

Capítulo 1:

Introducción

1.1. Origen del problema

Un motor alternativo de combustión interna y encendido provocado produce trabajo mecánico haciendo uso de un ciclo termodinámico denominado Otto. El ciclo Otto, cuyas fases se representan en la figura 1.1, utiliza un fluido de trabajo que en el caso de motores de combustión interna, coincide con la mezcla combustible. El término “encendido provocado” proviene de que la combustión se inicia mediante el salto de una chispa controlada en los electrodos de una bujía, y se propaga al resto de la mezcla en la cámara de combustión. Un motor de cuatro tiempos, que es lo más corriente en automoción, realiza estas fases mediante un mecanismo de pistón-biela-cigüeñal, en dos vueltas completas, o lo que es lo mismo, cuatro carreras o tiempos, descritos en la figura 1.2: admisión de la mezcla, compresión de esta, explosión, y escape de los gases quemados. De ello se deduce que tan sólo un tiempo es activo, el correspondiente a la explosión, mientras que los otros tres hacen uso de la energía cinética acumulada en un elemento de gran momento de inercia, el volante, solidario al cigüeñal.

Normalmente, los motores constan de más de un cilindro. En el caso más habitual, que es de cuatro cilindros en línea, las bielas van unidas a un cigüeñal común, de forma que los ciclos de trabajo están desfasados 180° y se realizan en el orden 1-3-4-2, con objeto de conseguir ofrecer un par lo más regular posible, y un equilibrado dinámico del cigüeñal.

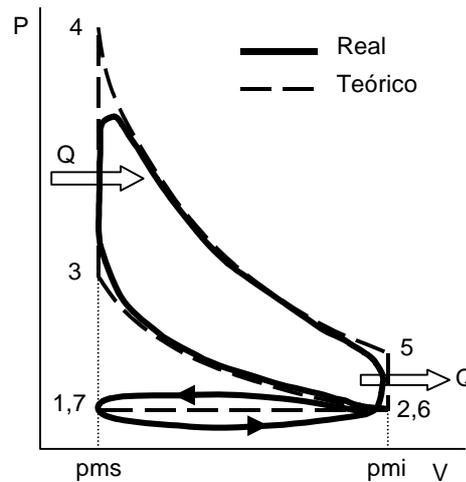


Fig. 1.1: Diagrama del ciclo Otto: 1-2 admisión; 2-3 compresión adiabática; 3-4 calentamiento a volumen constante; 4-5 expansión adiabática; 5-6 enfriamiento a volumen constante; 6-7 escape

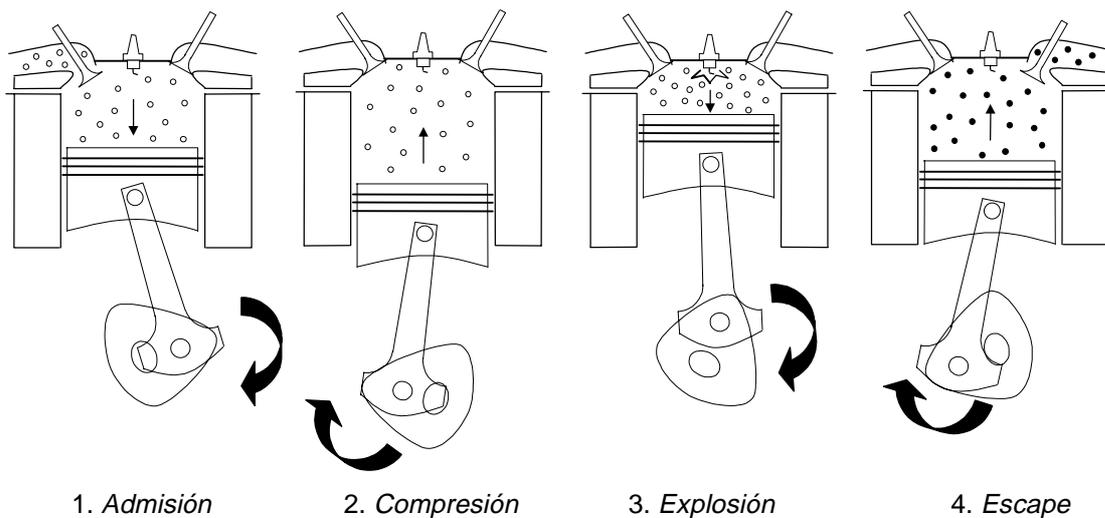


Fig. 1.2: Los cuatro tiempos del motor Otto

La combustión en un motor térmico es una reacción exotérmica, en la que parte de este calor de reacción se transforma en trabajo mecánico. Para ello es necesario lograr una mezcla de un combustible (la gasolina, formada por un conjunto de hidrocarburos) y un comburente (el oxígeno, contenido en el aire atmosférico) de tal calidad que proporcione una combustión correcta. Independientemente de la tecnología utilizada y del objetivo, esta mezcla ha de cumplir una serie de requerimientos:

- Que sea **combustible**, por lo cual la mezcla debe contener todos los reactivos.
- Que sea **gaseosa en el momento del encendido**, por lo que el combustible deberá estar perfectamente vaporizado dentro de la cámara de combustión.

- Que sea **homogénea**. Esto implica que la mezcla que llega a la cámara de combustión debe tener iguales características en todos los puntos del espacio. Como consecuencia, debe repartirse por igual entre todos los cilindros.
- Que esté correctamente **dosificada**.

De todas estas condiciones, se da por supuesto que se cumplen las tres primeras. Ahora bien, queda por ver qué significa "correctamente dosificada", y esto es lo que se trata a continuación.

Se entiende como **dosado** o **relación aire-combustible** (*air-fuel ratio*: **AFR**) el cociente entre la masa de aire y la masa de combustible existente en la mezcla. En las gasolinas comerciales utilizadas en automoción, el valor para el cual la reacción de combustión es teóricamente completa sin que sobre ninguno de los reactivos, se sitúa entre 14 y 15. Esto es lo que se denomina dosado **estequiométrico**. Si se normaliza el dosado respecto al dosado estequiométrico, se obtiene una variable denominada con la letra griega **lambda** (λ). En relación al valor estequiométrico, se define como **mezcla rica** aquella que tiene un exceso de combustible ($\lambda < 1$), mientras que una **mezcla pobre** tiene un exceso de aire, o lo que es lo mismo, una falta de combustible ($\lambda > 1$).

$$\text{AFR} = \frac{m_a}{m_c} \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{\text{AFR}}{\text{AFR}_e} = \frac{1}{\text{AFR}_e} \frac{m_a}{m_c} \quad (1.2)$$

El dosado requerido por un motor dependerá del objetivo buscado, siempre y cuando se sitúe dentro de los límites de inflamabilidad de la mezcla, $\lambda \approx [0,5 \div 1,5]$.

- **Dosado de máxima potencia:** es aquel que permite obtener la máxima potencia calorífica en la combustión; se da para mezclas ricas, con un exceso de combustible del orden del 10 % ($\lambda \approx 0,9$). Se aplica solamente cuando la carga del motor es la máxima.
- **Dosado de mínimo consumo:** es aquel que permite un aprovechamiento máximo del combustible introducido, manteniendo una combustión correcta, por tanto con exceso de aire (mezcla pobre), alrededor del 15% ($\lambda \approx 1,5$). Tradicionalmente se ha aplicado a todo el mapa de cargas parciales del motor, con objeto de lograr un máximo rendimiento energético del motor.

A su vez, el dosado de la mezcla tiene una gran influencia en las emisiones contaminantes. La combustión completa de un hidrocarburo debería proporcionar dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Lo que sucede es que, o bien la combustión no es completa, o bien resulta que las altas presiones y temperaturas reinantes en la cámara de combustión hacen que estos productos reaccionen entre sí, dando lugar a otros productos contaminantes resultantes de estas reacciones secundarias. El contenido total de contaminantes en los gases de escape es de aproximadamente el 1% en volumen de los gases totales emitidos, y en un motor Otto, se agrupan en tres categorías:

- **Monóxido de carbono (CO):** Aparece como consecuencia de una oxidación parcial. Es altamente tóxico, al impedir la aportación de oxígeno por la sangre a los tejidos del cuerpo.
- **Hidrocarburos (HC):** Proceden de la propia gasolina y del aceite sin quemar o quemados parcialmente. Son muy irritantes para los seres vivos.
- **Óxidos de nitrógeno (NOx):** Consisten en una mezcla de diferentes óxidos de nitrógeno, producidos por la oxidación del nitrógeno atmosférico como consecuencia de las altas temperaturas y presiones existentes en la cámara de combustión, lo cual favorece este tipo de reacción.

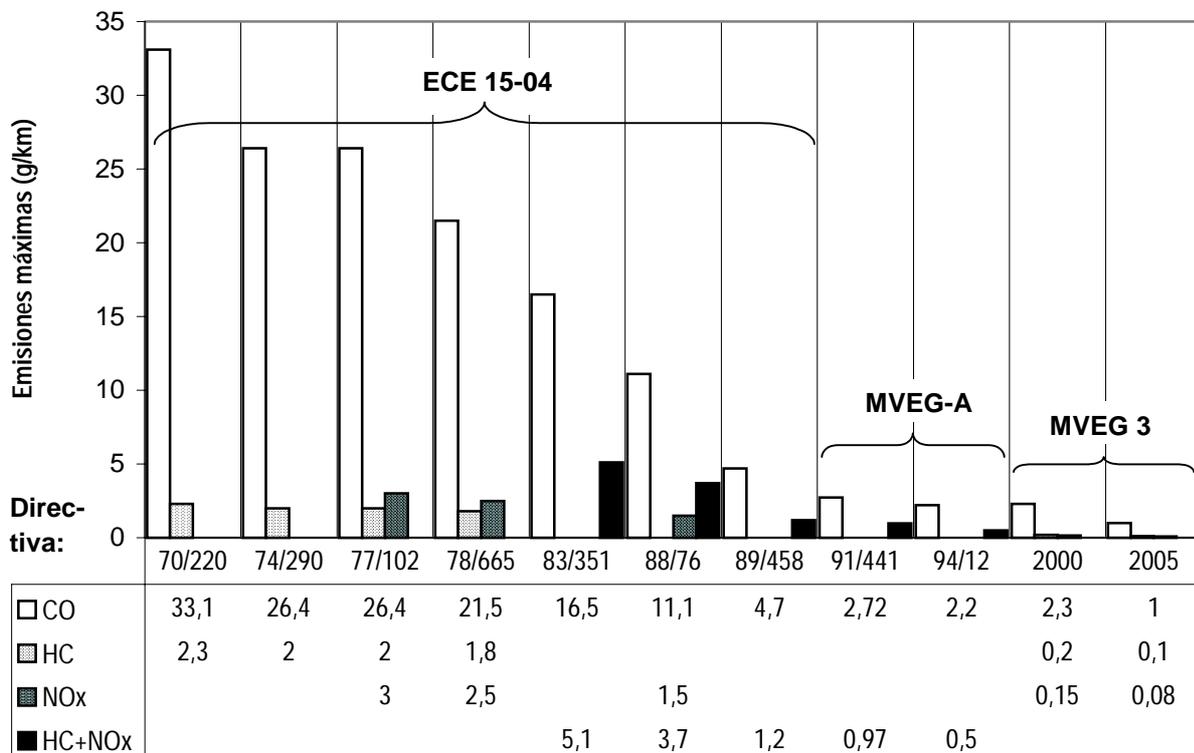


Fig. 1.3: Limitación de las emisiones contaminantes para un vehículo con motor Otto, de cilindrada $\leq 1,4$ l, e inercia 1130 kg

Desde que se empezó a tomar conciencia de los efectos nocivos de los gases contaminantes, nuevas leyes cada vez más exigentes han ido apareciendo de forma progresiva en distintos países, imponiendo unos límites legales a las cantidades de contaminantes emitidos por los vehículos a motor. La figura 1.3 muestra la evolución de las limitaciones en las emisiones dentro de la Unión Europea para un vehículo con motor de gasolina de cilindrada menor de 1,4 l, y una inercia equivalente de 1130 kg. No sólo se han reducido los límites, sino que los ciclos de conducción, representados en la figura sobre las llaves, han ido teniendo en cuenta primero la conducción en zona urbana (ECE 15-04), después también en zona interurbana (MVEG-A), y está previsto que se considere la fase inmediatamente después del arranque, en que el motor y el catalizador están fríos (MVEG 3). También se exige que estos límites se cumplan no sólo con un vehículo nuevo, sino cuando este haya recorrido 80.000 km. A raíz de la directiva europea 91/441 de 1991, hubo que

recurrir al catalizador como única tecnología capaz de cumplir con esas limitaciones, dado que no podían reducirse más las emisiones actuando sobre la combustión.

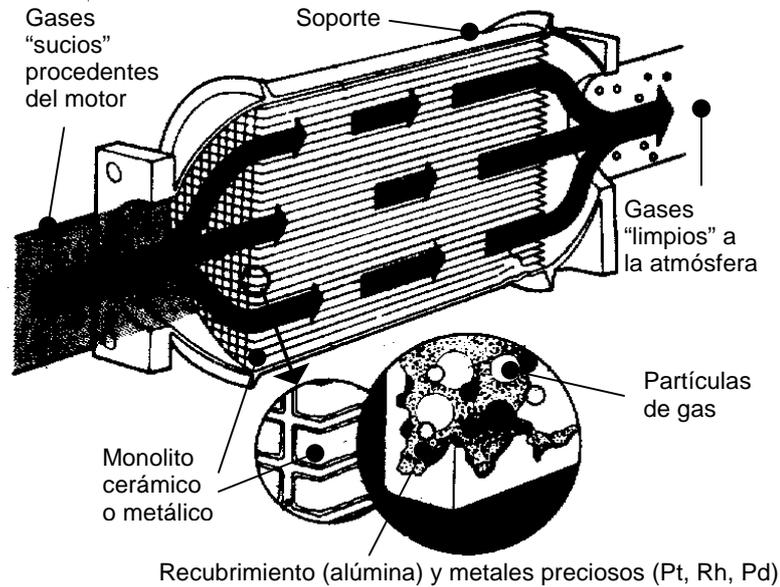
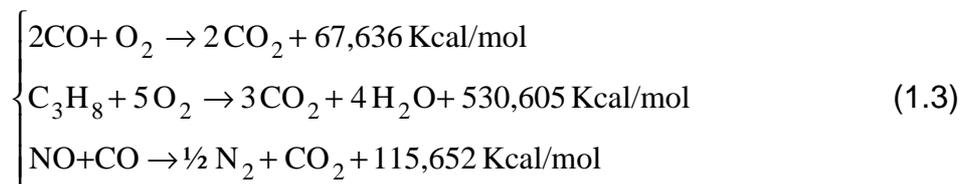


Fig. 1.4: Sección del catalizador [R.A.C.C.]

El catalizador consiste en una marmita incorporada en el tubo de escape, rellena con un monolito metálico o cerámico cuya sección transversal es de tipo panal de abeja. El interior de las celdillas está bañado en una emulsión, dispuesta en forma de pliegues para aumentar la superficie de contacto con los gases de escape, consistente en alúmina, en la cual están depositados los metales catalizadores: platino, paladio, y rodio. Estos son los encargados de transformar las sustancias nocivas procedentes de los gases de escape del motor (CO, HC, NOx) en otras inocuas (CO₂, H₂O, N₂ y O₂), como consecuencia de unas reacciones a baja temperatura, a partir de 300 °C. Las reacciones químicas producidas en el interior del catalizador [Katas91Fue] son las siguientes:



De ahí puede verse que hay dos grupos de reacciones químicamente diferentes. Las dos primeras requieren una atmósfera oxidante, que se obtiene con mezclas pobres, mientras que la última necesita una atmósfera con poco oxígeno, es decir, mezclas ricas. Para que las tres puedan hallar el equilibrio lo más a la derecha posible simultáneamente, es necesario controlar la concentración de oxígeno dentro de un margen muy estrecho. Dado que la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape depende exclusivamente del dosado de la mezcla, se comprende la necesidad de mantener siempre un dosado constante.

Se define la **eficacia** o **rendimiento de conversión** de un contaminante como la diferencia entre las concentraciones de entrada y de salida del catalizador, respecto a la concentración de entrada. La figura 1.5 representa el rendimiento de conversión de los tres contaminantes en función de λ . La tolerancia en el valor de λ que se admite para un rendimiento mínimo de conversión del 80 % en los tres contaminantes simultáneamente se denomina **ventana**, y es un valor muy pequeño, centrado justamente en el valor estequiométrico. El tamaño de la ventana suele ser del orden de $\pm 0,3$ %, aunque varía según el tipo de catalizador y su estado; un catalizador envejecido o envenenado por plomo, donde la superficie útil de contacto entre los metales y los gases se ha reducido notablemente, tendrá una ventana mucho más estrecha que un catalizador nuevo.

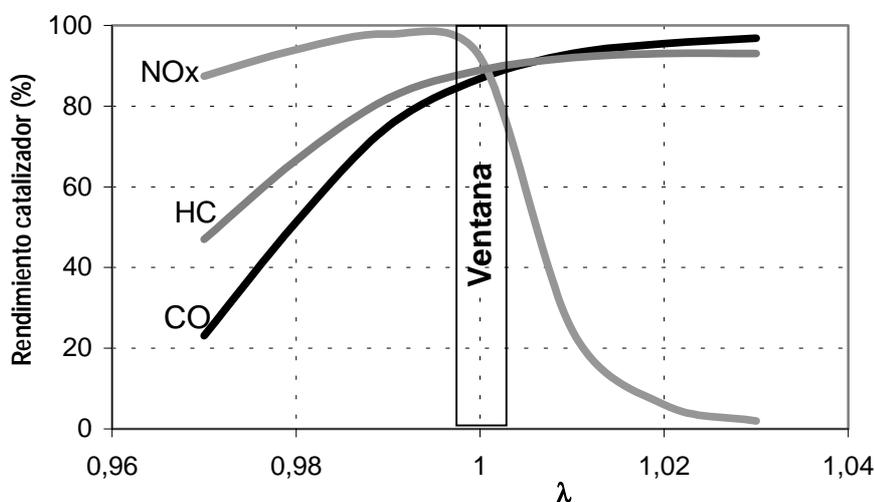


Fig. 1.5: Rendimiento de conversión de los contaminantes y ventana del catalizador

Por otro lado, el catalizador tiene partículas de Ce, las cuales le confieren la capacidad de almacenar oxígeno químicamente en forma de CeO_2 . Esto significa que ligeras excursiones fuera de la ventana no sólo no son perjudiciales, sino incluso beneficiosas, siempre y cuando estas sean en el lado rico y pobre alternativamente. Este fenómeno ha sido estudiado con detalle por Falk [Falk80Thre] y Katashiba [Katas91Fue]. Cuando una mezcla rica llega al catalizador, se libera el oxígeno que previamente, por efecto de una mezcla pobre, se había almacenado, el cual se utiliza para la reacción de oxidación. Si en esta fase logra consumirse todo el oxígeno almacenado, y además coincide con la cantidad requerida, la conversión de gases será máxima. Esto implica que existe una frecuencia y amplitud óptimas de oscilación del dosado alrededor del valor estequiométrico, para un catalizador dado. La conclusión de todos los trabajos es que la oscilación admitida es de hasta el 2%, para frecuencias comprendidas entre 1 y 4 Hz.

En definitiva, lo que se debe exigir a cualquier sistema de formación de la mezcla en lo que se refiere al dosado, es que proporcione una mezcla lo más cercana posible al valor estequiométrico, habiéndose abandonado por completo el criterio de mínimo consumo y por tanto de mezcla pobre. Así pues, el objetivo queda reducido a conseguir una mezcla con un dosado $\lambda=1$, sin necesidad de considerar el catalizador

desde el punto de vista químico.

1.2. Objetivo y motivación

La presente tesis propone el diseño de un sistema avanzado de control que, basado en la técnica de redes neuronales, permita superar las dificultades que supone el control de la mezcla de aire y gasolina en un motor de explosión, que los controladores convencionales desarrollados hasta el momento no han podido.

La elección del problema ha sido motivada por la importancia que tiene hoy en día el tema de la automoción, tanto en el plano ecológico como económico, aparte de profundizar en el campo de gestión de los motores para complementar la experiencia profesional, así como el interés personal en tecnologías avanzadas de control, sobre todo en sistemas inteligentes.

Por lo tanto, se propone resolver el problema mediante la utilización de las técnicas descritas, de forma que el estudio realizado sea generalizable a otros problemas similares. El objetivo es triple.

1. Objetivo ecológico

Se pretende lograr un control mucho más preciso de la mezcla, sobre todo durante los transitorios, de modo que el convertidor catalítico funcione con un rendimiento óptimo de depuración de los gases contaminantes y la conductibilidad del vehículo sea correcta. Esto último tiene una repercusión importante en confort, y la imagen subjetiva de calidad que da el vehículo.

2. Objetivo tecnológico

Las redes neuronales son un terreno donde, a pesar de haberse avanzado mucho en la última década, tienen muchos puntos abiertos y ofrecen un gran potencial de estudio, sobre todo cuando se trata de aplicaciones de control. Aquí ofrecen una serie de ventajas respecto a los controladores clásicos:

- No se requiere un conocimiento matemático exacto de la planta para el diseño del controlador, sino tan sólo información cuantitativa, obtenida de la experimentación y del uso normal de la propia planta.
- Permiten tratar problemas de control con plantas no lineales y parcialmente desconocidas, que las técnicas convencionales no pueden o requieren una gran complejidad.
- Al desarrollar un sistema dotado de capacidad de autoaprendizaje, tan sólo será necesario el entrenamiento del controlador sobre la planta real, que en este caso equivale a un programa específico de rodaje del vehículo en banco de rodillos, y posteriormente el realizado por el propio usuario en la conducción normal. Esto permite una **personalización**: cada coche irá aprendiendo en función de la forma particular de conducción de su propietario.

3. Objetivo económico

Como consecuencia de lo expuesto en el punto anterior, se evita tener que realizar todo el conjunto de ensayos con prototipos en instalaciones especiales, necesarios para la determinación experimental de los parámetros en los controladores convencionales. La consecuencia es una **reducción de los plazos y costes** en el desarrollo de un nuevo motor, o de la aplicación de un motor a un nuevo vehículo.

1.3. Solución adoptada

La idea propuesta debe ser capaz de afrontar todas las dificultades propias del problema y cumplir los requerimientos de control vistos anteriormente.

El objetivo es eliminar el retardo en el lazo de realimentación en la medida de lo posible. Para ello se diseña un observador de estado, de modo que la salida de este sea equivalente a la salida del motor sin retardar, y pueda ser utilizada por el controlador en lazo cerrado. El proceso consta de dos etapas:

- a) Se calcula, mediante análisis en lazo cerrado del motor, el retardo puro aparente.
- b) Se aplica a una red neuronal las mismas entradas que al motor. La salida de esta red se retarda un valor igual al retardo puro calculado. De esta forma, esta señal es comparable a la salida del motor, y este hecho se aprovecha para que la red aprenda. Así se obtiene un modelo capaz de aprender la dinámica del motor sin retardo en la respuesta.

1.4. Aportaciones

El control de la mezcla de aire y gasolina es un problema muy complejo, que hoy en día se resuelve mediante mapas estáticos. Las técnicas neuronales ofrecen un amplio abanico de posibilidades, siendo al mismo tiempo un campo donde queda mucho por descubrir. Así pues, las aportaciones realizadas se resumen en los siguientes puntos:

- Revisión exhaustiva del estado del arte en el apartado de control de la mezcla.
- Modelado de la formación de la mezcla en un motor de gasolina, a partir de modelos físicos y resultados experimentales. El análisis en profundidad del problema a través del modelo, permite comprender mejor las dificultades que plantea, y que la literatura existente contempla sólo en parte.
- Desarrollo de un montaje experimental, para el ajuste de determinados parámetros, y la posterior validación global del modelo.
- Estudio comparativo de diferentes controladores convencionales, y con ello análisis del problema de la formación de la mezcla desde el punto de vista de control.

- Estudio de la capacidad de diferentes tipos de red neuronal *feedforward* y recurrente para la identificación del motor como sistema dinámico.
- Desarrollo de un nuevo tipo de red recurrente, a partir de la modificación de la red de Elman, optimizada para la identificación de sistemas multientrada donde las características dinámicas son muy diferentes para cada una de las entradas, con factores de memoria adaptables por separado y factor de aprendizaje variable.
- Desarrollo de un controlador con un gran ancho de banda, utilizando la red neuronal creada, sin incrementar la complejidad física de la planta e incluso reduciendo el número de sensores.
- Aplicación del control a un caso real mediante simulación, utilizando el modelo no lineal desarrollado en esta tesis. En general, los casos hallados en la literatura se limitan a modelos muy simples, normalmente lineales.

1.5. Organización de la tesis

Continuando con la introducción expuesta en el presente capítulo, se dedica el **capítulo 2** al estudio del fenómeno de la formación de la mezcla, efectuándose una recopilación de la literatura existente sobre el tema, en dos grandes apartados: fundamentos teóricos y tendencias en control.

En el **capítulo 3** se efectúa una revisión de modelos del motor en diferentes publicaciones, y se desarrollan los seis submodelos: combustible, aire, admisión de la mezcla, combustión, medición de λ y dinámica del coche. La identificación de los parámetros correspondientes se realiza en los diferentes apartados. Por último, se valida el modelo global comparando los resultados de la simulación con el modelo y los obtenidos experimentalmente, al aplicar 6 conjuntos de datos de entrada, realizados en diferentes marchas (3^a, 4^a y 5^a).

El diseño de un controlador convencional para el análisis del modelo como planta a controlar, se realiza en el **capítulo 4**, donde se desarrolla en primer lugar el controlador *feedforward*, y posteriormente el *feedback*. El controlador *feedforward* se ajusta tanto en lazo abierto como cerrado. La sintonía del controlador *feedback* se realiza igualmente en lazo cerrado, y mediante análisis de la planta en lazo abierto. Primero se cierra el lazo con la sonda de dos estados (EGO), y después con la sonda continua (UEGO). De ello se extrae la información referente al comportamiento dinámico del motor, y se compara con los resultados obtenidos experimentalmente.

En el **capítulo 5** se diseña el controlador avanzado, basado en la red neuronal que configura el observador. En primer lugar se definen las señales de excitación, que se usarán para la identificación del motor mediante diferentes técnicas. Luego se realiza un estudio de modelos de entrada-salida para comprobar su capacidad de identificación de la planta, y la determinación de parámetros fundamentales, tales como el orden del sistema y el retardo aparente. Posteriormente se estudia la

identificación de la planta con diferentes tipos de red neuronal *feedforward* y recurrente, mediante entrenamiento *off-line*. Se desarrolla un nuevo tipo de red recurrente, objeto de esta tesis, y se compara con las anteriores. Finalmente se cierra el lazo de control con todas las redes, y se analiza el comportamiento del conjunto en lazo cerrado, comparando los resultados con los obtenidos en el capítulo 3.

En el **capítulo 6**, se extraen las conclusiones del trabajo, y se plantean una serie de temas abiertos para la continuación de este.

Se incluyen dos **anexos**. En el primero de ellos se muestra la instalación experimental utilizada para la toma de datos, y las características del motor y el vehículo usados. El segundo es un listado de todas las referencias bibliográficas que aparecen a lo largo de la tesis.

El esquema de la página siguiente resume con la ayuda de diagramas de bloques la organización de la tesis. Los diferentes colores corresponden a los distintos capítulos.

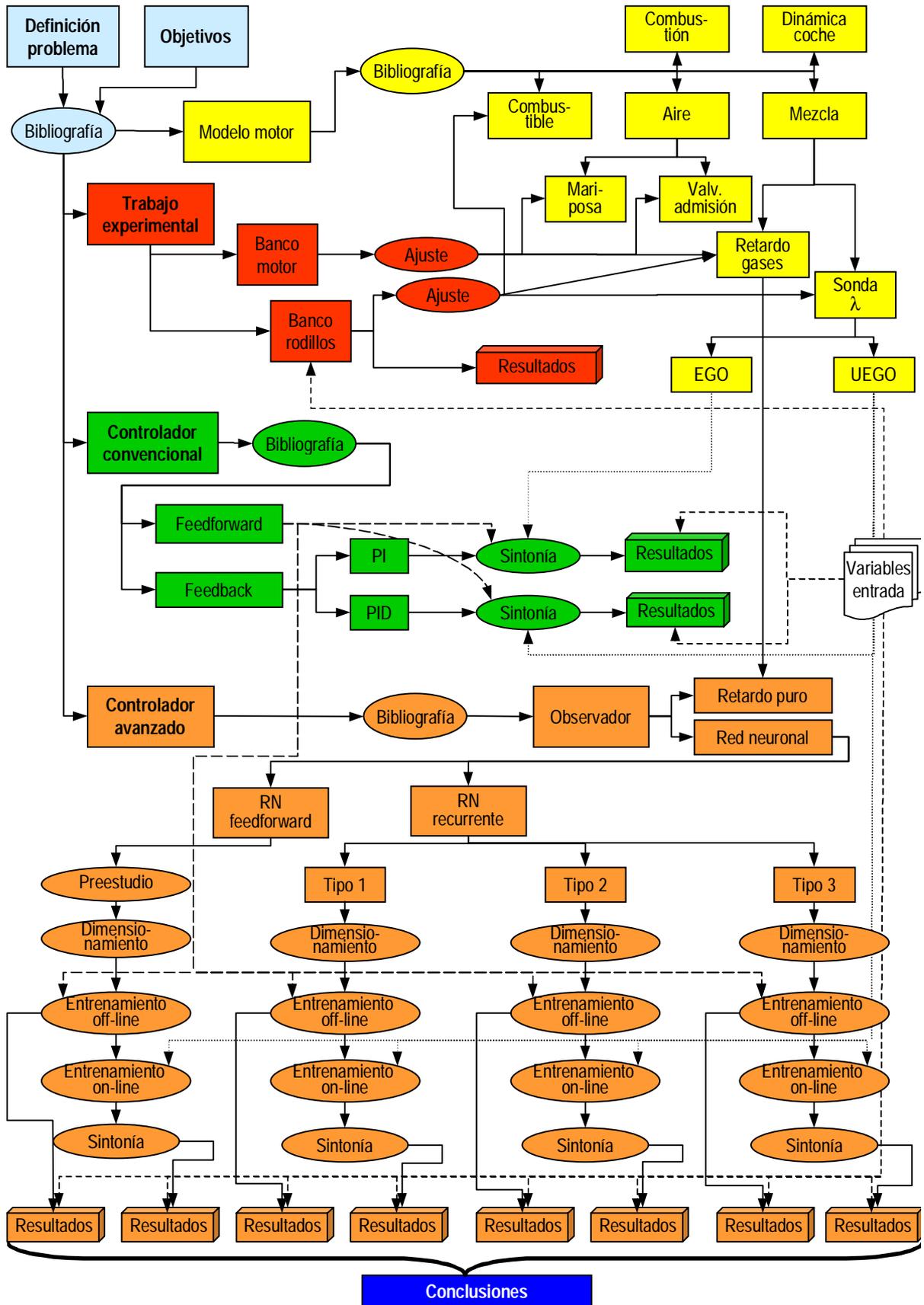


Fig. 1.6: Organización de la tesis

