



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN DE UN INYECTOR COMMON RAIL

Alumno: Juan Francisco Moreno García

Tutor: Prof. D. Eloísa Torres Jiménez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Doña ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ, tutora del Trabajo Fin de Grado titulado: CARACTERIZACIÓN DE UN INYECTOR COMMON RAIL, que presenta JUAN FRANCISCO MORENO GARCÍA, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2016

El alumno:

Los tutores:

JUAN FRANCISCO MORENO GARCÍA

ELOÍSA TORRES JIMÉNEZ

Índice

JUSTIFICACIÓN DEL TFG.....	1
<u>PRIMERA PARTE</u>	
1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN	3
2. LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DIESEL (EDC)	5
3. COMPONENTES ESENCIALES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON RAIL..	6
3.1. Actuadores.....	6
3.2. Sensores.....	11
3.3. Válvulas	14
3.4. Unidad de Control Electrónica (UCE)	15
4. TIPOS DE INYECCIÓN DIESEL.....	17
4.1. Inyección indirecta (IDI).....	17
4.2. Inyección directa (DI)	18
5. TIPOS DE INYECTORES DIESEL	19
5.1. Accionamiento del sistema.....	19
5.2. Tipo de válvula.....	20
5.3. Número de orificios en la tobera.....	21
6. EL INYECTOR DE VÁLVULA SOLENOIDE	24
6.1. Despiece.....	24
6.2. Funcionamiento	25
7. LA INYECCIÓN DEL COMBUSTIBLE	28
8. PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LA INYECCIÓN DIESEL.....	30
<u>SEGUNDA PARTE</u>	
9. AVL	34
10.AVL BOOST™ Hydsim.....	35
11.EL ENTORNO DE TRABAJO EN AVL BOOST™ Hydsim	36
11.1. Conexiones.....	38
11.2. Librería de elementos	40
12.CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE INYECTOR	51
13.RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	59
13.1. Análisis de sensibilidad	60
BIBLIOGRAFÍA	67

JUSTIFICACIÓN DEL TFG

El sector de la automoción es, a día de hoy, uno de los principales contribuyentes del calentamiento global que sufre el planeta. Se estima que, en la Unión Europea, el 26% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero son generadas por el transporte. En España, el 98% del consumo de energía dedicado a este fin proviene de productos petrolíferos. Concretamente, los turismos suponen el 50% de ese gasto y un 15% del consumo nacional de energía.

Esta fuerte dependencia de recursos no renovables obliga a realizar un uso eficiente de los mismos, además de estudiar alternativas que sean respetuosas con el medio ambiente. Una de las que más interés suscita a corto plazo es el empleo de biocombustibles en los motores actuales. De hecho, durante los últimos años se han aprobado medidas legislativas que fomentan su presencia en los carburantes convencionales, entre un 5 y un 10% en volumen.

Con este Trabajo Fin de Grado se pretende dar una visión general sobre la inyección Diesel, así como modelarla con un programa de cálculo específico. Ambos objetivos se desarrollan de forma independiente en las dos partes en que está dividido este proyecto:

- ✧ La primera parte engloba todos los capítulos relacionados con el funcionamiento del sistema Common Rail, haciendo especial hincapié en los inyectores.
- ✧ La segunda parte está reservada a la simulación numérica de un inyector con AVL BOOST™ Hydsim. Para este propósito, se evalúa la respuesta de la inyección en diferentes estados de servicio del motor, tanto con biocombustibles como con gasoil, que será el carburante de referencia. Así se evita tener que realizar costosos ensayos experimentales.

1ª parte

- 1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN
- 2 LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DIESEL (EDC)
- 3 COMPONENTES ESENCIALES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN
COMMON RAIL
- 4 TIPOS DE INYECCIÓN DIESEL
- 5 TIPOS DE INYECTORES DIESEL
- 6 EL INYECTOR DE VÁLVULA SOLENOIDE
- 7 LA INYECCIÓN DEL COMBUSTIBLE
- 8 PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LA INYECCIÓN DIESEL

1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN

El progreso del Motor de Encendido por Compresión (MEC) siempre ha estado rodeado de múltiples obstáculos desde su invención en 1892 por el ingeniero alemán Rudolf Diesel. Estas dificultades han estado relacionadas con prácticamente todos los elementos del motor, siendo muy especiales las que en su día suscitó la inyección del combustible. El sistema tenía que idearse partiendo absolutamente de cero, pues no existía ninguna técnica precursora.

En los primeros prototipos, el aire aspirado por el motor se comprimía hasta los 30 bar aproximadamente. Estaba claro que la presión con la cual inyectar el carburante tenía que ser superior a ese valor para alcanzar, de algún modo, el interior de la cámara de combustión. No obstante, con un leve exceso de presión lo único que se conseguía era un goteo débil y casi imposible de regular. Una de las alternativas que se exploró para mejorar la formación de la mezcla y la vaporización consistía en un depósito con aire comprimido. Éste se insuflaba en el interior de los cilindros con una bomba, la cual era accionada por el propio motor. Sin embargo, el consumo excesivo de la energía generada y unos resultados que no mejoraban de forma significativa los anteriores, propiciaron el abandono de esta opción.

Ante esta situación, el técnico alemán Robert Bosch comenzó a plasmar en 1922 las primeras ideas de un sistema que marcaría un antes y un después: la **bomba de inyección en línea**. A comienzos de 1923 se proyectaron una docena de bombas, las cuales se ensayaron en el motor a mediados de ese año. El sector técnico empezaba a depositar cada vez más confianza en el impulso que este sistema podía dar a la inyección del combustible. Incluso el propio Rudolf Diesel mostraba inicialmente su escepticismo a esta posibilidad con las siguientes palabras:

“La inyección del combustible por medio de una bomba me parece algo casi imposible de conseguir, puesto que la construcción de una bomba destinada a un caudal tan reducido, en tiempos tan cortos y en presencia de presiones muy elevadas ofrece unas dificultades casi insuperables.”

Rudolf Diesel

No fue hasta el año 1927 cuando se fabricaron las primeras bombas de inyección en línea. Tenían por cada pistón del motor un elemento de bomba, el cual estaba compuesto por un émbolo y un cilindro. Se caracterizaban por ser pequeñas, ligeras, precisas y capaces de alcanzar un número de revoluciones alto del motor. Su desarrollo propulsó el motor Diesel en varios campos de aplicación, especialmente en el sector del automóvil.

La bomba en línea fue el sistema de inyección utilizado en los motores Diesel durante muchos años. Pero el sector de la automoción progresaba incesantemente, y trajo consigo el ímpetu por diseñar un sistema más avanzado. La bomba en línea no conseguía proporcionar al motor Diesel la respuesta necesaria para poder competir con el motor de gasolina de la época. Así pues, Bosch creó en 1962 un nuevo prototipo que conseguiría satisfacer estos requisitos: la **bomba de inyección distribuidora o rotativa**. A diferencia del modelo antecesor, tenía un único elemento de bomba para todos los cilindros del motor. Estos avances, junto con la incorporación de la electrónica y el aumento en la presión de inyección, hicieron que los automóviles con motor Diesel fueran ganando peso en el mercado paulatinamente.

El desarrollo de los sistemas de inyección ya no estaba enfocado íntegramente en optimizar el rendimiento del motor, sino también en otros aspectos relacionados con el consumo de combustible o las emisiones de gases contaminantes, entre otros. Las crecientes exigencias no podían ser satisfechas con una inyección regulada mecánicamente, que dio paso a uno de los sistemas más perfeccionados que hay en la actualidad: el **Common Rail**. Separa la generación de presión y la inyección del combustible, al contrario que las bombas tradicionales. Esta disposición otorga al sistema de inyección Common Rail una gran flexibilidad para variar la presión, el caudal y el tiempo de inyección dentro de un amplio rango. Otra ventaja es el preciso control electrónico de la inyección, que optimiza la combustión del carburante y, consecuentemente, reduce el consumo y la emisión de gases contaminantes y ruidos, al mismo tiempo que incrementa la potencia del motor. Sólo con el sistema de inyección Common Rail se pueden cumplir las estrictas prescripciones que se exigen a los modernos motores Diesel.

2. LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DIESEL (EDC)

La tradicional regulación por revoluciones, que rige el comportamiento de los motores Diesel con bombas en línea y rotativas, proporciona una adecuada interpretación de los estados de servicio y preparación de la mezcla a quemar. Sin embargo, no registra las magnitudes más relevantes en el funcionamiento del motor o no lo hace con la suficiente rapidez. Estas limitaciones, junto con las estrictas exigencias actuales, han desplazado a la regulación mecánica por la electrónica en los motores Diesel actuales.

Los objetivos que guían el progreso en el sector de la técnica Diesel son:

- la disminución del consumo de combustible,
- la reducción en las emisiones de gases contaminantes (NO_x, CO, HC, etc.), partículas (hollín) y ruidos,
- el incremento simultáneo en la potencia y en el par motor.

Estas exigencias condicionan claramente la regulación de los sistemas de inyección en cuanto a presión, caudal o tiempo, entre otras magnitudes. La precisión que además se requiere hace que únicamente la regulación electrónica sea capaz de cumplir con estos requisitos, gracias principalmente a la capacidad de cálculo de los microprocesadores actuales. Otra ventaja es el intercambio de datos con otros sistemas electrónicos como el control de tracción (ASR), el control electrónico del cambio (ESG) o el programa de control de estabilidad (ESP).

La regulación electrónica Diesel en el sistema de inyección Common Rail se divide en tres bloques fundamentales: actuadores, sensores y la Unidad de Control Electrónica (UCE).

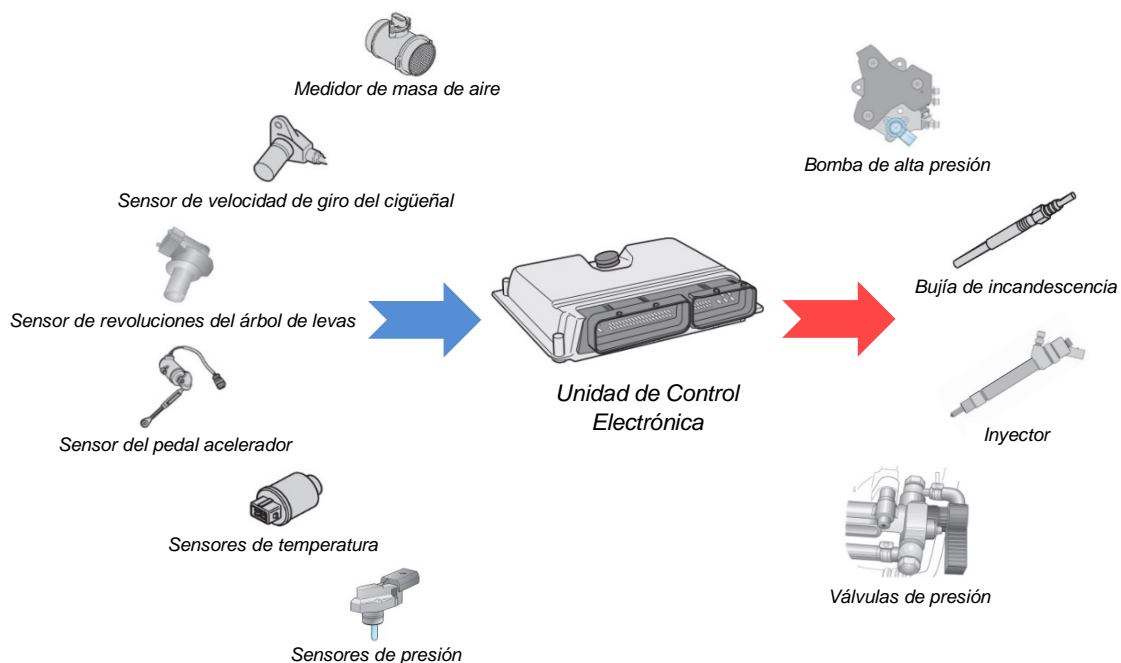


FIGURA 1.1 Bloques de la regulación electrónica Diesel

3. COMPONENTES ESENCIALES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON RAIL

3.1. Actuadores

Los objetivos por los que el sistema Common Rail fue concebido requieren la intervención de un conjunto de elementos para garantizar su cumplimiento. Cada uno de los componentes que integra el sistema está diseñado para desarrollar una función específica en unas condiciones de operación concretas y, según sean éstas, se clasifican en dos grupos: circuito de baja y de alta presión.

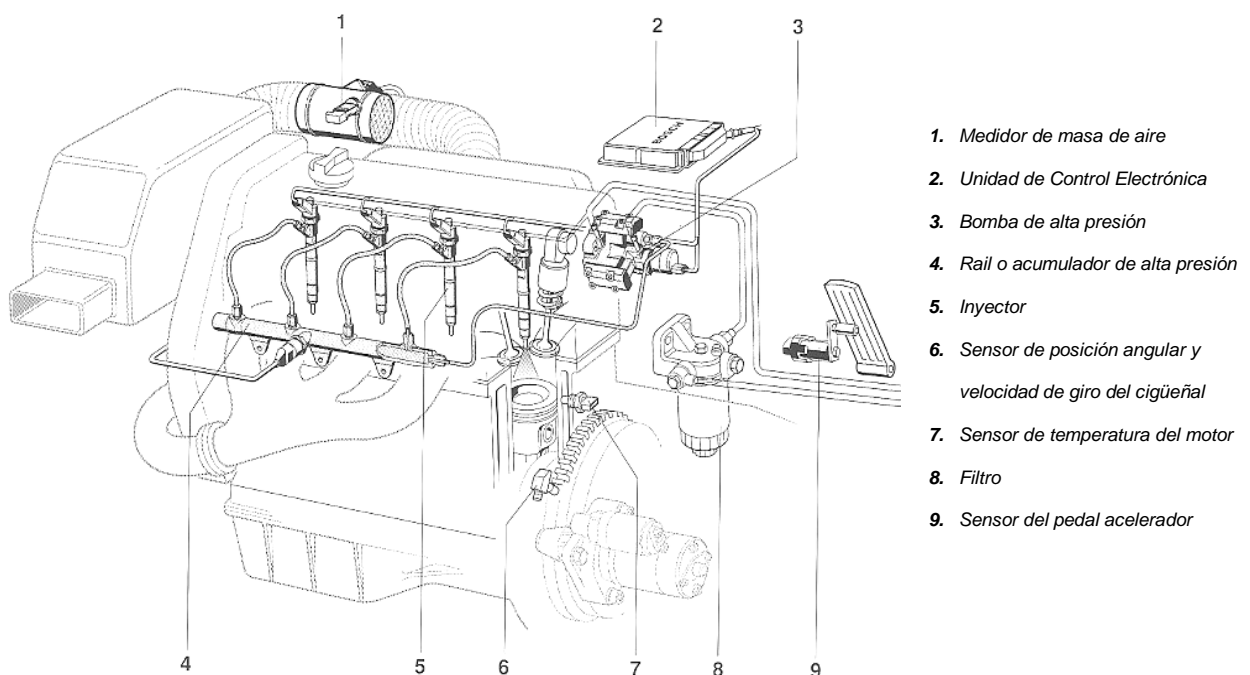


FIGURA 1.2 Componentes esenciales del sistema de inyección Common Rail

Circuito de baja presión

Comprende el almacenamiento, filtrado y suministro del carburante que se impulsa al circuito de alta presión, así como el retorno del excedente al depósito. La presión en el circuito de baja oscila entre los 3 y los 6 bar, dependiendo de la carga del motor. Está constituido por el depósito de combustible, el filtro preliminar, la bomba de baja presión, el filtro de combustible y los conductos de baja presión.

- Depósito de combustible

Es el elemento donde se almacena el carburante, lo cual justifica su resistencia a la corrosión y estanqueidad ante sobrepresiones e impactos. Debe situarse separado del motor, en un lugar que evite su inflamación en caso de accidente.

- Filtros

Mantienen el combustible limpio de impurezas y partículas que provocarían obstrucciones y daños en determinados elementos del sistema. Suelen estar compuestos por fibras de celulosa o poliéster impregnadas en resinas especiales; y, según sea su disposición, pueden ser de estrella, espiral o disco. Hoy en día tienen una relevancia que antes no era tan estricta, ya que las piezas de componentes como las bombas o los inyectores están diseñadas con tolerancias minúsculas y las condiciones en las que operan son sumamente exigentes. El sistema completo de filtrado está compuesto por:

- Filtro preliminar. Se ubica en el interior del depósito y purifica el carburante antes de su entrada a la bomba de baja presión.
- Filtro de combustible. Purga con mayor restricción el combustible a la entrada de la bomba de alta presión. Cuenta con un separador de humedad que impide el paso de agua, pues ésta reduce la lubricidad del gasoil y atasca el sistema de inyección.

- Conductos de baja presión

Guían el combustible entre los elementos del circuito de baja presión. Están protegidos contra las altas temperaturas y preparados para no alterar el funcionamiento del sistema en caso de deformación.

- Bomba de baja presión

Sea eléctrica o de accionamiento mecánico, la bomba de baja presión aspira el combustible del depósito para abastecer a la bomba de engranajes (integrada en la bomba de alta presión) en cualquier estado de servicio.

Circuito de alta presión

Está integrado principalmente por la bomba de alta presión, el rail o acumulador, los conductos de alta presión y los inyectores. El funcionamiento del conjunto formado por estos elementos engloba la generación de una presión elevada y la distribución y dosificación del combustible.

- **Bomba de alta presión**

Es el nexo de unión entre los circuitos de baja y de alta presión. Su función consiste en elevar permanentemente la presión del combustible hasta la demandada en cada instante (según la carga del motor, i.e. la posición del acelerador) e impulsarlo hacia el rail. De este modo garantiza el abastecimiento en cualquier condición de funcionamiento del motor. En ella está integrada la bomba de engranajes, que trabaja de forma netamente mecánica y es por donde se recibe el carburante.

La bomba de alta presión está atornillada a la brida intermedia del mando de engranajes y es accionada por el motor a través de un acoplamiento, ya sea una rueda o correa dentada. La velocidad de giro del cigüeñal repercute, por tanto, sobre la de la bomba y, a su vez, el caudal de combustible que ésta impele. Para que no escasee ni exceda, se aplica una relación de desmultiplicación. La presión es generada por tres pistones dispuestos en estrella y desfasados 120° entre sí, realizándose tres carreras de suministro por cada revolución del eje de accionamiento. No requiere lubricación, pues esta tarea y la refrigeración son desempeñadas por el propio combustible.

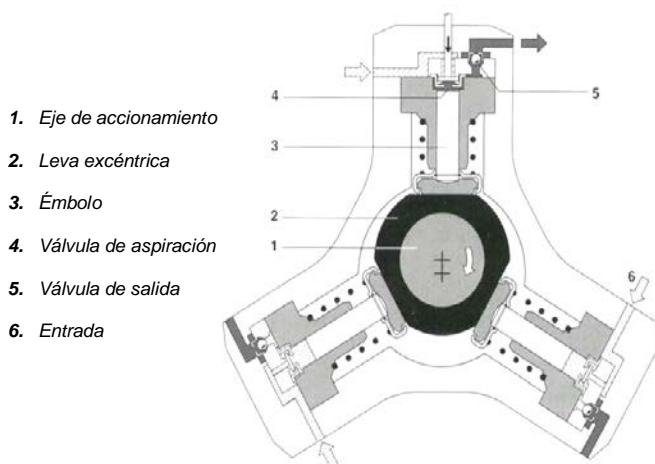


FIGURA 1.3 Bomba de alta presión

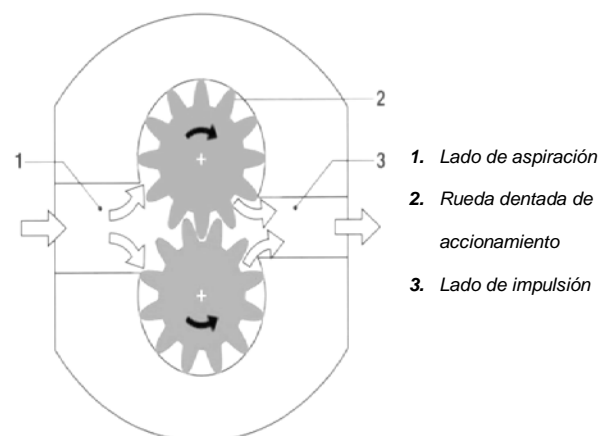


FIGURA 1.4 Bomba de engranajes

- Rail o acumulador de alta presión

Se trata de un conducto forjado en acero que almacena el carburante a elevada presión y lo distribuye a todos los inyectores. La finalidad del rail es que la inyección del combustible sea exactamente la misma en todo momento, pues se trata de un factor destacado en la composición de los gases de escape y la potencia del motor. Para ello es necesario sortear las fluctuaciones que ocasionan el suministro pulsante de la bomba y los ciclos de inyección. La precisión de inyección, tanto en tiempo como en cantidad, depende mucho de que esa presión sea constante, y eso solamente puede lograrlo un sistema de presión mecánica controlado electrónicamente.

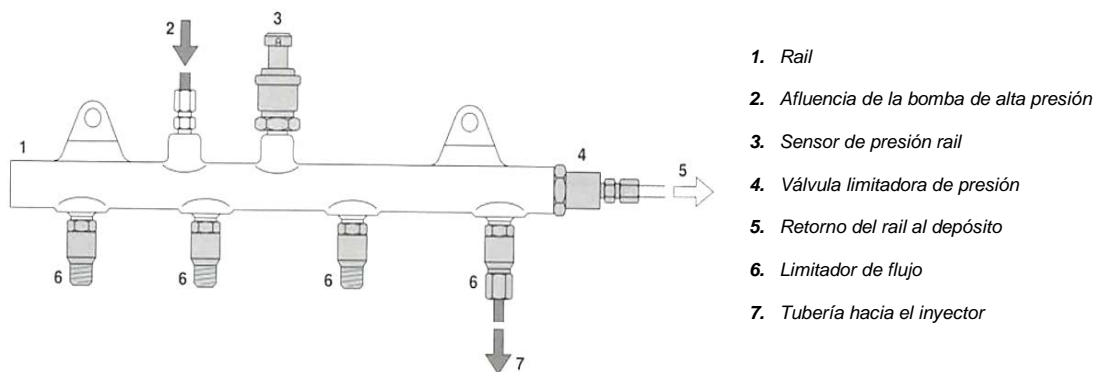


FIGURA 1.5 Rail o acumulador de alta presión

- Conductos de alta presión

Todos los sectores del circuito de alta están interconectados por estos conductos, que guían el fluido desde la bomba de alta presión al rail y, una vez ahí, hacia los inyectores. Deben resistir continuamente la enorme presión aportada por la bomba, así como las oscilaciones producidas por el suministro y las pausas de inyección. Éstas se expanden por el interior de cada conducto a la velocidad del sonido, reflejándose en los extremos (efecto resaca). Por este motivo están hechos de acero, sin costuras y con un diámetro exterior entre 4 y 22 mm (del orden de 2-4 veces el diámetro interior). También son fabricados evitando flexiones estrechas, concretamente con radios de flexión no inferiores a 50 mm.

- Inyectores

Son uno de los componentes más destacados. Reciben el combustible del mismo acumulador de alta presión, de ahí el origen del término *Common Rail*. Entre sus objetivos están:

- la dosificación exacta del carburante en tiempo y cantidad,
- la pulverización del combustible para conseguir una mezcla homogénea con el aire y que su combustión sea rápida y eficiente.

Ambas operaciones deben realizarse con rapidez, tanto en el suministro como en el corte, y según las condiciones momentáneas de funcionamiento. Por esta razón, el inyector está equipado con una válvula de acción rápida (electroválvula o actuador piezoeléctrico) que abre y cierra la tobera del mismo. Es en dicha tobera donde están practicados los orificios periféricos por los que se inyecta el fluido, cada uno con un diámetro del orden del cabello humano. Su funcionamiento es dirigido por la unidad de control, a partir de los sensores de revoluciones en el cigüeñal y en el árbol de levas.

En el sistema Common Rail hay tantos inyectores como número de cilindros tiene el motor, están fabricados con acero inoxidable y van fijados a la culata.

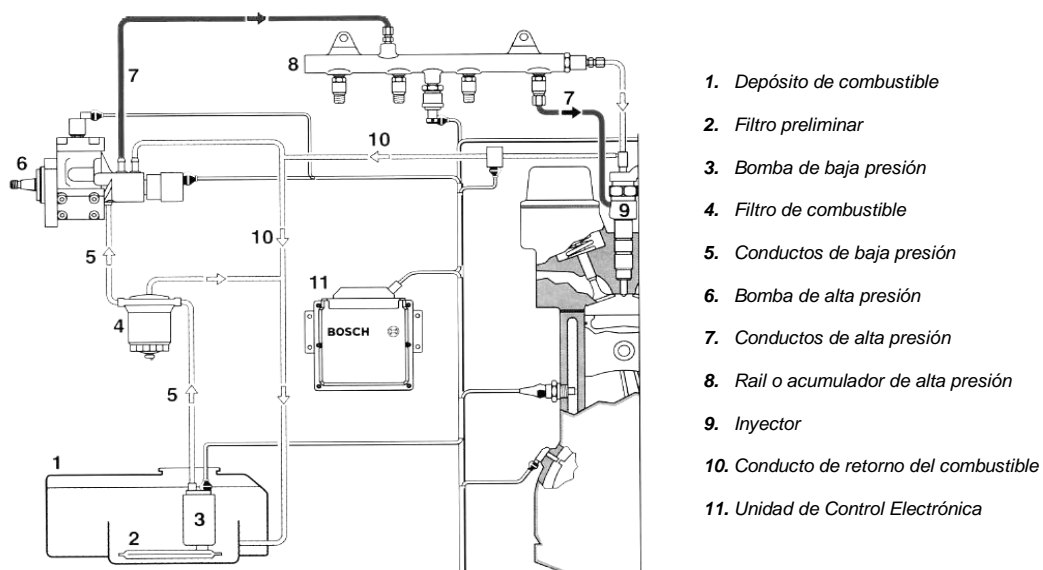
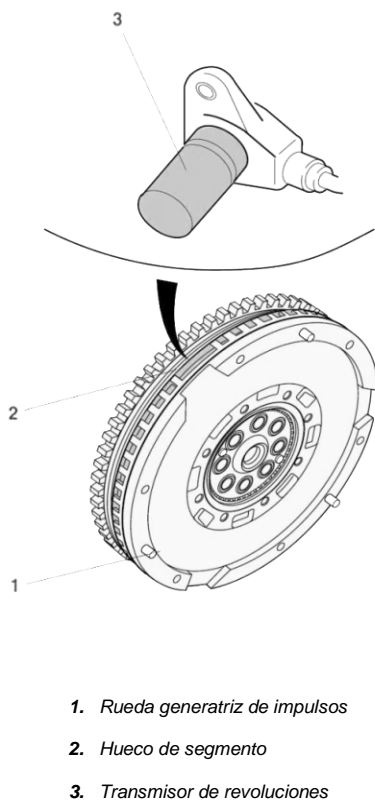


FIGURA 1.6 Circuitos de baja y de alta presión

3.2. Sensores

El funcionamiento de todos los actuadores y las condiciones de servicio en las que opera el motor son detallados en todo momento por los sensores. Son dispositivos que transforman las magnitudes físicas que registran en impulsos eléctricos, que posteriormente envían al procesador del vehículo: la unidad de control. A continuación se describen los sensores más importantes que intervienen en el sistema Common Rail.

- Sensor de posición angular y velocidad de giro del cigüeñal



Mide el número de revoluciones del motor y distingue la disposición de los pistones en los cilindros a partir de la posición angular del cigüeñal. También recibe el nombre de *transmisor de revoluciones*.

Se trata de un sensor inductivo fijado a la carcasa de distribución y formado por un imán permanente en cuyo extremo hay un perno de hierro dulce rodeado por un bobinado de cobre. Frente a él se sitúa una corona o rueda de impulsos ferromagnética, que cuenta con 58 dientes y un hueco que corresponde a dos más, que han sido suprimidos. Se ubica en el cigüeñal, entre el volante y la rueda dentada de control.

FIGURA 1.7 Sensor de posición angular y velocidad de giro del cigüeñal

Su funcionamiento se basa en la señal alterna senoidal generada por la variación del flujo magnético del imán al paso de los dientes presentes en la corona. La frecuencia y amplitud de la misma no son constantes, sino proporcionales a la velocidad de giro del motor. En caso de no detectarse esta señal, el motor no funcionaría.

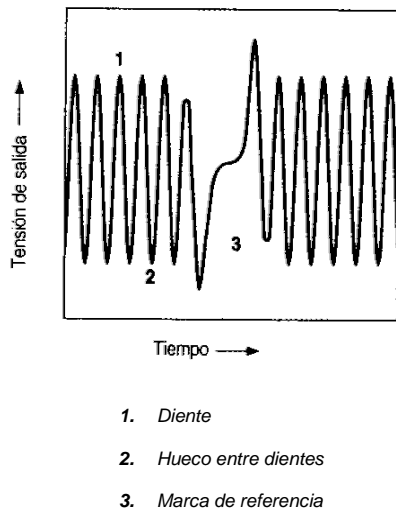


FIGURA 1.8 Señal de un sensor de revoluciones inductivo

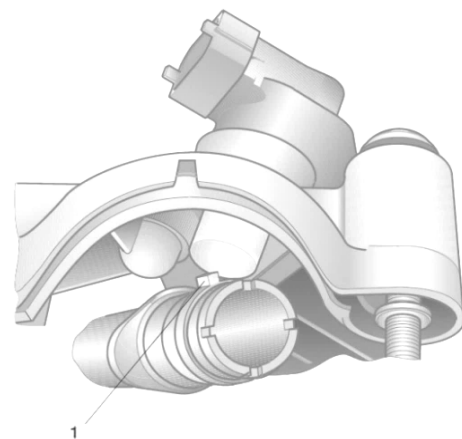
A partir del intervalo de tiempo entre las señales del sensor se determina el número de revoluciones del motor. Por otra parte, la disposición de los pistones se concreta a partir del hueco formado por los dientes suprimidos, que sirve como marca de referencia a una determinada posición del cigüeñal. En un motor de cuatro tiempos, un cilindro realiza el ciclo termodinámico cada dos vueltas completas del cigüeñal, es decir, cada 720° . Si además tiene cuatro cilindros, la separación de encendido (ángulo de desfase entre el par de cilindros que están en el PMS y el par en el PMI) será de 180° y el sensor detectará dos encendidos cada 30 dientes. Esta información es utilizada por la unidad de control para determinar el instante y cantidad de la inyección.

- Sensor de revoluciones del árbol de levas

Distingue si el PMS que alcanzan los cilindros de un motor de cuatro tiempos corresponde a la fase de compresión o escape. El árbol de levas es el componente que dirige la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape en el motor. Gira con una relación de desmultiplicación de 1:2 respecto al cigüeñal y, de forma solidaria, un diente de material ferromagnético.

El sensor se apoya en el efecto *Hall*, es decir, la generación de un potencial eléctrico al circular la corriente en presencia de un campo magnético perpendicular. Concretamente, el paso del diente por delante de unas plaquitas semiconductoras, atravesadas por la corriente del sensor,

varía la intensidad del campo magnético y orienta los electrones hacia la dirección perpendicular al paso de la corriente. Esto produce brevemente una



1. Diente ferromagnético

FIGURA 1.9 Sensor de revoluciones del árbol de levas

señal de tensión (del orden de milivoltios) denominada *tensión Hall*, que notifica a la unidad de control la fase de compresión del cilindro en el PMS. Esta información también puede ser proporcionada por el sensor del cigüeñal, pero sólo durante la marcha del motor, no en el arranque. Por tanto, la avería de este sensor impide arrancar nuevamente el motor.

- Sensor del pedal acelerador

Recibe las órdenes de acelerar, mantener constante o reducir la velocidad por parte del conductor. También se denomina transmisor de posición del pedal. Forma parte del pedal acelerador y su principal elemento es un potenciómetro que convierte la posición angular del pedal en una señal de tensión variable. Posteriormente, la unidad de control la interpreta y detecta la posición momentánea del pedal, evaluando qué cantidad de combustible es necesario inyectar en los cilindros.

- Sensores de temperatura

El componente fundamental en todos ellos es una resistencia variable fabricada con un material semiconductor y sensible a la temperatura. El sensor en cuestión mide el valor de la tensión en dicha resistencia y lo envía a la unidad de control, que lo interpreta a partir de una curva característica que relaciona tensión y temperatura.

En el motor se mide, entre otros, la temperatura de:

- Aire aspirado. Los valores de la temperatura y la presión en la admisión permiten calcular la masa de aire aspirada.
- Líquido refrigerante. Su temperatura también representa la del motor.
- Combustible. Influye en la presión del rail y en el caudal inyectado.
- Aceite del motor.
- Gases de escape.

- Sensor de presión en el rail

Registra la presión momentánea del carburante en el acumulador de alta presión. La precisión con que se mide esta magnitud es importante, ya que tiene un papel destacado en el funcionamiento del sistema. Esto obliga a que las tolerancias admisibles sean muy pequeñas, concretamente del $\pm 2\%$ del valor final. Las posibles variaciones respecto a este valor son corregidas por la válvula reguladora de presión.

- Medidor de masa de aire

Contabiliza con gran exactitud la masa de aire que realmente alimenta al motor, teniendo en cuenta las imprecisiones provocadas por pulsaciones y flujos inversos con la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape. Entrega la información con el fin de adaptar la combustión al respectivo estado de servicio y conforme a las prescripciones sobre emisiones.

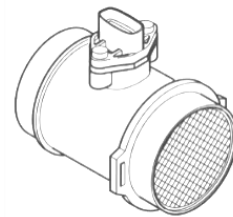


FIGURA 1.10 Medidor de masa de aire

3.3. Válvulas

- Válvula reguladora de presión

Se encarga de ajustar y establecer la presión del rail según las condiciones operativas. También está preparada para intervenir con unos valores preestablecidos ante una avería del sensor de presión en el rail. Puede estar instalada junto a la bomba de alta presión o por separado, dependiendo del espacio de montaje.

- Válvula limitadora de presión

Con un funcionamiento puramente mecánico, la válvula limitadora restringe la presión máxima admisible en el acumulador. Está presente en el propio rail y, al alcanzar el combustible en él en torno a 1450 bar, abre y permite el retorno del carburante superfluo hacia el depósito. De este modo protege al acumulador de posibles sobrecargas.

3.4. Unidad de Control Electrónica (UCE)

Tanto los datos medidos por los sensores como las funciones efectuadas por los actuadores son administradas y controladas por un elemento común: la Unidad de Control Electrónica. Es el elemento que registra los deseos del conductor y el comportamiento global del motor en las condiciones de servicio presentes, con el objetivo de procesar esta información y generar señales de respuesta que influyan sobre el funcionamiento del vehículo. En definitiva, es el componente central en el sistema Common Rail.

El corazón de la unidad de control es el microprocesador, una pequeña placa con circuitos impresos que calcula las señales de salida a partir de las mediciones ofrecidas por los sensores, y según los campos característicos y las directrices del programa de control o *software* almacenados en la memoria. De esta forma, controla y regula la actividad de los actuadores, siempre dirigida a la consecución de un consumo responsable del combustible, la emisión reducida de los gases de escape y el funcionamiento silencioso del motor. También es informado de anomalías como cortocircuitos, sobrecargas eléctricas y cables interrumpidos. Está equipado con un sensor de presión atmosférica, cuya señal corrige los valores teóricos para los circuitos reguladores y considera las diferencias de densidad del aire ambiente.

Las señales que la UCE recibe pueden ser de diferente tipo:

- Analógicas. Son señales de tensión que pueden adoptar cualquier valor dentro de los límites establecidos. Posteriormente, los conversores analógico-digitales (A/D) de la unidad de control las convierten en valores digitales con los que sí puede operar el microprocesador. A este grupo pertenecen las señales enviadas por los sensores de temperatura y el medidor de masa de aire, entre otros.
- Digitales. Sus valores son discretos, entre “alto” (lógico 1) y “bajo” (lógico 0), directamente evaluados por el microprocesador sin necesidad de convertirlas. Un ejemplo es la señal del sensor de revoluciones del árbol de levas, así como aquéllos que se basan en el efecto *Hall*, anteriormente explicado.

- Pulsatorias. Son transformadas en señales digitales rectangulares. El sensor de posición angular y velocidad de giro del cigüeñal genera este tipo de señales.

La relevancia que la UCE tiene en el dinamismo del motor obliga a que cumpla altas exigencias, como son:

- Gran capacidad de cálculo en tiempo real.
- Altas temperaturas del entorno (desde -40°C hasta 125°C) y humedad del ambiente.
- Tolerancia a sustancias empleadas en el motor (aceite, combustible, refrigerante,...).
- Resistencia a los esfuerzos mecánicos que provocan las vibraciones del motor, que pueden ser de hasta 30 g (treinta veces la aceleración de la gravedad terrestre).
- Compatibilidad electromagnética a las interferencias con otros sistemas electrónicos del vehículo (reguladores electromagnéticos, emisoras de radio, teléfonos móviles,...). Igualmente, la unidad de control no debe afectar a estos dispositivos.

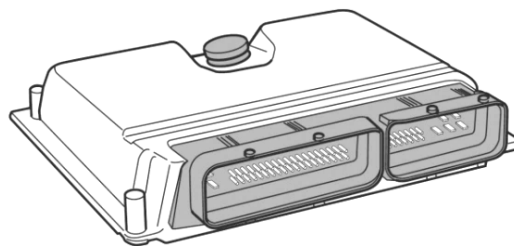


FIGURA 1.11 Unidad de Control Electrónica

El funcionamiento conjunto de los tres grupos expuestos en este capítulo (actuadores, sensores y unidad de control) constituye el sistema de regulación electrónica Diesel.

4. TIPOS DE INYECCIÓN DIESEL

Además del tipo de inyector que suministra el combustible, el modo en que éste es inyectado también tiene una influencia destacada en la calidad de la combustión y, consecuentemente, en el rendimiento del motor y las características de los gases de escape. Con estos propósitos son diseñadas la cámara de combustión y el cilindro, de forma que la mezcla entre el aire y el carburante garantice una combustión rápida y eficiente. La inyección del combustible puede ser principalmente de dos tipos:

4.1. Inyección indirecta (IDI)

No se produce en la propia cámara de combustión o principal, sino en un compartimento contiguo y de elevada turbulencia que recibe el nombre de antecámara o precámara. Ambas están comunicadas por un paso de reducidas dimensiones, que acentúa la diferencia de presión. Durante la compresión, el aire se introduce en la precámara por este orificio y de forma muy turbulenta, favoreciendo la homogeneización de la mezcla. Pueden ser de dos clases:

- Cámara de precombustión. Tiene lugar una precombustión que provoca la mezcla turbulenta aire/gasoil y la empuja hacia la cabeza del pistón. Ahí se inicia y finaliza una combustión que se caracteriza por ser suave y con poco ruido.
- Cámara de turbulencia. La combustión se produce entre este compartimento, donde comienza, y la cámara principal, donde concluye. El orificio que las une es de mayor sección, en referencia al que posee la cámara de precombustión.

El inyector utilizado en la inyección indirecta suele ser, en general, de orificio único y con apertura entre 120 y 160 bar. Esta presión es inferior en relación a la que se emplea con la inyección directa. Conjuntamente se instala una bujía de incandescencia o precalentamiento, que eleva la temperatura de la precámara durante el arranque en frío del motor. Debido a su situación, ésta tiene que ser resistente a elevadas presiones y temperaturas, así como a la actividad corrosiva de determinados productos químicos.

La invención de las cámaras de combustión divididas recae en el ingeniero alemán Prosper l'Orange y son ampliamente utilizadas, desde automóviles hasta maquinaria agrícola e industrial de pequeña y media cilindrada. Suponían la única opción de reducir las emisiones de gases contaminantes y ruidos, hasta que los avances en los sistemas de inyección impulsaron el uso de la inyección directa en estos motores.

4.2. Inyección directa (DI)

La inyección del combustible se realiza en la cámara de combustión, exactamente sobre la cabeza del pistón. Para que el encuentro entre el aire y el carburante sea uniforme y rápido, la presión con que se pulveriza el combustible debe ser mayor que la utilizada en la inyección indirecta, entre 240 y 260 bar aproximadamente. En este sentido también son importantes los movimientos *swirl* (rotación) y *squish* (confinamiento), que confieren a la corriente de aire aspirada un movimiento turbulento similar al de un remolino.

Otro factor que facilita el proceso de combustión es la subdivisión del chorro Diesel. Esta es la razón por la cual el inyector utilizado posee varios orificios periféricos de pequeño diámetro, que aseguran la pulverización y penetración del combustible.

La principal ventaja que avala el uso de la inyección directa sobre la indirecta está en el consumo de carburante, que puede llegar a ser hasta un 15% menor por una mejor formación de la mezcla y la supresión de pérdidas por sobrecarga entre la precámara y la cámara de combustión principal. Por el contrario, la combustión resulta un poco brusca y el funcionamiento del motor ruidoso y tosco.

INYECCIÓN INDIRECTA (IDI)	INYECCIÓN DIRECTA (DI)
<ul style="list-style-type: none"> • En la precámara • Inyector de un orificio • Presión de inyección más baja • Funcionamiento más suave • Menor emisión de contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobre la cabeza del pistón • Inyector de varios orificios • Presión de inyección más alta • Combustión más rápida • Menor consumo específico

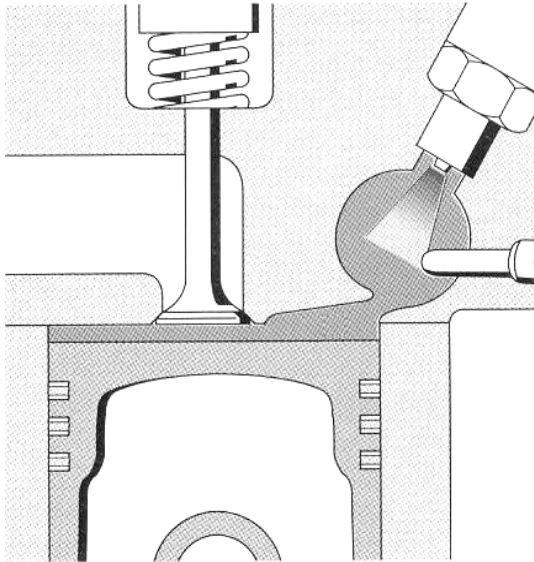


FIGURA 1.12 Inyección indirecta

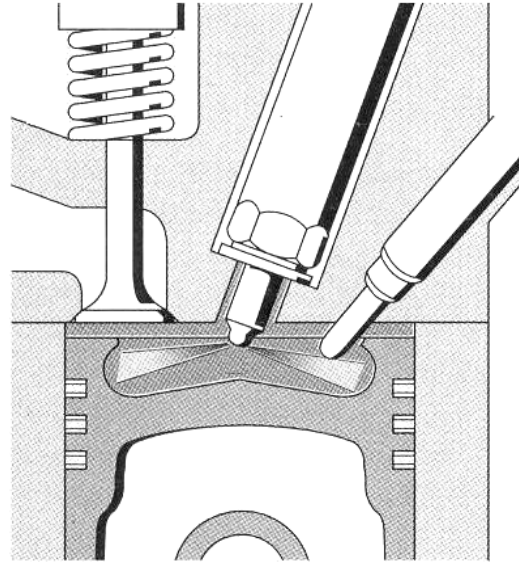


FIGURA 1.13 Inyección directa

5. TIPOS DE INYECTORES DIESEL

Los inyectores del sistema Common Rail se pueden clasificar en distintos tipos atendiendo a los siguientes parámetros:

5.1. Accionamiento del sistema

Inicialmente, la regulación del combustible en los sistemas de inyección se realizaba de dos formas posibles: mecánica o hidráulica. En el primer caso, la apertura del inyector es controlada por el propio motor o un dispositivo estrictamente mecánico (bomba en línea o rotativa, por ejemplo), mientras que en el segundo se produce cuando la presión del combustible supera la ejercida por el resorte sobre la válvula reguladora.

La normativa, cada vez más rigurosa sobre las emisiones de gases de escape y ruidos, y el exhaustivo control sobre la inyección del combustible suponen exigencias que los sistemas de inyección mecánicos e hidráulicos ya no pueden satisfacer. Aun así, se instalan en motores Diesel convencionales de vehículos industriales, maquinaria agrícola, aplicaciones marinas y generación de electricidad. En turismos han dado paso progresivamente a los sistemas electromecánicos (inyección mecánica asistida electrónicamente) y, sobre todo, a los electrónicos.

5.2. Tipo de válvula

La alta precisión que caracteriza la cantidad de combustible dosificada en los inyectores electrónicos tiene su origen en el control eléctrico del actuador por parte de la unidad de control. Dicho actuador consiste en una válvula de acción rápida estrechamente acoplada a la aguja del inyector. Esta disposición confiere a este tipo de inyectores una reacción inmediata, la capacidad de conseguir intervalos de inyección más pequeños y la reducción de la cantidad de combustible que retorna al circuito de baja presión.

Dentro de los sistemas de inyección gestionados electrónicamente, los inyectores Common Rail pueden ser de dos tipos en función de la clase de válvula/actuador:

- Válvula solenoide

La apertura y cierre del inyector es regulada a partir de los impulsos eléctricos que genera la unidad de control, con un retardo entre la activación y la respuesta de la electroválvula de, aproximadamente, 150 μ s. En estado de reposo, la posición de la válvula solenoide cierra la tobera. Esta posición cambia tan pronto como se alcanza el valor de tensión necesario, cuando la fuerza del electroimán supera a la que ejerce el muelle sobre la electroválvula. De este modo tiene lugar el proceso de inyección, que finaliza cuando se reduce la corriente de activación.

- Actuador piezoeléctrico

El funcionamiento es idéntico al expuesto anteriormente, a diferencia de la válvula solenoide, que se sustituye por un actuador piezoeléctrico. El comportamiento de este elemento se basa en el efecto piezoeléctrico inverso, que consiste en la tensión mecánica (deformación) inducida por el voltaje aplicado entre sus extremos. Concretamente, los iones positivos se desplazan en dirección al electrodo negativo, mientras que los iones negativos lo hacen hacia el electrodo positivo. Este fenómeno provoca la contracción o expansión del actuador según la dirección de la intensidad de campo eléctrico. Está compuesto por capas de material cerámico piezoeléctrico, dispuestas

físicamente en serie pero conectadas eléctricamente en paralelo. La aguja del inyector es elevada con la dilatación del actuador piezoeléctrico, inducida por la tensión eléctrica aplicada. La rapidez de apertura es mayor que en la válvula solenoide, lo cual permite realizar múltiples inyecciones en un mismo ciclo.

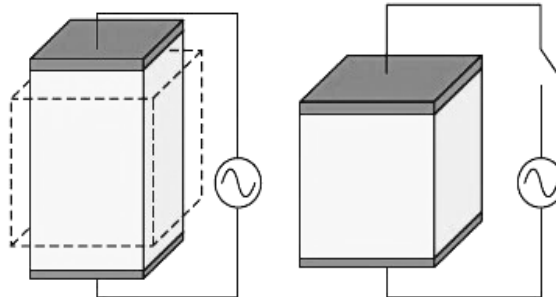


FIGURA 1.14 Efecto piezoeléctrico inverso

5.3. Número de orificios en la tobera

- Inyector de espiga o tetón

El flujo de carburante inyectado se regula con la apertura y cierre de una espiga (presente en el extremo de la aguja) a través del único orificio que posee la tobera, y que puede estar practicado de forma central o lateral.

Inicialmente, la apertura del inyector sólo admite el suministro de una pequeña cantidad de gasoil a través del estrecho espacio anular entre la espiga y el orificio. Con la elevación de la aguja, el área de paso y el flujo de combustible aumentan progresivamente hasta alcanzar un máximo, que corresponde al desplazamiento límite de la espiga. La tobera proporciona así un efecto estrangulador que, junto a la variabilidad de dimensiones y geometrías con que se diseña la espiga, modifica las características del chorro de inyección según lo requiera el funcionamiento del motor.

La obstrucción de este tipo de inyector es difícil. Además, asegura un funcionamiento más suave y menos ruidoso del motor por el aumento pausado de la presión de combustión en la precámara. Sólo se pueden utilizar en motores de inyección indirecta, pues los picos de presión que se alcanzan en el interior de la cámara de combustión perjudicarían su funcionamiento.

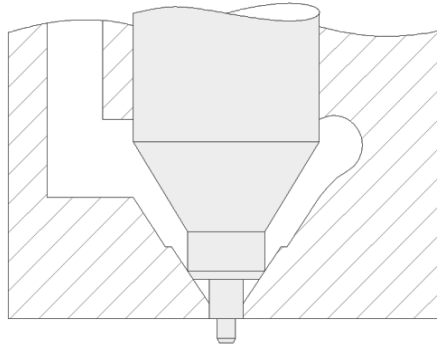


FIGURA 1.15 Inyector de espiga o tetón

- Inyector de orificios

La tobera de este inyector acaba en un extremo con forma semiesférica y varios orificios de salida perforados mediante electroerosión* en la envoltura. Tanto el número como el diámetro de estos orificios dependen de las características del sistema de inyección. En este caso, la aguja no sobresale en ningún momento de la tobera, de modo que los orificios son más propensos a quedar taponados por el hollín.

Puede tener un único taladro, al igual que el inyector de espiga, pero predominantemente se realizan múltiples orificios dispuestos simétrica o asimétricamente. Esto tiene como ventaja la posibilidad de orientar la inyección y conseguir una mezcla homogénea aunque la corriente de aire no sea turbulenta. Actualmente se perforan hasta seis orificios en turismos y diez en vehículos industriales. El objetivo en futuros diseños es incrementar el número y reducir simultáneamente el diámetro de los orificios de inyección para conseguir una distribución más uniforme del combustible.

En cualquier caso, la presión de inyección es más elevada que en los inyectores de espiga y, por esta razón, se instalan en motores de inyección directa. También se emplean en motores sometidos a altas temperaturas durante un amplio intervalo de tiempo, como pueden ser los motores sobrealimentados. Ante estas condiciones, los orificios pueden disponer de un conducto por el cual reciben el fluido del circuito de refrigeración.

* Proceso con el que se retira material en una pieza al aplicar descargas eléctricas, en forma de chispa o arco, que producen temperaturas de fusión muy locales.

El inyector de orificios puede ser de dos clases, atendiendo al volumen residual que queda bajo la aguja: de orificio/taladro ciego o de orificio/taladro en asiento.

- Inyector de orificio ciego. La geometría de la tobera impide que la aguja tapone los orificios de salida cuando el inyector está cerrado. Éstos son perforados en el casquete de la tobera, que puede ser semiesférico o cónico.
- Inyector de orificio en asiento. Los orificios de inyección están practicados alrededor del cono de asiento de la aguja, de tal forma que ésta los cubre al cerrarse el inyector e interrumpe la comunicación directa entre el volumen residual y la cámara de combustión. La geometría del asiento tiene su repercusión en la cantidad piloto (combustible al comienzo de la inyección) y en el nivel de ruidos del motor. En este caso, la forma del casquete es de forma cónica por motivos de resistencia.

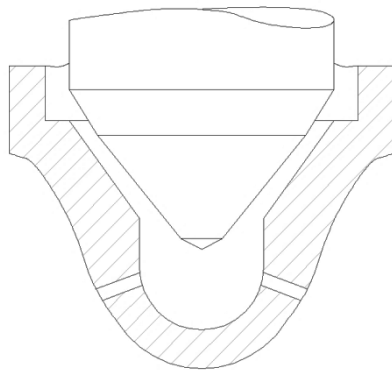


FIGURA 1.16 Inyector de orificio ciego

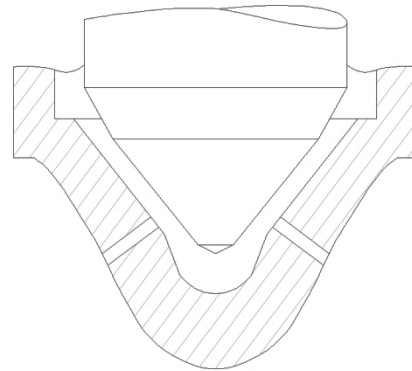


FIGURA 1.17 Inyector de orificio en asiento

Es importante mantener lo más reducido posible el volumen residual, donde se acumula el combustible sobrante en cada inyección. La intención es evitar su evaporación y, paralelamente, disminuir la emisión de hidrocarburos con los gases de escape. Esto se consigue de forma más eficaz en los inyectores de orificio en asiento, ya que el volumen residual en ellos es menor que en los inyectores de orificio ciego.

6. EL INYECTOR DE VÁLVULA SOLENOIDE

6.1. Despiece

El desmontaje empieza desenroscando la válvula solenoide del portainyector. Está equipada con la electroválvula que recibe las señales de la unidad de control, el terminal eléctrico y un orificio superior que sirve de retorno al combustible excedente. Además, en su interior alberga el muelle de electroválvula. El primer elemento que aparece en la parte superior del portainyector es el inducido de la electroválvula, que es presionado por el muelle antes mencionado y tapona con la bola de válvula el estrangulador de salida. Éste es el estrechamiento superior de la válvula, que también posee otro practicado transversalmente y que se denomina estrangulador de entrada. El siguiente elemento que se extrae es el émbolo de control, que está dividido en dos piezas. Para finalizar, se desenrosca la tuerca que mantiene unidos el portainyector y la tobera. En el interior de ésta última se alojan la aguja, el muelle de la tobera y los pernos de fijación, que refuerzan el acoplamiento con el portainyector.



FIGURA 1.18 Despiece del inyector de válvula solenoide

6.2. Funcionamiento

La función que desarrolla cada inyector en el sistema Common Rail está constituida por la sucesión de cuatro estados de servicio. Cada uno de estos estados corresponde a una fase concreta de la inyección y se diferencian entre sí por la distribución de fuerzas existente entre los componentes del inyector.

1. INYECTOR CERRADO (ESTADO DE REPOSO)

El combustible, que procede del rail, inunda el inyector hasta la cámara de control y la cámara de la tobera. Como la válvula solenoide no está activada por la unidad de control, el muelle de la electroválvula la presiona contra el asiento y es la bola del extremo inferior la que obstruye el estrangulador de salida. La elevada presión del rail incide sobre la superficie del émbolo de control, que junto a la acción del muelle de la tobera mantienen cerrada la aguja.

Para garantizar la estanqueidad de la tobera, la sección del émbolo de control se diseña con una relación de superficie a presión de aproximadamente 1'5 respecto a la superficie de la aguja. Es decir, la fuerza hidráulica sobre el émbolo de mando supera en torno a un 50% la fuerza de apertura de la tobera de inyección, sin contar la efectuada por el muelle. Éste último mantiene cerrada la tobera hasta que la presión diferencial es de unos 40 bar entre la cámara de la tobera y la cámara de control. Así se evita un posible retroceso de los gases de combustión a través del inyector, que anularían su funcionalidad y originarían una inestabilidad hidráulica.

2. COMIENZO DE LA APERTURA DEL INYECTOR

La electroválvula es activada con la corriente de excitación que genera la unidad de control. En cuanto la fuerza electromagnética supera la fuerza de cierre que ejerce el muelle de la válvula, el inducido se desplaza verticalmente hacia arriba y conecta el estrangulador de salida con la cámara de válvula. Por ahí fluye el carburante y retorna, de nuevo, al depósito.

La geometría del estrangulador de entrada impide el equilibrio inmediato entre las presiones de la cámara de válvula y la cámara de tobera. En otras palabras, la presión que incide sobre el émbolo de control es menor que aquella que actúa sobre la aguja del inyector, que todavía tiene el nivel de presión del rail. Esto conduce a la apertura de la tobera y el comienzo de la inyección. La velocidad con que se eleva la aguja depende de la breve corriente de alta intensidad y de la relación de paso entre los estranguladores de salida y de entrada.

3. INYECTOR TOTALMENTE ABIERTO

Tras un retardo de aproximadamente 150 μ s entre la activación y la respuesta de la válvula solenoide, el émbolo de control alcanza su límite superior. Por encima queda un reducido volumen de combustible, consecuencia del flujo entre el estrangulador de entrada y de salida, que amortigua el desplazamiento. La distribución de fuerzas es similar a la descrita en el estado anterior (comienzo de la apertura).

Con la elevación de la aguja, la tobera se abre totalmente y se produce la inyección del carburante. La presión con que se realiza es inferior a la del rail, siendo este descenso originado por las pérdidas de carga en los estrechamientos del inyector.

La caudal de combustible inyectado es proporcional al tiempo que la tobera permanece abierta por la conexión de la electroválvula e independiente de la velocidad de giro del motor o de la bomba.

4. CIERRE DEL INYECTOR (FINAL DE LA INYECCIÓN)

El ciclo de la inyección concluye en el momento en que la unidad de control deja de activar la electroválvula y ésta queda sin corriente. Entonces, el inducido es presionado hacia abajo por el muelle, hasta que alcanza el asiento y la bola de válvula taponan el estrangulador de salida. La presión en la cámara de control vuelve a ser ahora la misma que en el rail, de forma que la fuerza

total en el muelle de la tobera y en el émbolo de control se impone a la que actúa sobre la aguja. La velocidad con que ésta se cierra queda determinada por el flujo de gasoil en el estrangulador de entrada. Con la llegada de la aguja a su límite inferior, el inyector vuelve a la posición de reposo y finaliza el ciclo de inyección.

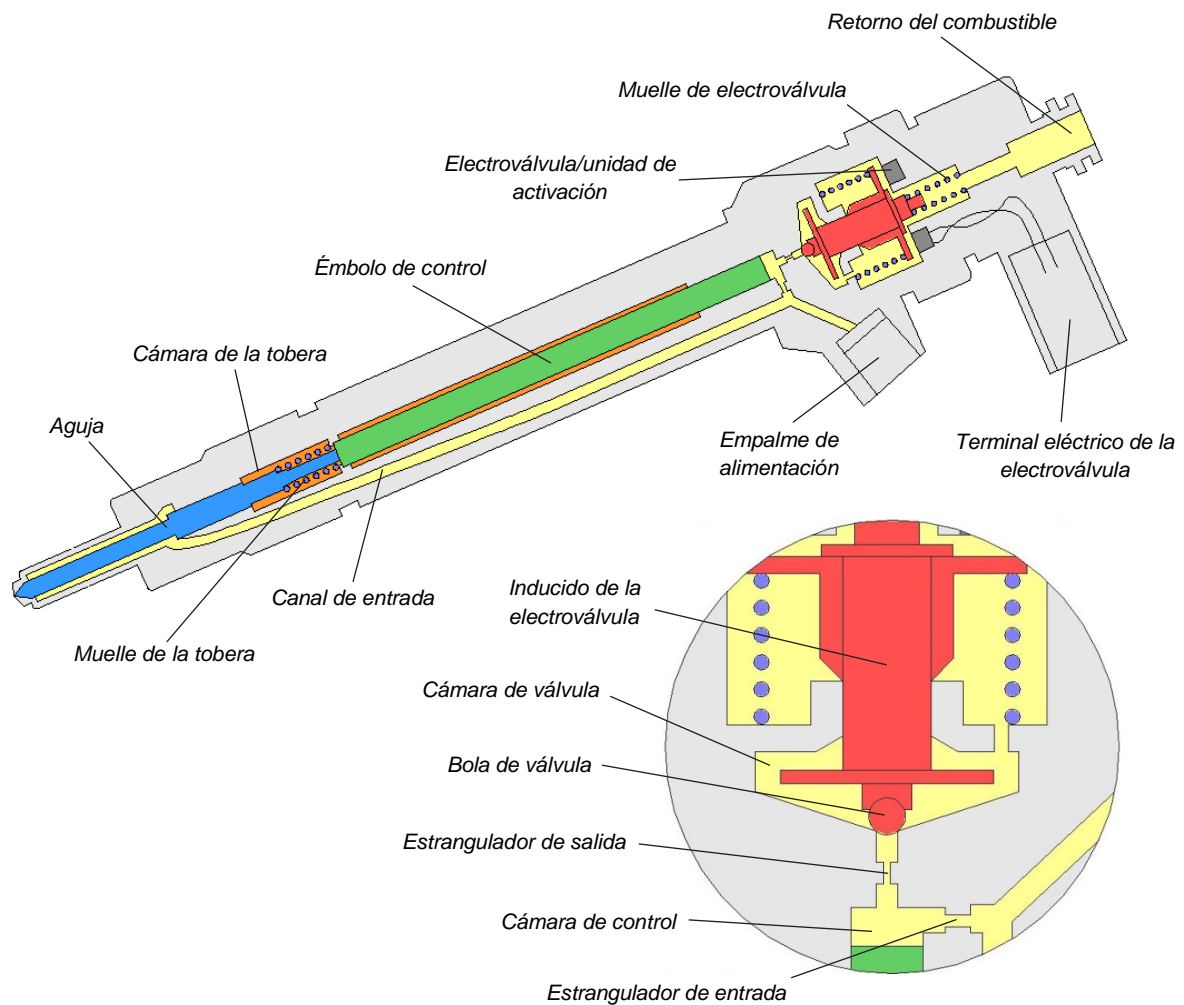


FIGURA 1.19 Componentes del inyector de válvula solenoide

7. LA INYECCIÓN DEL COMBUSTIBLE

El proceso de inyección del combustible se divide, fundamentalmente, en dos fases: inyección previa o preinyección e inyección principal. También se puede realizar, en algunos casos, una inyección posterior. El objetivo que se pretende con esta distribución es optimizar la combustión del carburante.

A. INYECCIÓN PREVIA O PREINYECCIÓN

Antes de que el pistón alcance el PMS, se inyectan entre 1 y 4 mm³ de carburante en cada cilindro (1 mm³ equivale al volumen contenido en media cabeza de un alfiler). Esta pequeña cantidad precondiciona la cámara de combustión y propicia en ella los siguientes efectos:

- Ligero aumento de la presión y de la temperatura, ya sea por reacción previa o combustión parcial.
- Reducción en el periodo de retraso de encendido/autoignición de la inyección principal.
- Atenuación de los incrementos y picos de presión en la combustión, que se hace más suave.

Como resultado se consigue una disminución en el consumo de combustible y en las emisiones de gases contaminantes y ruidos. Puede producirse hasta 90° antes del PMS, pero es importante tener presente que, con adelantos superiores a 40°, el combustible puede incidir sobre las paredes del cilindro y causar la dilución del aceite lubricante.

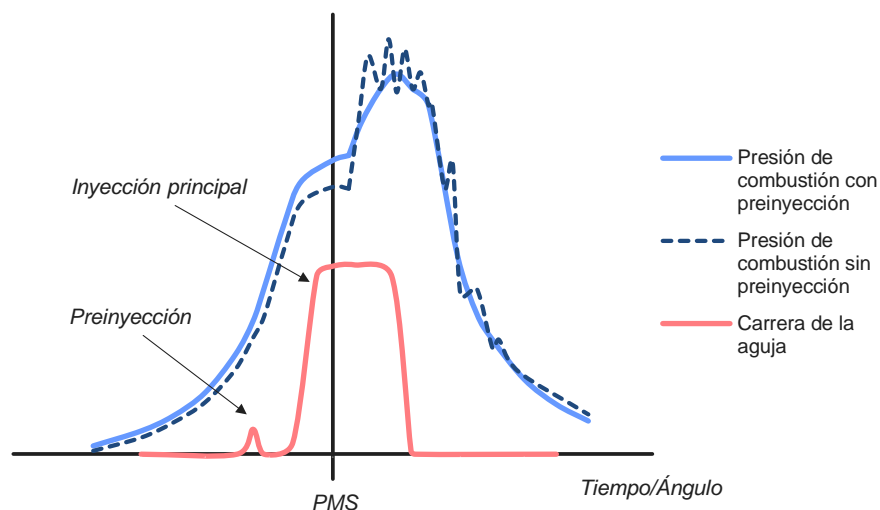


FIGURA 1.20 Diferencia en el desarrollo de la presión en una combustión con y sin preinyección

En caso de no realizar la preinyección, el aumento paulatino de la presión antes de llegar al PMS es seguido de un incremento pronunciado con picos muy agudos a partir del inicio de la combustión. Esta tendencia tiene su efecto en la sonoridad de la ignición en el motor Diesel. Por el contrario, con la preinyección el crecimiento de la presión en el margen del PMS es algo mayor, siendo la progresión posterior más atenuada.

B. INYECCIÓN PRINCIPAL

Aporta la mayor cantidad de carburante de la inyección y es, por consiguiente, la responsable esencial del par motor generado. El intervalo de tiempo en el que actúa es mayor que el de la preinyección. Además, tanto su inicio como la separación de la inyección previa son factores que pueden aumentar o disminuir el consumo específico de combustible.

La presión a la que se inyecta el gasoil en el sistema Common Rail es independiente del ciclo de inyección, del caudal de combustible y del régimen del motor. Como resultado se obtiene una curva de inyección casi cuadrada y constante.

Por el contrario, la presión generada y el caudal de inyección están asociados en los sistemas convencionales con bombas en línea o rotativas, ya que ambas magnitudes son reguladas por las mismas levas y émbolos de suministro. En este caso, la curva de inyección es triangular y con una presión punta que es más del doble que la presión de inyección media.

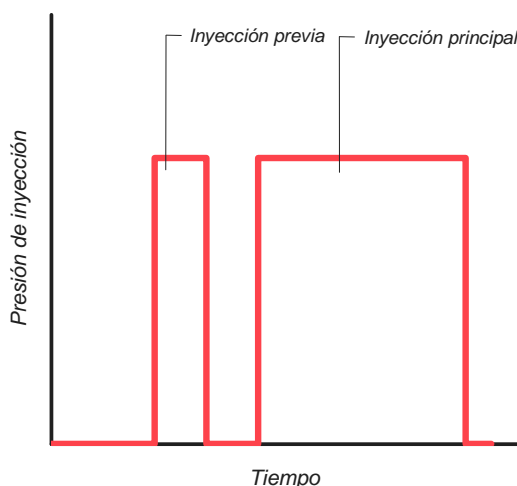


FIGURA 1.21 Curva de inyección con Common Rail

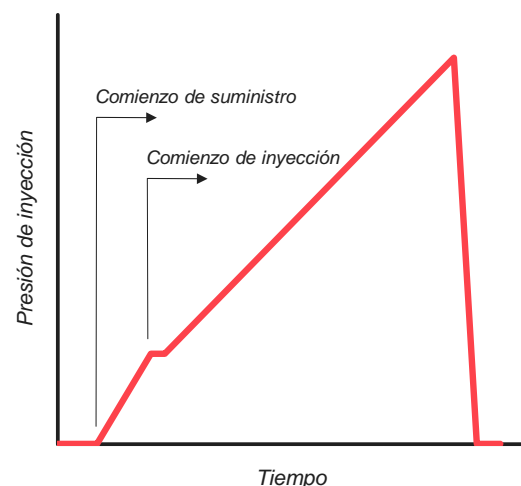


FIGURA 1.22 Curva de inyección con bombas en línea y rotativas

C. INYECCIÓN POSTERIOR

Sigue a la inyección principal e interviene en el tiempo de expansión o de escape, hasta un giro de 200° del cigüeñal respecto al PMS. En este caso, el combustible inyectado no se quema con los gases de escape, sino que se evapora con el calor residual de los mismos. Una parte de esta mezcla es devuelta a la aspiración, lo que hace que ésta sea una inyección previa muy adelantada. Con la retroalimentación de los gases de escape se reduce la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) sin aumentar drásticamente la de hollín, pues el carburante interviene como medio reductor. Por el contrario, una proporción de gases retroalimentados demasiado alta (superior al 40%) incrementa las emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) junto con el consumo de combustible, como consecuencia de la falta de oxígeno.

8. PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LA INYECCIÓN DIESEL

El rendimiento del motor, los gases de escape emitidos o el nivel de ruido son factores condicionados fuertemente por los siguientes parámetros:

- Inicio de la inyección

El instante en el que se inyecta el carburante en la cámara de combustión marca el comienzo de la ignición y, consecutivamente, repercute en el consumo y en las emisiones de gases contaminantes y ruido. Además, no es un valor fijo, sino que varía con la carga, la velocidad y la temperatura del motor. Estos motivos hacen que sea uno de los parámetros esenciales en la optimización del rendimiento del motor.

Se especifica de acuerdo a la posición del cigüeñal respecto al PMS. Las inyecciones retrasadas disminuyen la emisión de NO_x por ser la temperatura del proceso menor, aunque un retardo excesivo puede incrementar el consumo y la difusión de HC y hollín. Un desfase de tan sólo 1° en el valor teórico de inicio puede aumentar en un 5% la emisión de NO_x. En concreto, un avance de 2° en el cigüeñal eleva en 10 bar la presión punta, mientras que un retraso del

mismo orden incrementa la temperatura de los gases de escape en 20°C. La sensibilidad en el comienzo de la inyección exige, por lo tanto, una precisión muy elevada. Normalmente, los puntos óptimos en el mapa de datos de un motor Diesel se localizan entre 0 y 8° del cigüeñal antes del PMS.

- Desarrollo de la inyección

Por desarrollo de la inyección se entiende la variación del flujo de combustible durante el ciclo de la inyección. La cantidad de carburante debe suministrarse de forma progresiva e inyectando poca cantidad en el retardo de encendido (entre el comienzo de la inyección y el comienzo de la ignición); ya que la combustión es inicialmente violenta y repercute de forma desfavorable sobre la difusión de ruidos y de NO_x. Al final cae rápidamente el desarrollo de la inyección para evitar que el combustible mal pulverizado se desperdicie y provoque emisiones inadmisibles de HC y de hollín.

- Pulverización del combustible

Una de las principales dificultades en la combustión de un motor Diesel es el poco tiempo del que se dispone, ya que el combustible tiene que inyectarse, vaporizarse y mezclarse con el aire en fracciones de segundo. Para acelerar este proceso, el gasoil entra en la cámara de combustión dividido en gotas muy pequeñas, lo cual se consigue con una presión elevada y un tamaño de los orificios de inyección muy reducido.

Al pulverizar el combustible, éste pierde fuerza de penetración y entra rápidamente en contacto con el aire, lo cual facilita la homogeneización de la mezcla y acelera el proceso de oxidación. La inflamación de las gotas de combustible se realiza de forma superficial y depende tanto del tamaño como de la velocidad. Cuanto menor sea el diámetro de cada una, mayor será la relación superficie-masa del carburante en contacto con el aire caliente. De esta forma se consigue una mayor tasa de evaporación, un mayor aprovechamiento del combustible y una reducción en la emisión de HC y hollín. En resumen, con la pulverización se gana en economía y se disminuyen los gases contaminantes expulsados al ambiente.



FIGURA 1.23 Pulverización del combustible insuflado (Fuente: Bosch)

- Proporción de la mezcla aire/combustible

La formación de la mezcla aire/combustible está condicionada por la presión, comienzo y duración de la inyección, así como el movimiento del aire. Para que la combustión sea completa, los motores Diesel requieren que la temperatura sea elevada y la presencia de oxígeno abundante. Éste último parámetro queda caracterizado por el coeficiente o factor de exceso de aire (λ), que relaciona la cantidad de aire que produce la combustión completa (A_{real}) y la cantidad teórica o estequiométrica ($A_{mínima}$).

$$\lambda = \frac{A_{real}}{A_{mínima}}$$

La diferencia de ambas variables se denomina exceso de aire y se puede expresar en función del factor antes descrito:

$$A_{real} - A_{mínimo} = (\lambda - 1)A_{mínimo}$$

La relación aire-gasoil también se pueden expresar con el dosado, ya sea real ($F_{real} = \frac{1}{A_{real}}$) o estequiométrico ($F_s = \frac{1}{A_{mínimo}}$).

Los motores Diesel siempre funcionan con exceso de aire, en torno a un 10-40% ($\lambda = 1,1, \dots, 1,4$). El coeficiente de exceso de aire condiciona el autoencendido y la emisión de gases contaminantes. Una cantidad insuficiente de aire provocaría un incremento en las emisiones de hollín, CO y HC, así como un mayor consumo de gasoil.

2^a parte

9 AVL

10 AVL BOOST™ Hydsim

11 EL ENTORNO DE TRABAJO EN AVL BOOST™ Hydsim

12 CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE INYECTOR

13 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

9. AVL

Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List (*Instituto para Motores de Combustión Interna*) es una multinacional austríaca dedicada a la consultoría e investigación en el sector de la automoción. Es la mayor empresa privada del mundo en el desarrollo de motores de combustión interna, sistemas de tracción y técnicas de medición y control. Tiene sede central en Graz* y numerosos centros tecnológicos repartidos por todo el mundo.



FIGURA 2.1 Logo de AVL

AVL fue fundada en 1948 por el profesor e ingeniero Hans List. En sus albores, la empresa estuvo dedicada a los motores Diesel en camiones. Fundamentales fueron en esta etapa los fondos recibidos con el Plan Marshall[†]. Tras un periodo exitoso, incluyó en 1960 una sección de instrumentación para motores, siendo a finales de esta década cuando diseñó un banco de pruebas revolucionario.

A lo largo de la década de 1970, la experiencia y los avances en el motor Diesel adquiridos por AVL continuaron mejorando. Todos estos logros se materializaron en el software del banco de pruebas *PUMA*, que consagró a la empresa y le dio reputación internacional.

Después de más innovaciones y éxitos en la década de 1980, AVL creó la división *Advanced Simulation Technologies (Tecnología de Simulación Avanzada)* en 1987, donde está integrado el programa de cálculo empleado en este proyecto: AVL BOOST™ Hydsim.

En la actualidad, la preocupación por el cambio climático ha llevado a AVL a enfocar su actividad en los sistemas de tracción eléctricos e híbridos. Asimismo, ha instaurado un laboratorio de investigación sobre baterías para vehículos eléctricos en su centro tecnológico de Michigan (EE.UU.).

* Graz es la segunda ciudad más poblada de Austria, situada en el sureste, a unos 200 km de Viena.

† El Plan Marshall fue una iniciativa de EE.UU. para ayudar económicamente a aquellos países devastados tras la Segunda Guerra Mundial.

Destacadas son también sus colaboraciones con Ford en el diseño del motor Diesel *Power Stroke* o en Fórmula 1 con el motor *V6 Turbo* de Ferrari. Ésto, junto con el millar de patentes y el éxito económico de sus compañías subsidiarias, demuestra la competencia y liderazgo de la empresa en el sector automovilístico.

10. AVL BOOST™ Hydsim

Es una herramienta computacional ideada por AVL, integrada en la división AST y enfocada al análisis dinámico de sistemas hidráulicos e hidromecánicos, especialmente aquellos que son no estacionarios y de alta presión. El procedimiento de cálculo que se aplica para evaluar cualquier modelo está sujeto a la teoría de dinámica de fluidos y a la vibración de sistemas multicuerpo.

La principal área de aplicación de este programa es la simulación de la inyección de combustibles. Aunque inicialmente fue desarrollado para modelar la inyección Diesel, a día de hoy AVL BOOST™ Hydsim también está habilitado para simular la inyección de múltiples carburantes, desde la gasolina o el gas hasta los nuevos biocombustibles. Asimismo, no está limitado exclusivamente a la inyección Common Rail, también puede simular las variedades de este sistema y muchos más como la bomba de inyección en línea o la unidad bomba-inyector.

Sus principales características y ventajas son:

- Simulación flexible de modelos adaptados a numerosas aplicaciones.
- Elementos específicos de los diferentes sistemas de inyección.
- Amplia base de datos de fluidos y sólidos.
- Animación del flujo de combustible en la tobera del inyector.
- Diferentes *solvers* disponibles: de paso fijo y variable.
- Comunicación con AVL FIRE™ y MATLAB®/Simulink®.
- Fiabilidad probada por la confrontación con datos experimentales.

11. EL ENTORNO DE TRABAJO EN AVL BOOST™ Hydsim

Para iniciar el programa el primer paso es pulsar el icono de acceso directo *AVL AST v2013.2* en el escritorio. Seguidamente aparece un menú en cuya banda inferior se muestran todos los programas de simulación disponibles. Entre ellos se selecciona el grupo *BOOST*, concretamente la categoría *BOOST Hydsim* en la lista que se despliega.



La sesión comienza con la pantalla que se muestra a continuación:

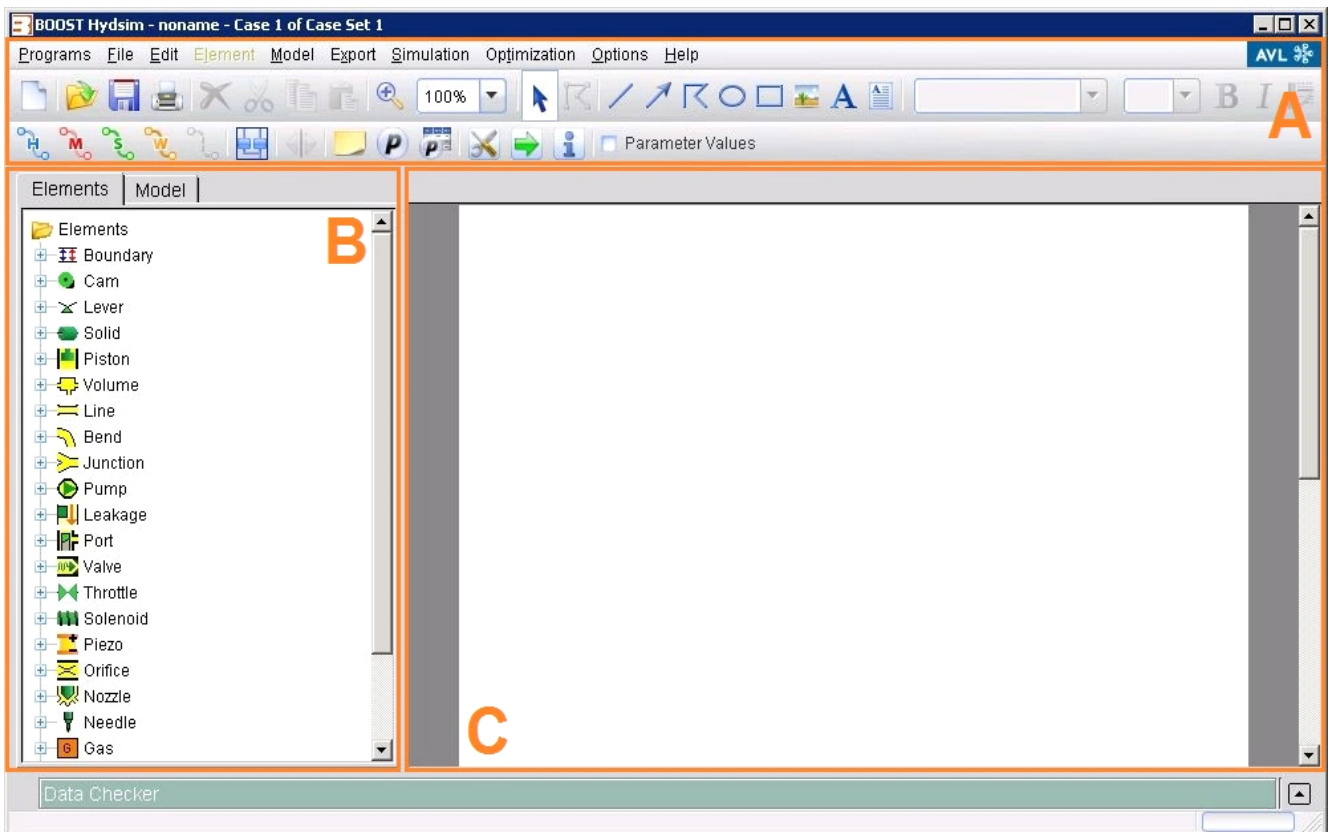


FIGURA 2.2 Interfaz de AVL BOOST™ Hydsim

La ventana principal está dividida fundamentalmente en tres secciones:

- A) El menú horizontal superior comprende las funciones básicas de cualquier programa: crear, abrir, guardar o imprimir un archivo. Especialmente importantes son las pestañas *Model* y *Simulation*. En la primera se definen las propiedades físicas del combustible, mientras que la segunda reúne los apartados relacionados con la configuración, ejecución y visualización de los resultados de la simulación. Más abajo se sitúan los distintos tipos de conexiones que se pueden utilizar para unir los elementos, los cuales se explican en el apartado 11.1.
- B) La columna de la izquierda contiene la librería de elementos. Cada uno de estos iconos representa una de las unidades elementales que puede estar presente en cualquier sistema de inyección real. En el apartado 11.2 se detallan todos los parámetros que definen a cada elemento.
- C) La mayor parte de la ventana está ocupada por el espacio de trabajo. Es aquí donde se sitúan, caracterizan y conectan entre sí los elementos que se van a utilizar. Al mismo tiempo, representa el modelo construido en dos dimensiones y proporciona al usuario una visión general del sistema.

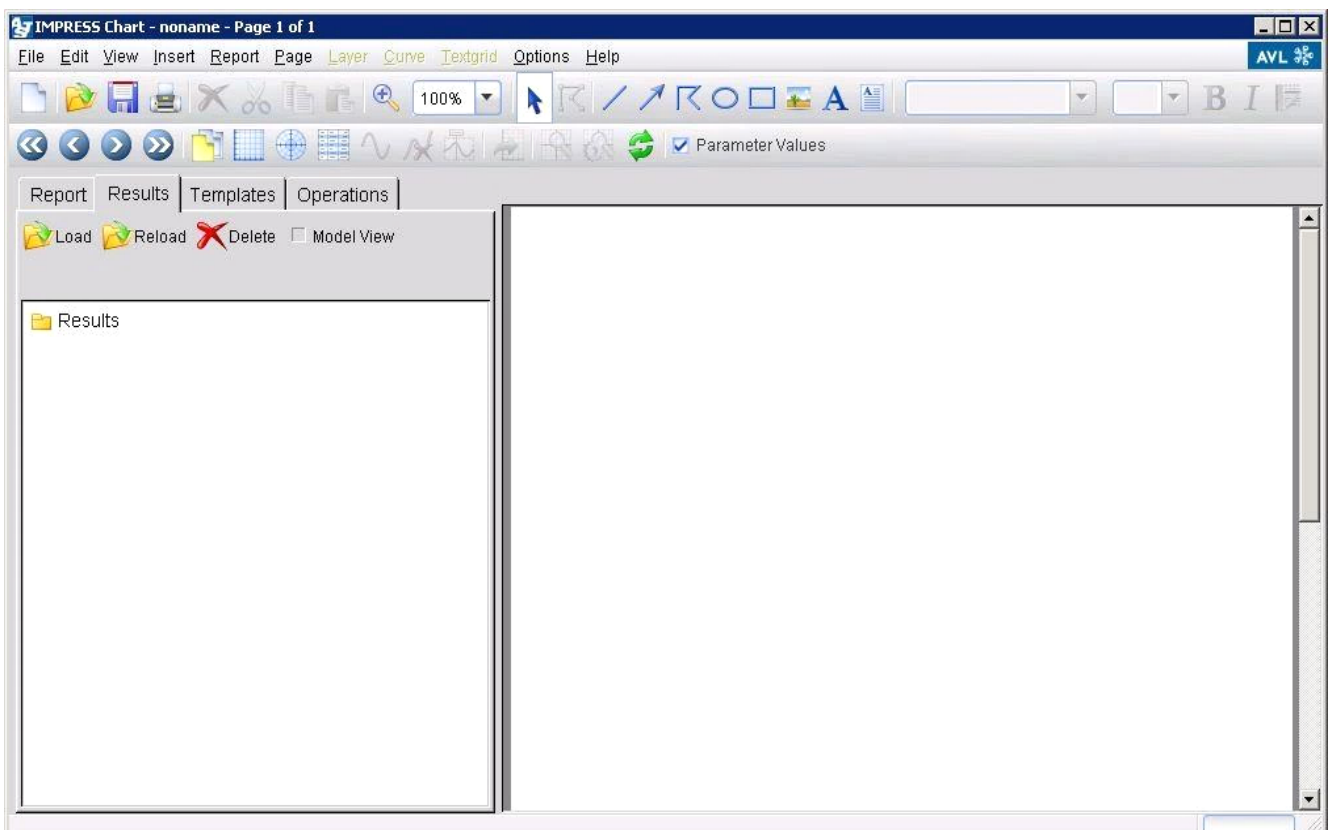


FIGURA 2.3 Interfaz de IMPRESS Chart


El programa comprueba en todo momento la validez del modelo, notificando al usuario sobre incompatibilidades y errores. La representación de los resultados obtenidos en la simulación se realiza en la ventana *IMPRESS Chart*, a la que se accede a través de la pestaña *Simulation*.

Los dos próximos apartados se reservan a la descripción de las propiedades con las que se configuran las conexiones y elementos empleados en el modelo a simular. Antes es preciso indicar las siguientes pautas para todos aquellos datos que se introducen en tablas:

1. Los valores se introducen en orden creciente.
2. Los datos intermedios se obtienen por interpolación lineal.
3. El primer y el último valor se mantienen constantes mientras que los cálculos de la simulación sobrepasen el límite inferior y/o superior de la tabla.


11.1. Conexiones

Todos los elementos que se definen en el espacio de trabajo de AVL BOOST™ Hydsim deben estar adecuadamente unidos entre sí según el grupo al que pertenezcan. Estos enlaces se denominan conexiones y están disponibles en la barra de herramientas situada sobre la librería de elementos. Una conexión es el vínculo de unión que hay entre dos elementos y se pueden distinguir cuatro clases: hidráulica, mecánica, eléctrica y especial.

- Hidráulica 

Transmite los valores de presión y/o flujo entre los elementos que conecta. Solamente se puede utilizar en aquellos elementos que tengan nudos de entrada/salida de este tipo. Siempre está referida a la dirección x del espacio y no se puede definir con ningún parámetro de entrada, ya que esta conexión no constituye una conducción o tubería, es solamente un símbolo. Se representa por una línea de color azul y una flecha en el extremo que indica el sentido positivo del flujo.



- Mecánica 

Caracteriza con la precarga, la rigidez, el amortiguamiento y el área a presión la unión de tipo mecánico existente entre dos elementos. Los valores que toman estas magnitudes pueden ser constantes o introducirse de forma tabulada. En este último caso, es importante tener presente que un valor positivo corresponde a la compresión del muelle y uno negativo a la elongación del mismo. Se pueden introducir en función de la posición relativa (traslación en el eje x o en el eje y o rotación alrededor del eje w) o de la velocidad relativa (lineal en el eje x o en el eje y o angular alrededor del eje w). Solamente se puede utilizar en aquellos elementos que tengan nudos de entrada/salida de este tipo. Se representa por una línea de color rojo y una flecha en el extremo que indica el sentido positivo del flujo.



- Eléctrica 

Permite el intercambio de datos entre AVL BOOST™ Hydsim y MATLAB®. Solamente se puede utilizar en aquellos elementos que tengan nudos de entrada/salida de este tipo. No se pueden establecer parámetros de entrada y se representa por una línea de color naranja sin flecha.



- Especial 

Establece la dependencia física o funcional que existe entre los elementos que enlaza. Concretamente, envía en una sola dirección los valores de posición y velocidad entre dos elementos que, normalmente, pertenecen a una misma parte o conjunto (aguja y tobera, émbolo y huelgo, aguja y huelgo, etc.). Es una conexión de carácter lógico y en la que no se pueden definir parámetros de entrada. Solamente se puede utilizar en aquellos elementos que tengan nudos de entrada/salida de este tipo y se simboliza con una línea de color verde sin flecha.







11.2. Librería de elementos

El modelo de inyector en AVL BOOST™ Hydsim consiste en la unión de *elementos*, que representan unidades básicas presentes en cualquier sistema de inyección real. A continuación se detallan en profundidad cada uno de los elementos que componen el modelo simulado en este proyecto, los cuales se clasifican en grupos de acuerdo a su tipo y función.

- Grupo **Condición de contorno** 

Cada uno de los elementos que componen este grupo establece el valor de una determinada propiedad física en la frontera del sistema. En el modelo de inyector simulado se emplean los siguientes:



PRESIÓN/TEMPERATURA 	
Función	Define las condiciones de presión y temperatura en función del tiempo o del ángulo de referencia. Dichas propiedades serán iguales en todos los nudos del elemento.
Nudos	Hidráulicos: 8 Eléctricos: 1 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Incremento de tiempo/ángulo:</u> Valor añadido a los datos tabulados de tiempo/ángulo (1ª columna) al inicio del cálculo. Tiene como utilidad evaluar la simulación en aquellos breves instantes de tiempo en los que se produce la inyección del combustible, obviando el resto. ○ <u>Factor de escala:</u> Valor que multiplica a los datos tabulados de tiempo/ángulo (1ª columna) al inicio del cálculo. ○ <u>Presión y temperatura frente al tiempo/ángulo de referencia</u>
Condiciones iniciales	No se pueden especificar. Los elementos Pistón, Orificio, Fuga o Conducto unidos a éste por medio de una conexión hidráulica adoptan como condición inicial los valores de presión y temperatura introducidos.

MECÁNICA 	
Función	Define la posición o velocidad en la frontera del sistema en función del tiempo o del ángulo de referencia. Dichas propiedades serán iguales en todos los nudos del elemento.
Nudos	Mecánicos: 8 Eléctricos: 1 

<p>Parámetros de entrada</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Variable:</u> Magnitud cuyos datos se introducirán en función del tiempo/ángulo. Se escoge entre la posición o la velocidad, referida a una sola dirección del espacio. ○ <u>Incremento de tiempo/ángulo:</u> Valor añadido a los datos tabulados de tiempo/ángulo (1ª columna) al inicio del cálculo. Tiene como utilidad evaluar la simulación en aquellos breves instantes de tiempo en los que se produce la inyección del combustible, obviando el resto. ○ <u>Factor de escala:</u> Valor que multiplica a los datos tabulados de tiempo/ángulo (1ª columna) al inicio del cálculo. ○ <u>Posición/Velocidad frente al tiempo/ángulo de referencia:</u> Valores de la magnitud seleccionada en <i>Variable</i> frente al tiempo/ángulo de referencia.
<p>Condiciones iniciales</p>	<p>No se pueden especificar. Toma los valores tabulados de posición/velocidad en función del tiempo/ángulo de referencia como condición inicial al comenzar el cálculo.</p>

☞ **NOTA:** *No es posible definir simultáneamente la posición y la velocidad en función del tiempo/ángulo de referencia. En caso de tabular la posición, la velocidad se obtendrá en la misma dirección a partir de la derivada temporal. Si el usuario decide tabular la velocidad, la posición se calcula en la misma dirección a partir de la integral respecto al tiempo.*

• Grupo **Conducto** 

<p>CONDUCTO DE LAPLACE </p>	
<p>Función</p>	<p>Define una conducción de sección circular.</p>
<p>Nudos</p>	<p>Hidráulicos: 2 Eléctricos: 1 </p>
<p>Parámetros de entrada</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre tres opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. El conducto adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). El conducto posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en el conducto. ○ <u>Pérdidas por fricción:</u> Pueden despreciarse o ser calculadas con el modelo no estacionario de Melcher.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Longitud:</u> Corresponde a la variable L de la FIGURA 2.4. ○ <u>Diámetro hidráulico:</u> Corresponde al variable D_h de la FIGURA 2.4.
Condiciones iniciales	Se pueden imponer el flujo volumétrico en los nudos de entrada y salida. Ver condiciones iniciales del elemento Presión/Temperatura.

👉 **NOTA:** Si se seleccionan propiedades del fluido locales, la velocidad del sonido, la densidad y la viscosidad en la conducción se calcularán a partir de la presión inicial en los nudos de entrada y salida. El elemento Conducto de Laplace considera constantes las propiedades del fluido. Si éstas son variables, dichas propiedades serán promediadas.

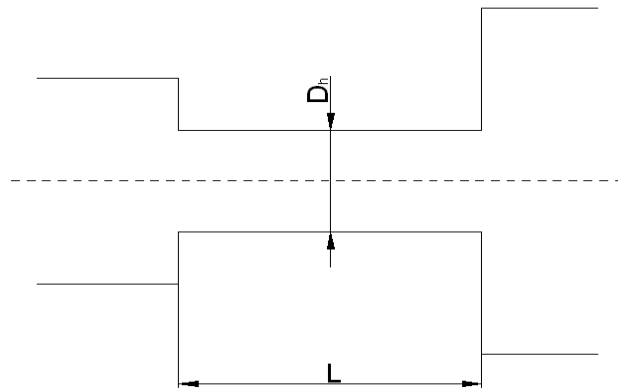


FIGURA 2.4 Conducto de Laplace



• Grupo **Volumen**

VOLUMEN ESTÁNDAR	
Función	Reúne las propiedades del fluido o combustible en un espacio delimitado por paredes rígidas.
Nudos	Hidráulicos: 10 Eléctricos: 1
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. El volumen adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). El volumen posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en el volumen.

	<ul style="list-style-type: none"> - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isothermas en el volumen. o <u>Volumen inicial:</u> Si no se encuentra unido a ningún elemento del grupo Pistón, el volumen será constante durante el cálculo, no así la presión. o <u>Cavitación:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Presión de vapor. Introducir un valor nulo o no especificarlo implica despreciar la cavitación y la posibilidad de obtener presiones negativas. Asimismo, mientras que la presión en el volumen sea inferior a la presión de vapor, el programa realizará el cálculo manteniendo constante este valor límite. - Extensión inicial. Volumen inicial que ocupan las burbujas de vapor originadas por la cavitación.
Condiciones iniciales	Presión y temperatura iniciales. Todos los elementos conectados hidráulicamente al Volumen estándar adoptarán estos valores para iniciar el cálculo desde el equilibrio. Si no se especifican se toman 1 bar y 293'15 K.

☞ **NOTA:** Si este elemento está unido a uno o varios del grupo Pistón, entonces el volumen será variable.



• Grupo **Bifurcación** ➤

TE (ÁNGULO) 	
Función	Crea una unión en forma de te con un determinado ángulo entre la conducción directa (sección 2-3) y la inclinada (sección 1).
Nudos	Hidráulicos: 3 Eléctricos: 1 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> o <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. El cruce adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). El cruce posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isothermas en la bifurcación. - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isothermas en el cruce.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Ángulo entre las secciones 1 y 2</u> ○ <u>Elementos unidos:</u> El programa indica los elementos unidos en cada sección de la bifurcación. ○ <u>Coefficiente de pérdidas:</u> Relación entre la diferencia de presión y la presión dinámica en la conducción, siendo v_m la velocidad media. $K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_m^2}$ Puede ser calculado por el programa o definido por el usuario.
Condiciones iniciales	No se pueden especificar.

👉 **NOTA:** El diámetro de cada sección corresponde al del elemento Conducto unido. Además, el diámetro de las secciones 2 y 3 será el mismo y nunca inferior al de la sección 1.

• Grupo **Orificio** 

ORIFICIO ESTÁNDAR 	
Función	Caracteriza la contracción presente en un conducto de sección circular.
Nudos	Hidráulicos: 2 Eléctricos: 1 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. El orificio adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). El orificio posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en el volumen. - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la contracción. ○ <u>Área/Diámetro de la sección transversal:</u> Se definen en el conducto (nom) y en la contracción (thr). Ver FIGURA 2.5. ○ <u>Coefficiente de fricción en la contracción:</u> Queda definido por los valores del: <ul style="list-style-type: none"> - Número de Reynolds crítico. Aquel en el que el flujo es transicional y cambia de laminar a turbulento y viceversa intermitentemente.

	<p>- Coeficiente de pérdidas: Relación entre la diferencia de presión y la presión dinámica en la conducción, siendo v_m la velocidad media.</p> $K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_m^2}$ <p>Está referido a la contracción del orificio.</p>
Condiciones iniciales	No se pueden especificar. Ver condiciones iniciales del elemento Presión/Temperatura.

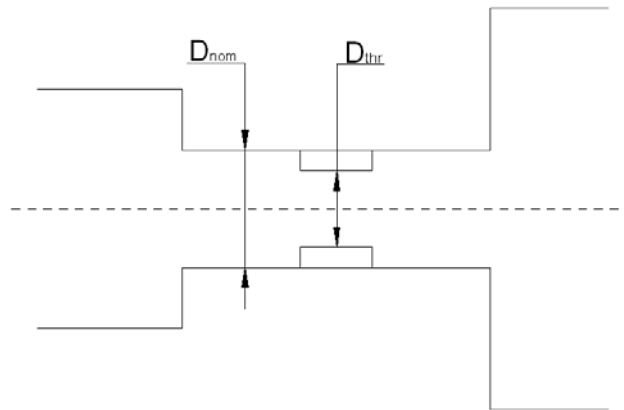




FIGURA 2.5 Orificio estándar

• Grupo **Aguja** 

AGUJA ESTÁNDAR 	
Función	Define las propiedades físicas de una aguja convencional.
Nudos	<p>Hidráulicos: 2 Mecánicos: 5 Eléctricos: 1 Especiales: 3</p> 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Grados de libertad:</u> Se escoge entre 1 grado de libertad (traslación en la dirección x) ó 3 (dirección x, y & z). ○ <u>Cuerpo de la aguja:</u> Se puede escoger entre: <ul style="list-style-type: none"> - Rígido. El cuerpo posee un grado de libertad y no existe deformación entre sus extremos. Por tanto, el desplazamiento relativo y la velocidad en los nudos de entrada y de salida serán iguales. - Elástico. El cuerpo se puede deformar axialmente entre los nudos de entrada y salida. La rigidez y la amortiguación de la aguja están determinados por la geometría y el material de la misma. ○ <u>Masa:</u> Comprende la masa de la aguja y el 33% de la del muelle unido a ella, así como la de la base sobre la que éste se apoya.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Diámetro de la guía de aguja:</u> Corresponde a la variable $D_{guía}$ de la FIGURA 2.6. ○ <u>Diámetro del asiento de aguja:</u> Corresponde a la variable $D_{asiento}$ de la FIGURA 2.6. ○ <u>Modelo de contacto:</u> Queda caracterizado por la rigidez y el amortiguamiento de la aguja en el asiento. Puede ser: <ul style="list-style-type: none"> - Lineal - Pseudo-lineal - No lineal ○ <u>Presión en el asiento de aguja:</u> Se puede calcular con los siguientes modelos: <ul style="list-style-type: none"> - Constante (modelo básico). La presión en el asiento es constante e igual a la presente en el volumen residual (cavidad bajo la aguja). - Distribuido (modelo avanzado).
<p>Condiciones iniciales</p>	<p>La posición y la velocidad (ambas relativas) para el nudo de entrada y el de salida en la dirección x (si el elemento tiene un grado de libertad) o en las direcciones x, y & z (si el elemento tiene tres grados de libertad). Si el cuerpo de la aguja es rígido, ambas magnitudes serán iguales en el nudo de entrada y de salida.</p>

- 👉 **NOTA:** Este elemento se define de acuerdo a las siguientes reglas:
- ✧ Debe estar unido mediante una conexión hidráulica a un elemento del grupo Volumen, el cual representará la cavidad bajo la aguja (volumen residual). Ver FIGURA 2.6.
 - ✧ El resorte de la aguja se constituye con una conexión mecánica a un elemento del grupo Condición de contorno.
 - ✧ Para modelar la tobera del inyector, el elemento Aguja debe estar unido a otro del grupo Tobera con una conexión especial.
 - ✧ Las conexiones hidráulica y mecánica, los parámetros de entrada y de salida y las condiciones iniciales están referidas a la dirección relativa x .

👉 **NOTA:** La utilización de este tipo de aguja asume que la presión en el volumen de la tobera actúa mientras que la existente en la cavidad bajo la aguja incide, durante su apertura, sobre el asiento de la misma.

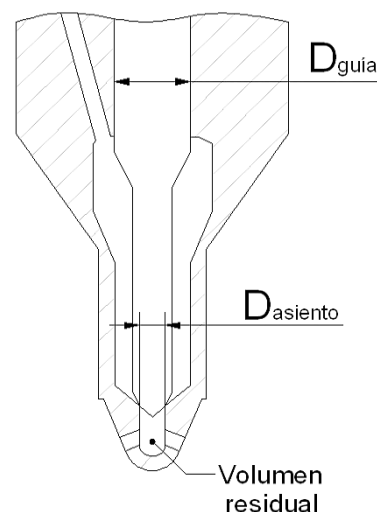







FIGURA 2.6 Aguja estándar


• Grupo Fuga 

ESPACIO ANULAR 	
Función	Incorpora las fugas de fluido a través del resquicio que queda entre el émbolo de control, o la guía de aguja, y las paredes del cilindro en el que se sitúa.
Nudos	Hidráulicos: 2 Eléctricos: 1 Especiales: 2 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. El resquicio adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). El resquicio posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la oquedad. - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la oquedad. ○ <u>Diámetro del pistón:</u> Diámetro del elemento Pistón al que se encuentra unido mediante conexión especial. ○ <u>Número de pistones:</u> Número de elementos Pistón al que se encuentra unido. ○ <u>Longitud inicial de la oquedad</u> ○ <u>Variación en la longitud de la oquedad:</u> Se puede optar por: <ul style="list-style-type: none"> - Constante. Adopta el valor inicial antes mencionado. - Variable. Tiene en cuenta la longitud inicial y el desplazamiento del pistón. ○ <u>Cálculo de la oquedad:</u> Puede ser calculado por el programa o definido por el usuario. En este último caso, la holgura ΔD (diferencia entre el diámetro del cilindro y el del pistón) se introduce en función de la presión media. $\Delta D = D_c - D_p$
Condiciones iniciales	No se pueden especificar. Ver condiciones iniciales del elemento Presión/Temperatura.

 **NOTA:** *Adopta el diámetro y los datos de posición y de velocidad introducidos para el elemento Pistón, al cual se encuentra unido con una conexión especial.*

• Grupo **Tobera** 

TOBERA DE ORIFICIO EN ASIENTO (BÁSICA) 	
Función	Reproduce el funcionamiento de una tobera cuyos orificios de inyección son taponados por la aguja.
Nudos	Hidráulicos: 2 Eléctricos: 1 Especiales: 1 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. La tobera adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). La tobera posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la tobera. - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la tobera. ○ <u>Cálculo de la pulverización:</u> Se eligen las fórmulas empíricas con las que calcular: <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño de la gota - Ángulo del cono de inyección - Profundidad de penetración ○ <u>Número de orificios de inyección</u> ○ <u>Diámetro del orificio de inyección:</u> Corresponde a la variable $D_{orificio}$ de la FIGURA 2.7. ○ <u>Diámetro de la aguja en los orificios de inyección:</u> Corresponde a la variable D_{aguja} de la FIGURA 2.7. ○ <u>Ángulo del asiento de aguja:</u> Corresponde a la variable $\alpha_{asiento}$ de la FIGURA 2.7. ○ <u>Modelo de flujo a través de los orificios:</u> Se puede escoger entre: <ul style="list-style-type: none"> - Calculado por el programa. - Definido por el usuario. Se puede configurar a partir del área de paso efectiva o del flujo volumétrico inyectado. En ambas opciones se puede aplicar un factor de escala a dichos valores, los cuales se introducen tabulados en función del desplazamiento de la aguja.
Condiciones iniciales	No se pueden especificar.

 **NOTA:** Se une a un elemento del grupo *Aguja* con una conexión especial. El nudo hidráulico de entrada estará unido a un elemento del grupo *Volumen*, que representa la cavidad bajo la aguja (volumen

residual). El nudo hidráulico de salida estará unido a un elemento del grupo Condición de contorno, que establece las condiciones físicas en la cámara de combustión del cilindro.

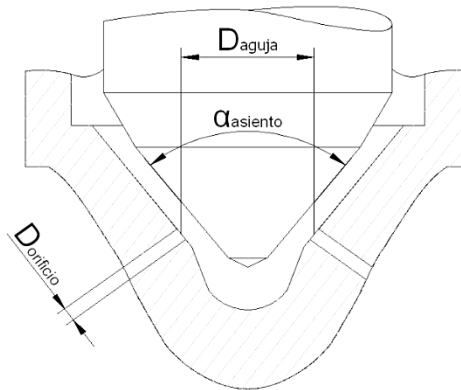


FIGURA 2.7 Tobera de orificio en asiento (básica)



• Grupo Pistón

PISTÓN ESTÁNDAR	
Función	Constituye un pistón hidráulico estándar.
Nudos	Hidráulicos: 2 Mecánicos: 6 Eléctricos: 1 Especiales: 3
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Cuerpo del pistón:</u> Se puede escoger entre: <ul style="list-style-type: none"> - Rígido. El cuerpo posee un grado de libertad y no existe deformación entre sus extremos. Por tanto, el desplazamiento relativo y la velocidad en los nudos de entrada y de salida serán iguales. - Elástico. El cuerpo se puede deformar axialmente entre los nudos de entrada y salida. La rigidez y la amortiguación del pistón están determinados por la geometría y el material del mismo. ○ <u>Masa:</u> Comprende la masa del pistón y el 33% de la masa del muelle unido. ○ <u>Carrera del pistón:</u> Máximo desplazamiento del émbolo. ○ <u>Sección transversal:</u> Se define por su diámetro o superficie en los nudos de entrada y de salida. ○ <u>Modelo de contacto:</u> Queda caracterizado por la rigidez y el amortiguamiento de parada del pistón en los nudos de entrada y de salida. Puede ser: <ul style="list-style-type: none"> - Lineal - Pseudo-lineal - No lineal

Condiciones iniciales	La posición y la velocidad (ambas relativas) para el nudo de entrada y el de salida en la dirección x . Si el cuerpo del pistón es rígido, ambas magnitudes serán iguales en el nudo de entrada y de salida. Ver condiciones iniciales del elemento Presión/Temperatura.
-----------------------	--

☞ **NOTA:** *El pistón rígido posee un grado de libertad (traslación en la dirección x), siendo de dos para el pistón elástico (traslación en la dirección x para el nudo de entrada y para el de salida, ambos por separado). Las conexiones hidráulica y mecánica, los parámetros de entrada y de salida y las condiciones iniciales están referidas a la dirección relativa x .*

• Grupo **Válvula** 

VÁLVULA DE CONTROL TEMPORIZADO 	
Función	Modela el comportamiento de una válvula de dos vías.
Nudos	Hidráulicos: 2 Eléctricos: 1 
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Propiedades del fluido:</u> Selección de las propiedades del fluido entre cuatro opciones: <ul style="list-style-type: none"> - Globales. La tobera adopta las propiedades físicas (constantes o variables) aplicadas al sistema. - Locales (base de datos). La válvula posee sus propias características fluidas, distintas a las del sistema y variables con la presión y/o temperatura. Es necesario especificar la temperatura inicial del fluido. - Locales (constantes). El usuario determina el valor del módulo de compresibilidad, la densidad (en función de la presión), la viscosidad cinemática y la tensión superficial del fluido. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la válvula. - Locales (variables). El usuario determina las propiedades indicadas anteriormente en función de la presión y de forma tabulada. Con esta opción sólo se calculan transformaciones isotermas en la válvula. ○ <u>Temporizado de la válvula:</u> Está caracterizado por: <ul style="list-style-type: none"> - Estado inicial. La válvula está abierta o cerrada. - Evaluación temporal. La apertura/cierre de la válvula y el área de paso efectiva (ambas cambian en función del tiempo/ángulo del eje cigüeñal) se pueden definir en una escala de tiempo absoluta o relativa, ésta última en relación al estado previo. - Estado de referencia. La evolución del estado de la válvula y del área de paso efectiva se puede referenciar al inicio del cálculo o al tiempo/ángulo del eje cigüeñal antes de alcanzar el punto muerto superior (PMS).

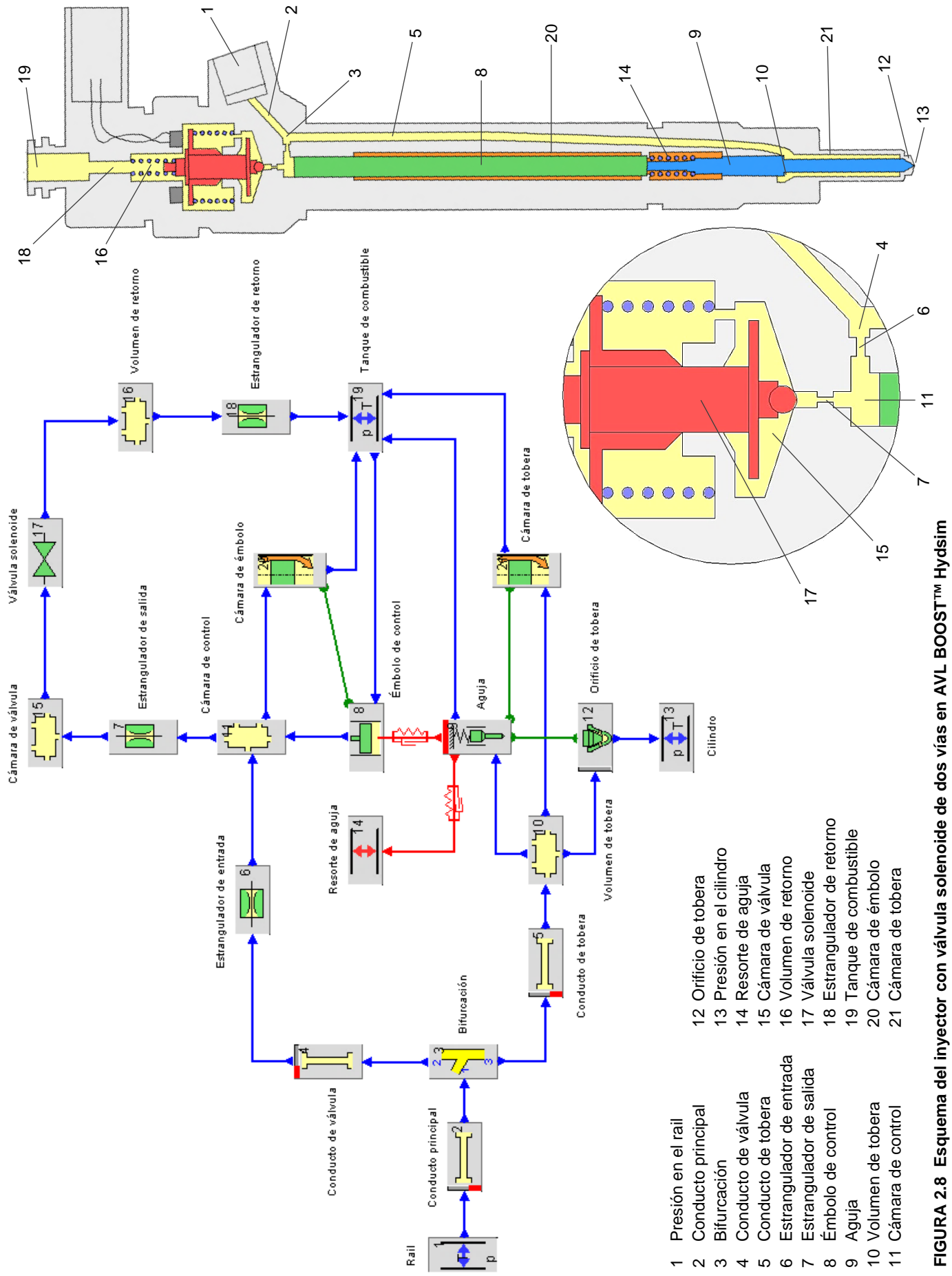
	<ul style="list-style-type: none"> ○ <u>Tiempo/Ángulo de apertura y cierre de la válvula:</u> Se especifica el instante en el que comienza la apertura y el cierre de la válvula. ○ <u>Área de paso efectiva en la apertura y cierre de la válvula:</u> Se introduce en función del tiempo/ángulo del eje cigüeñal y puede estar afectada por un factor de escala.
Condiciones iniciales	No se pueden especificar.

12. CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE INYECTOR

El modelo que simula el funcionamiento de un inyector Common Rail de válvula solenoide está constituido por la debida unión de los siguientes elementos:

NOMBRE	GRUPO	ELEMENTO
Rail	Condición de contorno	Presión/Temperatura
Cilindro	Condición de contorno	Presión/Temperatura
Tanque de combustible	Condición de contorno	Presión/Temperatura
Resorte de aguja	Condición de contorno	Mecánica
Conducto principal	Conducto	Conducto de Laplace
Conducto de válvula	Conducto	Conducto de Laplace
Conducto de tobera	Conducto	Conducto de Laplace
Volumen de tobera	Volumen	Volumen estándar
Cámara de control	Volumen	Volumen estándar
Cámara de válvula	Volumen	Volumen estándar
Volumen de retorno	Volumen	Volumen estándar
Bifurcación	Bifurcación	Te (ángulo)
Estrangulador de entrada	Orificio	Orificio estándar
Estrangulador de salida	Orificio	Orificio estándar
Estrangulador de retorno	Orificio	Orificio estándar
Aguja	Aguja	Aguja estándar
Cámara de tobera	Fuga	Espacio anular
Cámara de émbolo	Fuga	Espacio anular
Orificio de tobera	Tobera	Tobera de orificio en asiento (básica)
Émbolo de control	Pistón	Pistón estándar
Válvula solenoide	Válvula	Válvula de control temporizado

En este capítulo se detallan todos los parámetros con los que se configura el siguiente modelo:



- 1 Presión en el rail
- 2 Conducto principal
- 3 Bifurcación
- 4 Conducto de válvula
- 5 Conducto de tobera
- 6 Estrangulador de entrada
- 7 Estrangulador de salida
- 8 Émbolo de control
- 9 Tanque de combustible
- 10 Volumen de tobera
- 11 Cámara de control
- 12 Orificio de tobera
- 13 Presión en el cilindro
- 14 Resorte de aguja
- 15 Cámara de válvula
- 16 Volumen de retorno
- 17 Válvula solenoide
- 18 Estrangulador de retorno
- 19 Tanque de combustible
- 20 Cámara de émbolo
- 21 Cámara de tobera

FIGURA 2.8 Esquema del inyector con válvula solenoide de dos vías en AVL BOOST™ Hydsim

• Grupo **Condición de contorno**

Presión/Temperatura

Nombre del elemento	Incremento de tiempo/ángulo	Factor de escala	Presión y temperatura frente al tiempo/ángulo de referencia		
Rail	0 s	1	0 s	1500 bar	293'15 K
Cilindro	0 s	1	0 s	100 bar	293'15 K
Tanque de combustible	0 s	1	0 s	1'5 bar	293'15 K

Parámetros de salida	▪ Presión del fluido
----------------------	----------------------

Mecánica

Nombre del elemento	Variable	Incremento de tiempo/ángulo	Factor de escala	Posición/Velocidad frente al tiempo/ángulo de referencia	
Resorte de aguja	Posición en la dirección x	0 s	1	0 s	0 m

Parámetros de salida	En este caso no se selecciona ninguno
----------------------	---------------------------------------

• Grupo **Conducto**

Elemento	Propiedades del fluido	Pérdidas por fricción	Longitud (mm)	Diámetro hidráulico (mm)
Conducto principal	Globales	Modelo no estacionario de Melcher	200	2'4
Conducto de válvula			70	2'4
Conducto de tobera			110	2'4

Parámetros de salida	En este caso no se selecciona ninguno
----------------------	---------------------------------------

• Grupo **Volumen**

Elemento	Propiedades del fluido	Volumen inicial	Cavitación	
			Presión de vapor	Extensión inicial
Volumen de tobera	Globales	170 mm ³	100 Pa	0 mm ³
Cámara de control		20 mm ³	100 Pa	0 mm ³
Cámara de válvula		15 mm ³	100 Pa	0 mm ³
Volumen de retorno		300 mm ³	100 Pa	0 mm ³

Condiciones iniciales	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Presión: 1500 bar, excepto <i>Volumen de retorno</i>, que toma 1'5 bar ◆ Temperatura: 293'15 K
-----------------------	---

Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presión del fluido ▪ Volumen de vapor por cavitación
----------------------	---

• Grupo **Bifurcación**

Elemento	Ángulo entre las secciones 1 y 2	Elementos unidos	Coefficiente de pérdidas
Bifurcación	60°	Sección 1: Conducto principal Sección 2: Conducto de válvula Sección 3: Conducto de tobera	Calculado por el programa

Parámetros de salida	En este caso no se selecciona ninguno
----------------------	---------------------------------------

• Grupo **Orificio**

Elemento	Propiedades del fluido	Área/Diámetro de la sección transversal		Coefficiente de fricción en la contracción	
		Conducto	Contracción	Nº Reynolds crítico	Coefficiente de pérdidas
Estrangulador de entrada	Globales	0'8 mm ²	0'046 mm ²	1000	1'83
Estrangulador de salida		0'8 mm ²	0'057 mm ²	1000	1'83
Estrangulador de retorno		2'54 mm ²	1 mm ²	1000	1'6

Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo volumétrico de combustible en el nudo de entrada en función del tiempo ▪ Flujo volumétrico acumulado en el nudo de entrada
----------------------	---

☞ Para que la aguja permita la inyección de combustible es preciso que la sección transversal del estrangulador de salida sea mayor que la del estrangulador de entrada.

• Grupo **Aguja**

Elemento	Grados de libertad	Diámetro del asiento de aguja	Masa	Presión en el asiento de aguja
Aguja	1 (x)	1'7 mm	2'6 g	Constante (modelo básico)
	Cuerpo de la aguja	Diámetro de la guía de aguja	Modelo de contacto	
	Rígido	4 mm	Lineal	
			Rigidez	Amortiguamiento
		4·10 ⁵ N/mm	400 N·s/m	

Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posición relativa del nudo de entrada en la dirección x ▪ Fuerza hidráulica sobre la aguja
----------------------	--

☞ La posición/velocidad establecida como condición de contorno será igual en el nudo de entrada y en el de salida al seleccionar el cuerpo de la aguja como *Rígido*.

• Grupo **Fuga**

Elemento	Diámetro del pistón	Número de pistones	Longitud inicial de la oquedad	Variación en la longitud de la oquedad	Cálculo de la oquedad	
Cámara de tobera	4 mm	1	11 mm	Variable	Definido por el usuario	
					Presión media	ΔD
					1 bar	0'004 mm
					1000 bar	0'007 mm

Elemento	Diámetro del pistón	Número de pistones	Longitud inicial de la oquedad	Variación en la longitud de la oquedad	Cálculo de la oquedad	
Cámara de émbolo	4'3 mm	1	15 mm	Constante	Definido por el usuario	
					Presión media	ΔD
					1 bar	0'003 mm
					1000 bar	0'006 mm

Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo volumétrico de combustible en función del tiempo ▪ Flujo volumétrico acumulado
----------------------	---

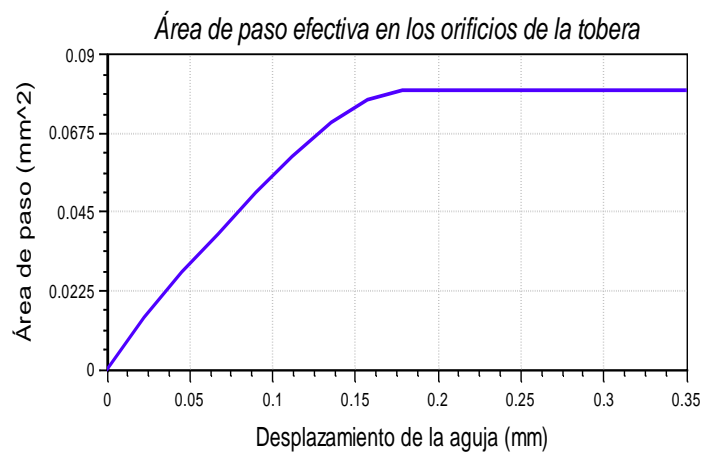
Las propiedades del fluido se seleccionan como *Globales*.

• Grupo **Tobera**

Elemento	Propiedades del fluido	Diámetro del orificio de inyección	Nº de orificios de inyección	Ángulo del asiento de aguja
Orificio de tobera	Globales	0'16 mm	4	55°
		Diámetro de la aguja en los orificios de inyección	Modelo de flujo a través de los orificios	
		0'9 mm	Definido por el usuario (pág. 56)	

Cálculo de la pulverización	
Tamaño de la gota	Correlación de <i>Elktob</i>
Ángulo del cono de inyección	Correlación de <i>Arai, Tabata</i>
Profundidad de penetración	Correlación de <i>Arai, Tabata, Hiroyasu</i>

Modelo de flujo a través de los orificios	
Desplazamiento de la aguja (mm)	Área de paso (mm ²)
0	0
0'022	0'0152
0'045	0'0279
0'067	0'039
0'09	0'0506
0'112	0'0608
0'135	0'0708
0'157	0'0774
0'178	0'0797
0'2	0'08
0'22	0'08
0'35	0'08



Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo volumétrico de combustible en función del tiempo ▪ Flujo volumétrico acumulado ▪ Área de paso efectiva ▪ Flujo másico de combustible en función del tiempo ▪ Flujo másico acumulado ▪ Diámetro medio Sauter ▪ Ángulo del cono de inyección ▪ Profundidad de penetración ▪ Potencia de inyección ▪ Presión en los orificios de inyección ▪ Duración de la inyección ▪ Velocidad media del flujo ▪ Número de Reynolds
----------------------	---

• Grupo Pistón

Elemento	Cuerpo del pistón	Masa	Sección transversal		
Émbolo de control	Rígido	10'7 g	Diámetro		
			Nudo de entrada	Nudo de salida	
			4'3 mm	4'3 mm	
		Carrera del pistón	Modelo de contacto		
		0'21 mm	Lineal		
			Rigidez	Amortiguamiento	
			0 N/mm	0 N·s/m	
10 ⁵ N/mm	100 N·s/m				

Condiciones iniciales	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Posición relativa del nudo de entrada en la dirección x: $-8'8 \cdot 10^{-5}$ m ◆ Posición relativa del nudo de salida en la dirección x: $-8'8 \cdot 10^{-5}$ m
Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posición relativa del nudo de entrada en la dirección x ▪ Fuerza resultante sobre el pistón

• Grupo **Válvula**

Nombre del elemento	Propiedades del fluido	Temporizado de la válvula		
Válvula solenoide	Globales	Estado inicial	Evaluación temporal	Estado de referencia
		Cerrado	Absoluta	Inicio del cálculo

Área de paso efectiva en la apertura y cierre de la válvula:

	Tiempo/Ángulo del eje cigüeñal (ms)	Área de paso (mm ²)
Apertura de la válvula	0	0
	0'138	0'05892
Cierre de la válvula	0	0'05892
	0'136	0

Tiempo /Ángulo de apertura y cierre de la válvula:

	Tiempo/Ángulo de apertura y cierre de la válvula
Apertura	1'5 ms
Cierre	2'1 ms

Parámetros de salida	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujo volumétrico de combustible en función del tiempo ▪ Flujo volumétrico en función del ángulo ▪ Flujo volumétrico acumulado ▪ Área de paso efectiva
----------------------	---

☞ El área de paso efectiva al inicio de la apertura es cero, ya que el estado inicial de la válvula es *Cerrado*. También será nula al finalizar el cierre.

CONEXIONES

• Conexión **Mecánica**

Conexión	Precarga (N)	Rigidez (N/m)	Amortiguamiento (N·s/m)	Área a presión
Aguja – Resorte de aguja	34	34900	20	Constante
Aguja – Émbolo de control	Constante	$2'5 \cdot 10^7$	1000	Constante

☞ Estas propiedades están referidas a la dirección x . Al seleccionar el área a presión como *Constante*, ésta se toma de los elementos conectados, en este caso la Aguja y el Émbolo de control.

CONTROL DE LA SIMULACIÓN

Todos los cálculos se efectúan y almacenan en base al dominio temporal, tomando 1000 rpm como velocidad de referencia. Éstos y los siguientes parámetros se introducen en el apartado *Control* de la pestaña *Simulation*.

Motor			Solver (paso fijo)		
Tipo	Velocidad	Ángulo del eje cigüeñal al comienzo del cálculo	Paso de tiempo	Tiempo final de cálculo	Número de valores almacenados
4 cilindros	2000 rpm	0	$2 \cdot 10^{-7}$ s	0'005 s	300

☞ Al seleccionar un paso de tiempo fijo se emplea el método numérico explícito Runge-Kutta-Gill de 4^o orden.

PROPIEDADES GLOBALES DEL FLUIDO

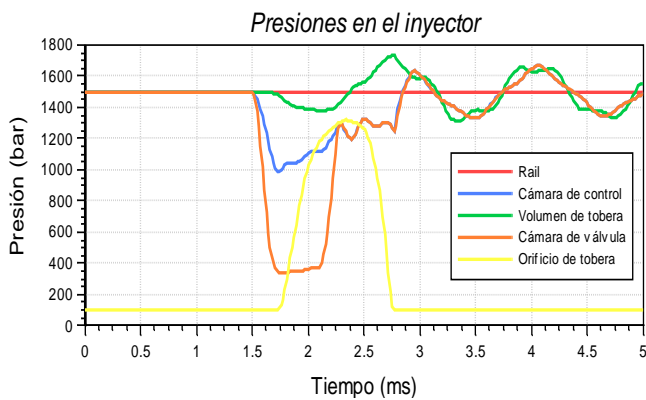
En todos los elementos del modelo que así lo permiten se seleccionan las propiedades del fluido como *Globales*. Los valores de las mismas se concretan en la pestaña *Model* y son los siguientes:

PROPIEDADES CONSTANTES	
Módulo de compresibilidad (N/mm ²)	1630
Densidad de referencia (kg/m ³)	865
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	1'7
Tensión superficial (N/m)	0'029
Presión de referencia (bar)	1

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor específico [J/(kg·K)]	1960
Coefficiente de dilatación térmica (1/K)	0'001
Conductividad térmica [W/(m·K)]	0'145
Temperatura de referencia (K)	293'15

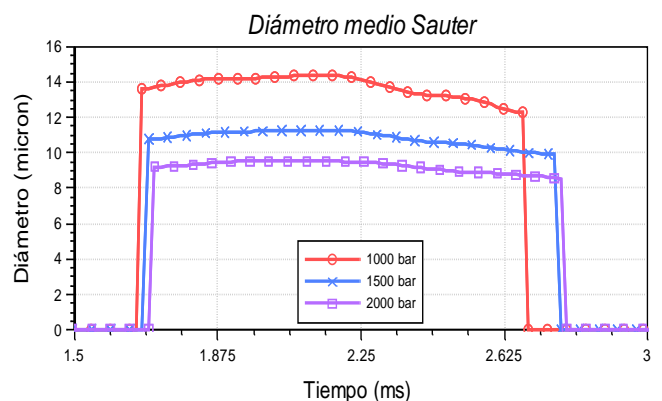
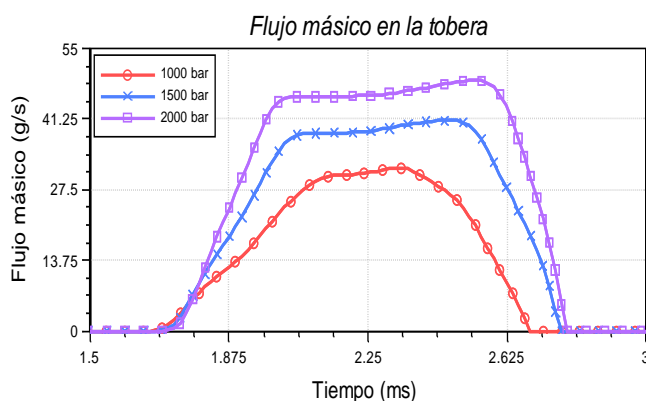
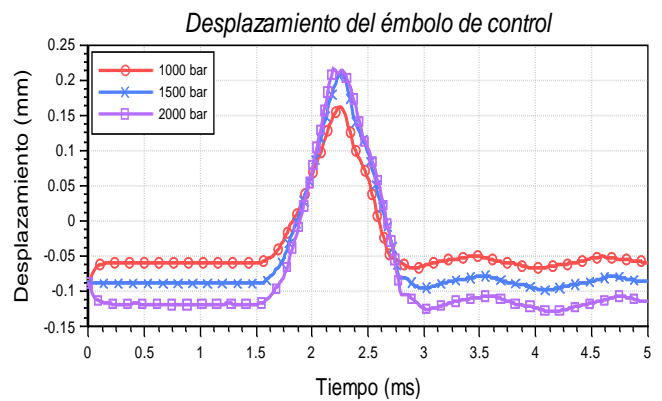
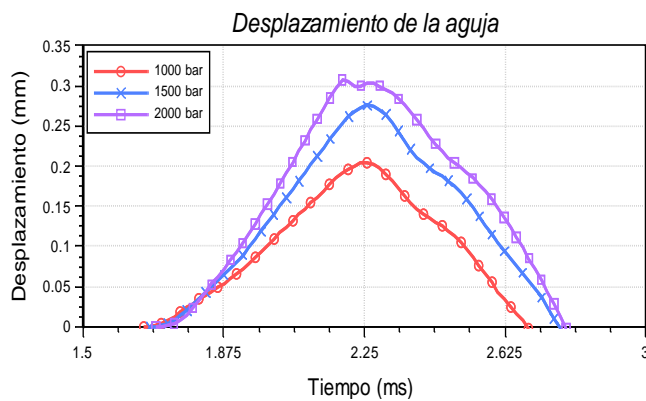
13. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tras configurar el modelo se ejecutan varias simulaciones, modificando el valor de determinados parámetros de entrada. En primer lugar, se representan los resultados obtenidos para diferentes presiones. Seguidamente, se realiza un estudio de sensibilidad con las propiedades fluidas del combustible.



Mientras que en el rail se mantienen constantes los 1500 bar, la presión se reduce en las cámaras de control y de válvula con la apertura del inyector. Esta tendencia es distinta en los orificios de la tobera, ya que éstos dejan de estar taponados por la aguja.

Los siguientes gráficos contrastan la respuesta del sistema ante una presión de 1000, 1500 y 2000 bar en el rail. A medida que crece, aumentan el desplazamiento de la aguja y del émbolo de control, así como el flujo másico inyectado. Por el contrario, disminuye el diámetro de las gotas de carburante, consiguiéndose una mejor pulverización con la presión más elevada.



13.1. Análisis de sensibilidad

A día de hoy, la mejora de la eficiencia energética y el desarrollo de nuevos carburantes suponen, para el sector de la automoción, prioridades a la hora de diseñar los motores actuales. A nivel mundial se están aprobando normativas que fomentan el uso de fuentes de energía alternativas al petróleo. Éste es el caso de los biocombustibles, que ya están presentes en el carburante en niveles comprendidos entre el 5 y el 10% en volumen.

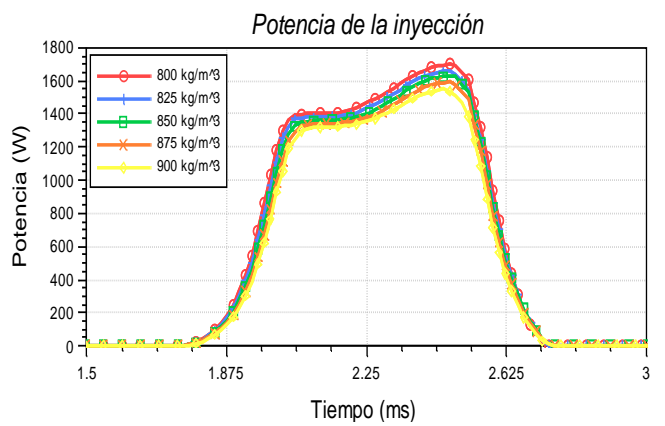
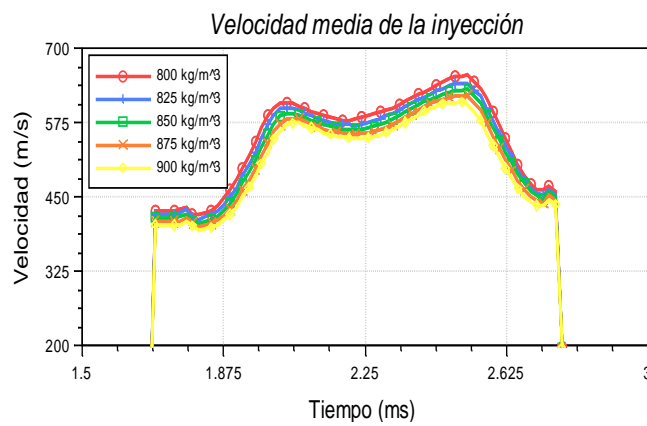
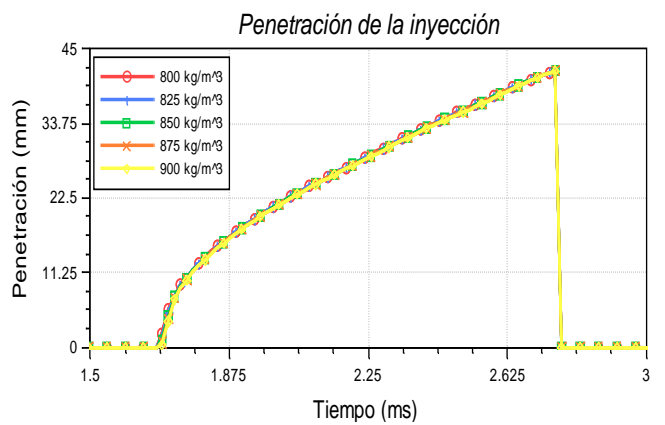
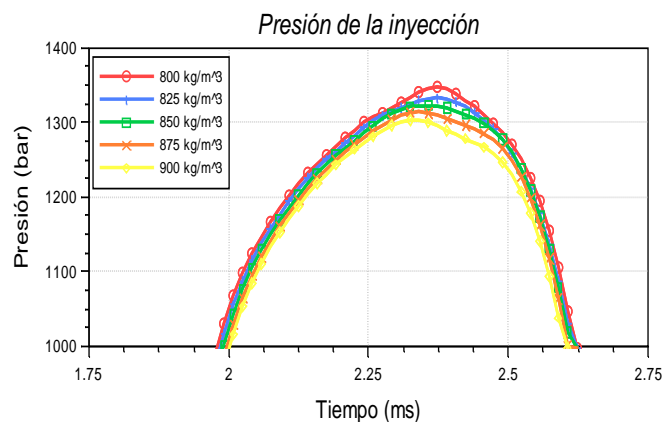
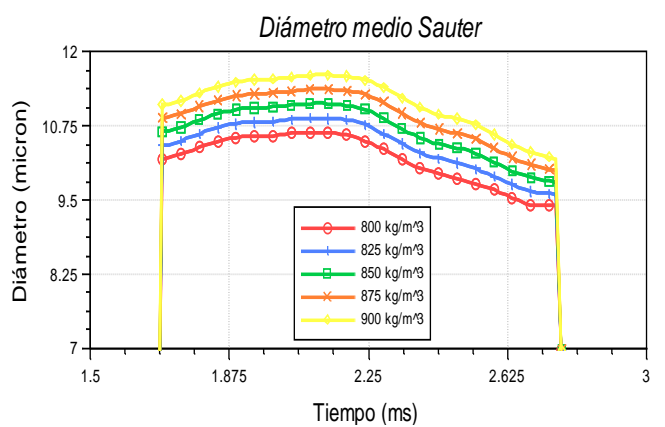
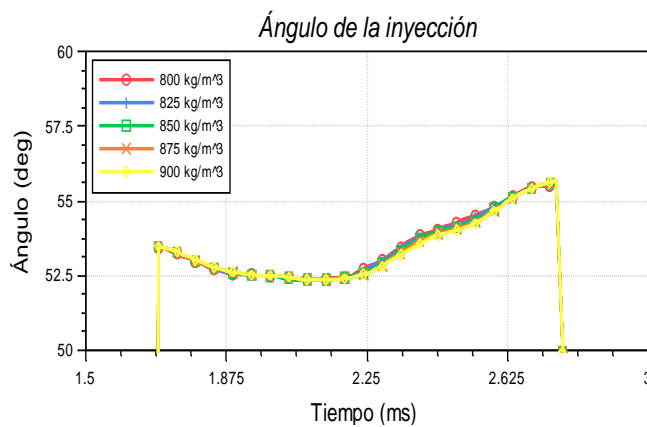
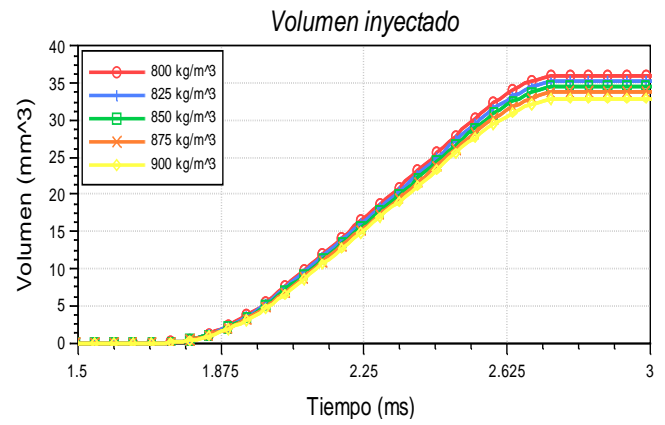
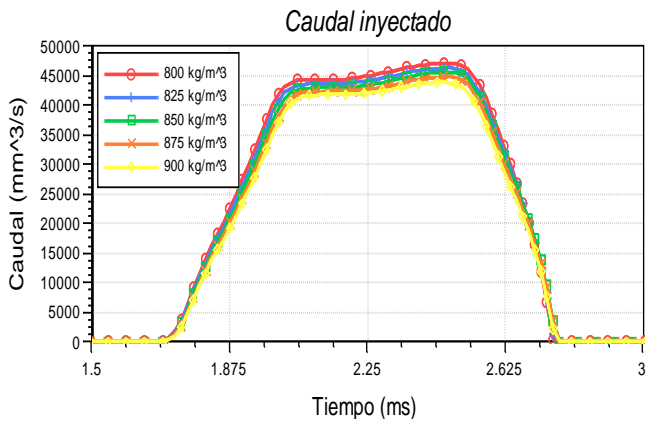
Cada biocombustible posee propiedades distintas al resto y al gasoil, lo cual condiciona la forma en que se produce la inyección en el cilindro. Para valorar esta influencia se realiza un estudio de sensibilidad, teniendo como referencia el rango en el que varían la densidad, la viscosidad cinemática, la tensión superficial y el módulo de compresibilidad de tres carburantes diferentes. Éstos son el gasoil puro sin aditivos, una mezcla al 15% en volumen de bioetanol con gasoil y biodiesel puro obtenido de aceite de colza [1,2].

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES ESTUDIADOS A 20°C				
Nombre	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Módulo de compresibilidad (N/mm ²)
Bioetanol + Gasoil	827'4	3'75	0'0256	1387'75
Gasoil	834'5	4'15	0'0262	1441'37
Biodiesel (aceite de colza)	880'3	6'78	0'0330	1625'03

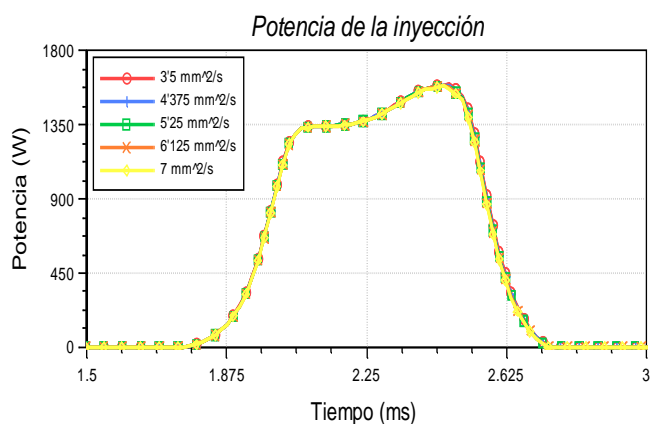
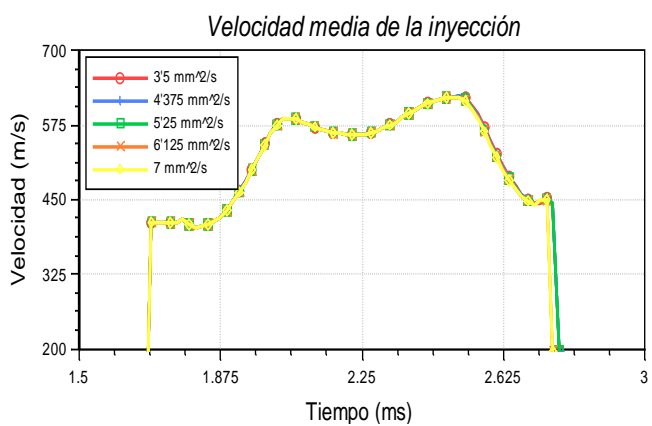
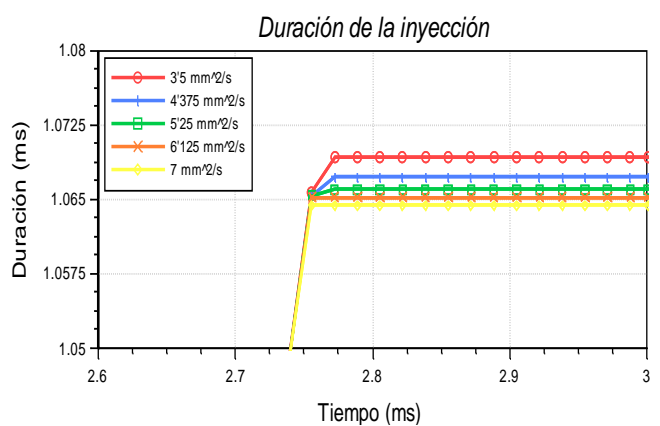
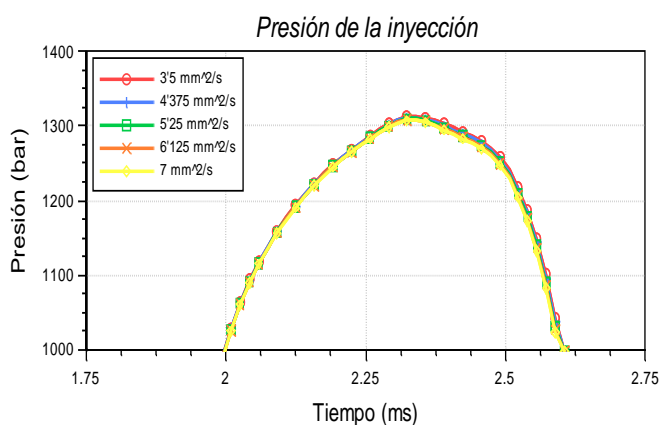
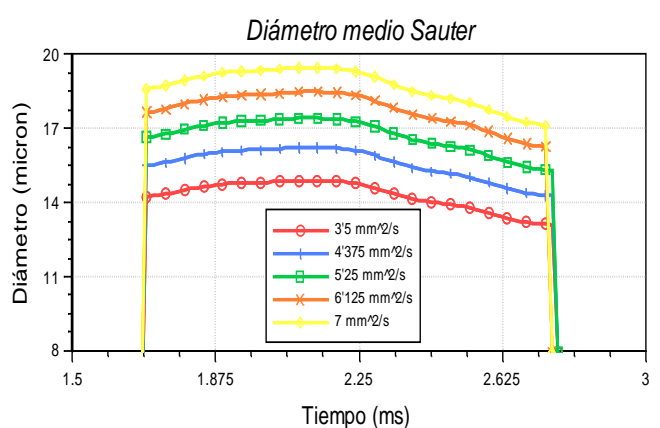
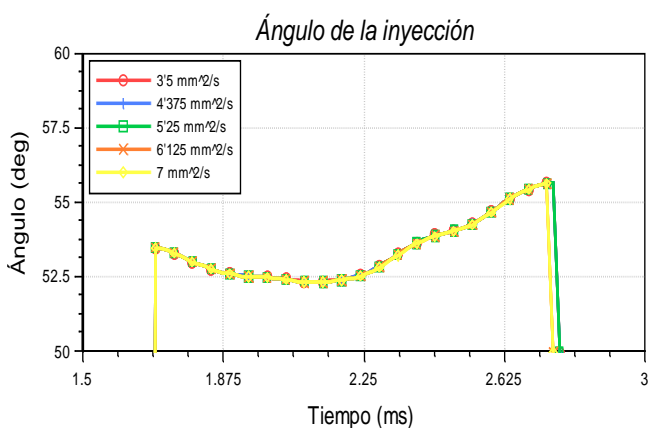
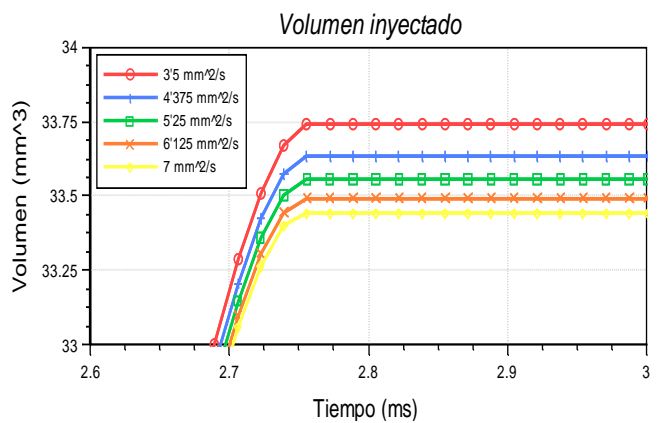
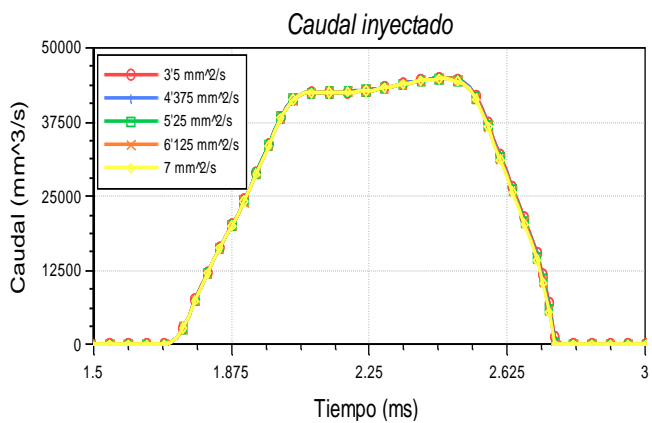
Los valores ensayados para cada propiedad se escogen entre el máximo y el mínimo que ésta alcanza en la terna de combustibles anteriores. En todas las simulaciones se mantienen constantes el resto de propiedades definidas en la página 58, así como todos los parámetros del modelo especificados en el capítulo 12. La presión en el rail será, por lo tanto, de 1500 bar.

VALORES EVALUADOS PARA CADA PROPIEDAD			
Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Módulo de compresibilidad (N/mm ²)
800	3'5	0'025	1300
825	4'375	0'0275	1375
850	5'25	0'03	1450
875	6'125	0'0325	1525
900	7	0'035	1600

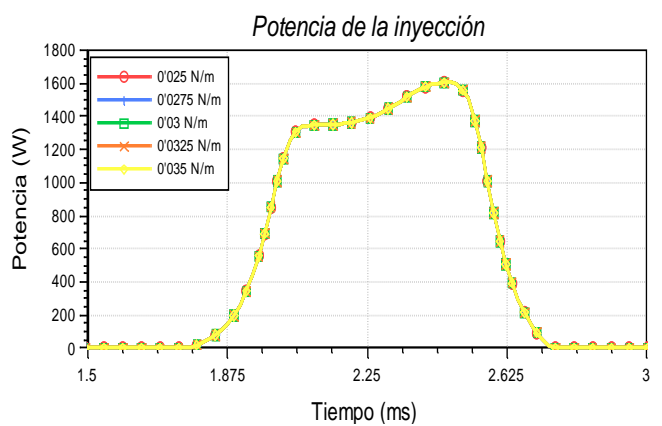
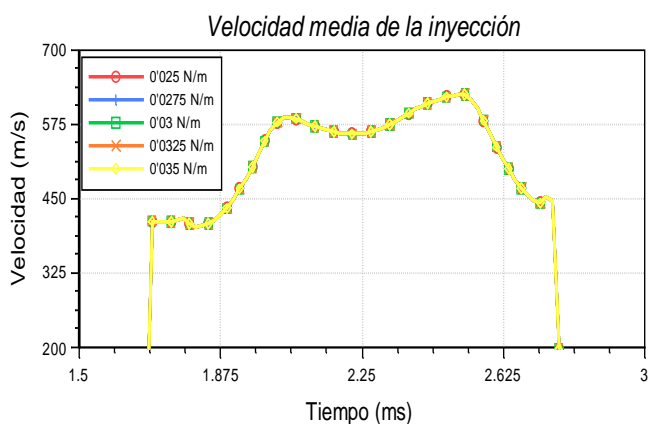
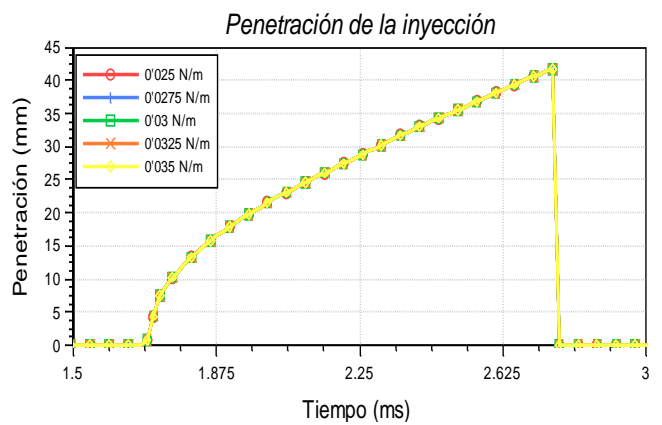
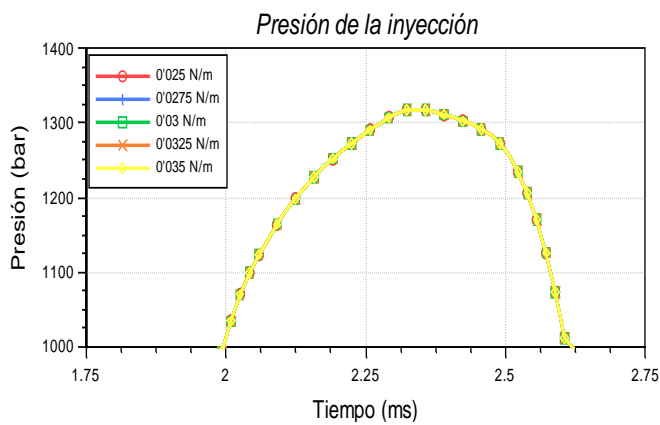
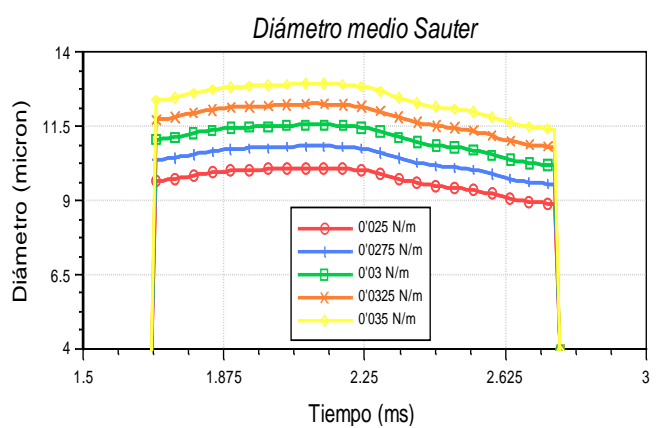
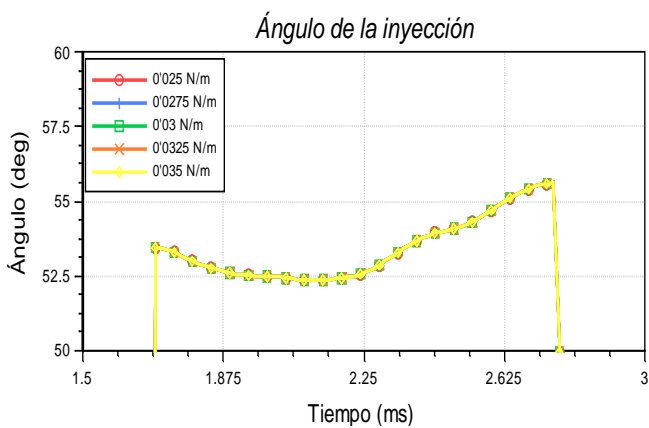
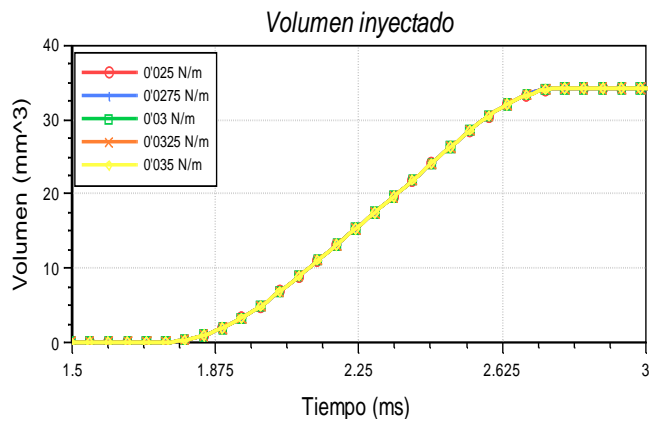
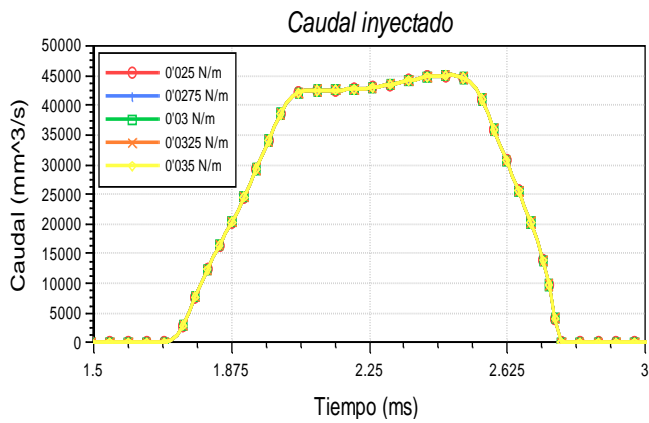
• DENSIDAD



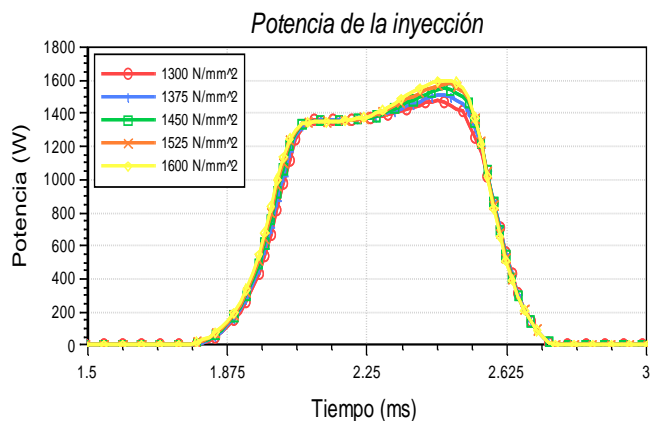
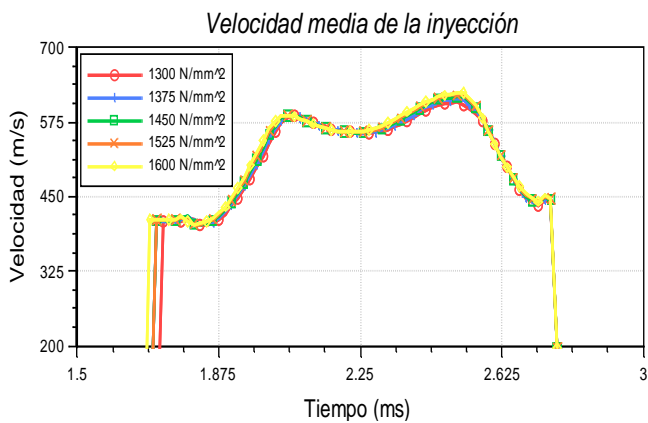
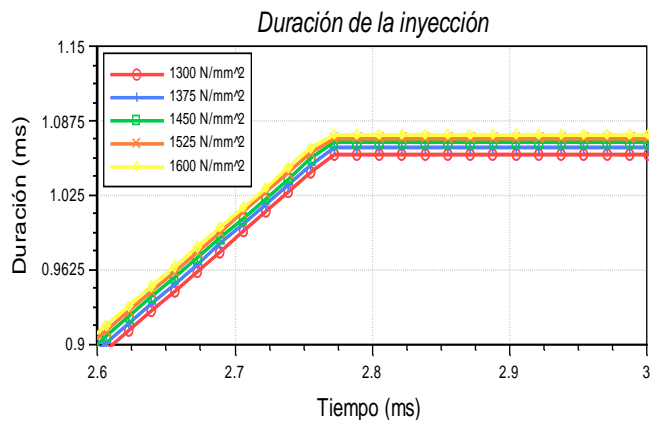
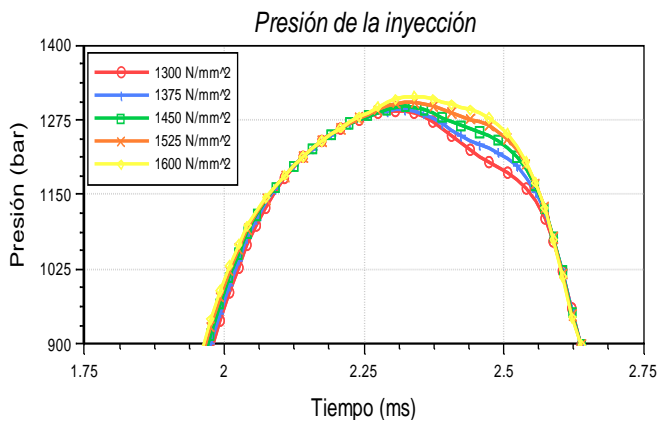
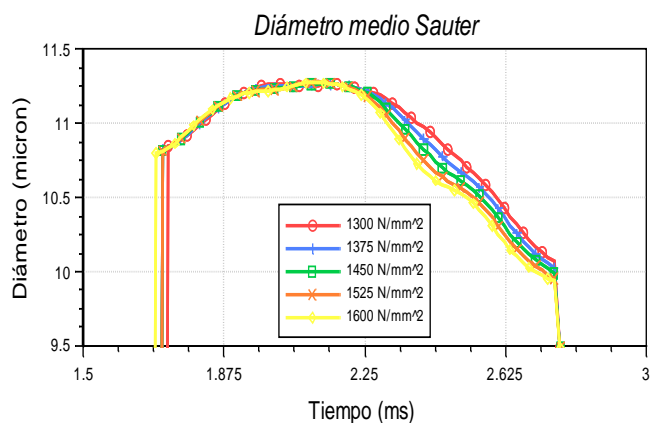
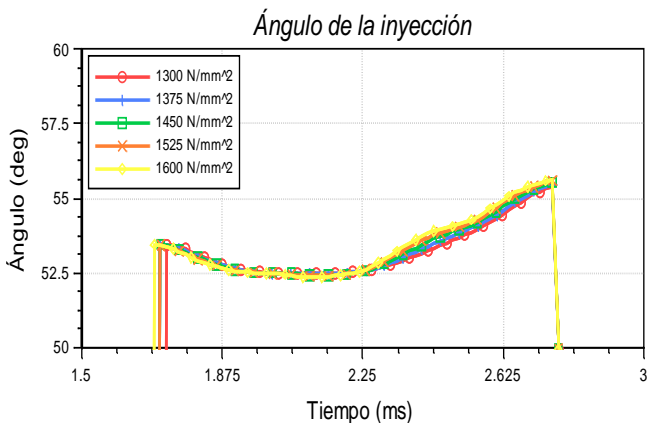
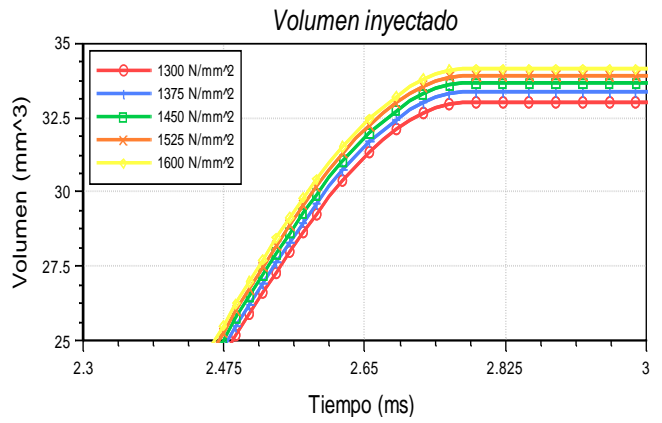
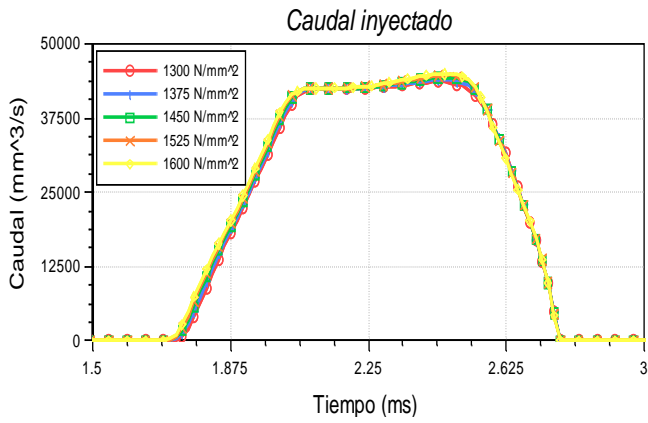
• VISCOSIDAD CINEMÁTICA



• TENSIÓN SUPERFICIAL



• MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD



DENSIDAD

Las gráficas muestran que un aumento en la densidad del combustible produce una reducción en el caudal y volumen inyectados; así como en la presión, la velocidad media y la potencia de la inyección. Por el contrario, tiene lugar un incremento considerable en el diámetro medio Sauter de las gotas pulverizadas. El ángulo y la penetración de la inyección prácticamente no se ven afectados.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Su efecto se observa en el volumen inyectado y en la presión y duración de la inyección, que disminuyen levemente ante un mayor valor de esta propiedad. La variación más destacada se distingue en el diámetro medio Sauter, aunque en este caso aumenta con la viscosidad cinemática. En el resto de parámetros no se advierte ninguna modificación importante en las curvas.

TENSIÓN SUPERFICIAL

La influencia de la tensión superficial no es relevante sobre los parámetros de la inyección, pues no se observan cambios significativos en comparación con el resto de propiedades evaluadas. La única alteración se localiza en las curvas del diámetro medio Sauter, que incrementan su valor conforme lo hace la tensión superficial. La tendencia de este parámetro también se identifica en la densidad y en la viscosidad cinemática.

MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD

Al contrario de lo que sucede con la densidad y la viscosidad cinemática, un aumento en el módulo de compresibilidad da lugar a un mayor volumen inyectado de combustible y a una disminución en el diámetro medio Sauter. La duración de la inyección también se incrementa, así como el ángulo, la presión y la potencia al final de la apertura del inyector.

ABREVIATURAS

		Origen
ASR	Control de tracción	<i>Anti-Slip Regulation</i>
CO	Monóxido de carbono	
DI	Inyección directa	<i>Direct Injection</i>
HC	Hidrocarburos	
IDI	Inyección indirecta	<i>In-Direct Injection</i>
EDC	Regulación electrónica Diesel	<i>Electronic Diesel Control</i>
ESG	Control electrónico del cambio	
ESP	Programa de control de estabilidad	<i>Electronic Stability Program</i>
MEC	M otor de E ncendido por C ompresión	
NO _x	Óxidos de nitrógeno	
UCE	U nidad de C ontrol E lectrónica	
PMS	P unto M uerto S uperior	
PMI	P unto M uerto I nferior	

FIGURAS Y GRÁFICAS

Parte de las figuras que aparecen a lo largo del TFG se han extraído de libros de instrucción técnica y manuales de Bosch, Audi y Volkswagen. Otras han sido elaboradas con Autodesk[®] AutoCAD[®] 2014 y Autodesk[®] Inventor[®] Professional 2014.

Las gráficas incluidas en la primera parte del TFG se han realizado con Microsoft[®] Excel[®] 2010; las presentes en la segunda parte son generadas por AVL BOOST[™] Hydsim.

BIBLIOGRAFÍA

- ♦ *Sistema de inyección de acumulador Common Rail, Diesel*. Editorial Robert Bosch GmbH, 1999.
- ♦ *Sistema de inyección Diesel por acumulador Common Rail*. Editorial Robert Bosch GmbH, 2005.
- ♦ *Regulación electrónica Diesel (EDC)*. Editorial Robert Bosch GmbH, 2002
- ♦ Sánchez, E. (2009). *Sistemas auxiliares del motor*. Editorial Macmillan Iberia, S.A.
- ♦ Bartsch, C. (2005). *Revolución del motor Diesel: Desarrollo de la inyección directa*. Editorial Ceac S.A.
- ♦ Manuales del usuario de AVL BOOST™ Hydsim (versión 2013.1).
- ♦ [1] E. Torres Jiménez, M. Svoljšak-Jerman, A. Gregorc, I. Lisec, M.P. Dorado, B. Kegl. *Physical and Chemical Properties of Ethanol–Biodiesel Blends for Diesel Engines*, Energy Fuels, 24, (2010), 2002-2009.
- ♦ [2] E. Torres Jiménez, M. Svoljšak-Jerman, A. Gregorc, I. Lisec, M.P. Dorado, B. Kegl. *Physical and chemical properties of ethanol diesel fuel blends*, Fuel, 90, (2010), 795-802.