



Universidad Zaragoza



Escuela Universitaria de
Ingeniería
Técnica Industrial
Universidad Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza

APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE NO_x EN MOTORES

MEMORIA

AUTOR

Jesús Eloy García Beatove

DIRECTOR

Francisco Moreno Gómez

ESPECIALIDAD

Mecánica

CONVOCATORIA

Junio 2012

Índice de contenido

EGR.....	2
Introducción.....	2
Objeto del proyecto.....	2
Localización.....	2
Conceptos previos.....	3
Emisiones contaminantes.....	3
EGR (Exhaust Gas Recirculation).....	4
Fecha y firma.....	5
Datos Iniciales.....	6
Ensayos con el motor.....	6
Densidad.....	7
Caudales máximos y pérdidas de presión.....	10
Calculo % EGR.....	14
Códigos para programación.....	15
Cambios de orificio.....	18
INYECCIÓN DE AGUA.....	21
Introducción.....	21
Objeto del proyecto.....	21
Localización.....	21
Fecha y firma.....	22
Determinación caudal.....	23
Instalación (Montaje).....	24
Elementos principales.....	25
Inyector.....	26
Bomba.....	27
Rotámetro.....	29
Conclusiones.....	30
BIBLIOGRAFÍA.....	31

Introducción

Objeto del proyecto

Desde el departamento de Máquinas y Motores Térmicos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza se realiza la petición de la aplicación de estrategias de EGR para reducción de emisiones de NOx en motores, realizando un estudio del funcionamiento del motor que se dispone en el laboratorio con este sistema.

El objetivo de este proyecto se va a centrar en dar funcionalidad al sistema de EGR anteriormente diseñado y construido para el motor, obteniendo y calculando los parámetros necesarios para el control de este de una forma automática (programable), con el fin de disminuir la cantidad de contaminantes según la normativa vigente Euro 5 y Euro 6 que se explican en el Reglamento (CE) N° 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de Junio de 2007 sobre la homologación de tipo de vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos.

El resultado final será el diseño de la estructura de la serie de códigos de programación necesarios para calcular el tanto por ciento de EGR que es el dato que nos interesa conocer, para conocer como funciona el sistema de EGR construido para el motor, así como todos los demás datos que nos interese conocer recogidos durante el proceso de cálculo.

Localización

El motor objeto del estudio, se encuentra instalado en el laboratorio de motores del departamento peticionario del proyecto, en el edificio Torres Quevedo del campus Río Ebro en la Universidad de Zaragoza.

Conceptos previos

Emisiones contaminantes

Se denominan gases de escape al material de residuo en forma de gas que ya no tiene utilidad y que se genera como consecuencia de un proceso de combustión. En el caso de los motores de combustión se ha acuñado el término "gas de escape".

Los gases de escape del motor contienen, además de sustancias inocuas como vapor de agua, dióxido de carbono y nitrógeno, también otras sustancias nocivas para las personas y/o el medio ambiente como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxido de nitrógeno (NOx).

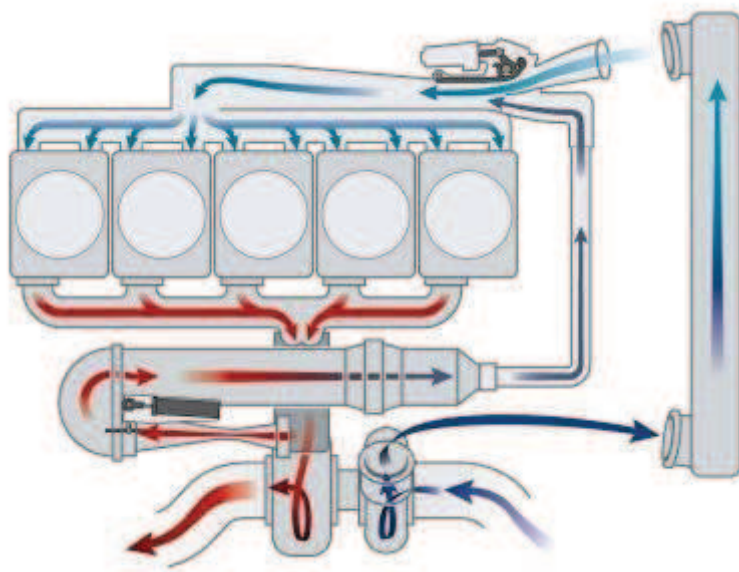
Estas sustancias nocivas representan sólo una parte mínima de todas las emisiones de un motor moderno: el 1,1 % en los motores de gasolina. En su mayor parte, los gases de escape están compuestos de nitrógeno, agua y dióxido de carbono. Sin embargo, es importante reducir o convertir en inocuas también las sustancias nocivas cuya cantidad es, en comparación, mucho más pequeña.

En un motor gasolina los gases de escape están aproximadamente en la proporción:

- N₂ 72,1%
- CO₂ 12,3%
- H₂O 13,8%
- O₂ 0,7%
- CO 0,88%
- HC 0,09%
- NO_x 0,13%

Podemos encontrar una explicación más detallada de los agentes contaminantes como son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC) y óxido de nitrógeno (NOx), en el apartado de "Sustancias nocivas" en los anexos.

EGR (Exhaust Gas Recirculation)



El EGR o sistema de recirculación de gases de escape principalmente lo que hace es redirigir parte del aire de escape que sale de las cabinas de combustión, volviéndolo a introducir en el colector de admisión junto con la mezcla de aire limpio y gasolina, como podemos ver en la imagen.

El caudal que se recircula varía de forma automática (programable) gracias a una válvula de EGR.

Este caudal redirigido antes de volver a ser introducido en el colector de admisión pasa por un enfriador ya que se encuentra a altísimas temperaturas. Este cambio brusco de temperaturas hace que la **densidad** del gas aumente considerablemente. Ese será el **primer punto** a tener en cuenta en el proyecto, en el cual habrá que definir el valor de la densidad de una forma precisa.

Después, el aire pasa por el caudalímetro diseñado para esta aplicación en concreto, en el que a partir de una diferencia de presión originada en unos orificios mecanizados, calcularemos el caudal preciso que se está trasegando y redirigiendo a la admisión. Aquí tenemos el **segundo punto** importante en el proyecto ya que tendremos que calcular los **caudales y las diferencias de presión** tanto mínimas como máximas que podrá trasegar cada orificio y por lo tanto cuando deberemos cambiar cada uno de ellos según estos valores.

Por último, una vez calculados los caudales, diseñaremos los **códigos de programación** que serán compatibles e introducidos con el programa que maneja al motor, para que nos indique la cantidad de EGR en tanto por ciento que estamos utilizando en cada momento; e integrando también el sistema de cambio de orificio anteriormente calculado.

Podemos ver más en detalle cada uno de los componentes de la instalación en el anexo “Elementos Principales” así como un esquema de la instalación.

Fecha y firma

Zaragoza a 15 de Mayo de 2012

Fdo.: Jesús Eloy García Beatove

Datos Iniciales

Ensayos con el motor

El propósito del proyecto no sólo es conocer como funciona el motor aplicando una serie de estrategias para la reducción de NOx, sino como se comporta este si lo hacemos funcionar con una serie de combustibles diferentes y como estas estrategias actúan de una manera u otra en función de estos combustibles.

A continuación se presentan los diferentes combustibles con sus características principales.

Datos de combustible	Gasolina	CH ₄ (87° inyec.)	CH ₄ (-15° inyec.)	90CH ₄ - 10H ₂	70CH ₄ - 30H ₂	50CH ₄ - 50H ₂
Átomos de Carbono	7,7600	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Átomos de Hidrogeno	13,1000	4,0000	4,0000	4,2222	4,8571	6,0000
Fracción másica Carbono (%)	87,5913	74,8687	74,8687	73,8379	71,0430	66,5111
Fracción másica hidrógeno (%)	12,4087	25,1313	25,1313	26,1621	28,9570	33,4889
Peso molecular (gr/mol)	106,4330	16,0500	16,0500	16,2743	16,9154	18,0694
Moles de oxígeno para combustión esteq.	11,0350	2,0000	2,0000	2,0556	2,2143	2,5000
Aire esteq.	14,3400	17,2300	17,2300	17,4694	18,1051	19,1358

Densidad

Como hemos comentado anteriormente, el cambio brusco en la temperatura del gas recirculado modifica el valor de la densidad, aumentando éste de manera considerable.

Por lo tanto, lo primero que tenemos que hacer es asegurarnos de estar utilizando un valor preciso de la densidad ya que esta directamente relacionado con el posterior y segundo punto a tratar, el cálculo de los límites de caudal y diferencia de presión como veremos más adelante en el apartado correspondiente en la memoria.

Para hallar el valor de la densidad, según la fórmula general de los gases **necesitaremos el cálculo del peso molecular** como podemos ver a continuación:

$$\rho = \frac{P \cdot P_m}{R \cdot T^a} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

donde: P = presión del gas (atm)

P_m = peso molecular del gas (g/mol)

R = constante universal de los gases ideales 0,0821 $\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

T^a = temperatura del gas (K)

Como se cuenta con un analizador de gases en el laboratorio, que nos dice la composición del gas de escape, podemos calcular el peso molecular directamente.

Por otro lado, también hallaremos el peso molecular directamente de la fórmula que encontramos en la norma: *Reglamento no 49 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE)*.

Por lo tanto contaremos con dos valores diferentes para el peso molecular:

- 1. Peso molecular a partir de la composición (g/mol)**
- 2. Peso molecular según norma (g/mol)**

Podemos ver la explicación y el cálculo de ambos pesos moleculares en el apartado 'Peso molecular' del anexo “Cálculo de densidad”.

Una vez que tenemos hallado el peso molecular, procedemos a hallar el valor de la densidad.

Para este cálculo y con el mismo objetivo que en el caso del peso molecular, que no es otro que el de poder hallar de diferentes formas el mismo dato para posteriormente poder comparar los resultados y valorar la forma mas precisa de cálculo, procedemos a calcular la densidad esta vez de tres formas distintas:

La primera aplicando la fórmula que acabamos de ver para el cálculo de la densidad y usando el primer peso molecular hallado.

La segunda volveremos a aplicar la misma fórmula pero esta vez usaremos el segundo peso molecular obtenido.

Y la tercera y última, no será otra que la fórmula que podemos encontrar en la misma normativa que hemos utilizado para calcular el segundo peso molecular, que nos indica la fórmula con la cual hallaremos la densidad directamente sin calcular previamente el peso molecular.

Por lo tanto tenemos tres densidades distintas:

- 1. Densidad a partir del peso molecular según la composición**
- 2. Densidad a partir del peso molecular calculado con norma**
- 3. Densidad según norma**

Al igual que con el peso molecular, podemos encontrar las explicaciones y cálculos detallados en el apartado 'Densidad' del anexo “Cálculo de densidad”.

Una vez hallada la densidad de las tres maneras distintas procedemos a comparar los tres resultados con el fin de ver el error y la diferencia entre ellas. Para ello decidimos coger la medida más pequeña y la medida mayor de entre las tres y comparar estas.

Para calcular el error vamos a utilizar tres métodos diferentes que miden el error entre dos valores y que podemos ver detallados en el apartado de anexos 'Medida de error' del anexo “Cálculo de densidad”, con los porcentajes de error calculados.

El resultado de esos porcentajes nos muestra que al no alcanzarse ni el 2% de error entre el mayor y el menor valor de densidad, cualquiera de los tres métodos será válido para nuestra aplicación.

Por último, sabiendo que los resultados de la densidad son correctos, se procede a averiguar si también valdría tomar el valor de la densidad del aire como gas ideal que obtenemos en Tablas o en programas termodinámicos como el Termograf. Esto podemos verlo en el apartado 'Conclusiones' del anexo “Cálculo de densidad”.

La conclusión es, que en el caso de usar gasolina podremos utilizar tanto los tres métodos como la densidad del aire como gas ideal. En caso de utilizar otro combustible sólo serán válidos los tres métodos descritos por nosotros.

Caudales máximos y pérdidas de presión

Una vez aclarado y acabado el tema del cálculo de la densidad, el siguiente paso que tenemos que dar, como hemos comentado al principio en el apartado de EGR, será el cálculo de los límites inferiores y superiores tanto de caudal como de diferencia de presión que podrán trasegar cada orificio mecanizado en su respectiva placa metálica.

Tanto para el cálculo, fórmulas y aclaraciones de los pasos a seguir, así como del valor de las diferentes constantes que se deben calcular, y la teoría pertinente, se sigue la norma correspondiente en la que viene recogido todo acerca del medidor: British Standard 1042 del año 1964 (referencia 14)

La fórmula principal por la que podemos hallar la diferencia de presión en el orificio que provoca un cierto caudal que trasegamos, así como si despejamos correctamente, el caudal que estamos trasegando según la diferencia de presión que obtengamos en el medidor es:

$$H = \frac{8}{\rho} \cdot \left(\frac{Q_m}{C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot d^2} \right)^2$$

donde:

H: diferencia de presión en Pascales

ρ : densidad del fluido en kg/m³

Qm: caudal másico en kg/s

C: coeficiente de descarga

E: factor de aproximación de velocidad

ε : factor de expansibilidad

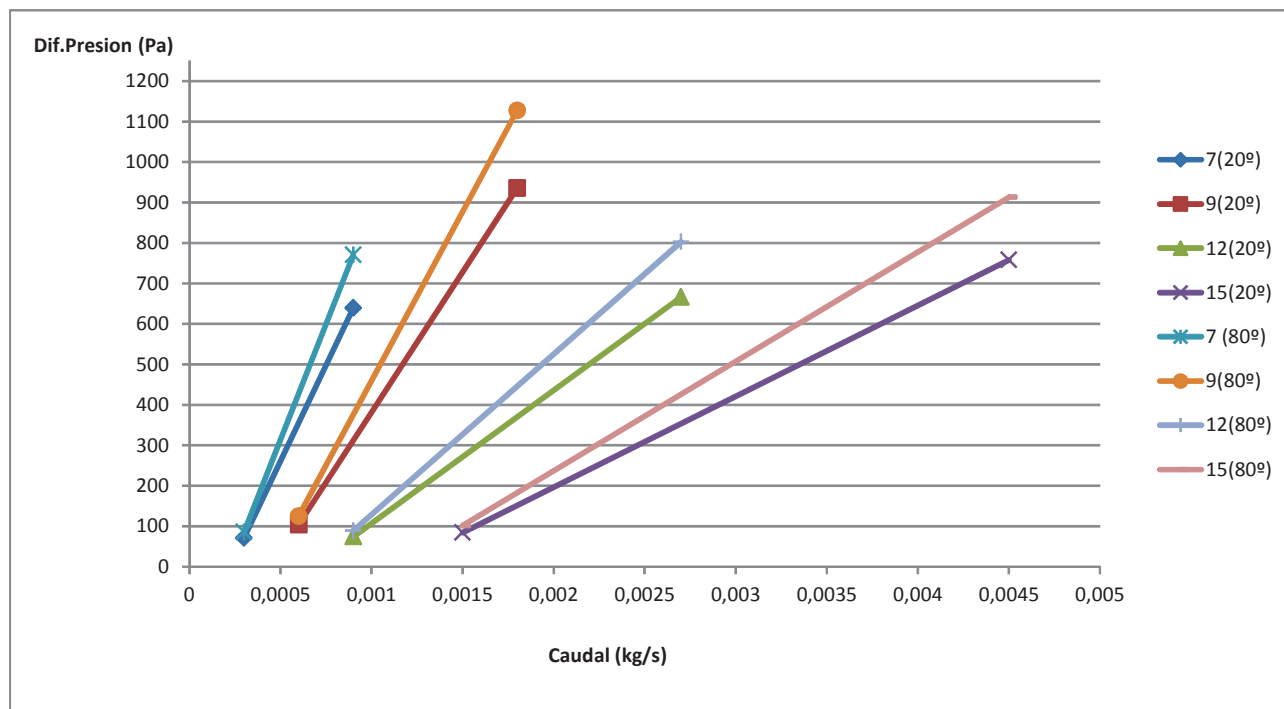
d: diámetro del orificio en metros

Todo el proceso de cálculo de los límites de caudal de todos los orificios, así como el cálculo de pérdidas de presión que producen cada uno de ellos vienen detalladas en el anexo “Caudales y pérdidas de presión”. A continuación vienen expuestas directamente las tablas de caudales mínimos y máximos con sus respectivas pérdidas de presión para los casos de aire a 20°C y aire a 80°C, extraídas de estos anexos.

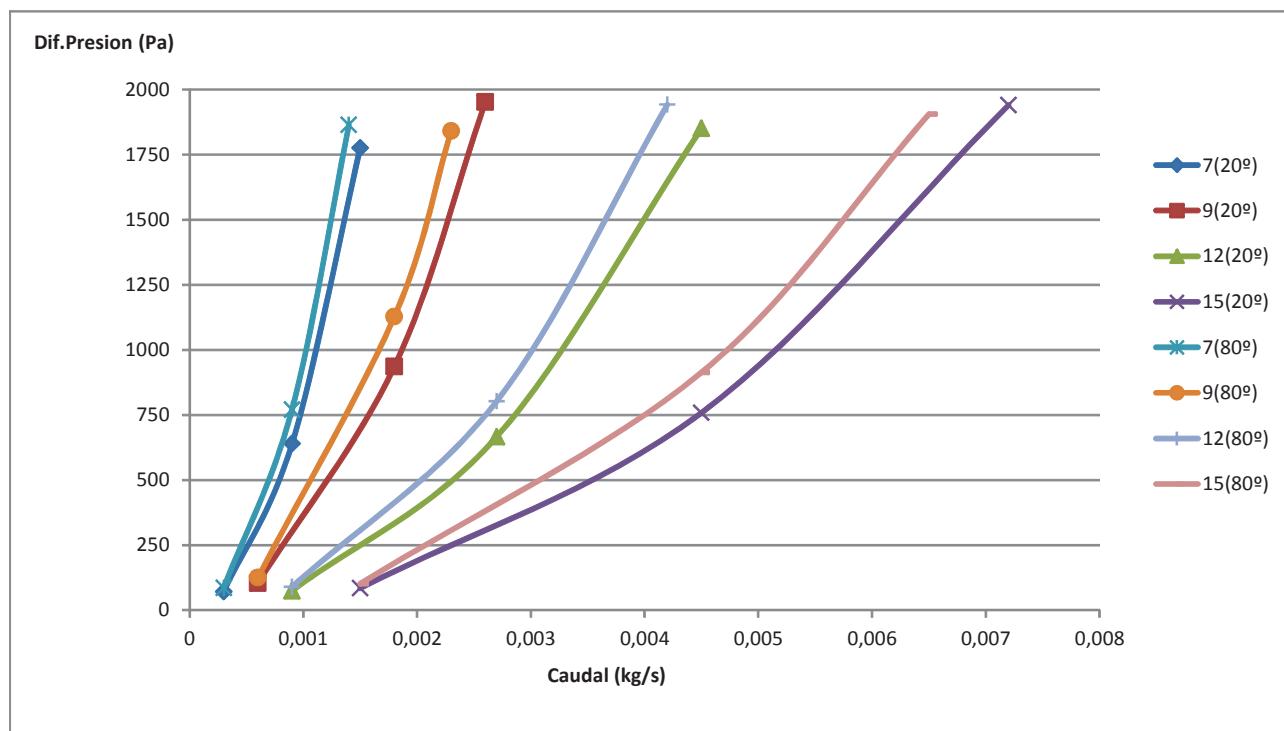
AIRE A 20°C			
Diametro 1	7 milímetros		
Caudal	0,0003	0,0009	0,0015
Dif.Presión	71,038	639,340	1775,943
Diametro 2	9 milímetros		
Caudal	0,0006	0,0018	0,0026
Dif.Presión	103,985	935,866	1952,610
Diametro 3	12 milímetros		
Caudal	0,0009	0,0027	0,0045
Dif.Presión	74,028	666,256	1850,712
Diametro 4	15 milímetros		
Caudal	0,0015	0,0045	0,0072
Dif.Presión	84,228	758,052	1940,612
AIRE A 80°C			
Diametro 1	7 milímetros		
Caudal	0,0003	0,0009	0,0014
Dif.Presión	85,578	770,200	1863,693
Diametro 2	9 milímetros		
Caudal	0,0006	0,0018	0,0023
Dif.Presión	125,269	1127,420	1840,756
Diametro 3	12 milímetros		
Caudal	0,0009	0,0027	0,0042
Dif.Presión	89,181	802,626	1942,156
Diametro 4	15 milímetros		
Caudal	0,0015	0,0045	0,0065
Dif.Presión	101,468	913,210	1905,339

Una vez que tenemos los límites marcados dentro del rango de temperaturas mínimas y máximas a las que se puede encontrar el aire en el caudalímetro, hacemos una gráfica donde podemos ver las bandas de seguridad que aplicaremos cuando trabajemos con el motor, para saber que caudal es capaz de trasegar cada orificio en cada momento dependiendo de factores como temperatura, diámetro del orificio y diferencia de presión.

Primero se muestra la gráfica sólo con los límites superiores con ratio de caudal 3:1 establecidos en la norma y los cuales nos dan una medida absolutamente fiable:

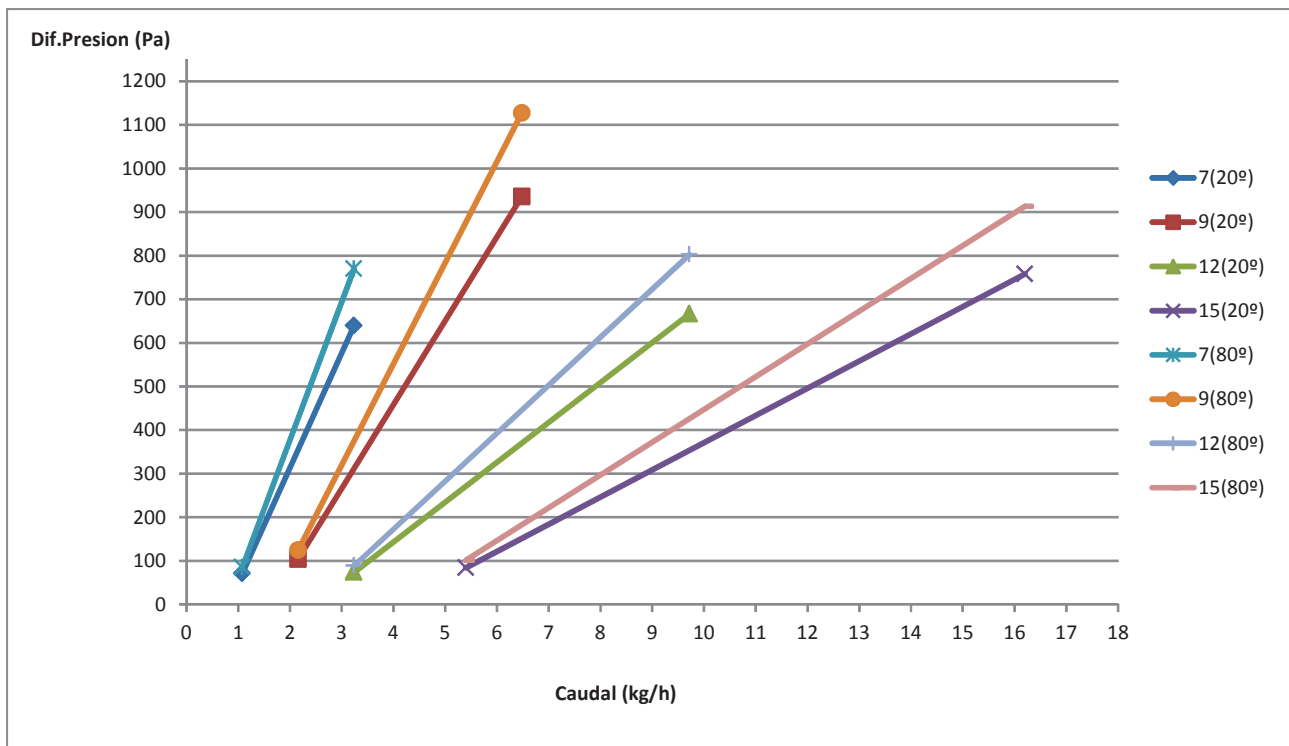


Y en segundo lugar se muestra la gráfica incluyendo los límites superiores con ratio de caudal 5:1 que hemos considerado como válidos pero que nos indican los valores límite para el cambio de placa:

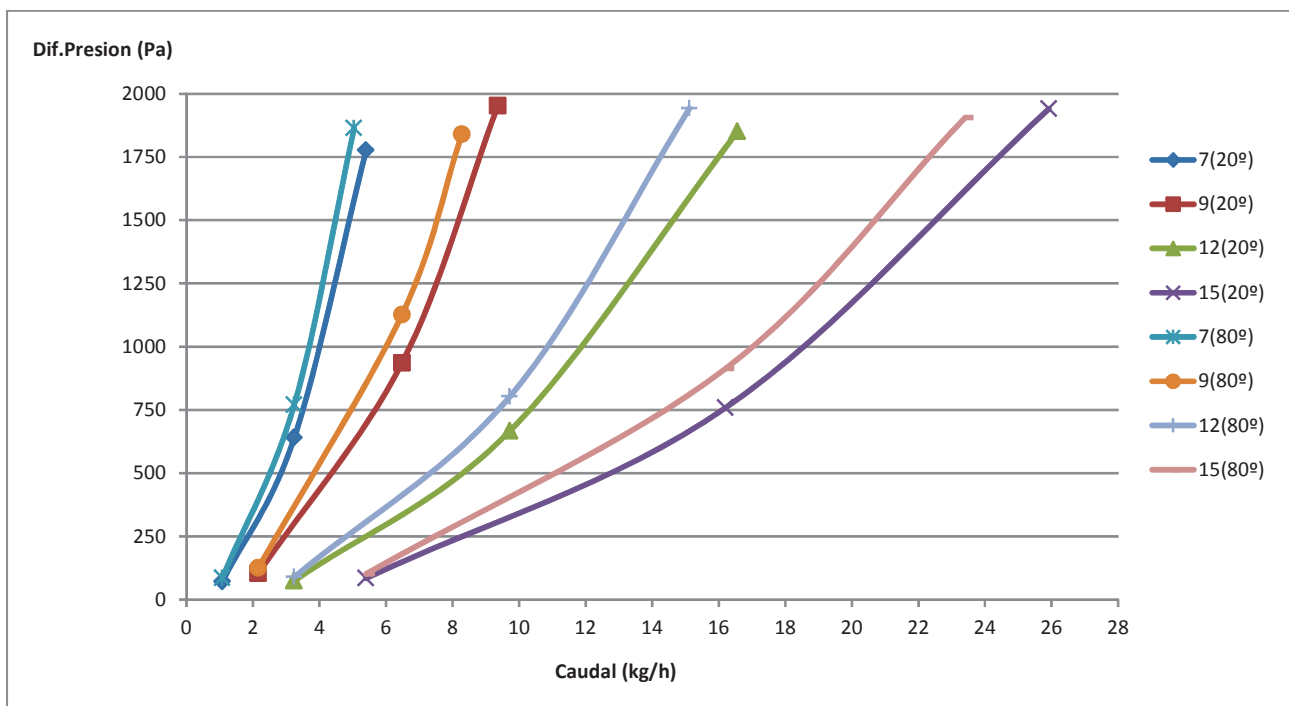


Por otra parte se incluyen las mismas gráficas anteriormetne mostradas manteniendo la unidad de presión en Pascales pero con unidades de caudal en kg/h.

Ratio 3:1



Ratio 5:1



Calculo % EGR

La finalidad de este proyecto como hemos comentado al principio, era el diseño de una serie de códigos de programación que se introducirían en el programa que controla el motor, para poder hallar el tanto por ciento de EGR de forma automática, así como todos los demás factores que nos interese conocer del funcionamiento del motor.

En nuestro caso el programa al final nos mostrará tres cálculos diferentes de EGR en %, ya que tenemos tres caudales de EGR diferentes que se han calculado a su vez con las tres densidades que hemos calculado en el apartado correspondiente de la memoria.

El porcentaje de EGR se puede definir como la fracción de masa frente a la masa introducida al cilindro desde la admisión según la referencia 11:

$$EGR = \left(\frac{m_{EGR}}{m_i} \right) \times 100 \quad (\%)$$

donde:

EGR (%): tasa de EGR

m_{EGR} : masa de gas recirculado

m_i : masa de gas entregado al cilindro desde la admisión

Otra forma de denominarlo que se deriva de la anterior sería asumir que la m_i es la suma de la masa de aire y combustible quedando:

$$EGR = \left(\frac{m_{EGR}}{m_{aire} + m_{combustible}} \right) \times 100 \quad (\%)$$

donde:

EGR (%): tasa de EGR

m_{EGR} : masa de gas recirculado

m_{aire} : masa de aire que entra en la admisión

$m_{combustible}$: masa de combustible introducido

La tasa de gases de escape recirculados representa el porcentaje volumétrico de gases de escape en mezcla fresca. Una tasa normal son 5-10% para motores gasolina, pero en motores con buena generación de mezcla (mezcla rica en la región de salto de chispa – HCCI) permite un aumento significativo de la tasa de gas recirculado, excediendo a veces el 20%, esto hace una reducción potencial del consumo de masa de un 7% y una reducción de emisiones contaminantes de HC y NOx de un 35% aproximadamente (referencia 12).

La apertura de la válvula del sistema, se realiza a baja y media potencia, puesto que para las altas prestaciones de un motor, se necesita una entrada de aire más denso que se mezcle con el combustible, lo que se denomina en automoción aire fresco.

En este proyecto se consideran unas tasas de EGR entre el 5% y el 25% para regímenes de carga de 25% y 50%, mientras que para el 75% de carga se considerarán unas tasas entre el 5% y 15%. Siendo 0% de EGR para el 100% de carga.

Códigos para programación

A continuación se presenta la serie de códigos de cálculo que deben ser compatibles e introducirse en el programa que controla al motor, con la finalidad de que calcule todas las variables que se necesitan para mostrar de forma clara al usuario que tanto por ciento de EGR esta utilizando el motor.

Por otra parte el usuario podrá consultar cualquier valor de las diferentes variables que le sean de utilidad.

Variables a introducir por el usuario antes de comenzar (ctes)

- A) Átomos de Carbono
- B) Átomos de Hidrogeno
- C) Fracción másica Carbono (%)
- D) Fracción másica Hidrogeno (%)
- E) Peso Molecular (gr/mol)
- F) Moles de Oxígeno para combustion estequiométrica
- G) Aire estequiométrico.

[d] = Diámetro orificio (m)

Variables Obtenidas una vez encendido el motor (varían para cada toma)

1. Carga (Nm)
2. Régimen (rpm)
3. Dosado relativo
4. Concentración base seca (ppm) $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) CO} \\ \text{b) CO}_2 \\ \text{c) O}_2 \\ \text{d) HC} \\ \text{e) NO}_x \end{array} \right.$
5. Humedad relativa (%)
6. Tª aire admisión (°C)
7. Presión atmosférica admisión (mbar)
8. Caudal de combustible (kg/h)
9. Presión EGR $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } \Delta P \text{ Caudalímetro (Pa)} \\ \text{b) Presión gas (atm)} \end{array} \right.$
10. Temperaturas gases (°C) $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) Escape} \\ \text{b) EGR} \end{array} \right.$

Variables definidas o calculadas

Condiciones ambientales

11. Pres. saturación del aire (mbar) = $193145600 \cdot 10^{(-1779,75/(237,3+[6]))}$
12. Presión de vapor del aire de admisión (mbar) = $[11] \cdot [5]/100$
13. Presión atmosférica del aire seco (mbar) = $[7] - [12]$
14. Humedad absoluta del aire de admisión (g agua/kg aire seco)
= $(6,22 \cdot [5] \cdot ([12]/10)) / (([7]/10 - [12]/10) \cdot [5] \cdot 0,01)$

Factores de corrección seco-húmedo

15. Caudal de aire húmedo (kg/h) = $([G] \cdot [8]/[3])$
16. Caudal de aire seco (kg/h) = $[15] - ([15] \cdot [14]/1000)$
17. Caudal de gases de escape húmedo (kg/h) = $[8] + [15]$
18. Factor específico del combustible del gas de escape en condiciones húmedas.
 $K_f = 0,055584 \cdot [D] - 0,0001083 \cdot [C]$
19. Factor de corrección de seco a húmedo para el aire de admisión.
 $K_{wr} = (1 - ((1,2442 \cdot [14] + 111,19 \cdot [D] \cdot ([8]/[16])) / (773,4 + 1,2442 \cdot [14] + ([8]/[16]) \cdot [18] \cdot 1000))) \cdot 1,008$

Composición base húmeda

$$20. \text{Concentración base húmeda (\%)} \left\{ \begin{array}{l} \text{a) CO} = [4a] * [19] / 10000 \\ \text{b) CO}_2 = [4b] * [19] / 10000 \\ \text{c) O}_2 = [4c] * [19] / 10000 \\ \text{d) HC} = [4d] / 10000 \\ \text{e) NO}_x = [4e] / 10000 \end{array} \right.$$

$$21. \text{Humedad (\%)} = (1 - [19]) * 100$$

$$22. \text{Concentración base húmeda N}_2 \text{ (\%)} = 100 - ([20a] + [20b] + [20c] + [20d] + [20e] + [21])$$

Pesos moleculares y densidades

$$23. \text{Peso molecular composición (g/mol)} \\ = ([20a] * 28 + [20b] * 44 + [20c] * 32 + [20d] * 16 + [20e] * 30 + [21] * 18 + [22] * 28) / 100$$

$$24. \text{Densidad composición (kg/m}^3\text{)} = [23] * [9b] / (0,082 * (273 + [10b]))$$

$$25. \text{Peso molecular Norma (g/mol)} = (1 + ([8] / [15])) / ((([8] / [15]) * ((([D] / [C]) / 4) / (12,011 + 1,00794 * ([D] / [C])))) + ((([14] * 0,001) / (2 * 1,00794 + 15,9994)) + (1 / 28,9)) / (1 + [14] * 0,001)))$$

$$26. \text{Densidad Norma (kg/m}^3\text{)} = [25] * [9b] / (0,082 * (273 + [10b]))$$

$$27. \text{Densidad Aire Gas Ideal a una temperatura [10b] y una presión [9b] “Tablas”}$$

EGR

$$28. \text{Caudal EGR 1 (kg/h)} = 0.596 * 1 * 1 * 3.1416 * [d]^2 * \text{RAIZ}([9a] * [24] / 8) * 3600$$

$$29. \text{Caudal EGR 2 (kg/h)} = 0.596 * 1 * 1 * 3.1416 * [d]^2 * \text{RAIZ}([9a] * [26] / 8) * 3600$$

$$30. \text{Caudal EGR 3 (kg/h)} = 0.596 * 1 * 1 * 3.1416 * [d]^2 * \text{RAIZ}([9a] * [27] / 8) * 3600$$

$$31. \text{EGR 1 (\%)} = [28] * 100 / ([15] + [28])$$

$$32. \text{EGR 2 (\%)} = [29] * 100 / ([15] + [29])$$

$$33. \text{EGR 3 (\%)} = [30] * 100 / ([15] + [30])$$

Todos estas fórmulas de las variables que acabamos de ver en forma de código de programación, podemos encontrarlas en el apartado de anexos “Formulario códigos programación”, donde se muestran las fórmulas de una forma gráfica, con numeradores y denominadores separados para una mejor comprensión de estas y no en forma de códigos de programación.

Cambios de orificio

Con lo visto en el apartado anterior, podemos definir los pasos a seguir cuando queramos experimentar con el motor y obtener los valores de EGR u otras variables como:

- 1. Introducir datos de combustible (A-G)**
- 2. Introducir diámetro del orificio utilizado (d)**
- 3. Cálculo y recepción de variables**

Una vez que hemos puesto todo en marcha y empezamos a recibir información, debemos crear otro sistema de códigos que nos permitan recibir información de una forma automática por nuestro programa, que nos indique si debemos utilizar un diámetro de orificio u otro, más cómodo y seguro para el usuario, por lo consiguiente nos tendrá que obligar a cambiar cuando sea necesario las placas que contienen los orificios.

Esto se debe a lo que hemos podido ver en las gráficas del apartado correspondiente de la memoria anteriormente, donde obtenemos unas bandas de trabajo para cada orificio, con límites inferiores y superiores de caudal y diferencia de presión. Esos son los límites que tendremos que imponer en nuestro programa para el cambio de orificio.

Así pues, una vez empezado a calcular y recibir variables, el motor estará continuamente pasando el filtro de cambio de orificio por si se sobrepasan los límites y debe avisar al usuario.

- 4. Filtro para cambio de orificio**
- 5. Mostrar datos EGR (%)**
- 6. Mostrar otros datos de interés**

A continuación podemos ver el sistema de códigos que se integrará en el programa del motor, actuando como filtro para el cambio de orificios.

CAMBIOS DE ORIFICIO

Para $[d]=7 \rightarrow [28]/3600 \leq 0,0009$
 $0,0009 < [28]/3600 \leq 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$
 $[28]/3600 > 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$

CORRECTO
VALIDO
ERRONEO
 \rightarrow Ves pensando en cambiar a $[d]=9$
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=9$

Para $[d]=9 \rightarrow [28]/3600 < 0,0006$
 $[28]/3600 \leq 0,0018$
 $0,0018 < [28]/3600 \leq 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$
 $[28]/3600 > 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$

ERRONEO
CORRECTO
VALIDO
ERRONEO
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=7$
 \rightarrow Ves pensando en cambiar a $[d]=12$
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=12$

Para $[d]=12 \rightarrow [28]/3600 < 0,0009$
 $[28]/3600 \leq 0,0027$
 $0,0027 < [28]/3600 \leq 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$
 $[28]/3600 > 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$

ERRONEO
CORRECTO
VALIDO
ERRONEO
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=9$
 \rightarrow Ves pensando en cambiar a $[d]=15$
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=15$

Para $[d]=15 \rightarrow [28]/3600 < 0,0015$
 $[28]/3600 \leq 0,0045$
 $0,0045 < [28]/3600 \leq 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$
 $[28]/3600 > 0,596*1*1*3,1416*[d]^2*RAIZ(1970,68*[24]/8)$

ERRONEO
CORRECTO
VALIDO
ERRONEO
 \rightarrow Cambio obligatorio a $[d]=12$

INYECCIÓN DE AGUA

Introducción

Objeto del proyecto

Desde el departamento de Máquinas y Motores Térmicos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza se realiza la petición de la aplicación de estrategias de Inyección de agua para reducción de emisiones de NOx en motores, realizando un estudio y diseño del sistema más eficaz de inyección de agua para aplicarlo al motor del que se dispone.

Este diseño conlleva a realizar un estudio de mercado para la búsqueda y elección de cada uno de los componentes que forman parte del sistema de inyección de agua, por lo que no sólo este proyecto abarca una carga teórica sino también práctica, moviendo al alumno dentro del campo real de trabajo, donde no siempre lo teóricamente ideal vale, ya que dependemos de factores como el presupuesto, espacio, instalaciones, etc.; por lo que el alumno tendrá que buscar y seleccionar aquello que sea lo más eficaz posible dentro de las limitaciones reales del departamento.

Localización

El motor objeto del estudio, se encuentra instalado en el laboratorio de motores del departamento peticionario del proyecto, en el edificio Torres Quevedo del campus Río Ebro en la Universidad de Zaragoza.

Fecha y firma

Zaragoza a 15 de Mayo de 2012

Fdo.: Jesús Eloy García Beatove

Determinación caudal

Como el tema a abarcar era un tema nuevo de estudio en el departamento, en cuanto a cuál sería la instalación de inyección de agua, que componentes se deberían utilizar, qué caudales deben usarse y todos los factores que la instalación de agua conlleva, primero se hace un estudio de otros sistemas de inyección, realizando una búsqueda de artículos y recopilando información.

En el departamento sólo se dispone de un par de artículos, referencias 8 y 9, acerca de la inyección de agua por lo que se realiza una búsqueda de otros experimentos con la inyección de agua como protagonista. Todos los artículos se descargan de la página www.sciencedirect.com, en la cual se puede descargar gratuitamente accediendo desde el portal vpn.unizar.es donde tienes que introducir tus datos de usuario que te otorga la Universidad de Zaragoza.

Las diferentes informaciones y datos de caudales que se obtienen de todos esos artículos, viene resumida en los anexos “Ensayos anteriores”.

Según las pruebas realizadas sabemos los caudales mínimos y máximos de cada combustible:

Gasolina	máx.caudal combustible	4,4 kg/h
	mín. caudal combustible	0,6 kg/h
CH₄ (H₂)	máx.caudal combustible	3,3 kg/h
	mín. caudal combustible	0,8 kg/h

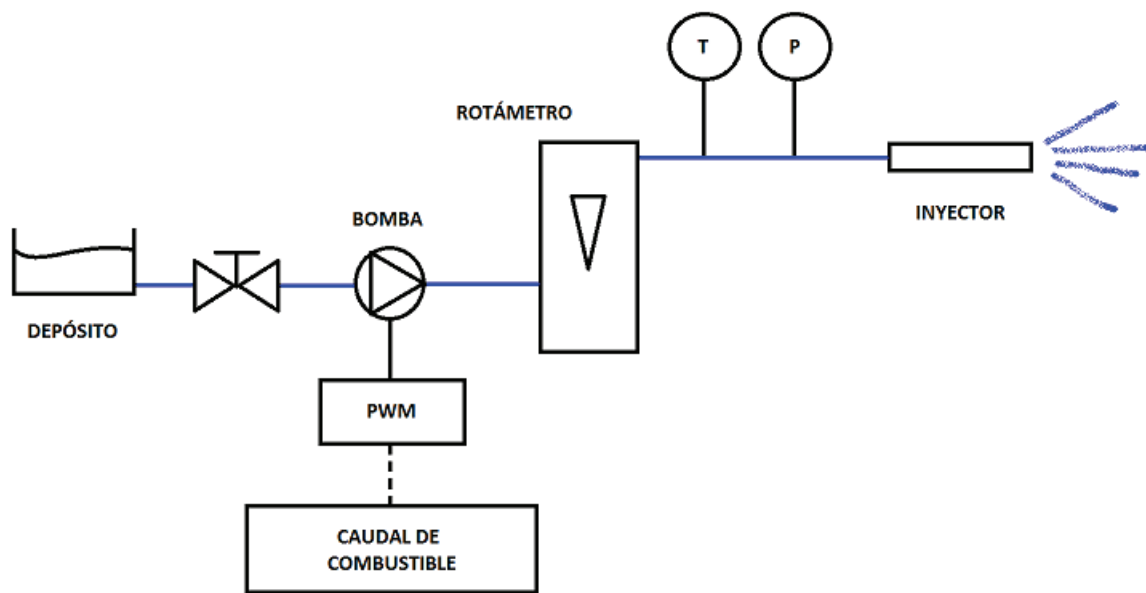
Teniendo en cuenta que la densidad de la gasolina es aproximadamente 680 g/l podemos calcular el caudal volumétrico de gasolina del motor:

$$Q = \frac{4,4 \text{ kg/h}}{680 \text{ g/l}} = 6,47 \text{ l/h} = 0,11 \text{ l/min}$$

Después de conocer los ratios en diferentes experimentaciones, teniendo en cuenta que en nuestro caso utilizaríamos diferentes combustibles, y no queriendo limitar el sistema de inyección de agua ya que al principio se pretende empezar a experimentar con cantidades muy pequeñas de caudal de agua inyectado, e ir aumentando poco a poco esa cantidad, decidimos entre todos en el departamento establecer el siguiente caudal máximo de agua, que viene a ser aproximadamente el 50% en volumen del caudal de combustible:

$$Q_{\text{max. agua}} = 2,4 \text{ l/h} = 0,04 \text{ l/min} = 40 \text{ c.c.} = 40 \text{ ml/min} = 0,63 \text{ GPH}$$

Instalación (Montaje)



Por otra parte se llega a la conclusión del sistema de inyección de agua que se va a utilizar, así como cada uno de los componentes integrados en el sistema.

Se pretende pulverizar agua directamente sobre la cámara de admisión del motor, mecanizando una pequeña entrada a la cámara parecida al pulverizador del sistema de EGR, que llevará al agua junto con el aire y el combustible, de forma que se haga una mezcla lo más homogénea posible.

Para que esta mezcla sea homogénea necesitamos que nuestro **inyector** introduzca el agua lo más pulverizada que se pueda (partículas diminutas) y abarque la mayor superficie posible.

Una vez hecha la mezcla, ésta pasa directamente a las cámaras de combustión.

Para trasladar el agua del **depósito** a la cámara de admisión, necesitamos una **bomba eléctrica**.

Con la finalidad de controlar constantemente el caudal que se está trasegando, hemos decidido colocar un **rotámetro** en la instalación.

También colocaremos unos **sensores de Presión y Temperatura** previos a la salida del agua por el inyector para controlar en todo momento el estado del líquido, y según cuales sean sus características poder modificarlas de forma automática con un **PWM**.

A continuación podemos encontrar información ampliada de las características que habrá que tener en cuenta de cada componente de la instalación.

Elementos principales

En el sistema de inyección de agua hay cuatro factores fundamentales que nos determinarán la elección de los diferentes componentes de la instalación, estos factores están directamente relacionados unos con otros por lo que habrá que encontrar una combinación perfecta de estos.

Los tres factores son:

- Pulverización perfecta del agua en la cámara de admisión.
- Caudal de agua.
- Presión del agua.
- Flujo continuo.

El **caudal** es lo primero que hemos determinado después de haber leído y conocido otros tipos de experimentaciones con inyección de agua.

La **pulverización** es estrictamente necesaria si no queremos tener problemas en el motor, con explosiones heterogéneas, acumulación de agua en el motor (lo que provocaría que el motor se ahogara o se formara corrosión en su interior), etc. El tipo de pulverización así como su calidad dependerá de los inyectores, por lo que primeramente se intentará buscar y determinar que pulverizadores son válidos para nuestra instalación.

Estos pulverizadores serán los que nos determinarán a que **presión** debemos inyectar el agua para que salga un caudal determinado, como el caudal es el único dato fijo que tenemos, buscaremos pulverizadores que inyecten las cantidades que nosotros hemos fijado de caudal de agua y veremos que presión necesitamos conseguir.

Una vez que tengamos esa presión que necesitamos marcada por los inyectores, pasaremos a buscar una bomba que llegue a alcanzar como mínimo esa presión, ya que sino cuando traslade el agua al inyector, este producirá goteo y el sistema no será válido.

Las características de la bomba nos indican que caudal de agua es capaz de trasegar ésta a una cierta presión (curva característica), por lo que habrá que buscar una bomba que a la presión mínima determinada por los inyectores nos pueda trasegar el rango de caudales que hemos establecido al principio del todo.

El **flujo continuo** es estrictamente necesario ya que el motor trabaja continuamente, alternando el movimiento de los pistones.

En el caso del rotámetro, lo más importante y primero a fijarse será el caudal que son capaces de trasegar y medir, pero sin olvidar la presión máxima que aguantan para que no se rompan.

inyector

Como hemos comentado anteriormente, la búsqueda y elección de los inyectores es el primer paso que debemos seguir, primero para hacernos una idea de lo que hay en el mercado en cuanto a tipos, presiones que deberemos alcanzar (para la posterior elección de la bomba), precios, etc.

Como el departamento ya ha contactado alguna vez con alguna empresa de inyectores, se empieza a mirar por las dos empresas de las que se dispone de catálogo (que posteriormente se actualiza vía internet.) y el cual nos es útil para dar una primera idea de lo que podemos encontrar.

En los anexos “Inyectores” podemos encontrar la información y explicación de cada una de las empresas, así como los pasos a seguir para la elección final de unos inyectores.

Los inyectores que se escogen finalmente son de la casa Lechler para aplicaciones industriales genéricas, como desinfección, humidificación del aire, humidificación del producto, rociado de aceite, enfriamiento y limpieza de aire y gas, supresión de polvo, filtro de pulverización, evitar el sobrecalentamiento, etc.

Los tres modelos escogidos son:

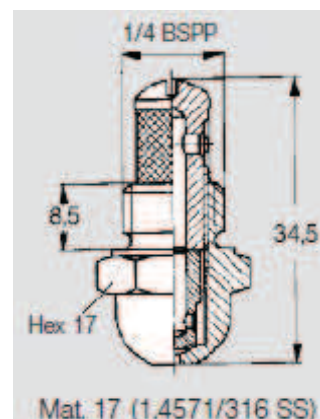
- **212.004.17.AC**
- **212.014.17.AC**
- **212.05417.AC**

Los inyectores además tienen las siguientes características:

- Dibujo de cono hueco
- Máximo ángulo del spray 60°
- Diámetro de spray de 80mm
- Hechos de acero inoxidable
- Rosca 1/4 BSPT
- Caudales entre 0,013 y 0,057 l/min
- Presiones entre 5 y 20 bar

Podemos ver sus características e información completa en el anexo de “Inyectores”.

También encontraremos en los mismos anexos la oferta y la factura que nos envió la compañía.



Bomba

El segundo gran paso a realizar sería la búsqueda y selección del tipo de bomba, que no será fácil ya que hay multitud de factores que condicionan el funcionamiento de ésta, y que habrá que tener en cuenta.

Según el comercial de cada empresa con el que hemos hablado el tipo de bomba ideal para nuestra aplicación es diferente. Tenemos una breve descripción de cada tipo de bombas en el apartado 'Tipos de bomba' del anexo "Bombas."

Como hemos comentado anteriormente, son los inyectores los que nos van a determinar que presión mínima deberemos alcanzar para que la pulverización sea óptima.

Como hemos visto en el apartado del inyector, aunque el rango de presiones válidos va de 5 a 20bar, también sabemos que contra más **presión** suministremos mejor calidad de pulverización obtendremos, y como queremos evitar el goteo y suministrar el agua en la cámara de admisión lo más pulverizado posible, se fijan unos límites inferiores de presión de unos 10bar para la búsqueda de una bomba adecuada.

Además de tener en cuenta la presión, otro factor importantísimo será el **caudal**. En las bombas, este viene marcado según una curva de trabajo en la que se relaciona directamente con la presión con la que suministra la bomba, mostrando el caudal que esta es capaz de trasegar con las diferentes presión de trabajo.

Normalmente si queremos conseguir mayores caudales deberemos reducir la presión por lo que habrá que tener muy presente este factor, ya que queremos abarcar todo el rango de caudales pero no queremos bajar de 10bar.

Otra de las cosas en las que deberemos fijarnos es el número de pulsaciones por minuto o **frecuencia de pulso**. Ya sea en las bombas analógicas (controlador manuales) como en las digitales, podemos variar este número, reduciendo o aumentando las veces que inyecta en un periodo de tiempo. No confundir con la cantidad que inyecta, ya que este regulador simplemente varía la frecuencia de pulso y no los litros por golpe. Lógicamente si variamos la frecuencia de pulso finalmente estaremos variando los litros por hora, porque a menor cantidad de pulsos a la hora menor caudal total.

Cuanto más reduzcamos el numero de pulsos por minuto, peor para la aplicación, ya que los pulsos se hacen mas notables y no conseguimos el flujo continuo que necesitamos.

Para evitar los pulsos, existen unos amortiguadores antipulsaciones cuya función no es otra que mantener un flujo continuo a pesar de que la bomba este trabajando a pulsos mas o menos notorios. Intentaremos evitar tener que utilizar un amortiguador antipulsaciones haciendo hincapié en la búsqueda de una bomba que se ajuste a nuestras necesidades.

Por último, aunque no se ha fijado ningún tipo de restricción económica, un buen trabajo de un ingeniero siempre será buscar una bomba con buena relación calidad-prestación-precio, ya que si realmente no hubiese límite, sería un trabajo sencillo comprando unos serie de componentes reguladores como amortiguadores antipulsaciones y otro tipo de válvulas haciendo que no hiciese falta que la bomba se ajustara tanto a nuestras necesidades.

By-pass

Hay que asumir desde un principio que encontrar una bomba que nos de unas prestaciones perfectas en cuanto a caudal y presión, conforme a lo que nos solicitan los inyectores, es prácticamente imposible.

Por lo tanto, sabemos que puede que cuando la bomba este impulsando agua hacia el inyector, este caudal sea mayor del que realmente podrá ser expulsado por la boquilla.

Con el fin de eliminar problemas en el circuito, sobrepresiones en la bomba y otros problemas que pueden surgir, la solución sería instalar un by-pass.

Según el tipo y el modelo, algunas bombas incorporan un sistema by-pass interno que evita pequeños problemas en su propio sistema de bombeo, pero si la bomba no esta equipada con un sistema interno o este no es suficiente para evitar problemas, deberemos instalar un sistema by-pass externo.

Este sistema no es más que una desviación, normalmente de dimensiones mas pequeñas que el tubo principal, que redirige más o menos agua dependiendo de la aplicación, con el fin de mantener un orden de presión y caudal correctos.

Tanto la información como características, precios y funciones de todos los modelos estudiados se puede encontrar en apartado 'Estudio de bombas' del anexo “Bomba”.

Finalmente la bomba seleccionada será de la empresa Etatron:

DLXB-MA/M serie 1-15

Bomba dosificadora con microprocesador

Rango de caudales: 1 – 5 l/h

Presión máxima: 15bar

Tecnología HRS (permite llegar hasta 17 l/h)

Caudal regulable manualmente de 0÷100%

Regulador mecánico de embolada (l/pulso)

Predispuesta para el control del nivel y de alarma del flujo (excluida la sonda)



Rotámetro

Otro de los componentes de la instalación y no menos importante que los demás es el rotámetro, el cual se encarga de medir mediante un elemento flotante el caudal de agua que trasiega la instalación continuamente.

En este caso el departamento tenía contacto con una empresa dedicada a la fabricación de sistemas de medición, ya sea de caudal, presión, temperatura y otros sistemas.

Además se dispone de un catálogo, que aunque no está actualizado (la diferencia es mínima con el actual), ayuda a la comprensión rápida de las características que debe tener un rotámetro.

También se dispone de varios rotámetros en el laboratorio de la misma empresa aun sin estrenar, que se comprueba que no son válidos para nuestra instalación ya que son para la medida de caudales mucho mayores, pero son útiles para conocer cómo son físicamente (tamaño, funcionamiento, conexiones, etc.)

Las principales características que debemos tener en cuenta en la búsqueda de un rotámetro son:

- Rango de caudal que pueden medir
- Precisión
- Máxima presión que soportan

Estos tres factores, especialmente la máxima presión a la que pueden trabajar un rotámetro, hace que descartemos nuestra primera opción y finalmente nos tengamos que decantar por otro tipo de rotámetro.

La explicación con la respectiva información de ambos rotámetros la encontramos en los anexos “Rotámetro”.

Este será el modelo elegido de rotámetro:

DK32

Rotámetro de tipo armado

Precisión:	4 %
Rango caudales:	0,25 – 2,5 l/h
Presión máxima:	150 bar
Tª máxima:	-80 – 200°C



Conclusiones

Los factores más importantes comentados desde un principio, como son la necesidad de una perfecta pulverización, el rango tan pequeño de caudales y las presiones mínimas establecidas, han sido la referencia a seguir y los que han marcado desde el principio hasta el fin la selección de los diferentes componentes implicados en la instalación.

Una selección que se a podido dar gracias al exhaustivo estudio de mercado, obteniendo multitud de información acerca de cada uno de los componentes en la instalación de inyección de agua.

El trabajo no sólo ha sido encontrar cada uno de los componentes en su sector específico, sino también el continuo estudio de compatibilidad entre ellos, para que finalmente la instalación sea un bloque que trabaje de manera eficaz.

En cuanto a los componentes, hemos conseguido encontrar unos inyectores de alta calidad con una pulverización muy fina que logrará una mezcla homogénea.

Después hemos dado con una bomba que logra trasegar todo nuestro rango de caudales y que dispone de un sistema HRS.

Por ultimo el rotámetro seleccionado nos permitirá tener una lectura continua del caudal de EGR que estemos utilizando en todo momento cuando este trabajando el motor.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos

1. A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions; K.A. Subramanian
2. DIRECT WATER INJECTION COOLING FOR MILITARY ENGINES AND EFFECTS ON THE DIESEL CYCLE; R. B. MELTON, JR., S. J. LESTZ, AND R. D. QUILLIAN, JR., E. J. RAMBIE
3. Effect of Direct Water Injection on Performance and Emissions of a Hydrogen Fuelled Direct Injection Engine; Aly H. Gadallah, Elshenawy A. Elshenawy, Aly M. Elzahaby, Hafez A. El-Salmawy, Ahmed H. Bawady
4. EFFECT OF WATER-ALCOHOL INJECTION AND MAXIMUM-ECONOMY SPARK ADVANCE ON KNOCK-LIMITED PERFORMANCE AND FUEL ECONOMY OF A LARGE AIR-COOLED CYLINDER; Jack E. Vandeman, Orville H. Heinicke
5. EFFECTS OF DIESEL—WATER EMULSION COMBUSTION ON DIESEL ENGINE NO_x EMISSIONS; C. ALAN CANFIELD
6. Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine; Xavier Tauzia, Alain Maiboom, Samiur Rahman Shah.
7. USE OF WATER INJECTION TO DECREASE GASOLINE CONSUMPTION IN AN AIRCRAFT ENGINE CRUISING AT HIGH POWER; Helmuth W. Engelman, H. Jack White
8. THE INDUCTION OF WATER TO THE INLET AIR AS A MEANS OF INTERNAL COOLING IN AIRCRAFT-ENGINE CYLINDERS; ADDISON M. ROTHROCK, ALOIS KRSEK JR., ANTHONY W. JONES
9. END-ZONE WATER INJECTION AS A MEANS OF SUPPRESSING KNOCK IN A SPARK-IGNITION ENGINE; Rinaldo J. Brun, H. Lowell Olsem, Cearcy D. Miller.
10. Direct injection of hydrogen, oxygen and water in a novel two stroke engine; Alberto Boretti, Azmi Osman, Ishak Aris
11. Exhaust gas recirculation strategy in the hydrogen SI engines; Stanislaw Szwaja, Jeffrey D. Naber.
12. NO_x emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using gas recirculation; James W. Heffel; International Journal of Hydrogen Energy 2003; 28:1285-1292.

Libros

13. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschöke; Handbook of Diesel Engines; Bosh.

Normativa

14. Methods for the measurement of fluid flow in pipes; Part 1. Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes; British Standard 1042 año 1964