caudal de aire.
- Por cuestiones prácticas, sólo se puede colocar un sensor antes de la mariposa, y no junto al inyector, con lo que en condiciones dinámicas se introduce un error. En efecto, dado que el colector de admisión almacena aire tras un transitorio positivo de mariposa, la medición efectuada por el sensor es muy superior al valor real. Este error, que puede ser superior al 100%, es función de la relación entre el volumen del colector y la cilindrada, el ángulo inicial y la velocidad de abertura de la mariposa, y el régimen de giro [Loesi89Mas]. En un transitorio negativo el efecto es el contrario, y el caudal medido es inferior al real.

• Presión absoluta del colector de admisión y régimen (p/n)

Si se trata el motor como una bomba volumétrica de aire, partiendo de las condiciones de presión y temperatura en el colector de admisión, se puede obtener de forma teórica la densidad. De ahí se puede calcular el caudal másico.

- Cálculo indirecto del caudal de aire.

- La medida es robusta, puesto que la presión engloba todas las tolerancias.
- **Angulo de mariposa y régimen (α/n)**
 - Dado que la presión en el colector de admisión es función del ángulo de mariposa y el régimen de giro, puede calcularse de este modo la carga.
 - Cálculo indirecto del caudal de aire.
 - Es barato y de fácil implantación.
 - La respuesta de los sensores es inmediata.
 - La calibración es poco robusta a las tolerancias.

La precisión obtenida en el cálculo del caudal de aire con los tres métodos, en función de la presión en el colector de admisión, viene reflejada por el siguiente gráfico.

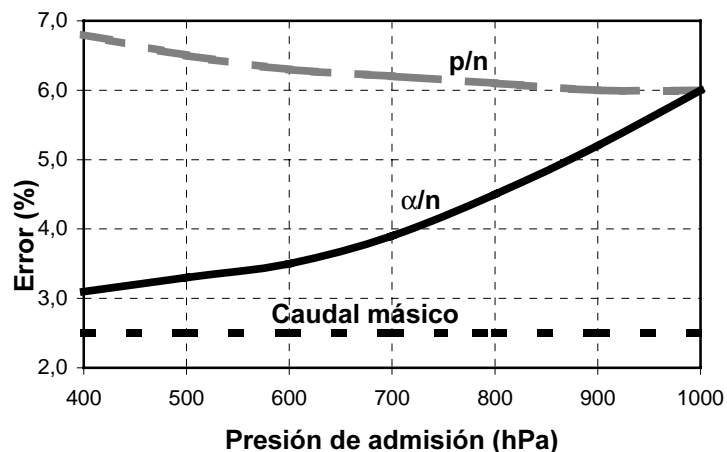


Fig. 2.16: Error en la medición del caudal másico de aire [Loesi89Mas]

2.2.4.2. Estados de funcionamiento del motor

En cada iteración del programa de gestión se actualiza tanto la información de los sensores, como de las variables. Estas últimas determinan los **estados de funcionamiento** del motor, los cuales condicionan las funciones de control que se han de aplicar. Los estados responden a varios criterios, de modo que en todo instante el motor tiene varios estados de funcionamiento, cada uno correspondiente a un criterio diferente:

- Motor **parado** ($n \leq n_{\min}$) o en **marcha** ($n > n_{\min}$)
- Motor **frío** ($T_{\text{agua}} \leq T_{\min}$) o **caliente** ($T_{\text{agua}} > T_{\min}$)
- Motor en **tiro** ($M > 0$) o en **retención** ($M < 0$)
- **Estabilizado** ($-\varepsilon \leq \dot{\alpha} \leq \varepsilon$), en **aceleración** ($\dot{\alpha} > \varepsilon$) o en **deceleración** ($\dot{\alpha} < -\varepsilon$)
- **Ralentí** ($\alpha < \alpha_0$), **plena carga** ($\alpha > \alpha_{pc}$) o **carga parcial** ($\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{pc}$)
- **Arranque** (mientras es arrastrado por el motor eléctrico), **postarranque**

(transitorio) o **funcionamiento normal**

siendo n : régimen de giro; M : par motor; α : ángulo de mariposa; $\dot{\alpha}$: primera derivada temporal del ángulo de mariposa.

2.2.4.3. Representación de las funciones y parámetros

Las fórmulas contenidas en el programa junto con los datos o parámetros constituyen una serie de funciones de transferencia, que modelan el comportamiento del motor en sus distintas funciones. Los bloques que definen el modelo se representan en forma de **mapas estáticos** (*look-up table*) de una o dos dimensiones. Estos mapas consisten en tablas con una o dos variables de entrada, donde se almacenan las salidas correspondientes a unos puntos discretos, denominados **puntos de corte** (*breakpoints*). El resultado es un valor que se obtiene como interpolación lineal (1 variable de entrada) o trapezoidal (2 variables de entrada) de los puntos de corte más cercanos.

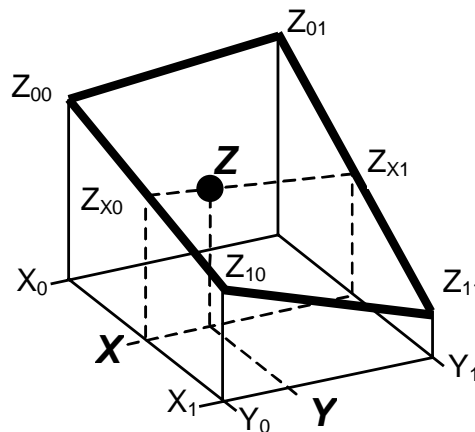


Fig. 2.17: Obtención de la coordenada Z en un mapa estático bidimensional, mediante Interpolación trapezoidal

Las ecuaciones 2.17 permiten calcular la coordenada Z correspondiente al punto (X,Y), mediante interpolación trapezoidal, según se representa en la figura 2.17. dados los puntos de corte (X_0, Y_0) , (X_1, Y_0) , (X_1, Y_1) y (X_0, Y_1) ,

$$\begin{aligned} Z_{X0} &= \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} (Z_{10} - Z_{00}) + Z_{00} \\ Z_{X1} &= \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} (Z_{11} - Z_{01}) + Z_{01} \\ Z &= \frac{Y - Y_0}{Y_1 - Y_0} (Z_{Y1} - Z_{Y0}) + Z_{Y0} \end{aligned} \quad (2.17)$$

La obtención de estas tablas se hace experimentalmente. Este sistema de representación conlleva las siguientes particularidades:

- El número de parámetros requeridos es alto, por lo que tiene un gran consumo de memoria.
- Los cálculos son muy sencillos.
- Determinación de parámetros compleja, pero metódica.
- Cualquier función estática es representable, por compleja que sea.
- Difícil representación de sistemas dinámicos.
- Importancia de la correcta elección de los puntos de corte.
- Complejidad en la calibración, tanto por el número de tablas existentes como por la dificultad física de determinar algunas de ellas.
- Cualquier modificación en el transcurso del proyecto que afecte al sistema de admisión o de escape (la "respiración") del motor, como puede ser un nuevo filtro de aire, supone rehacer una gran cantidad de ensayos.

2.2.4.4. Estructura del controlador

A raíz de las dificultades vistas anteriormente, el controlador del dosado de la mezcla necesita dos componentes: una anticipativa, en lazo abierto, y una correctiva, en lazo cerrado, según se observa en la figura siguiente. Ambas utilizan para su representación tablas estáticas. En el capítulo 3 se estudia más a fondo este tipo de controlador, aplicado al modelo desarrollado.

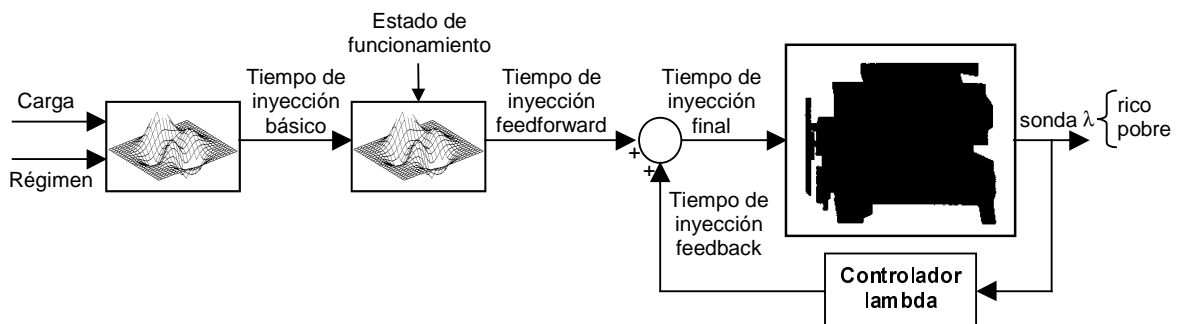


Fig. 2.18: Diagrama del control lambda convencional

□ Componente en lazo abierto (*feedforward*)

La respuesta a un cambio rápido del punto de funcionamiento se acorta mediante la utilización de un control anticipativo en lazo abierto, por ser este de efecto inmediato, dado que un controlador en lazo cerrado no es capaz de lograr un control preciso de λ en los transitorios rápidos. El objetivo es ofrecer un modelo del proceso de formación de la mezcla, de modo que a partir de las señales de los sensores, que suministran información sobre el grado de carga y el régimen, se pueda calcular el tiempo de inyección necesario para lograr una mezcla de $\lambda=1$.

En primer lugar, se calcula el tiempo básico de inyección, en función del punto de funcionamiento. En el caso en que se conozca el caudal de aire, tan sólo es necesario dividir este valor por la constante estequiométrica, con lo que se obtiene el caudal de combustible. Conociendo la característica tiempo-caudal del inyector, el cálculo del tiempo de inyección es inmediato.

Posteriormente, se aplican unas funciones de corrección, según los estados de funcionamiento del motor, cuya complejidad depende de la precisión deseada.

- **Motor frío:** Permite compensar la variación de la relación aire-combustible a temperaturas del motor distintas de la de funcionamiento habitual, originadas por un mayor flujo de calor hacia las paredes del colector.
- **Plena carga:** Se enriquece con objeto de desplazar λ hacia los valores de potencia óptima, además de bajar la temperatura de los gases de escape y proteger así el catalizador.
- **Aceleración:** Se enriquece, compensando así la cantidad de gasolina condensada en el colector de admisión por efecto del aumento de presión.
- **Retención:** Se empobrece para contrarrestar el incremento de gasolina en forma de vapor producido al disminuir la presión en el colector de admisión.
- **Cut-off:** Durante el modo *cut-off* no hay paso de combustible al colector de admisión, sino tan sólo aire, para evitar que llegue gasolina sin quemar al catalizador, como consecuencia de las condiciones desfavorables que existen en la cámara de combustión.

□ **Componente en lazo cerrado (*feedback*)**

La corrección del error en estado permanente se logra mediante un controlador en lazo cerrado, que suele ser de tipo P, I o PI, usando la información procedente de la sonda de dos estados (EGO). La naturaleza binaria de la señal de error hace que sólo se pueda operar en ciclo límite, de manera que la acción de control está formada por tramos verticales, que coinciden con los cambios de dosado en el sentido de rico a pobre y de pobre a rico, y tramos rectos con una pendiente determinada (figura 2.19); por la misma razón no puede utilizarse un término derivativo. Los parámetros óptimos del controlador dependen del punto de funcionamiento, debido principalmente a los diferentes retardos puros. Para solucionar este problema, se opera en lo que se denomina **ganancia tabulada** o **planificada** (*scheduled gain*), consistente en sintonizar el controlador en distintos puntos de corte, con el motor estabilizado sobre los correspondientes puntos de funcionamiento, y almacenar los parámetros obtenidos en los mapas estáticos. Posteriormente, durante la operación normal, se calculan los parámetros por interpolación de esos mismos mapas.

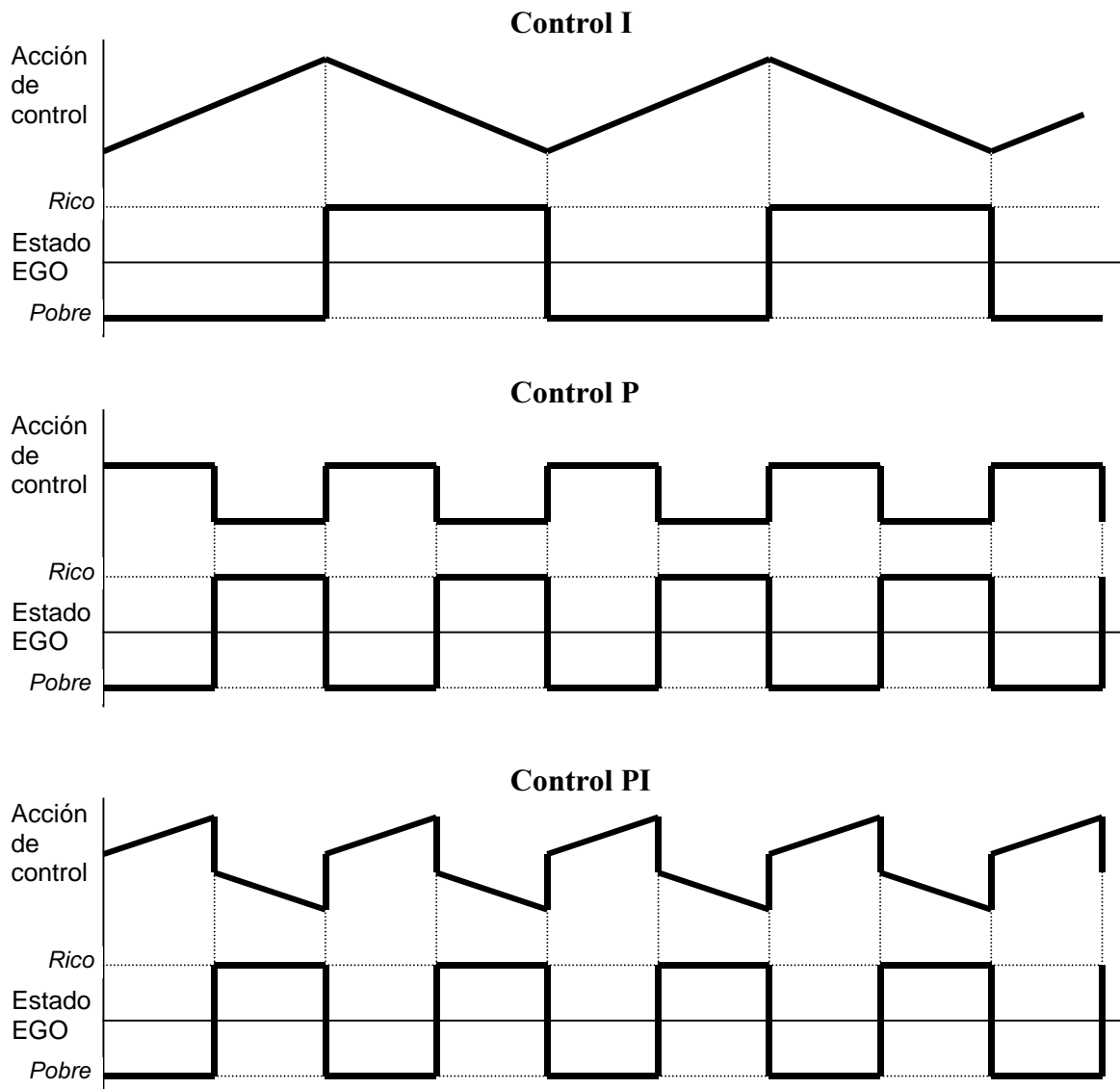


Fig. 2.19: Control I, P y PI con sensor EGO

2.3. Tendencias en control

Un problema que ha ido asociado a la evolución en complejidad de los sistemas convencionales de control de la mezcla, es que el número de tablas que es necesario calibrar para cada nuevo desarrollo va creciendo de forma prácticamente exponencial en el tiempo, y con ello el número de experimentos que se debe realizar. La figura 2.20 refleja esta situación. Puesto que los plazos de industrialización de nuevos productos no se han alargado, sino más bien al contrario, se ha creado la necesidad de aumentar el número de recursos destinados a la optimización del sistema de gestión, con el consiguiente incremento de los costes.

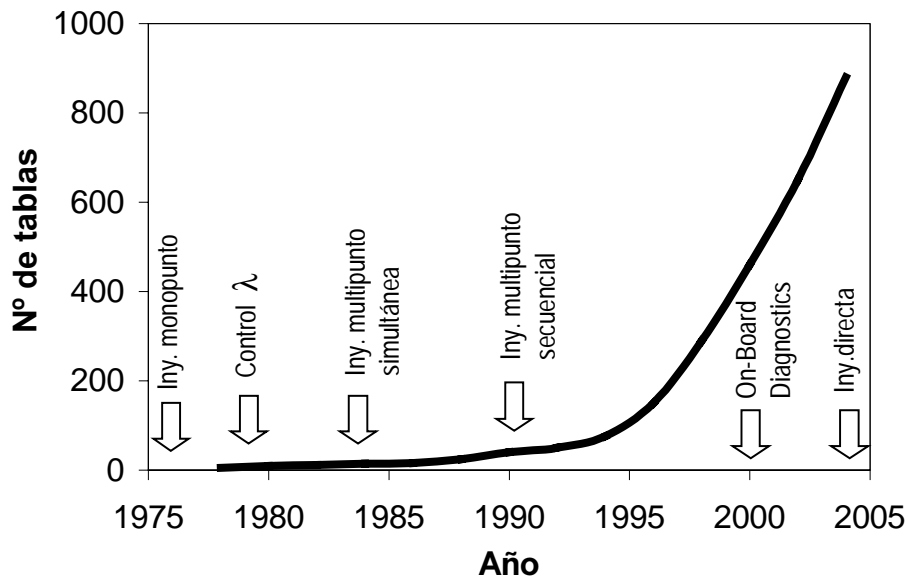


Fig. 2.20: Evolución del número de tablas con la tecnología de los sistemas de inyección

Como ayuda a la calibración de los mapas estáticos, se ha avanzado mucho en el control automático de bancos de ensayo [Kampe93Aut], [Bande92Tra], de modo que el tiempo necesario para la confección de las tablas se acorta enormemente, pero no se han superado las limitaciones de este tipo de representación. Es por este motivo que, prácticamente desde la aparición de los sistemas digitales de gestión de la mezcla, se han realizado numerosos estudios sobre posibles mejoras en el controlador, para evitar precisamente tener que realizar todo el trabajo experimental, o como mínimo reducir la magnitud de este. Las estrategias han evolucionado paralelamente con las teorías de control, observándose diferentes tendencias.

2.3.1. Mejoras sobre el controlador clásico

En este apartado se incluyen un conjunto de mejoras aplicadas sobre el controlador convencional, pero manteniendo su estructura básica, es decir, una componente en lazo abierto y otra en lazo cerrado, basadas ambas en mapas estáticos, y cerrando el lazo de control desde la sonda lambda.

Un procedimiento normalmente utilizado consiste en filtrar la señal de control en lazo cerrado a una frecuencia mucho más baja que la frecuencia natural de oscilación, y aplicarla como factor de corrección en lazo abierto, de modo que el valor medio de la acción del controlador tienda a cero (figura 2.21). Para eliminar el efecto del retardo, sólo se calculan estos valores de corrección cuando el motor funciona en régimen estacionario, lo cual se determina limitando bien la variación del ángulo de mariposa, bien del propio tiempo de inyección. Con objeto de lograr una mayor precisión, se suele dividir el mapa de funcionamiento del motor en regiones, a cada una de las cuales se le asigna un único factor. De esta forma, puede corregirse la tendencia del controlador a las desviaciones debidas a cambios atmosféricos o en la dinámica de la planta.

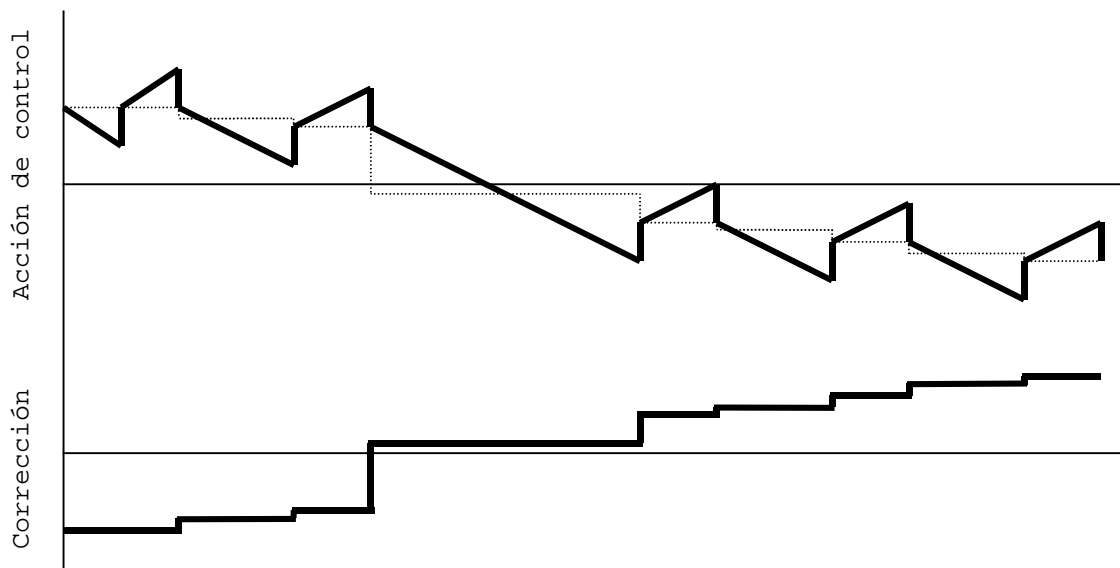


Fig. 2.21: Corrección a las desviaciones de la acción de control

Otra forma de minimizar las desviaciones de λ consiste en mejorar exclusivamente el controlador en lazo cerrado. En lugar del clásico PI (caso de sonda EGO), se aplica un término integral que se incrementa en el tiempo, hasta que se produce un cambio de estado pobre a rico o viceversa; entonces se vuelve al valor tabulado, el cual se incrementa de nuevo.

Nakaniwa [Nakan91Dev] describe un algoritmo de aprendizaje anidado. Consiste en la corrección convencional a partir de las desviaciones del controlador en lazo cerrado, pero con una división en regiones realizada recursivamente, de forma que el tamaño de estas es más pequeño allí donde se requiere mayor precisión. El factor de corrección aplicado en un punto de funcionamiento determinado no es único, sino que es la suma de los factores correspondientes a las diferentes subdivisiones.

Katashiba [Katas91Fue] hace un estudio de las características del ciclo límite, resultante de aplicar un controlador PI a la señal procedente de la sonda EGO para cerrar el lazo. Dado que el objetivo es obtener una frecuencia determinada que ocasione el máximo rendimiento en el catalizador de tres vías (apartado 1.1), modula la señal de control mediante la adición de un tren de pulsos de 12 Hz. Con esta modulación artificial consigue que la frecuencia y la amplitud del ciclo límite sean independientes entre sí y del punto de funcionamiento. Valida su teoría con un motor de 2,0 l y un catalizador de tan sólo 100 cm³, y en paralelo con un modelo del catalizador desarrollado a partir de las ecuaciones 1.3, para un régimen constante de 1500 rpm. Sus conclusiones son que la frecuencia óptima está relacionada con la amplitud, de forma lineal, y a su vez la frecuencia crece linealmente con la carga del motor, para una misma amplitud. Por otro lado, la frecuencia natural es óptima para cargas bajas, pero insuficiente para cargas mayores, en su caso a partir de 20 l/s, lo que requiere la ayuda de la modulación artificial. La mejora media en el rendimiento de conversión para todos los gases llega a ser del 6,5%.

2.3.2. Algoritmos heurísticos

Entre las estrategias más antiguas, figuran las de tipo heurístico. Más que una innovación en control, son procedimientos sistemáticos para realizar la calibración del controlador, reduciendo el número de ensayos necesarios.

Auiler [Auile77Opt] aplica la técnica de programación dinámica a un motor de 4 l, sobre tres regiones del mapa régimen-carga representativas del ciclo de conducción americano FTP. Los parámetros sobre los que actúa son el dosado, el avance de encendido y la tasa de recirculación de gases de escape (EGR), y en función de ellos obtiene en un motor sobre banco el consumo y la masa de hidrocarburos. El problema se formula como hallar el procedimiento óptimo para asignar la masa de HC a cada región, de modo que el consumo es mínimo para cualquier objetivo de HC, y calcular el avance de encendido óptimo correspondiente.

Dohner [Dohne78Tra] desarrolla un procedimiento para la optimización de lo que él denomina sistema de transitorios. Consiste en un algoritmo iterativo, que utiliza datos obtenidos durante el ensayo de emisiones. El problema consiste en optimizar un conjunto de parámetros de control (dosado, avance y EGR) cada 0,5 s, hallando la ley de realimentación de estos a partir de determinadas variables medidas en el ensayo. La función de coste es el consumo, y está sujeta a restricciones en los tres gases contaminantes y en la conductibilidad. Resuelve el problema aplicando el principio máximo, utilizando multiplicadores de Lagrange constantes y mediante minimización de la función Hamiltoniana respecto a los parámetros de control.

Rao [Rao79Engin] propone un procedimiento sistemático para efectuar la calibración de un motor. Las variables que controla son dosado, presión absoluta en el colector, tiempo de inyección y avance de encendido. La solución consiste en minimizar el consumo como función de las variables anteriores en un ciclo de conducción cualquiera, por el método de la relajación de la Lagrangiana (multiplicadores de Lagrange) o de Everett. Las restricciones aplicadas son igualmente de emisiones y conductibilidad.

Rizzo [Rizzo91Una], aparte de proponer un conjunto de criterios de diseño de un controlador, desarrolla un sistema estocástico de optimización de emisiones y consumo, que resuelve por el método de Quasi-Newton, y formula un modelo lineal capaz de predecir los errores en las variables de control a partir de los producidos en los actuadores y sensores.

2.3.3. Control avanzado con realimentación de estados

Otros trabajos han aplicado la teoría de **estimación** al campo del control de la mezcla. Estos han ido encaminados a sustituir el control empírico en lazo abierto, por una estimación del valor de λ en el cilindro, y así avanzarse a la señal que proporciona la sonda, con objeto de eliminar los retardos puros en el lazo de realimentación. La naturaleza de los estimadores y las señales utilizadas son diferentes en cada caso.

Hendricks [Hendr90Mea], [Hendr91SI] propone un compensador obtenido a partir de

un modelo linealizado de la dinámica del combustible. El resultado, verificado por el mismo autor, no es muy bueno en los transitorios. Una mejora adicional la realiza al sustituir las señales de los sensores (presión y caudal de aire) por observadores en lazo abierto, mediante un modelo por él desarrollado.

Según el esquema desarrollado por Benninger [Benni91Req], la estimación se logra mediante un modelo simplificado del colector de admisión, más un modelo de la dinámica del combustible, del que se invierte la función de transferencia.

Chang [Chang93Eng], [Chang95Air] y Amstutz [Amstu94Mod], desarrollan conjuntamente una ley de control basándose en las señales de los sensores y un observador de estado. Este observador, que actúa en paralelo al motor, contiene tres estados: masa de combustible en forma de película líquida, dosado teórico y dosado medido. Una combinación lineal de los estados predichos por el observador es la utilizada para la realimentación, mientras que la señal de la sonda λ sirve para asegurar que el observador se corresponde a la planta en todo instante. La ganancia en lazo cerrado se obtiene por inversión de la dinámica del combustible, lo que resulta en una cancelación de ceros y polos en el plano z . El error estacionario del observador (*bias*) se corrige mediante un lazo adicional desde el sensor y un controlador integral, con una ganancia muy baja. Después de un transitorio rápido ($\Delta \alpha > 5^\circ$), el término integral es reinicializado a un valor almacenado en una tabla, función del punto de funcionamiento. Para calcular los parámetros del observador, Chang utiliza un filtro de Kalman extendido de ganancia constante. Amstutz fija arbitrariamente los polos del observador en $z=(0; 0,25 \pm 0,2j)$, y de ahí obtiene en cada ciclo una nueva ganancia. El resultado, obtenido en un motor monocilíndrico a 1200 rpm, es una desviación de λ menor de 0,5% RMS.

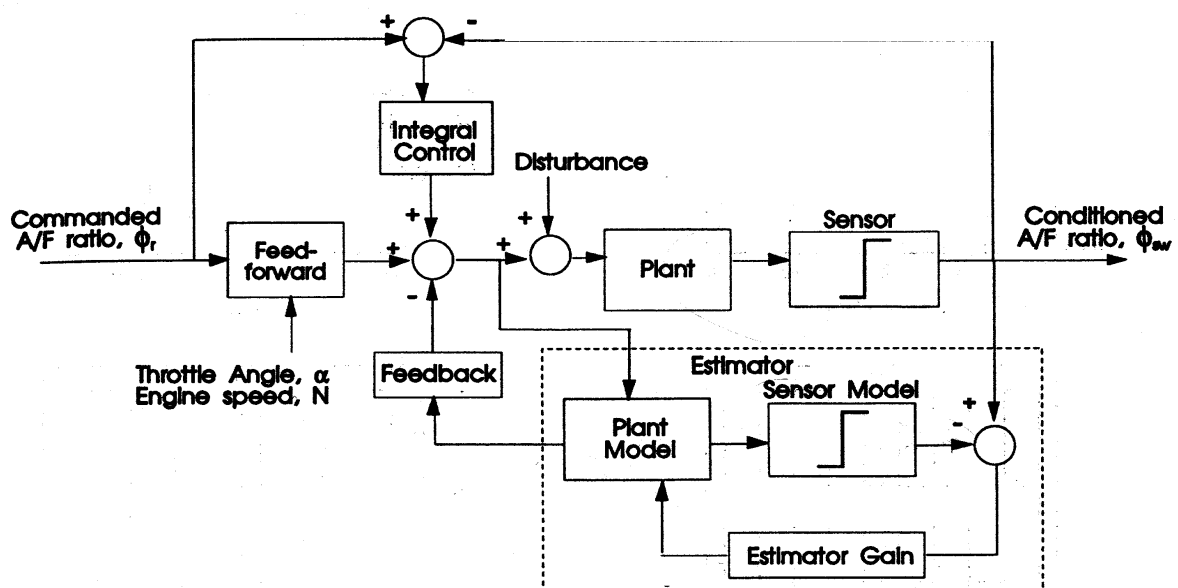


Fig. 2.22: Estructura de control utilizada por Amstutz [Amstu94Mod]

Fekete [Feket95Mod] plantea una estrategia de compensación adaptativa mediante modelo con dos entradas, el ángulo de mariposa y el régimen de giro. En primer lugar

calcula la dinámica del aire, con una componente estática tabulada, más un modelo discreto para la compensación dinámica, consistente en una función de transferencia con un polo; una vez conocida la cantidad de aire que penetra en los cilindros, se calcula la masa de combustible que debe pasar al interior, y gracias a un modelo inverso de la película de combustible, la cantidad que debe inyectarse. La adaptatividad del modelo de aire se realiza gracias a la señal de un sensor de presión absoluta en el colector de admisión, a la que se aplica un filtro de Butterworth de cuarto grado, lo que permite estimar la constante de tiempo del colector en cada punto de funcionamiento. Jones [Jones95Ide], [Jones96Tow] perfecciona la técnica de Fekete, identificando la constante de tiempo de forma global por mínimos cuadrados no lineales. La combinación del modelo descrito, con un observador de estado similar al utilizado por Chang y Amstutz, se aplica a un motor de 2,2 l y 4 válvulas por cilindro, y se estudia la respuesta a una aceleración del 23% al 45% en 42 ms, girando a 2000 rpm. El resultado es una desviación de la consigna de solamente 0,4% RMS.

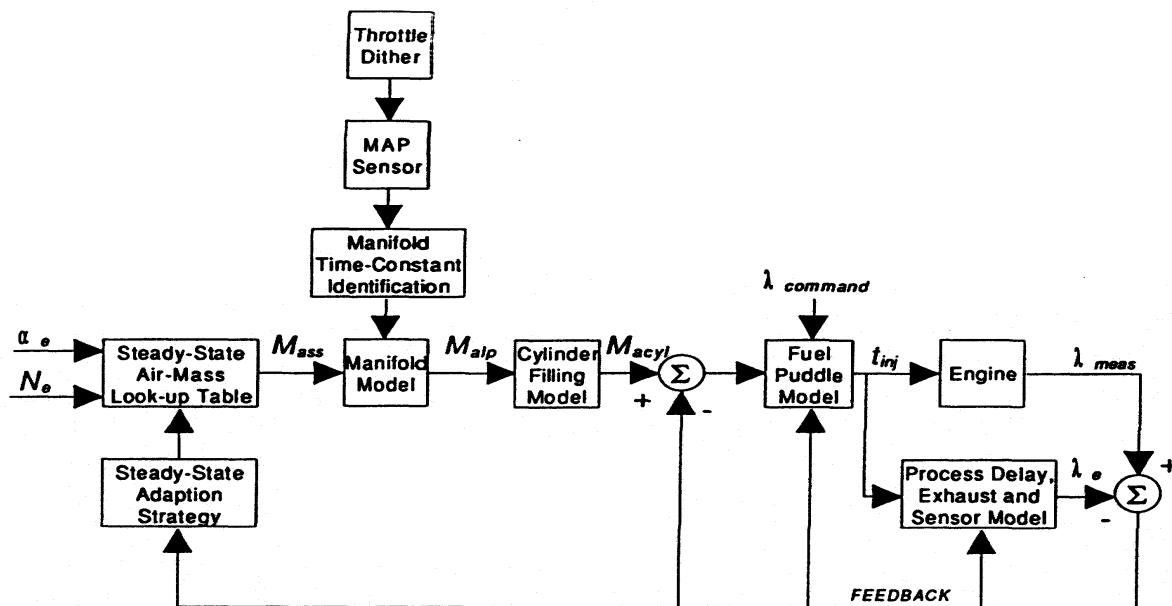


Fig. 2.23: Estructura de control utilizada por Fekete [Feket95Mod]

Bidan [Bidan95Non] crea un modelo del colector de admisión, que utiliza para determinar el consumo de aire en función de la señal de presión en el colector. Con la ayuda de un modelo simple del combustible, basado en el de Aquino, calcula la cantidad de combustible que se ha de inyectar.

Iwata [Iwata96Mod] muestra un controlador en lazo abierto consistente en invertir un modelo por él desarrollado, que comprende la dinámica del combustible y del aire en el colector de admisión. A continuación aplica un control en lazo cerrado que permita converger a cero, por un lado, la corrección en la masa de combustible depositada en forma de película, calculada mediante un observador de estado a partir de la señal de la sonda lambda, y por el otro, la integral de la corrección en la masa de combustible introducida en el cilindro. El lazo se cierra con una combinación lineal de los dos valores anteriores.

Asik [Asik96A/F] utiliza un algoritmo de estimación de λ , a partir de las variaciones de velocidad del cigüeñal, detectadas en la señal de la rueda fónica. El par desarrollado por un motor es función del dosado de la mezcla (apartado 1.1), y su derivada puede aproximarse por una recta, que cruza el eje de abscisas en el punto $AFR \approx 13$. El valor estimado del dosado se calcula como una función del régimen, avance de encendido, caudal de aire normalizado, tiempo de inyección, masa de aire en el cilindro y temperatura del aceite. En total intervienen 10 parámetros, que hay que identificar experimentalmente, aplicando regresión no lineal. Finalmente, demuestra que el valor estimado puede utilizarse para cerrar el lazo de realimentación.

2.3.4. Control en modo deslizante

Más recientemente se ha aplicado la teoría de control en modo deslizante, para cerrar el lazo [Choi92Slid]. Consiste básicamente en un control integral, con parámetros variables de tal forma que la trayectoria de las variables de estado siempre converja a la superficie deslizante en el espacio de estados, de acuerdo con un criterio de estabilidad. El resultado es un control mucho más óptimo y robusto que un PI, y con menos necesidad de calibración, ya que se elimina la ganancia tabulada de este, pero su precisión es muy sensible al control *feedforward* al que va asociado. Además, no se evita la oscilación alrededor del punto de equilibrio (chattering), que puede llegar al 15%. Posteriormente, Choi [Choi98An O] perfecciona su técnica y crea un observador deslizante de dos estados para la dinámica del aire, lo que permite reducir considerablemente la amplitud de oscilación, y aplicarlo en un motor 3,8 l V6.

2.3.5. Utilización de sensores y actuadores alternativos

La evolución tecnológica de los sensores y actuadores permiten utilizar algoritmos de control λ que no pueden aplicarse con la configuración física convencional.

Así, con la reducción del precio de las **sondas lineales** (UEGO) en los últimos años, que han pasado a valer de 20 a 4 veces el precio de las sondas binarias (EGO), algunos autores, como Chang [Chang93Eng] y Onder [Onder93Mod], justifican su uso para cerrar el lazo de control λ , lo que permite utilizar leyes de control más complejas que con una sonda EGO.

Otra posibilidad de mejora consiste en controlar no tan sólo el caudal de combustible, sino también el de aire, dotando a la válvula de mariposa de un motor. Al desligar físicamente la mariposa del acelerador (**DBW, drive-by-wire**), dado que la dinámica del aire es más rápida que la del combustible, se consigue un control más preciso de la mezcla, aunque se introduce un actuador más. Esta técnica ya se aplicó de forma simplificada para el control del dosado mediante un carburador dotado de control electrónico de aire (E.A.C.®) [Nevot92App] y catalizador de tres vías. Dado que un carburador no permite modificar la cantidad de gasolina aportada a menos que se disponga de un mecanismo bastante complejo que actúe sobre los calibres o el difusor, puede calibrarse este de modo que la mezcla suministrada sea siempre rica; el aire que falta se suministra adicionalmente, directamente al colector de admisión. El caudal de aire viene regulado por medio de una válvula, operada con una señal de

pulsos (PWM). Puesto que la diferencia de presión en la válvula es muy alta para cargas bajas, y prácticamente nula para cargas altas, la válvula requiere un rango muy amplio de funcionamiento. No obstante, la zona habitual de trabajo del motor en el ciclo de emisiones, y la rapidez de respuesta del sistema, permiten el cumplimiento de las leyes correspondientes a la directiva 91/441, aplicado a un motor SEAT de 0,9 l.

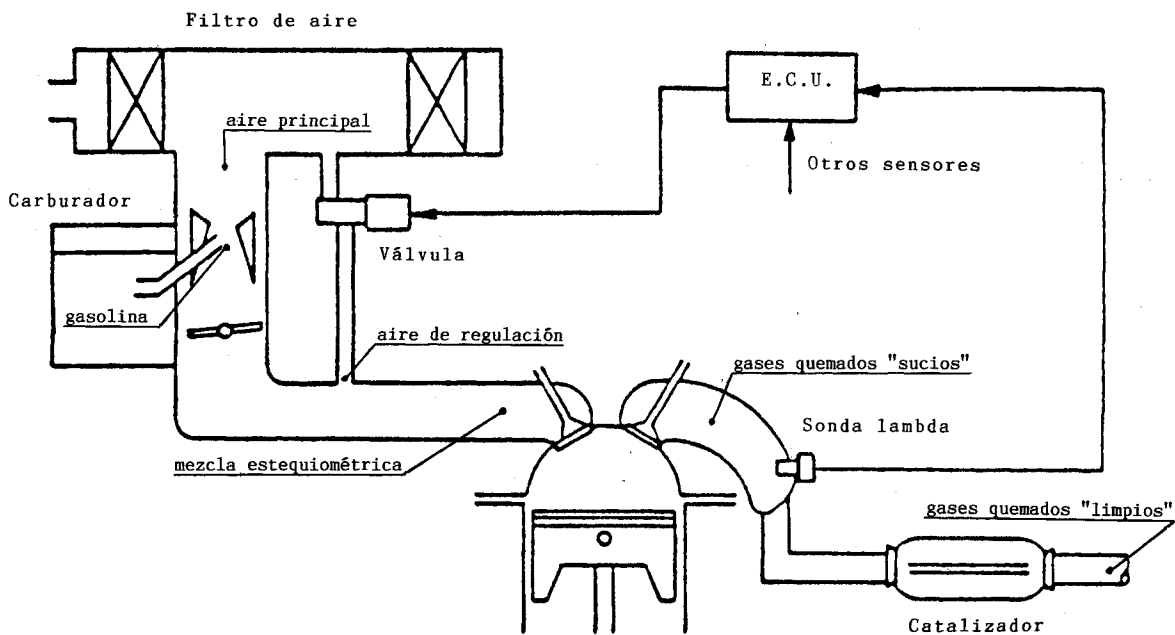


Fig. 2.24: Control con carburador y E.A.C. [Nevot92App]

Benninger [Benni91Req], que aplica un actuador de mariposa a su esquema de control, retarda la apertura de esta, de tal forma que el aire aportado sea capaz de compensar instantáneamente la cantidad de combustible que llega al cilindro. La mariposa se abre mediante una rampa limitada, con una pendiente determinada a partir del modelo.

Anthoine [Antho92Reg] utiliza tanto sonda lineal como actuador de mariposa. Describe un algoritmo adaptativo, que combina mínimos cuadrados recursivos, para el cálculo de la gasolina, y un modelo interno del motor, que permite determinar la ley de apertura de la mariposa. Los parámetros del modelo son identificados on-line. La aplicación del algoritmo a un vehículo permite obtener una reducción del 28% en CO, 18% en HC y hasta el 75% en NOx, según el ciclo europeo MVEG-A.

Tudor [Tudor93Ele] describe cualitativamente un control adaptativo, que determina el retardo inicial de la mariposa en función de la desviación en el dosado, observada en transitorios similares efectuados anteriormente.

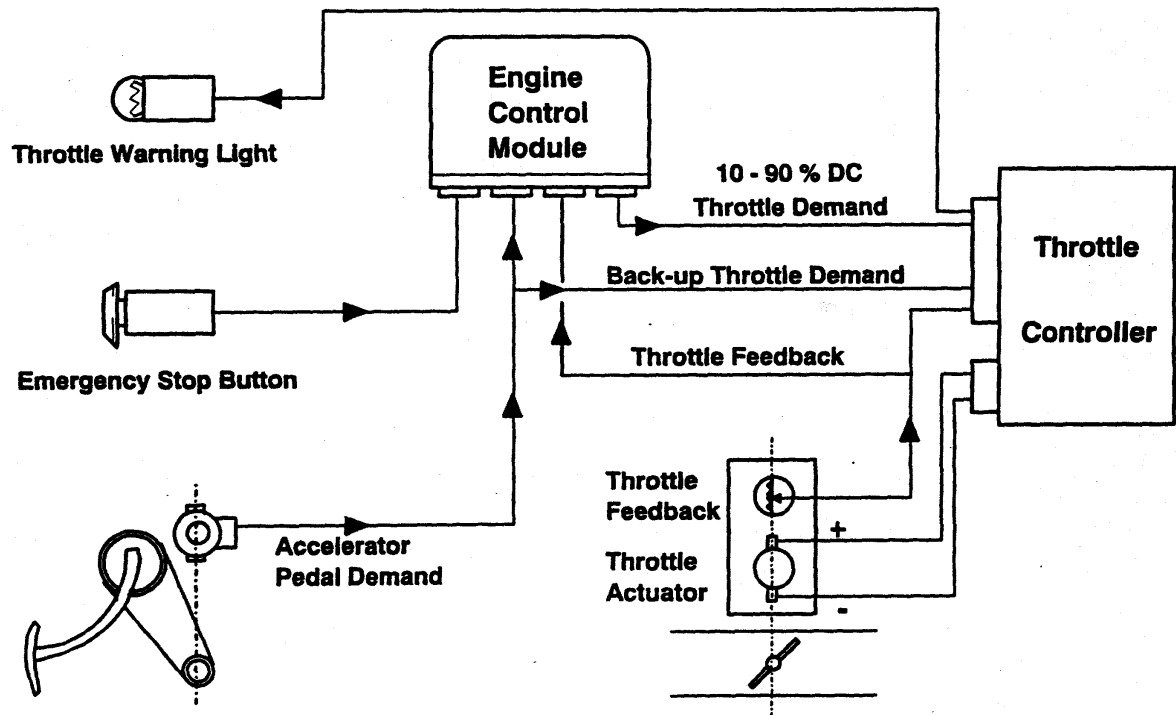


Fig. 2.25: Esquema del actuador de mariposa [Tudor93Ele]

Amstutz completa su trabajo [Amstu94Mod] con una mariposa gobernada electrónicamente, y lo aplica en un motor monocilíndrico. Fekete [Feket95Mod] calcula la trayectoria de la mariposa cada segmento, previamente a la carrera de admisión, gracias a una estrategia de tipo bang-bang, consistente en saturar el actuador, más un control PI en lazo cerrado.

Bidan [Bidan95Non] utiliza en su controlador un actuador de mariposa. La presión en el colector se controla en lazo cerrado utilizando un modelo lineal de referencia, y un compensador PI. A partir de este valor linealizado de la presión, y del régimen de giro, determina el retardo y la señal que hay que aplicar al motor eléctrico de la mariposa. Tanto la velocidad de abertura como el ángulo absoluto están limitados.

