

# DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN CONVENCIONAL CON BOMBA ROTATIVA.

JOSÉ M. PALOMAR CARNICERO, FRANCISCO J. JIMÉNEZ ESPADAFOR, RICARDO CHACARTEGUI RAMÍREZ, ANTONIO MUÑOZ BLANCO, TOMÁS SÁNCHEZ LENCERO

Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Escuela Superior de Ingenieros. Camino de los Descubrimientos s/n, Grupo de Máquinas y Motores Térmicos, 41092 Sevilla

JOSÉ M. PALOMAR CARNICERO

Escuela Politécnica Superior. Avd. Madrid 35, 23008 Jaén E-mail : jpalomar@ujaen.es

## Resumen

El presente artículo se ocupa de la aplicación de un modelo de inyección de bomba rotativa al diseño de la misma. En éste se detalla un modelo del sistema de inyección, el cual se ha formado a partir del modelado de las diferentes cámaras que constituyen el sistema. Una vez validado el modelo, se desarrolló un método de optimización basado en una estructura tipo Newton discreto. El modelo utiliza de forma independiente dos grupos de variables de diseño. En un caso la ley de la leva y en otro parámetros del sistema de inyección. El algoritmo de optimización opera sobre el modelo del sistema de inyección hasta conseguir una ley de inyección prefijada.

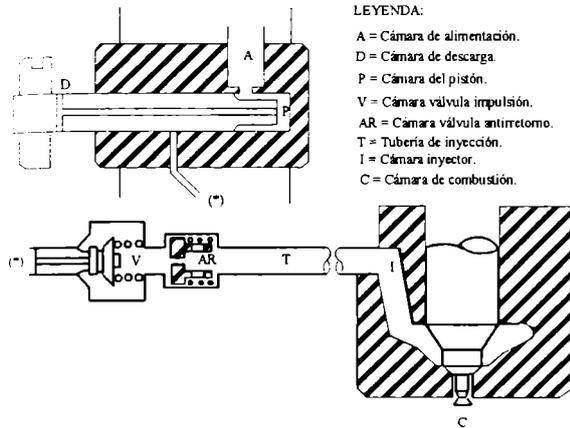
## 1. Introducción

El modelo matemático desarrollado supone una ayuda para el diseño, por cuanto que permite analizar la respuesta del sistema (en términos de tasa de inyección, caudal total por ciclo, presión residual, etc.). Sin embargo, dicho modelo no permite por sí mismo abordar el denominado problema inverso, esto es, dada una ley objetivo suministrar las características dimensionales del sistema que hacen que el sistema de inyección reproduzca la ley objetivo. Este artículo supone un primer acercamiento a la resolución del problema inverso, donde un reducido grupo de parámetros del sistema se mantienen como variables sobre las que actúa el algoritmo de optimización, con el objetivo final de generar una determinada ley de inyección prefijada.

## 2. Evaluación y validación experimental

El presente modelo (Palomar J. M. 1996) fue diseñado para una bomba rotativa Bosch tipo VE y abarca el sistema compuesto por bomba-tubería-inyector. A partir de los parámetros característicos del sistema y del régimen de revoluciones del motor, obtiene unas gráficas que representan el comportamiento de la línea de presiones en las distintas cámaras, el levantamiento de las válvulas y los caudales inyectados por cilindro y ciclo en función del ángulo de giro de la leva. El método matemático se basa en un cálculo iterativo, empleando como ecuaciones básicas la ecuación de continuidad, la ecuación de cantidad de movimiento, la ecuación de la energía y el método propuesto por Yamaoka K. (1973). A su vez, se tienen en cuenta las características variables del combustible, los coeficientes de descarga a la entrada y salida de las cámaras, así como la posible cavitación.

La Fig.1 muestra un esquema del sistema de inyección, que incorpora una bomba rotativa Bosch tipo VE, de cuatro cilindros y que equipa al motor del VW Polo 1,4 LSD, de 1400 cm<sup>3</sup> y 36,8 kW de potencia a 4500 rpm.



Para contrastar el modelo se han elegido las siguientes variables:

- Presión a la entrada del inyector
- Levantamiento aguja del inyector
- Combustible inyectado por ciclo.

La Tabla 1 muestra los caudales inyectados por ciclo, tanto medidos como simulados, así como el error relativo entre ambos, para las distintas situaciones ensayadas. La relación diámetro exterior/interior de la tubería es 6/2.

Fig. 1 - Esquema del sistema de inyección

Tabla 1. Caudales inyectados (simulados y reales) en función de las revoluciones de la bomba

VELOCIDAD BOMBA (r.p.m.)	PRESIÓN TARADO (bar)	LONGITUD TUBERÍA (mm)	CAUDAL MEDIDO (mm <sup>3</sup> )	CAUDAL SIMULADO (mm <sup>3</sup> )	ERROR RELATIVO (%)
1000	130	600	24.8	24.20	- 2.47
1500			26.8	28.44	+ 5.76
2000			26.2	26.03	- 0.65
1000	130	500	24.0	24.48	+ 1.96
1500			26.0	25.99	- 0.04
2000			26.0	25.66	- 1.32
1000	150	600	24.1	23.92	- 1.16
1500			26.4	26.41	+ 0.04
2000			25.0	26.19	+ 4.55
1000	150	500	23.0	23.66	+ 2.79
1500			25.0	25.84	+ 3.25
2000			25.6	25.72	+ 0.46

La comparación entre los resultados del modelo y los experimentales arrojan errores en la tasa de inyección inferiores al 3% (para un numeroso rango de condiciones operativas) siendo las leyes de presión de inyección y levantamiento de la aguja del inyector, tanto en forma como en magnitud, muy similares a las medidas. Por tanto se considera que el modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento del sistema de inyección.

### 3. Optimización del sistema de inyección

El problema del diseño dentro de una estrategia de optimización puede definirse, de forma general, como un problema no-lineal que presenta la formulación siguiente:

$$\min \varphi_0(x) \quad (1)$$

$$\text{sujeto a: } \varphi_i [ y(t, x), x, t ] \leq 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, \dots, j \quad (2)$$

y la ecuación de estado ( modelo matemático del sistema de inyección )

$$h(t, y, \dot{y}, x) = 0 \quad (3)$$

La función  $\varphi_0(\mathbf{x})$  recibe el nombre de función objetivo y el conjunto de funciones (2), se denominan restricciones. El subíndice  $j$  representa el número de restricciones y  $T$  es la longitud de los intervalos de interés.

El vector  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  tiene por componentes todos los parámetros estructurales que pueden ser variados de manera independiente, y el vector  $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$  tiene por componentes las diferentes respuestas posibles del sistema.

La solución del problema pasa por encontrar las componentes del vector de parámetros del sistema  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ , tal que minimice la función  $\varphi_0(\mathbf{x})$  respetando las restricciones impuestas en la ec.2. Aquí se va a considerar la optimización sin restricciones, por cuanto que las restricciones están asociadas a exigencias bien definidas del sistema que a priori no se conocen en su conjunto y donde la variable temporal  $t$  se ha sustituido por la variable  $\theta$  ( ángulo de giro de la leva).

El algoritmo de optimización empleado se conoce como método de Newton discreto. Las razones principales para su elección radican en el hecho de que se trata de un modelo cuadrático y que como tal posee gran simplicidad y eficiencia, además de sus buenas propiedades de convergencia.

#### 3.1. Leyes objetivo

Una de las características más importante del sistema de inyección es el comportamiento de la tasa de inyección  $\dot{q} [ y(t,x), x, t ]$ , de manera que se puede afirmar que la forma de esta ley influye en el proceso de combustión y por tanto en el consumo específico, las emisiones de gases contaminantes, y en el ruido de combustión; de ahí que resulte adecuado tomar ésta como función objetivo. A tal efecto habrá que definir una ley ideal  $\dot{q}^p(t)$  que suponga el objetivo a conseguir por el sistema de inyección.

Otra característica importante del sistema de inyección es la ley de levantamiento de aguja. La forma de ésta está relacionada con la tasa de inyección y además afecta al dimensionado de los componentes del sistema por cuanto que va a definir la magnitud de los impactos entre la aguja y el asiento, por lo que puede ser incluida en la función objetivo como  $L^p(t)$ .

### 3.2. Variables a optimizar

Se han utilizado dos grupos de variables que se han tratado de forma independiente.

a) **La ley de leva.** En este caso, se ha utilizado un polinomio de sexto orden para modelar la ley de la leva. Por tanto, son los siete coeficientes que definen la geometría de la leva las variables independientes que constituyen el vector  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^7$  presente en el planteamiento inicial, ecs.1, 2 y 3.

b) **Parámetros del sistema.** Aquí se han considerado aquellos parámetros que no condicionan los modelos de pérdida de carga o coeficientes de descarga. Las variables incluidas aquí son la masa de la aguja del inyector ( $M_i$ ), la constante del muelle del inyector ( $K_i$ ) y el diámetro de la tubería ( $D_i$ ). Estos son los tres parámetros que constituyen el vector  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^3$  presente en las ecs.1, 2 y 3.

### 3.3. Análisis de resultados.

A continuación se van a analizar los resultados obtenidos después de aplicar la metodología de optimización al modelo de simulación. El objetivo buscado ha sido la modificación de las características del sistema de inyección para conseguir una determinada ley de inyección deseada. Los casos estudiados son los siguientes:

#### 3.3.1. Incremento y disminución de la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja.

Utilizando la ley de leva como variable independiente, se ha estudiado la viabilidad de obtener una ley de levantamiento de aguja del inyector con la pendiente de subida incrementada y disminuida respecto al valor inicial. En las Figs.2 y 6, respectivamente, se puede apreciar que el algoritmo de optimización funciona perfectamente, pues es capaz de incrementar y disminuir notablemente la rampa de subida de la ley de levantamiento de aguja respecto de la original, que es lo que se perseguía. La singularidad que aparece al final de la rampa de subida obedece al método de cálculo, debido a la discontinuidad de las derivadas de la función objetivo; este mismo efecto puede observarse en las Figs.6 y 10.

Hubiera sido deseable utilizar la tasa de inyección como ley objetivo, por ser ésta la que más condiciona el proceso de combustión en motores Diesel; sin embargo, el mal comportamiento (discontinuidad en la primera y segunda derivada) en la tasa de

inyección hacen que los resultados de la optimización según el algoritmo de Newton sean poco válidos. No obstante se puede apreciar que, a pesar de haber utilizado la ley de levantamiento de aguja como función objetivo, esto repercute sobre la tasa de inyección, consiguiendo fuertes gradientes de la tasa al crecer la pendiente de subida del levantamiento de aguja (Figs. 4 y 5) o que la tasa de inyección disminuya al disminuir la pendiente de subida del levantamiento de aguja, sobretodo en las primeras etapas del proceso de inyección, disminuyendo así el ruido de combustión (Figs.8 y 9).

Fig.2 - Aumento de la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja del inyector (1500 rpm)

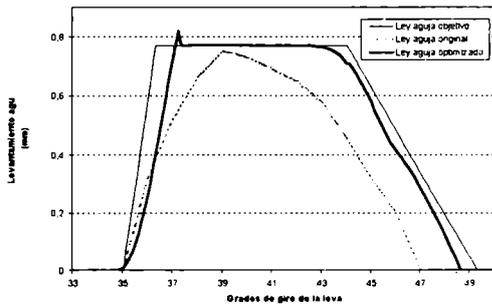


Fig.3 - Efecto sobre la ley leva al aumentar la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja del inyector (1500 rpm)

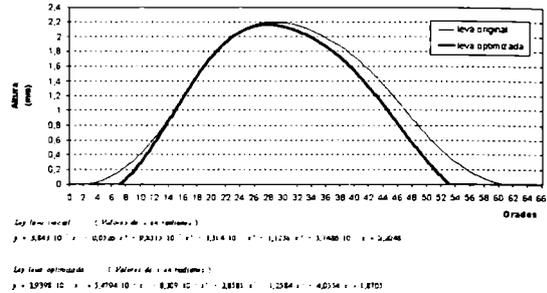


Fig. 4.- Efecto sobre la tasa de inyección al aumentar la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja inyector (1500 rpm)

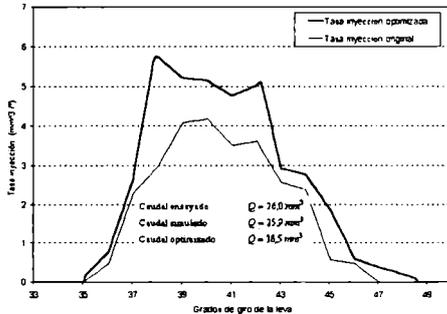
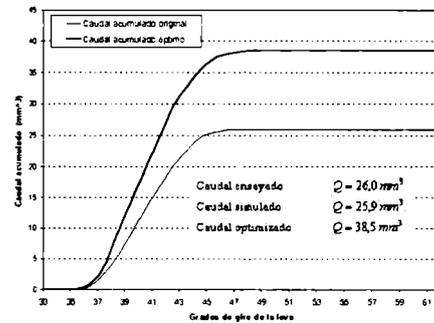


Fig. 5.- CAUDALES ORIGINAL Y OPTIMIZADO ACUMULADOS (1500 rpm)



Por último indicar que los caudales globales inyectados se modifican notablemente por no incluir restricciones en el algoritmo y por tanto la cantidad neta inyectada es un parámetro que no presenta control en la actual estructura del algoritmo.

Fig. 8.- Disminución de la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja del inyector (1500 rpm)

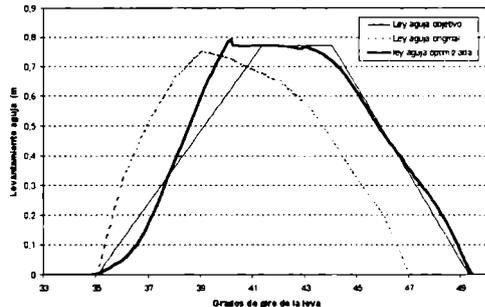


Fig. 7 - Efecto sobre la ley leva al disminuir la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja del inyector (1500 rpm)

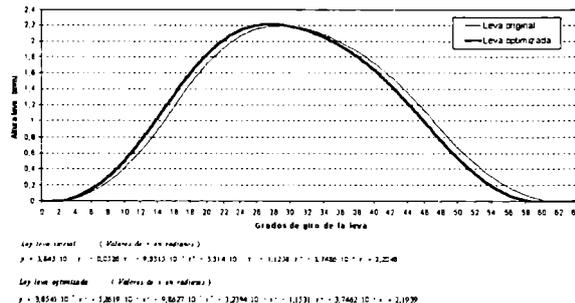


Fig. 8.- Efecto sobre la tasa de inyección al disminuir la pendiente de subida de la ley de levantamiento de aguja del inyector (1500 rpm)

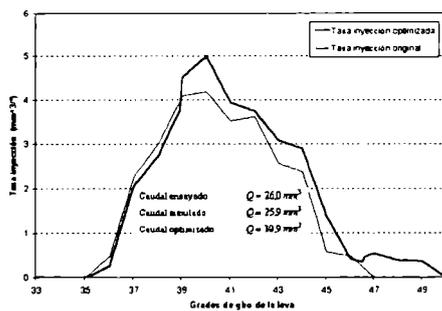
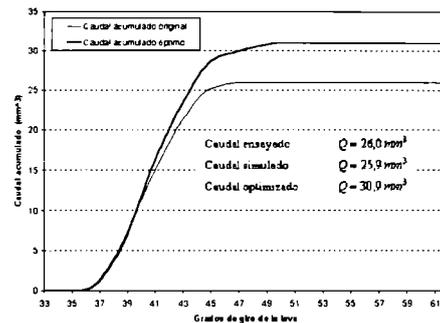


Fig. 9.- CAUDALES ORIGINAL Y OPTIMIZADO ACUMULADOS (1500 rpm)



### 3.3.2. Adelanto de la ley de levantamiento de aguja con respecto a la original

Tomando como variables de optimización los parámetros del sistema (masa de aguja del inyector, constante del muelle del inyector y diámetro de la tubería) se evaluó el modelo de optimización para ver la viabilidad de conseguir una ley de levantamiento de aguja del inyector a 1500 rpm, que iniciara el levantamiento en el mismo ángulo de giro de la leva que se produce cuando el modelo del sistema de inyección (sin optimización alguna) se ejecuta a 1000 rpm. Con los parámetros obtenidos ( $m_{\text{óptima}}$ ,  $K_{\text{óptima}}$ ,  $d_{\text{óptimo}}$ ) se evaluó el modelo del sistema de inyección a 1000 rpm, y se comprobó que el levantamiento de aguja se iniciaba un poco antes (en términos de grados de giro de la leva) que la solución del modelo con estos mismos parámetros a 1500 rpm. Lo que se pretende al disminuir el desfase es la posibilidad de eliminar el avance a la inyección, con lo que el coste de fabricación de la bomba inyectora disminuiría notablemente.

La Fig.10 muestra el resultado de aplicar el modelo de optimización a la ley de levantamiento de aguja con los imperativos indicados en el párrafo previo. Se puede observar como el modelo responde modificando los parámetros del sistema de inyección adelantando unos 3,8 grados el inicio de la inyección.

Fig. 10.- Efecto de modificar parámetros del sistema de inyección (Masa inyector, Constante muelle inyector y Diámetro tubería) (1500 rpm)

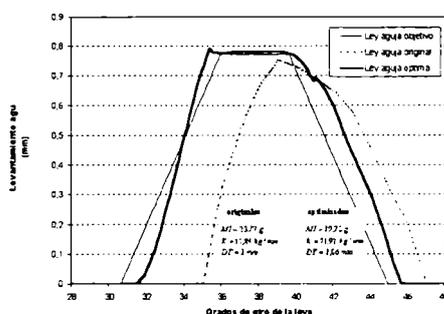


Fig. 11.- Efecto sobre la tasa de inyección al modificar los parámetros del sistema de inyección (1000 rpm)

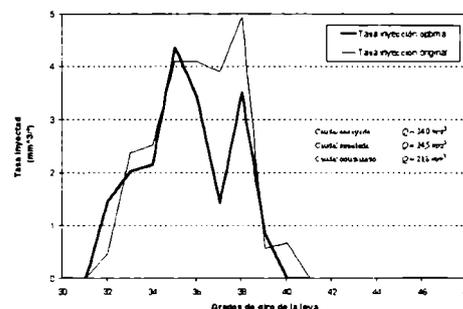


Fig. 12.- Efecto sobre la tasa de inyección al modificar los parámetros del sistema de inyección (1500 rpm)

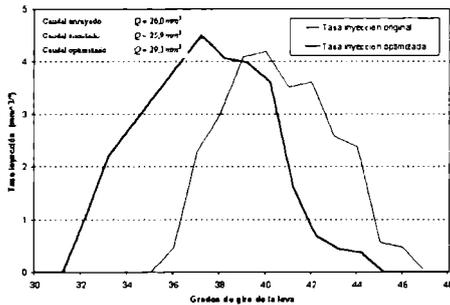
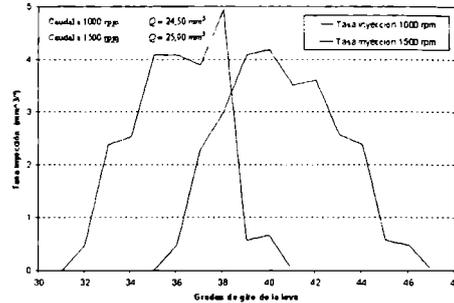
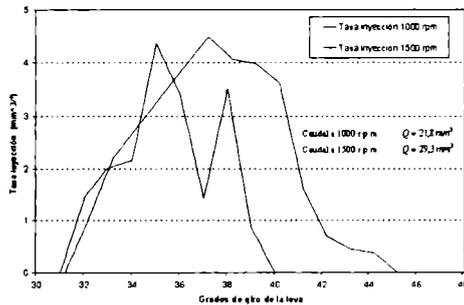


Fig. 13.- Tasa de inyección a distintas velocidades de giro con los parámetros originales



La Fig.13 muestra la tasa de inyección correspondiente a los parámetros originales y la Fig.14 muestra los resultados de la tasa de inyección con los parámetros optimizados.

Fig. 14.- Tasa de inyección a distintas velocidades de giro con los parámetros proporcionados por la optimización



Al comparar los adelantos sufridos al aplicar el algoritmo de optimización se observa que para 1000 rpm el ángulo de inicio de la inyección no se altera (apenas en 2 décimas de grado); mientras que a 1500 rpm hay un notable adelanto de la inyección (3,8 grados).

#### 4. CONCLUSIONES

En cuanto al modelo de optimización empleado dirigido al diseño (problema inverso) ha mostrado claramente su potencialidad aunque el problema global no está todavía cerrado. Hay que diseñar otro algoritmo que incluya como restricciones parámetros tales como cantidad total inyectada o restricciones de tipo geométrico asociadas a parámetros tales como valores mínimos y máximos de las dimensiones de aguja y del volumen de reaspiración.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PALOMAR, J.M. (1996). "Diseño y Simulación del Comportamiento Funcional de la Bomba Rotativa Bosch tipo VE de Inyección Diesel", VIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Actas II, pp. 593-611.

YAMAOKA K., SAITO A. (1973). "A Computer Technique for Evaluation Characteristic of Certain Phases of Fuel Injection in Fuel Injection System". SAE 730663. E.E.U.U.