



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

  
motores térmicos

TRABAJO FINAL DE GRADO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA

**DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR DE  
TASA DE INYECCIÓN AGUAS ARRIBA PARA  
INYECTORES GDI UTILIZANDO MEDIDAS  
INSTANTÁNEAS DE PRESIÓN**

Autor: César Augusto Fung Gásperi

Tutor: PhD. Jaime Gimeno García

Fecha: Septiembre 2020



## RESUMEN

El proyecto realizado se enfocó en el desarrollo de un sistema de medida de tasa de inyección o tasímetro para los inyectores GDI (Gasoline Direct Injection), o inyectores con funcionamiento similar, que sea aguas arriba respecto a la posición del inyector. Este sistema puede ser utilizado con cualquier tipo de inyector debido a que cuenta con un puerto adaptable a los distintos inyectores de características similares (mediante el diseño de un casquillo específico). El sistema tiene como función la medición de presiones en distintos puntos de la línea de inyección para, a través de un procesador de datos y las presiones, poder calcular la tasa de inyección.

Ya existen los medidores de tasa convencionales, los cuales miden esta variable aguas abajo del inyector. El sistema propuesto traería mejoras en cuanto a la exactitud de la medida de la tasa de inyección, en la complejidad del montaje experimental y del tiempo requerido para la toma de la medida, ya que se puede trabajar a una presión cualesquiera, así como realizar los ensayos y las medidas al mismo tiempo. Debido a las características del tasímetro convencional (está lleno del líquido inyectado y a una cierta contrapresión) no permite replicar las condiciones del gas ambiente a las que será inyectado el combustible, también se puede ocasionar una onda de contrapresión que modifique las medidas obtenidas a través de los sensores y los resultados finales por el modo de funcionamiento de éste, el nuevo sistema propuesto puede instalarse directamente en el sistema de inyección de un motor instrumentado.

La realización del diseño se divide en:

1. Evaluación preliminar del concepto de medida. Se realizaron simulaciones 1D de dinámicas de ondas hidráulicas en modelos sencillos de tasímetros, a través del software Simulink.
2. Diseño hidráulico del sistema de medida. Una vez comprobado el correcto funcionamiento de estos modelos se procedió a hacer más realista el modelo, se cambiaron las dimensiones y configuraciones de los distintos elementos del sistema como lo son los acumuladores, las líneas de inyección, los puntos de medición de presiones, y se dividió en elementos finitos para evaluar la evolución de las gráficas a lo largo del sistema y poder decidir los puntos óptimos donde realizar dichas medidas. Todo este proceso se realizó con el software Simulink.

3. Diseño mecánico del sistema de medida. A partir de las dimensiones obtenidas del diseño hidráulico se diseñó el acumulador principal con forma cilíndrica, formado por el raíl y la línea corta, al cual se le acoplaron por el extremo superior la tubería por donde llega el fluido, por el extremo inferior el inyector y los sensores de presión en los puntos elegidos mediante las simulaciones de los modelos en Simulink. Ya que el acumulador está sometido a presiones altas se realizó un estudio estático con elementos finitos para evaluar si el ensamblaje soporta las condiciones de operación a las que será sometido. El diseño y estudio se realizaron con el software SolidWorks.

## ABSTRACT

The present project is focused on the development of an injection rate meter system or flow rate meter for GDI (Gasoline Direct Injection) injectors, or injectors with a similar functioning, namely that they are upstream relative to the injector's position. This system can be used with any injector type because it has a port that can adapt, through the design of a specific bushing, to different injectors with similar characteristics. The function of this system is to measure the pressure at different points in the injection line to, using a processor of data and pressures, calculate the injection rate.

Conventional rate meters already exist, and these types of rate meters measure the variable downstream of the injector. Because of the proposed system's ability to work at any pressure, and because trials and measurements could occur simultaneously, it would bring improvements regarding the accuracy of the injection rate measurement, the complexity of the experimental equipment assemblage, and the time required to take a measurement.

The characteristics of the conventional rate meter (it is filled with the injected liquid and at a certain counterpressure), do not allow it to replicate the ambient gas conditions in which the fuel is injected. Additionally, given this meter's functioning mode, a counterpressure wave could be created that would modify the measurements obtained through the sensors and the results. The proposed new system can be installed directly in the injection system of an instrumented engine.

The designing process can be divided into three main stages:

1. A preliminary evaluation of the measurement concept. 1D hydraulic waves dynamic simulations were made in simple models of flow rate meters using Simulink software.
2. The hydraulic design of the measurement system. Once the accurate functioning of these models was verified, a more realistic model was created. This was done by changing the dimensions and configurations of the system's different elements, such as the accumulators, injection lines, and pressure measurement points. It was then divided into finite elements to evaluate the graphics' evolution throughout the system and to decide the optimum points where to take those measurements. This process was done using Simulink software.

3. The mechanical design of the measurement system. A cylinder-shaped principal accumulator was created using the dimensions obtained from the hydraulic design. The accumulator consists of a rail and a short line. To this accumulator a tube that allows fluid to come inside was added at the upper end, the injectors were added at the bottom end, and the pressure sensors were added at the optimum points that were determined via the Simulink models. Since the accumulator is exposed to high pressures, a static study with finite elements was conducted to evaluate if the assembly could resist the operational conditions it would be subjected to. The design and study were done using SolidWorks software.

## RESUM

El projecte realitzat va ser enfocat en el desenvolupament d'un sistema de mesura de taxa d'injecció o "tasímetro" per als injectors GDI (Gasoline Direct Injection), o injectors amb funcionament similar, que siga aigües amunt respecte la posició de l'injector. Aquest sistema pot ser utilitzat amb qualsevol tipus d'injector, degut al seu port adaptable als diferents injectors de característiques similars (mitjançant el disseny d'un casquet específic). El sistema té com a funció el mesurament de pressions a diferents punts de la línia d'injecció, per mitjà d'un processador de dades i pressions, que durà a terme el càlcul de la taxa d'injecció.

Ja existeixen els mesuradors de taxa convencionals, els quals mesuren aquesta variable aigües avall del injector. El sistema proposat donaria millores en quant a l'exactitud de la mesura de la taxa d'injecció, en la complexitat del muntatge experimental i del temps requerit per a la toma de la mesura, ja que es pot treballar a qualsevol pressió, així com realitzar els assaigs i les mesures al mateix temps. Degut a les característiques del "tasímetro" convencional (està ple de líquid injectat i a una certa contrapressió) no permet replicar les condicions del gas ambient al que serà injectat el combustible, també es pot ocasionar una ona de contrapressió que modifiqui les mesures obtingudes a través dels sensors i els resultats finals per la manera de funcionament d'aquest, el nou sistema proposat pot instal·lar-se directament al sistema d'injecció d'un motor instrumentat.

La realització del disseny es divideix en:

1. Avaluació preliminar del concepte de mesura. S'han realitzat simulacions 1D de dinàmiques d'ones hidràuliques en models senzills de "tasímetros", a través del software Simulink.
2. Disseny hidràulic del sistema de mesura. Una vegada comprovat el correcte funcionament d'aquests models s'ha procedit a fer més realista el model, s'han canviat les dimensions i configuracions dels diferents elements del sistema com ho són els acumuladors, les línies d'injecció, els punts de mesurament de pressions, i s'ha dividit en elements finits per avaluar l'evolució de gràfiques al llarg del sistema i decidir els punts òptims on realitzar les mesures dites. Tot aquest procés s'ha realitzat amb el software Simulink.

3. Disseny mecànic del sistema de mesura. A partir de les dimensions obtingudes del disseny hidràulic s'ha dissenyat el acumulador principal amb forma cilíndrica, format pel rail i la línia curta, al qual se li han acoblat per l'extrem superior la canonada per con aplega el fluid, per l'extrem inferior l'injector i els sensors de pressió en els punts elegits mitjançant les simulacions dels models en Simulink. Com que l'acumulador es troba sotmès a pressions altes, s'ha realitzat un estudi estàtic amb elements finits per avaluar si l'ensamble suporta les condicions d'operació a les que ha sigut sotmès. El disseny i estudi s'han realitzat amb el software SolidWorks.

# AGRADECIMIENTOS

Aprovecho la ocasión especial para agradecerle a todas las personas que me acompañaron en esta etapa de 4 años, en la que tuve que mudarme a un país en otro continente y empezar de nuevo en otra universidad, a los que estuve desde el principio y a los que fui conociendo en el camino, a mis familiares y a mis amigos.

Primero quiero agradecer al Instituto CMT por permitirme realizar mis pasantías y a las personas que trabajan en él por su ayuda durante las mismas, gracias a Alberto, Armando, Santiago, a los demás compañeros del despacho, a José Enrique y a los trabajadores de la parte administrativa.

Quiero agradecer también a mis compañeros de la universidad por esas tardes de estudio y por aclarar mis dudas justo antes del examen.

Me gustaría dar un agradecimiento especial a mi tutor Jaime Gimeno por darme la oportunidad y la confianza de realizar este proyecto, por la paciencia y todas sus respuestas para aclarar mis innumerables dudas y a César Carvallo, doctorando del CMT, por su ayuda y guía durante toda la realización de este trabajo.

Gracias a Gabriela, por acompañarme durante la mayor parte de esta etapa, por ser un apoyo incondicional, por ayudarme, por aconsejarme, por motivarme y recordarme que cada vez la meta estaba más cerca.

Gracias a mi familia que me apoyó desde el inicio, en especial mis papás, mi tía y mis abuelos, por su sacrificio para poder lograr lo que me propongo y por todo el apoyo recibido. También quiero agradecer a mis hermanos quienes siempre estuvieron conmigo en todo momento así fuese a la distancia, este logro es de todos ellos también.

Dedicado a mi familia y amigos.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
MEMORIA .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. OBJETO DEL PROYECTO .....	2
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN Y VIABILIDAD .....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. MOTORES .....	5
2.1.1. Motores Térmicos .....	5
2.1.2. Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) .....	5
2.1.2.1. Motor de Encendido Provocado (MEP) .....	6
2.1.2.1.1. MEP de Inyección Directa .....	7
2.1.2.1.2. MEP de Inyección Indirecta.....	9
2.1.2.2. Motor de Encendido por Compresión (MEC) .....	11
2.2. INYECCIÓN .....	12
2.2.1. Inyección .....	12
2.2.2. Inyección de Combustible.....	12
2.2.2.1. Gasolina.....	13
2.2.3. Common-rail.....	13
2.2.4. Inyector .....	15
2.2.4.1. Inyector de Solenoide .....	17
2.2.4.2. Inyector Piezoeléctrico .....	18
2.2.4.3. Inyector Mecánico .....	19
2.2.5. Inyector Spray G .....	20
2.3. MEDICIÓN DE TASA DE INYECCIÓN .....	21
2.3.1. Tasa de Inyección .....	21
2.3.2. Cantidad de movimiento .....	26

3.	FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO.....	33
3.1.	SIMULINK.....	33
3.2.	SOLIDWORKS .....	37
4.	SOLUCIONES ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO .....	46
4.1.	DISEÑO.....	46
4.1.1.	Conexión entre el raíl y la base.....	46
4.1.2.	Ubicación de los puntos de medición.....	46
4.1.3.	Conexión entre la base y inyector .....	49
4.1.4.	Longitud de la línea corta.....	50
4.1.5.	Conexión de los sensores al ensamblaje.....	50
4.1.6.	Elementos que componen el ensamblaje .....	51
4.2.	MATERIALES.....	53
5.	DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN ADOPTADA .....	55
5.1.	DISEÑO.....	55
5.1.1.	Conexión entre el raíl y la base.....	55
5.1.2.	Ubicación de los puntos de medición.....	55
5.1.3.	Conexión entre la base y inyector .....	55
5.1.4.	Conexión de los sensores al ensamblaje.....	56
5.1.5.	Longitud de la línea corta.....	56
5.1.6.	Elementos que componen el ensamblaje .....	56
5.2.	MATERIALES.....	56
6.	ANEXOS.....	57
6.1.	DISEÑO HIDRÁULICO (SIMULINK) .....	57
6.1.1.	Modelo 1 .....	57
6.1.2.	Modelo 2.....	59
6.1.3.	Modelo 3.....	60
6.1.4.	Modelo 4.....	62
6.1.5.	Modelo 5.....	64
6.1.6.	Modelo 6.....	66
6.1.7.	Modelo 7 .....	68
6.1.8.	Modelo 8.....	70
6.1.9.	Modelo 9 .....	71

6.1.10. Modelo 10 .....	73
6.1.11. Modelo 11 .....	75
6.1.12. Modelo 9 corregido .....	82
6.1.13. Modelo 10 corregido .....	83
6.2. DISEÑO MECÁNICO (SOLIDWORKS) .....	84
6.2.1. Base.....	84
6.2.2. Raíl.....	85
6.2.3. Casquillo inyector .....	86
6.2.4. Placa de ajuste .....	86
6.2.5. Sensores de presión.....	87
6.2.6. Inyector Spray G .....	88
6.2.7. Ensamblaje .....	88
6.2.8. Sección y detalles del ensamblaje.....	89
6.3. ANÁLISIS ESTÁTICO (SOLIDWORKS).....	91
6.3.1. Tensiones .....	95
6.3.2. Desplazamientos.....	97
6.3.3. Deformaciones unitarias.....	98
6.3.4. Factor de seguridad.....	99
7. CONCLUSIONES.....	101
7.1. TRABAJO REALIZADO .....	101
7.2. TRABAJOS FUTUROS .....	101
8. BIBLIOGRAFÍA.....	103
PRESUPUESTO .....	110
9. PRESUPUESTO .....	111
9.1. MANO DE OBRA.....	111
9.2. COSTE EQUIPOS .....	111
9.3. COSTE MATERIALES FUNGIBLES .....	112
9.4. COSTE MATERIAL INFORMÁTICO .....	112
9.5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	113
9.6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE CONTRATA.....	113
PLANOS.....	114

# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1: Diagrama presión vs volumen del ciclo Otto. [1] .....	6
2.2: Ejemplo de inyección directa de gasolina (GDI). [2] .....	8
2.3: Representación de la sección de un cilindro de motor GDI. [3] .....	8
2.4: Ejemplo de inyección indirecta de gasolina. [2] .....	10
2.5: Comparación entre ciclo Atkinson y ciclo Otto. [4] .....	10
2.6: Diagrama presión vs volumen del ciclo Atkinson. [5] .....	10
2.7: Diagrama presión vs volumen de un ciclo Diésel. [6] .....	11
2.8: Diagrama temperatura vs entropía de un ciclo Diésel. [7] .....	12
2.9: Señal de inyección ECN de inyector Spray G. [8] .....	12
2.10: Common-rail para motores de gasolina. [9] .....	14
2.11: Esquema de funcionamiento de motores que utilizan el sistema common-rail para distribución del combustible. [10] .....	14
2.12: Inyector de tipo aguja. [11] .....	16
2.13: Inyector de tipo bola. [11] .....	16
2.14: Inyector de solenoide y sus componentes. [12] .....	18
2.15: Inyector de solenoide marca Bosch. [9] .....	18
2.16: Inyector piezoeléctrico y sus componentes. [13] .....	19
2.17: Inyector mecánico y sus componentes. [14] .....	19
2.18: Distribución de los orificios de un inyector Spray G. [17] .....	21
2.19: Esquema de visualización de los chorros de inyección dependiendo del ángulo de giro del inyector. [17] .....	21
2.20: Diagrama ilustrativo de las partes de un tasímetro convencional. [18] .....	22
2.21: Tasímetro en laboratorio del CMT. [28] .....	22
2.22: Representación de una sección del adaptador del inyector utilizado en las medidas de tasa de inyección. [18] .....	24
2.23: Inyector, soporte del inyector y medidor de tasa IAV utilizado en el montaje experimental. [18] .....	24
2.24: Esquema presentando el montaje experimental utilizado para las medidas de tasa de inyección. [18] .....	25
2.25: Representación de un flujo real a la salida de la tobera y la descripción simplificada del fluido a través de los coeficientes del área y velocidad efectivas. [18] .....	27
2.26: Renderizado del equipo de prueba para la medición de la cantidad de movimiento mostrando el sensor piezoeléctrico (en amarillo) a través del acceso óptico. [18] .....	29
2.27: Representación esquemática del choque del fluido contra el sensor. [18] .....	30

2.28: Renderizado del equipo de medición de la cantidad de movimiento con el sensor, inyector GDI y soporte del inyector en la configuración lateral. [18] .....	31
2.29: Renderizado del equipo de medición de la cantidad de movimiento con el sensor, inyector GDI y soporte del inyector en la configuración frontal. [18] .....	31
2.30: Seis fragmentos del momento de inyección grabado con una cámara de alta velocidad a través del acceso óptico del equipo de prueba de cantidad de movimiento. [18] .....	32
3.1: Representación esquemática de los modelos en los cuales se obtienen las señales de presión. ....	34
3.2: Representación esquemática de los modelos en los cuales se obtienen las señales de tasa de inyección.....	35
3.3: Detalle de acople mediante tornillos entre el raíl y la base, y de la tórica. ....	38
3.4: Detalle en parte superior del raíl de la rosca 9/16-18 UNF, del orificio de desahogo y del acople directo del inyector. ....	39
3.5: Sección del raíl. ....	39
3.6: Detalles de la base: unión con el raíl, unión con el casquillo del inyector, mecanizado para el sensor y mecanizado para las conexiones electrónicas del inyector. ....	40
3.7: Detalle del aplanado y del fresado en la base para conexión del sensor piezoeléctrico. ....	41
3.8: Detalle de unión entre el casquillo y el inyector, y de la tórica en la cavidad. ....	41
3.9: Detalle de la sección de la placa de ajuste. ....	42
3.10: Detalles de la placa de ajuste: acople mediante tornillos entre la base y la placa de ajuste, unión con el casquillo del inyector y ajuste holgado con el inyector. ....	42
3.11: Detalle del mecanizado realizado para las conexiones electrónicas del inyector. ....	43
3.12: Detalle de los cortes en la parte superior del raíl. ....	44
3.13: Detalle del corte en la ubicación del sensor piezorresistivo en el raíl. ....	44
3.14: Detalle de los cortes en ambos lados de la base, de la placa de ajuste y de la parte inferior del raíl. ....	44
3.15: Detalle de los chaflanes en el casquillo del inyector. ....	45
3.16: Gráfica del flujo másico utilizando la presión en el inicio del raíl. ....	47

3.17: Gráfica del flujo másico utilizando la presión a un cuarto del inicio del raíl. ....	47
3.18: Gráfica de comparación del flujo másico utilizando las señales al inicio del raíl, a un cuarto del inicio del raíl y al inicio de la línea corta. ..	48
3.19: Representación de la conexión entre la base y el raíl mediante un casquillo. ....	49
3.20: Detalle de la conexión de los sensores en el raíl y en la base. ....	51
3.21: Representación de conexión entre la base y el inyector. ....	52
3.22: Representación de la conexión entre la base y el casquillo del inyector. ....	52
3.23: Representación del montaje con la placa de ajuste sujetando al casquillo del inyector. ....	52
6.1: Representación de modelo 1 de Simulink. ....	57
6.2: Señal de inyección de modelo 1. ....	58
6.3: Señal de presión del modelo 1. ....	58
6.4: Representación del modelo 2 de Simulink. ....	59
6.5: Señal de inyección del modelo 2. ....	60
6.6: Señales de presión del modelo 2. ....	60
6.7: Representación del modelo 3 de Simulink. ....	61
6.8: Señales del flujo másico en el modelo 3. ....	62
6.9: Representación del modelo 4 de Simulink. ....	63
6.10: Señales de presión del modelo 4. ....	63
6.11: Representación del modelo 5 de Simulink. ....	65
6.12: Señal de inyección del modelo 5. ....	65
6.13: Señales de presión del modelo 5. ....	66
6.14: Representación del modelo 6 de Simulink. ....	67
6.15: Señal de flujo másico del modelo 6. ....	67
6.16: Representación del modelo 7 de Simulink. ....	68
6.17: Señal de inyección del modelo 7 (ECN). ....	69
6.18: Señales de presión del modelo 7. ....	69
6.19: Representación del modelo 8 de Simulink. ....	70
6.20: Señal de flujo másico del modelo 8. ....	71
6.21: Representación del modelo 9 de Simulink. ....	72
6.22: Señales de presión del modelo 9. ....	72
6.23: Representación del modelo 10 de Simulink. ....	73
6.24: Señal de flujo másico del modelo 10. ....	74
6.25: Comparación entre las señales de flujo másico de los modelos 8 y 10. ....	74

6.26: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión al inicio del raíl. ....	76
6.27: Señal de flujo másico del modelo 11 con señal de presión al inicio del raíl. ....	76
6.28: Comparación señal de flujo másico entre modelo 10 y modelo 11 con señal de presión en el inicio del raíl. ....	77
6.29: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión en punto intermedio del raíl. ....	77
6.30: Señal de flujo másico del modelo 11 con señal de presión a un cuarto del inicio del raíl. ....	78
6.31: Comparación de señal de flujo másico entre modelo 11 con señal al inicio del raíl y modelo 11 con señal de presión a un cuarto del inicio del raíl. ....	78
6.32: Representación del modelo 11 de Simulink simplificado (sin tubería larga). ....	79
6.33: Comparación señales de flujo másico entre modelo 11 con señal de presión al inicio del raíl y el modelo 11 simplificado. ....	79
6.34: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión al inicio de la línea corta. ....	80
6.35: Comparación de señal de flujo másico del modelo 11 entre la señal al inicio del raíl, a un cuarto del inicio del raíl y al inicio de la línea corta.....	80
6.36: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión en punto intermedio de la línea corta. ....	81
6.37: Comparación señales de flujo másico entre modelo 8, modelo 10 y las distintas configuraciones del modelo 11. ....	81
6.38: Señales de presión del modelo 8 con dimensiones del diseño mecánico.....	82
6.39: Señal de flujo másico del modelo 10 con dimensiones del diseño mecánico.....	83
6.40: Renderizado de la base del ensamblaje. ....	84
6.41: Renderizado del raíl del ensamblaje.....	85
6.42: Renderizado del casquillo del inyector del ensamblaje.....	86
6.43: Renderizado de la placa de ajuste del ensamblaje. ....	86
6.44: Sensor piezoeléctrico Kistler 601H. [37].....	87
6.45: Sensor piezorresistivo Kistler 4067. [38].....	87
6.46: Renderizado del inyector Spray G.....	88
6.47: Vista lateral derecha del renderizado del ensamblaje. ....	88
6.48: Vista lateral izquierda del renderizado del ensamblaje. ....	89
6.49: Representación de una sección del renderizado del ensamblaje. ....	89

6.50: Detalles de la sección del renderizado del ensamblaje. Entrada raíl, tornillos ensamblaje y acople entre base, casquillo del inyector, placa de ajuste e inyector.....	90
6.51: Detalles del renderizado del ensamblaje. Montaje del sensor piezoeléctrico en el raíl, montaje del sensor piezorresitivo en la base y mecanizado para facilitar conexiones electrónicas del inyector. ....	91
6.52: Renderizado del ensamblaje simplificado. ....	92
6.53: Representación del área donde se aplica la sujeción. ....	92
6.54: Representación de la presión ejercida por el fluido en el raíl y en la base. ....	93
6.55: Representación de la fuerza ejercida por la tubería de alimentación en la rosca del raíl. ....	94
6.56: Representación de las fuerzas ejercidas por los tornillos. Tornillo superior en la rosca interna de la base, tornillo inferior en la rosca interna de la base y tornillo inferior en la placa de ajuste. ....	94
6.57: Tensiones en la parte interna y externa del ensamblaje simplificado. ....	95
6.58: Tensiones en la línea corta y en la placa de ajuste. ....	95
6.59: Tensiones en los orificios para tornillos. ....	96
6.60: Desplazamientos en el ensamblaje. ....	97
6.61: Detalle de desplazamientos en parte inferior del raíl, la base y la placa de ajuste. ....	97
6.62: Deformaciones unitarias equivalentes en el ensamblaje. ....	98
6.63: Detalle de las deformaciones unitarias equivalentes. Inicio del raíl, final del raíl, base, casquillo y placa de ajuste. ....	98
6.64: Deformaciones unitarias equivalentes en orificio de tornillo en el raíl. ....	99
6.65: Factor de seguridad en el ensamblaje. ....	99
6.66: Detalles del factor seguridad. Inicio del raíl, tramo medio del raíl y línea corta. ....	100
6.67: Detalle de factor de seguridad de orificio de tornillo en el raíl. ....	100

# ÍNDICE DE TABLAS

2.1: Especificaciones de diseño de inyectores Spray G. [15] .....	20
2.2: Condiciones de funcionamiento de inyectores Spray G. [16] .....	20
3.1: Características de los modelos compuestos por una sola tubería (en los modelos 1, 2 y 3). .....	34
3.2: Características de los modelos conformados por tres tuberías (desde el modelo 4 hasta el modelo 11). .....	36
6.1: Características de tuberías en modelo 1. ....	57
6.2: Características de tuberías en modelo 2. ....	59
6.3: Características de tuberías en modelo 3. ....	61
6.4: Características de tuberías en modelo 4. ....	62
6.5: Características de tuberías en modelo 5. ....	64
6.6: Características de tuberías en modelo 6. ....	66
6.7: Características de tuberías en modelo 7. ....	68
6.8: Características de tuberías en modelo 8. ....	70
6.9: Características de tuberías en modelo 9. ....	71
6.10: Características de tuberías en modelo 10. ....	73
6.11: Características de tuberías en modelo 11. ....	75
6.12: Características de tuberías en modelo 9 (diseño mecánico). ....	82
6.13: Características de tuberías en modelo 10 (diseño mecánico). ....	83
9.1: Coste mano de obra. ....	111
9.2: Coste equipos. ....	112
9.3: Coste consumo eléctrico. ....	112
9.4: Coste materiales fungibles. ....	112
9.5: Coste material informático. ....	113
9.6: Presupuesto de ejecución material. ....	113
9.7: Presupuesto de ejecución de contrata. ....	113

**Parte I**

# **MEMORIA**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. OBJETO DEL PROYECTO

Diseño de un dispositivo de medición de tasa de inyección aguas arriba del inyector para inyectores GDI (Gasoline Direct Injection), este medidor de tasa de inyección trabajará con sensores de presión, uno al extremo inicial del rail (el más alejado del inyector) y otro en la línea corta (el más cercano posible al inyector), tubería por la cual el fluido pasa del raíl al inyector. Dichos sensores proveerán una medida de presión instantánea de ambos puntos, a través de las cuales se podrán hallar las medidas de tasa de inyección, relacionándolas matemáticamente.

Para realizar dicho proyecto se realizarán simulaciones de ondas en 1D en Simulink, para así proceder a realizar el diseño hidráulico utilizando las condiciones de contorno iniciales (temperatura, presión y caudal) y otras características correspondientes al material utilizado. Con este diseño se determinará la mejor posición de los sensores para poder conseguir la señal de inyección más parecida a la original y se procederá a realizar el diseño mecánico del ensamblaje con las especificaciones y limitaciones correspondientes.

Para el cálculo de las presiones se utilizará una señal de inyección sacada de ECN (Engine Combustion Network) y posteriormente estas presiones para replicar la señal de inyección (1.1).

$$\frac{dp}{dt} \approx \frac{dm}{dt} = \dot{m} \quad (1.1)$$

## 1.2. ANTECEDENTES

Este proyecto fue realizado en el área de Inyección del Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, el cual es un centro educacional involucrado de lleno en el desarrollo del futuro de los motores de combustión desde hace más de 40 años. Las investigaciones y proyectos que se realizan en el CMT se han enfocado en el entendimiento de los procesos físicos de los motores de

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

combustión, y en estudios aplicados para mejorar el comportamiento del motor y ayudar en su desarrollo.

El CMT está dividido en diferentes áreas, que se dedican a investigaciones específicas. Algunas áreas de investigación son:

- Combustión.
- Inyección.
- Control de ruido.
- Mantenimiento.
- Renovación de carga.
- CFD.
- Técnicas experimentales.

A raíz de la necesidad de calcular con exactitud la tasa de inyección de los inyectores se crearon los tasímetros convencionales, los cuales se implementan aguas abajo del inyector, dicho elemento toma las medidas a través de sensores de presión en distintos puntos del mismo y se modela la señal de inyección.

El problema de este tipo de medidor de tasa de inyección es que las medidas pueden verse alteradas por la presencia de pérdidas a la salida del inyector, en las paredes del tasímetro y pérdidas del fluido a lo largo de su recorrido. Se debe tomar en cuenta el fenómeno del golpe de ariete, el cual produce una onda de presión en sentido contrario al inicial del fluido inyectado que puede generar depresiones, sobrepresiones y perturbaciones en las medidas tomadas por los sensores, ocasionadas por las ondas de presión que son reflejadas al chocar con la pared final del tasímetro.

La metodología para realizar ensayos con el tasímetro convencional en inyectores es:

- Medir la tasa de inyección.
- Medir la cantidad de movimiento.
- Por último se procede a realizar los ensayos con el inyector en la maqueta que se vaya a utilizar.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN Y VIABILIDAD**

Debido a las complicaciones que pueden ocurrir al momento de medir la tasa de inyección con los tasímetros convencionales, se propone el estudio y diseño de un medidor de tasa de inyección aguas arriba del inyector, el cual también utilizará medidas de presión en dos puntos definidos a través de ensayos en el software Simulink de Matlab, y tiene como ventajas, en comparación con los tasímetros convencionales, que:

- No se generarán pérdidas en el inyector.
- No trabajará a contrapresión, ya que el fluido se puede inyectar a cualquier presión de trabajo, incluso en vacío, porque el acumulador no se llena de líquido.
- Al producirse el evento de inyección se genera una caída de presión en el sistema, esta onda viaja aguas arriba y es detectada por los sensores ubicados en el interior del tubo del nuevo tasímetro, permitiendo el cálculo de la tasa de inyección.
- Con este nuevo sistema se pueden realizar los ensayos y medir la tasa de inyección al mismo tiempo, la cual es una de sus ventajas más interesante.

En cuanto a la viabilidad del proyecto, el CMT cuenta con los medios necesarios para llevarlo a cabo, puesto que están en posesión de los equipos y softwares necesarios para realizar cada uno de los pasos a seguir en el mismo. Además, al ser un sistema de medición de tasa de inyección novedoso supondrá un avance y una mejora importante para las investigaciones de los inyectores y de los sistemas de inyección.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. MOTORES**

#### **2.1.1. Motores Térmicos**

Es un conjunto complejo de elementos que tienen como finalidad generar energía mecánica a través de la transformación cíclica de energía térmica, que mayoritariamente se produce durante la combustión en los cilindros del motor. Se dividen en motores de combustión interna y de combustión externa, de fluido no condensable o condensable, y en alternativos, rotativos o de reacción.

Los motores que más se utilizan actualmente, ordenados decrecientemente según su potencia, son: turbinas de gas, turbinas de vapor y motores de combustión interna alternativos (trabajan con diésel y gasolina).

#### **2.1.2. Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA)**

Son un tipo de motor térmico que está conformado por un conjunto de elementos mecánicos que mediante desplazamientos lineales de un émbolo que se encuentra dentro de un cilindro permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica de un fluido determinado, que puede ser que circula por él y que ha sido obtenida mediante un proceso de combustión interna. Según el proceso de combustión se dividen en motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC), y dependiendo del número de carreras que necesita el pistón para realizar un ciclo de trabajo se dividen en cuatro tiempos (4T) y en dos tiempos (2T).

Sus ventajas son:

1. El combustible utilizado tiene un poder calorífico alto.
2. Rendimiento térmico aceptable (<55%).
3. Amplio rango de potencias (0,1-80.000 kW).
4. El grado de carga se puede modificar de manera fácil.
5. Poseen una potencia específica elevada comparada con las turbinas.
6. Los cilindros se pueden disponer de maneras constructivas variadas.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

7. Son motores que poseen alta autonomía.

Sus inconvenientes son:

1. Combustibles de alta calidad (derivados del petróleo).
2. Producen una alta contaminación química y acústica.
3. Gran variabilidad del rendimiento según las condiciones de uso y el tipo de motor.

### 2.1.2.1. Motor de Encendido Provocado (MEP)

Este tipo de motores se caracterizan porque el fluido operante está conformado por aire más combustible y porque el encendido es mediante una chispa eléctrica provocada por una bujía. La formación de dicha mezcla puede producirse de dos maneras: por inyección indirecta o inyección directa.

La regulación de la carga en estos motores es cuantitativa porque se regula la cantidad de mezcla, además, trabaja con combustibles ligeros como la gasolina, GLP, GN, etanol, biogás, etc. (poseen alto octano). También son conocidos como motor de encendido por chispa o motor Otto, recibe este nombre por el ciclo termodinámico que realizan.

Este tipo de motores tienen como ventajas que el motor puede girar a una mayor cantidad de revoluciones por unidad de tiempo que en los MEC, lo que los hace aumentar la fuerza y la potencia.

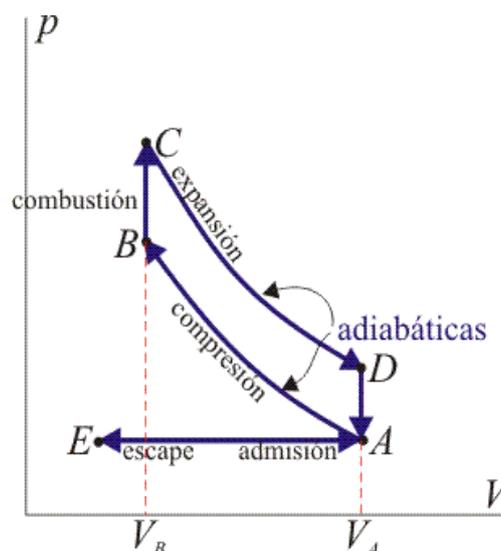


Figura 2.1: Diagrama presión vs volumen del ciclo Otto. [1]

### 2.1.2.1.1. MEP de Inyección Directa

En los cuales se inyecta combustible en el cilindro cerca de la bujía y con una turbulencia cilíndrica (efecto Tumble, que ayuda a la formación de la mezcla) durante el proceso de compresión, lo cual produce que se forme una mezcla heterogénea o estratificada. Este sistema también se conoce como GDI, ayuda a mejorar las prestaciones del motor (eficiencia, potencia específica, etc.) y reducir las emisiones contaminantes.

La inyección directa permite un control preciso de la definición de los intervalos de alimentación del combustible en cada ciclo de trabajo de los pistones y del tiempo necesario para que se forme la mezcla.

Las ventajas de este tipo de inyección son:

1. Evita la estrangulación en los modos operativos que trabajan con mezcla estratificada, ya que permite que se abra más la válvula de mariposa y entre más aire.
2. Con mezcla estratificada el motor trabaja con  $\lambda=1,6$  hasta  $\lambda=3$ , por lo cual se reduce el consumo de combustible. Lambda ( $\lambda$ ) es el factor de exceso de aire

**(2.2):**

$$\lambda = \frac{\text{masa de aire incorporada}}{\text{masa de aire estequiométrica}} \quad (2.2)$$

3. Menor pérdida de calor cedido a las paredes del cilindro, debido a que la combustión se inicia cerca de la bujía y tiene poco margen.
4. Es posible reducir el régimen de ralentí, lo que hace que el arranque en frío sea más fácil, porque al reanudar la inyección de combustible este no queda depositado en las paredes del cilindro.

Sus inconvenientes son:

1. El tratamiento de los gases de escape, todos los NOx que se generan no pueden ser transformados en nitrógenos por un catalizador de tres vías, se necesita un catalizador-acumulador de NOx.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

2. La cantidad de azufre en la gasolina, porque tiene una similitud química con los NOx, lo que hace que se almacene en los espacios que están destinados a los NOx en el catalizador-acumulador de NOx, haciendo que este se tenga que regenerar con mayor frecuencia, lo que representa un mayor consumo de combustible.

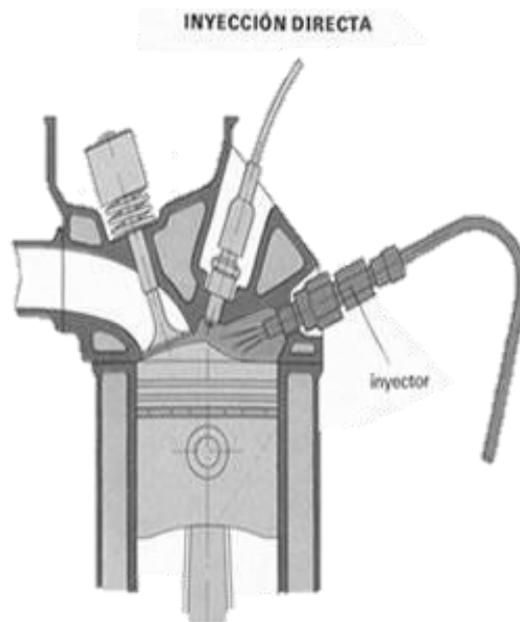


Figura 2.2: Ejemplo de inyección directa de gasolina (GDI). [2]

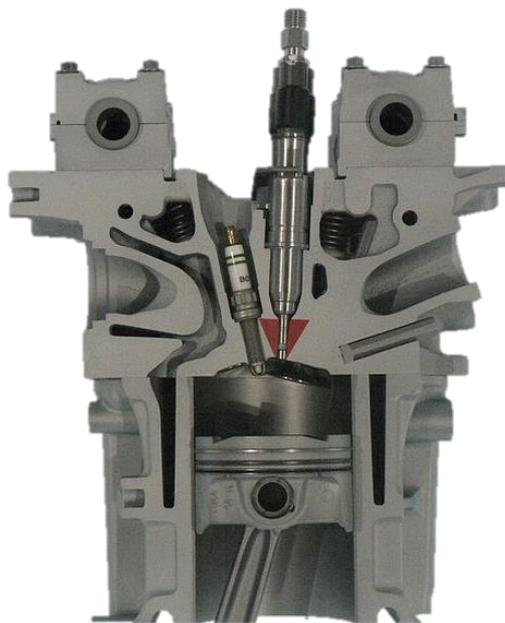


Figura 2.3: Representación de la sección de un cilindro de motor GDI. [3]

### **2.1.2.1.2. MEP de Inyección Indirecta**

La mezcla se forma durante la admisión, puesto que el combustible se inyecta en el colector de admisión durante el proceso de expansión, para que se produzca una mezcla homogénea cuando la misma entre a la cámara de combustión.

Para ayudar a la mezcla del combustible con el aire, este tipo de motores tienen el interior del colector rugoso, lo que genera turbulencias y conlleva a una mejor atomización de la mezcla.

Las ventajas de este tipo de motores son:

1. Se producen menos NO<sub>x</sub> en la combustión y son neutralizables en el escape por el catalizador.
2. Permite el uso de un ciclo más eficiente que el ciclo Otto, conocido como el ciclo Atkinson.
3. Tiene un menor coste de fabricación.
4. Los inyectores al estar en el colector de admisión tienen una menor probabilidad de obstrucción (están apartados de la combustión).

Sus desventajas son:

1. Al realizarse la mezcla en el colector de admisión y luego pasar al cilindro, el combustible se encuentra repartido por toda la cámara de combustión. Al encenderse calienta más, haciendo que hallan más pérdidas de calor por el que es cedido a las paredes del cilindro, lo que a su vez reduce el rendimiento térmico del motor.
2. Tiene una relación de compresión ligeramente menor que los MEP de inyección directa.
3. El colector trabaja a una temperatura mayor que en los de inyección directa.
4. No es tan fácil realizar el arranque en frío, porque el combustible se adhiere a las paredes de la cámara de combustión.
5. Si se utiliza el ciclo Atkinson se tendrá menor rendimiento.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

6. Es menos estable para trabajar a ralentí porque el suministro de combustible no es tan exacto.
7. Tienen menor capacidad para aspirar aire (menor apertura de la mariposa) por las turbulencias necesarias para formar la mezcla en el colector de admisión.

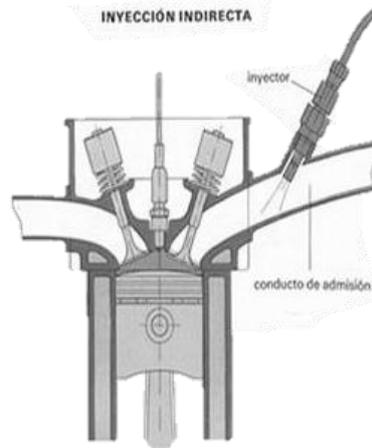


Figura 2.4: Ejemplo de inyección indirecta de gasolina. [2]

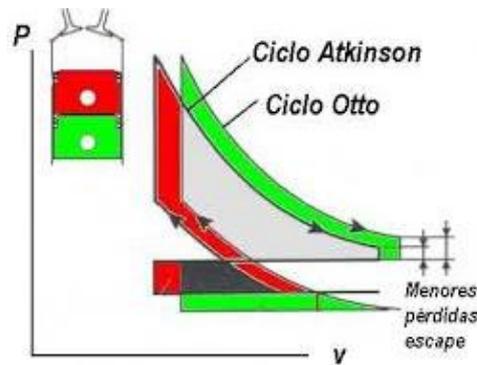


Figura 2.5: Comparación entre ciclo Atkinson y ciclo Otto. [4]

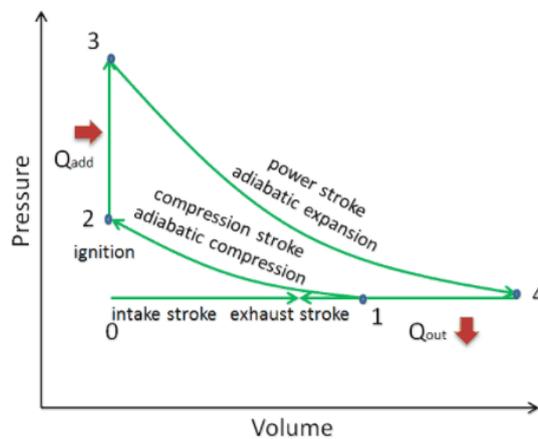


Figura 2.6: Diagrama presión vs volumen del ciclo Atkinson. [5]

### 2.1.2.2. Motor de Encendido por Compresión (MEC)

La característica principal de este tipo de motores es que la combustión se inicia por el autoencendido de la mezcla de combustible una vez que el aire, que se introduce durante la admisión, llega a una temperatura y una presión lo suficientemente altas que hacen detonar el combustible, el cual se inyecta en un instante cercano al final de la carrera de compresión. La combustión en los MEC no tiene una zona definida en donde producirse, sino que se producen varios frentes de llama con recorridos diferentes que dependerán del chorro de aire que se inyecta y del movimiento del aire dentro de la cámara de combustión.

A diferencia de los MEP, aquí la mezcla es heterogénea y la regulación de la carga es cualitativa, ya que se regula la cantidad de combustible que se inyecta. Este tipo de motores también es conocido como motor Diésel, por el ciclo que realizan, y tiene como ventaja frente a los MEP que necesitan un menor consumo de gasolina.

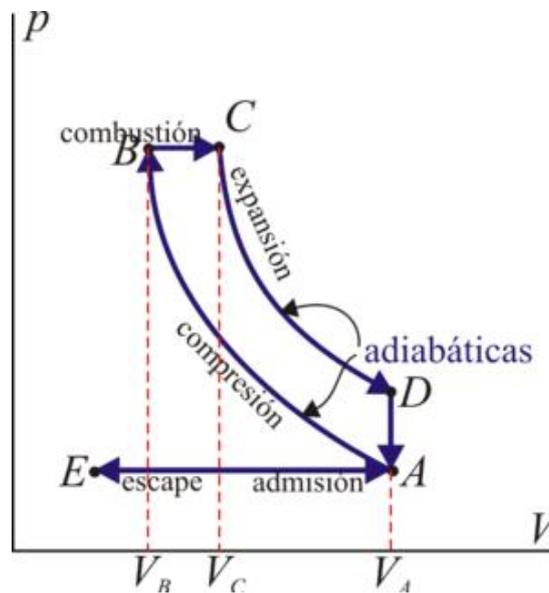


Figura 2.7: Diagrama presión vs volumen de un ciclo Diésel. [6]

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

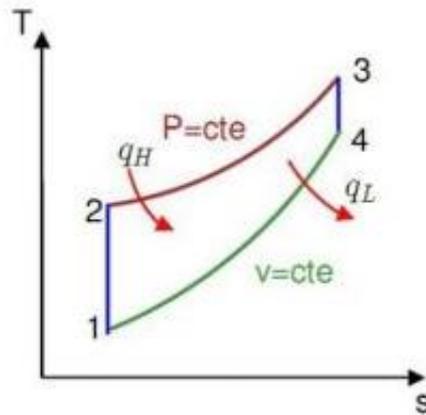


Figura 2.8: Diagrama temperatura vs entropía de un ciclo Diésel. [7]

## 2.2. INYECCIÓN

### 2.2.1. Inyección

Proceso que consiste en la introducción de un fluido a presión en el interior de un cuerpo desde el sistema de alimentación.

### 2.2.2. Inyección de Combustible

Es una manera de proveer una cantidad precisa de combustible a cierta presión, que hace que salga atomizado hacia el aire que posteriormente se introduce en el cilindro o directamente en la cámara de combustión. Esta inyección introduce la misma cantidad de fluido en cada cilindro, logrando que todos los cilindros trabajen a presión y temperatura constantes.

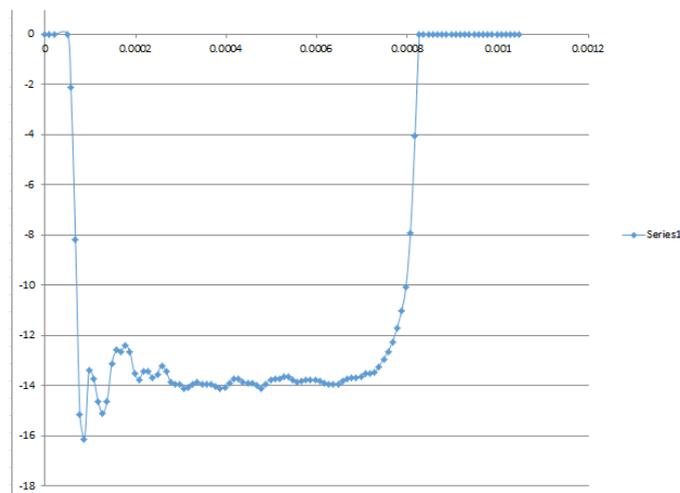


Figura 2.9: Señal de inyección ECN de inyector Spray G. [8]

### 2.2.2.1. Gasolina

Es una mezcla de hidrocarburos individuales, desde el C<sub>4</sub> (butanos y butenos) hasta el C<sub>11</sub> (undecano), del petróleo que se utiliza en motores de combustión interna como los MEP, también se utiliza en productos químicos de limpieza o para lámparas y estufas antiguas. Se califica según el octanaje, que indica la presión y temperatura a las que puede ser sometido el combustible ya mezclado con aire antes de que se produzca la autoignición y posteriormente la detonación, en gasolina de 95 octanos y de 98 octanos.

La gasolina de 95 octanos es más barata, facilita el arranque en frío y tiene menor densidad, en cuanto a la de 98 octanos es más limpia y segura, porque produce menos cantidad de azufre favoreciendo las prestaciones del motor.

La gasolina tiene que cumplir unas condiciones para el funcionamiento del motor y de tipo ambiental, que son reguladas por leyes en la mayoría de los países como lo son el índice de octano: MON = Motor Octane Number, RON = Research Octane Number y PON = Pump Octane Number (promedio de las dos anteriores), que indican la resistencia del combustible a la detonación.

Sus propiedades principales son:

1. Densidad  $\rho=680 \text{ kg/m}^3$ .
2. Energía al quemarse  $Q=34,78 \text{ MJ/L}$
3. Emisiones de CO<sub>2</sub>: 73,38 g/MJ

### 2.2.3. Common-rail

Es un sistema electrónico mediante el cual se distribuye el combustible a los inyectores del motor que están conectados a la tubería de distribución, aguas arriba se encuentra el puerto de entrada y a lo largo de él están las conexiones de los inyectores.

El combustible es transportado desde el depósito hasta el raíl, primero por una bomba eléctrica que lo aspira a baja presión desde el depósito hasta una bomba de alta presión, la cual lo inyecta posteriormente al cilindro después de haber pasado por el raíl y el inyector.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Es un sistema que permite un control electrónico del combustible a través de la ECU (Engine Control Unit: unidad de control del motor), también permite realizar pre-inyecciones antes de la inyección principal para mejorar la mezcla lo que conlleva a aumentar la presión y temperatura del cilindro, tener una mejor combustión y una disminución del ruido.

Sus ventajas son:

1. El control electrónico (por medio de la ECU).
2. La presión de trabajo es independiente del régimen del motor.
3. Al tener una mejor mezcla de combustible se reduce el consumo, se aumenta la potencia y se reducen las emisiones contaminantes.



Figura 2.10: Common-rail para motores de gasolina. [9]

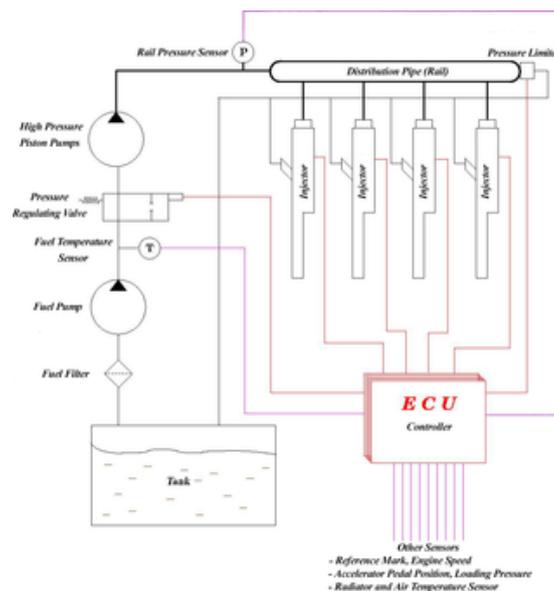


Figura 2.11: Esquema de funcionamiento de motores que utilizan el sistema common-rail para distribución del combustible. [10]

#### **2.2.4. Inyector**

Es el dispositivo utilizado para inyectar la cantidad requerida de combustible atomizado a alta presión dentro de la cámara de combustión, para formar la mezcla con el aire lo más homogénea posible (aproximadamente para lograr una relación de 14,6 partes de aire por cada parte de combustible). Los inyectores se rigen por el efecto Venturi, que es un fenómeno en el cual un fluido en movimiento en un conducto cerrado aumenta su velocidad y baja su presión al pasar por una zona con una sección menor que en la que se encontraba anteriormente.

Los inyectores más comunes son los de tipo aguja, ya sean de gasolina o diésel, y están conformados principalmente por:

1. Tóricas: se utilizan para sellar las conexiones en la parte superior e inferior del inyector.
2. Filtro: es el último elemento que retiene impurezas del combustible antes de llegar al motor, para evitar que las impurezas más pequeñas ingresen y dañen el motor o al mismo inyector.
3. Conexión eléctrica: por donde recibe las señales de la ECU.
4. Cuerpo del inyector: fabricado en acero o aleaciones.
5. Bobina: alimentada por la ECU, es la pieza que hace que la aguja suba y permita la inyección del combustible al cilindro.
6. Aguja: es el componente del inyector que evita que el combustible salga del mismo, cerrando el compartimiento presurizado donde se encuentra el combustible.
7. Tapa protectora: en ella se apoya la aguja para sellar la salida del inyector.
8. Resorte: es la pieza que cierra el inyector cuando termina la inyección devolviendo a la aguja a su posición de reposo.
9. Porta-tobera: bloque de acero guía al cual se acopla la tobera, que representa el inicio del inyector.
10. Tobera: pieza fijada al porta-tobera que representa el final del inyector.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

11. Varilla de empuje: comunica el movimiento entre la electroválvula y el resorte.
12. Tornillo de reglaje: ajusta la presión de inyección del combustible.
13. Racor de cierre: hermetiza el conjunto del inyector y permite el regreso del combustible residual al tanque.

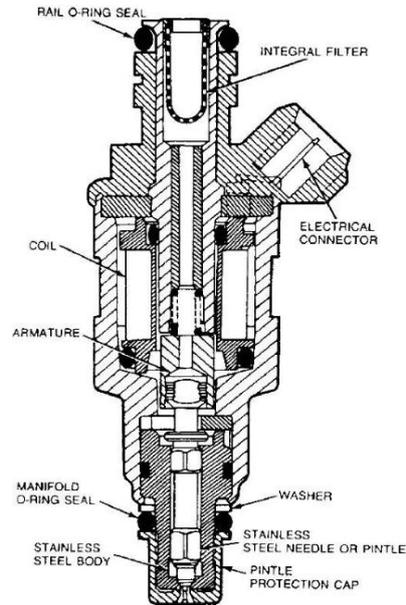


Figura 2.12: Inyector de tipo aguja. [11]

Además de los inyectores de tipo aguja hay inyectores de tipo disco y tipo bola, que tienen el mismo principio de funcionamiento, pero varía la forma del elemento que permite la salida del combustible, también varían en el mecanismo de apertura del inyector: pueden ser electrónicos (de solenoide), piezoeléctricos o mecánicos.

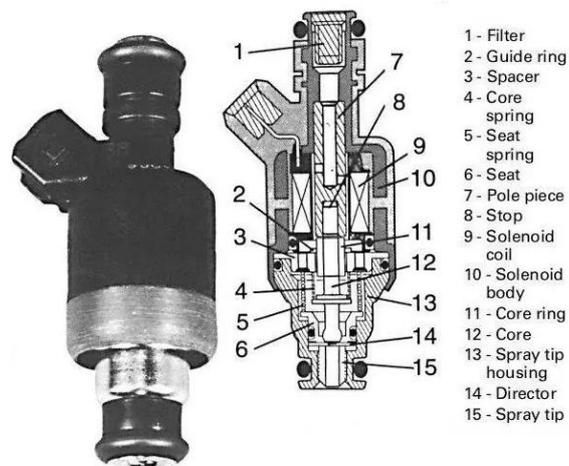


Figura 2.13: Inyector de tipo bola. [11]

#### **2.2.4.1. Inyector de Solenoide**

El funcionamiento de estos inyectores está relacionado con los sensores que se encuentran conectados a la ECU, que es el elemento que controla los tiempos de inicio y final de la inyección, además de la cantidad de combustible a inyectar.

El inyector se alimenta con combustible presurizado proveniente de la bomba de inyección y que pasa por el raíl hasta llegar a la entrada del inyector, que puede ser en la parte superior o en el lateral, luego pasa a través de conductos dentro del inyector donde llega al volumen de control y a la tobera. El combustible queda almacenado por la presencia de la aguja del inyector, que es la pieza que evita la salida del combustible al estar presionada contra la tobera por un resorte, a raíz del equilibrio de presiones que se produce entre la cámara superior (volumen de control) y la cámara inferior (tobera).

Los inyectores de solenoide poseen una electroválvula o válvula de bola que está controlada por la ECU, cuando el inyector está en reposo el electroimán mantiene a la electroválvula cerrando el paso del estrangulador de salida.

Una vez la ECU manda la señal para el inicio de la inyección, el electroimán atrae hacia él a la válvula de bola dejando libre el paso por el estrangulador de salida, permitiendo así que el combustible fluya hacia el conducto de retorno del inyector, lo que provoca una caída de presión en la cámara superior, por lo que la cámara inferior se encuentra a una presión mayor, al pasar esto ya no hay equilibrio de presiones a ambos lados de la aguja, por lo que la presión de la cámara inferior hace que la aguja suba y así se produzca la atomización del combustible dentro del cilindro. Cuando la ECU manda la señal de finalización de la inyección el resorte regresa a la aguja a su posición inicial cerrando el paso de combustible al cilindro.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

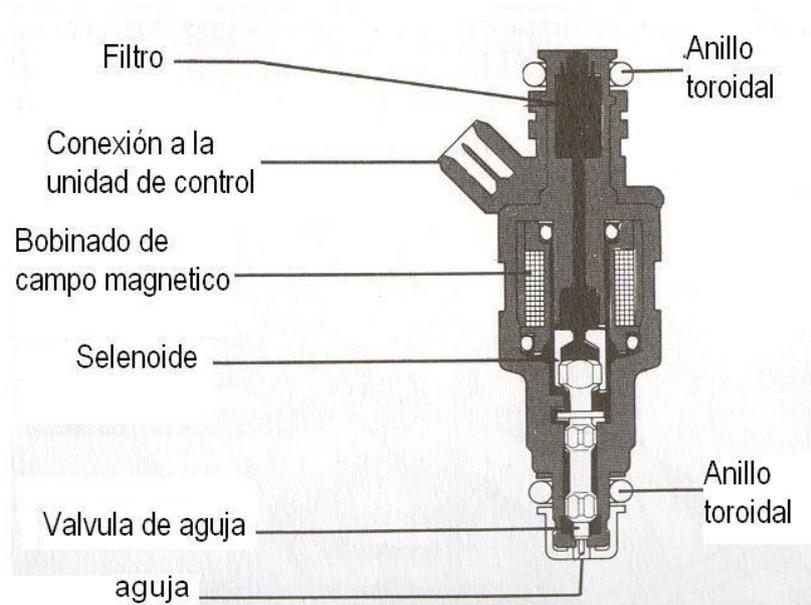


Figura 2.14: Inyector de solenoide y sus componentes. [12]



Figura 2.15: Inyector de solenoide marca Bosch. [9]

#### 2.2.4.2. Inyector Piezoeléctrico

El sistema de funcionamiento de este tipo de inyectores es el mismo que para los inyectores de solenoide, la diferencia está en que se sustituyen las bobinas por materiales piezoeléctricos, como el polvo de cristal de cuarzo. Este material tiene la facultad de expandirse o contraerse de manera proporcional a

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

la señal eléctrica que recibe, de manera casi inmediata, lo cual es aprovechado para realizar la inyección del combustible.

Este tipo de inyectores poseen una mayor estabilidad en los sistemas de inyección múltiples porque posee muy poco tiempo de diferencia entre la señal del pulso eléctrico y el inicio de la inyección del combustible.

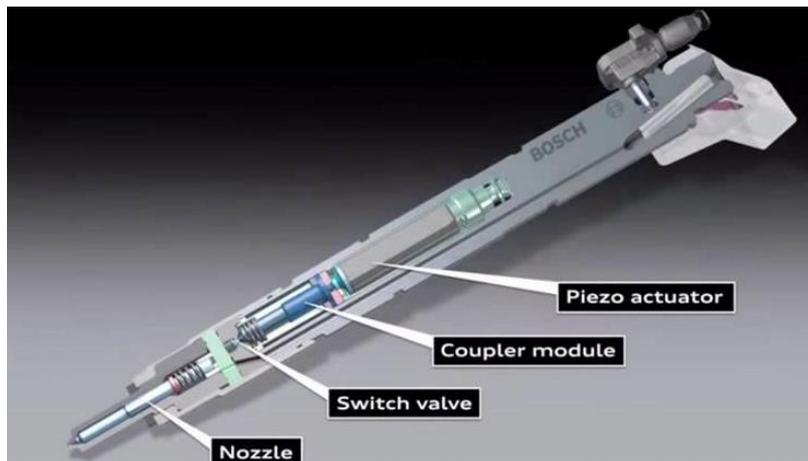


Figura 2.16: Inyector piezoeléctrico y sus componentes. [13]

### 2.2.4.3. Inyector Mecánico

Fue el primer tipo de inyector que se utilizó para inyección de diésel y de gasolina, hasta que se implantaron los common-rail. Funcionan a través de un sistema de alimentación que controla la cantidad y el momento de atomización del combustible de manera mecánica.

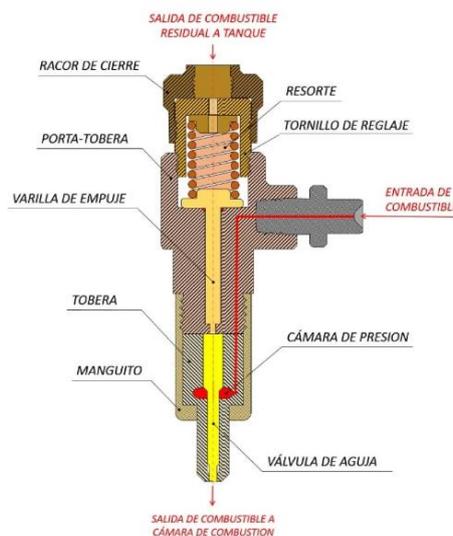


Figura 2.17: Inyector mecánico y sus componentes. [14]

### 2.2.5. Inyector Spray G

Es un tipo específico de inyector de gasolina que trabaja bajo unas condiciones de funcionamiento definidas en la **Tabla 2.2** y tiene unas dimensiones definidas en la **Tabla 2.1**. La ECN dice que: “la condición Spray G corresponde a un caso de inyección temprana sin reacción para la inyección de gasolina guiada por spray. Las especificaciones del inyector son para sistemas modernos de inyección avanzada con capacidad de alta presión”. [8]

PARÁMETRO	VALOR DE DISEÑO
Nro. de orificios	8
Forma del atomizado	Circular
Ángulo de flexión	0°
Relación L/D	1,4
Forma del orificio	Recto
Tasa del flujo	15 cm <sup>3</sup> /s @ 10 MPa
Fabricación	EDM (Mecanizado por Descarga Eléctrica)
Diámetro del orificio de salida	0,165 mm
Diámetro del paso	0,388 mm
Ángulo del taladro del orificio	37°
Ángulo de salida del atomizado	80°

Tabla 2.1: Especificaciones de diseño de inyectores Spray G. [15]

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura ambiente del gas	573 K (300 °C)
Presión ambiente del gas	≈ 6 bar = 0,6 MPa
Boquilla	8 orificios
Presión de inyección	20 MPa, antes del inicio de la inyección
Combustible	Iso-octano
Temperatura del combustible en la boquilla (similar a la temperatura del cuerpo del inyector)	363 K (90 °C)
Masa de inyección	10 mg (valor nominal)
Duración de la inyección electrónica	680μs

Tabla 2.2: Condiciones de funcionamiento de inyectores Spray G. [16]

En la **Figura 2.18** se muestra la parte inferior del inyector con sus orificios y la manera en la que se encuentran distribuidos.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

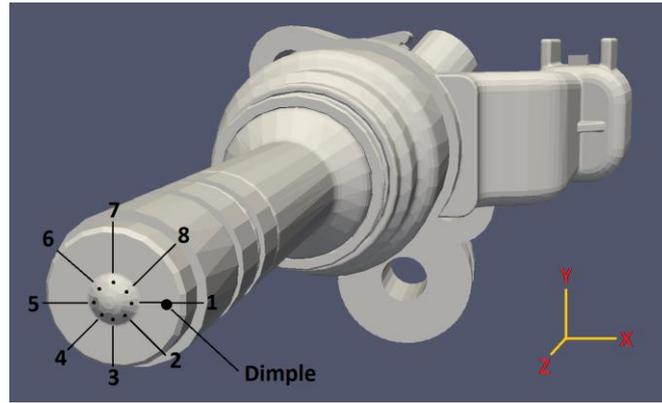


Figura 2.18: Distribución de los orificios de un inyector Spray G. [17]

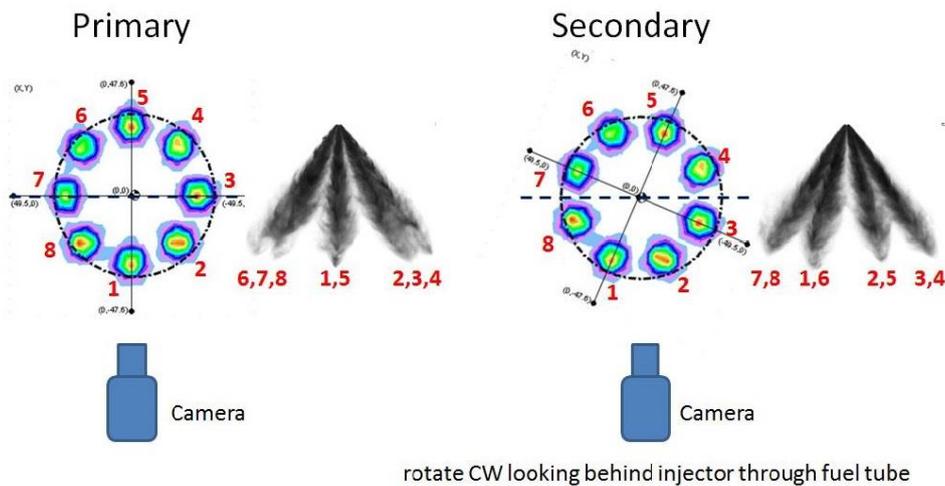


Figura 2.19: Esquema de visualización de los chorros de inyección dependiendo del ángulo de giro del inyector. [17]

## 2.3. MEDICIÓN DE TASA DE INYECCIÓN

Tal y como explicó Vaquerizo et al. [18] los procesos de medición de tasa de inyección (a través de la variación de presión) y de medición de la cantidad de movimiento, permiten calcular la tasa de inyección de los inyectores. Ambos procesos se explican a continuación.

### 2.3.1. Tasa de Inyección

Es una magnitud física que representa la variación de la masa en función del tiempo al pasar por un área determinada, se define en el Sistema Internacional como kilogramos por segundo y su símbolo es  $\dot{m}$ . También se le conoce como gasto, flujo o caudal másico.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Es una característica fundamental de los sistemas de inyección que afecta de manera significativa el rendimiento, el ruido y las emisiones contaminantes de los motores diésel actuales [19]. No fue tan importante para los antiguos motores de inyección indirecta, pero para los motores de inyección directa de gasolina (GDI) juega un papel importante por la manera en que se regula la carga [20].

La metodología con la que se realizan las mediciones de tasa de inyección para los ECN GDI es descrita en publicaciones anteriores [21, 22] y se basa en el montaje de medida para los inyectores diésel [23, 24, 19, 25, 26]. Para medir la tasa de inyección se utiliza un instrumento llamado tasímetro, como el del diagrama de la **Figura 2.20** o el de la imagen de la **Figura 2.21**, el cual utiliza el método de tubo largo o el método Bosch [27]. Éste último es muy utilizado por su buena dinámica de respuesta, la alta precisión y la sencillez [23].

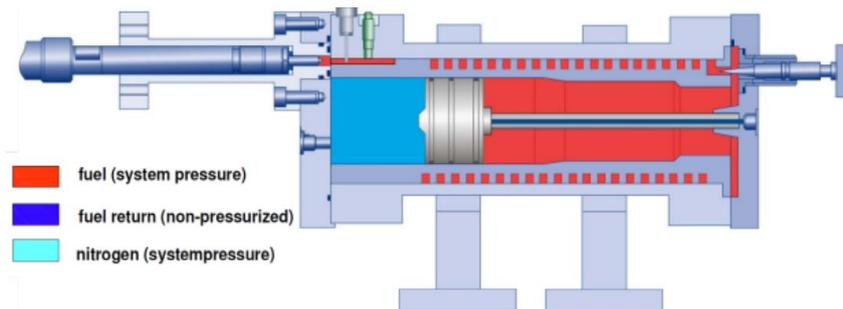


Figura 2.20: Diagrama ilustrativo de las partes de un tasímetro convencional. [18]



Figura 2.21: Tasímetro en laboratorio del CMT. [28]

La manera en que trabaja este instrumento es llenando su volumen interno con combustible para tener definidas las condiciones de contorno para el proceso de propagación de la onda, como si fuese una función de la presión y de la velocidad del sonido en el medio. La presión interna del tasímetro se puede ajustar a través de un volumen de nitrógeno que se encuentra adyacente al volumen de prueba. La inyección genera una onda de presión que se desplaza a una velocidad  $c$  que corresponde con la velocidad del sonido en el medio donde se inyecta y una variación de presión descrita por la ecuación de Allievi **(2.3)**:

$$\Delta p = c\rho_f u \quad (2.3)$$

Donde  $\Delta p$  es el incremento de presión generado por la inyección,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $c$  es la velocidad del sonido del combustible y  $u$  la velocidad del combustible en la salida de la tobera. La presión se mide con un sensor piezoeléctrico posicionado muy cerca de la punta del inyector, es necesario que el sensor y el inyector se encuentren muy cerca para evitar retrasos entre la inyección y la señal registrada, y para minimizar la atenuación de la presión debido a las pérdidas por fricción.

La inyección produce una onda de presión que se desplaza aguas abajo hasta que llega al depósito del combustible o área de liberación, el cual tiene como función limitar el incremento de la presión global al ser agregado el combustible. Una vez ésta llega a la parte con mayor sección del depósito, se genera una onda reflectante que viaja de regreso en dirección al sensor y al inyector, para evitar que se produzca una interferencia entre las dos ondas de presión opuestas la longitud del tubo tiene que ser lo suficientemente larga. La señal de presión del sensor piezoeléctrico se puede traducir en una señal de la masa en función del tiempo **(2.4)** a través del conocimiento de la sección del tubo y de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}(t) = \frac{A_p \Delta p}{c} \quad (2.4)$$

Donde  $A_p$  es el área de la sección del tubo y  $\dot{m}$  es la tasa de inyección.

El inyector se conecta a un soporte diseñado de manera específica para su geometría, como se muestra en la **Figura 2.22**. El

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

soporte tiene un circuito de enfriamiento para poder mantener el cuerpo del inyector a una temperatura controlada.

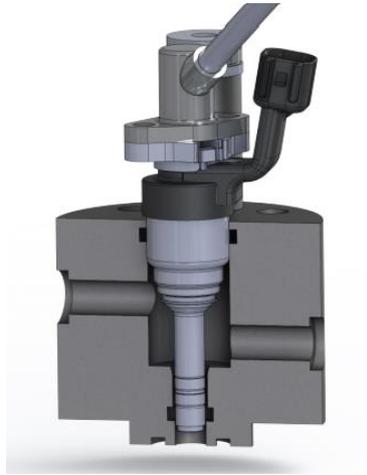


Figura 2.22: Representación de una sección del adaptador del inyector utilizado en las medidas de tasa de inyección. [18]

Luego, en la **Figura 2.23** se puede ver una foto del adaptador unido al ensamblaje.



Figura 2.23: Inyector, soporte del inyector y medidor de tasa IAV utilizado en el montaje experimental. [18]

El indicador de descarga de la curva de inyección (por sus siglas en inglés IRDCI) o tasímetro utilizado, es un equipamiento de IAV (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, compañía alemana dedicada a la industria automotriz) disponible comercialmente acoplado con un termopar para monitorear la temperatura del depósito, porque influye en la densidad y en la velocidad del sonido del combustible. El equipo posee un sensor de presión

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

adicional para medir la presión ambiente dentro del depósito, la cual se puede modificar variando la presión de nitrógeno en el volumen adyacente. El circuito de enfriamiento del soporte del inyector está conectado a un controlador de temperatura PID (proporcional, integral y derivativo) a través de mangueras de PVC, dicho regulador utiliza una mezcla de glicol y agua para controlar la temperatura por sus propiedades térmicas.

Dadas las incertidumbres en la determinación o los datos disponibles de la velocidad del sonido del combustible, y como una metodología estándar llevada a cabo en publicaciones previas [23, 24, 22, 29], se utiliza una escala gravimétrica aguas abajo del medidor de tasa, como se ilustra en la **Figura 2.24**.

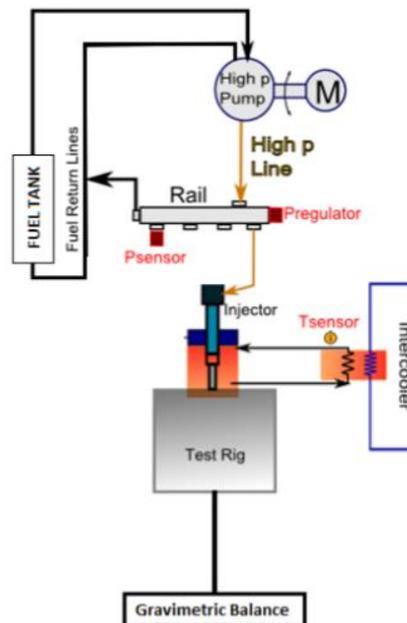


Figura 2.24: Esquema presentando el montaje experimental utilizado para las medidas de tasa de inyección. [18]

El valor obtenido con el balance gravimétrico se utiliza para corregir la integral de la señal de la tasa de inyección medida con el tasímetro, se hace por la incertidumbre de la velocidad del sonido del combustible usado (iso-octano). La velocidad del sonido del combustible depende de la composición del mismo y de la temperatura del sistema, ya que es muy sensible a sus variaciones. Como no se poseen registros de la velocidad del sonido del iso-octano se procedió a utilizar el valor de la velocidad del sonido del octano publicado en el libro web del NIST (National Institute of Standards and Technology). [30]

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

La medición es realizada inyectando a una frecuencia de  $f=10$  Hz. Cuando la cantidad inyectada medida por el balance gravimétrico alcanza la estabilización, hay 50 inyecciones que han sido realizadas y recopiladas con un osciloscopio digital. La señal de la tasa de inyección, la de presión y la señal enviada por la ECU se registran y almacenan. Entonces, el valor obtenido en el balance gravimétrico es usado para escalar la señal de la tasa de inyección y para hacer que su integral sea igual al valor medido en el balance **(2.5)**.

$$k_{ajuste}M_{integración} = M_{Balance} \quad (2.5)$$

Con  $M_{integración}$  y  $M_{balance}$  refiriéndose a la integral del promedio de las 50 repeticiones de la señal de la tasa de inyección y de la masa medida en el balance por inyección antes de que alcanzase la estabilidad. Por lo que  $k_{ajuste}$  es un factor escalar entre los dos y es controlado para tener valores entre 0,95 y 1,05.

Debido a que la cantidad de combustible en el depósito de combustible el tasímetro aumenta constantemente a medida que se van realizando las medidas, la señal tasa de inyección bruta también presenta un incremento constante por la acumulación de combustible. Estudiado por Payri et al. [19], encontró que la solución para evitar que el combustible se evapore aguas abajo del equipo de prueba, que puede producir un balance negativo de flujo másico, se utilizó un tubo largo refrigerado a la salida del tasímetro. Aunque no se encontraron diferencias entre la salida refrigerada y la no refrigerada. [18]

### 2.3.2. Cantidad de movimiento

Según Payri et al. [31], la medición del momento de un fluido puede definirse por la tasa de inyección multiplicada por la velocidad del fluido. Obteniendo un flujo másico de  $\dot{m}$ , con densidad  $\rho$ , que se mueve a una velocidad  $u$  a través de una sección  $A_0$ , pudiendo definir la tasa de inyección **(2.6)** y la cantidad de movimiento **(2.7)**.

$$\dot{m} = \int_{A_0} u\rho dA \quad (2.6)$$

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

$$\dot{M} = \int_{A_0} u^2 \rho A \quad (2.7)$$

Combinando ambas medidas se observaba con más detalle el flujo a la salida del inyector. Para simplificar la descripción del flujo se definen el coeficiente del área efectiva ( $A_{ef}$ ) **(2.8)** y el coeficiente de velocidad efectiva ( $u_{ef}$ ) **(2.9)**. El significado de estos parámetros se ve gráficamente en la **Figura 2.25**.

$$A_{ef} = \frac{\dot{m}_f^2}{\rho_f \dot{M}_f} \quad (2.8)$$

$$u_{ef} = \frac{\dot{M}_f}{\dot{m}_f} \quad (2.9)$$

Donde  $\dot{M}_f$  y  $\dot{m}_f$  son la tasa de inyección y la cantidad de movimiento del combustible inyectado y  $\rho_f$  es la densidad del combustible.

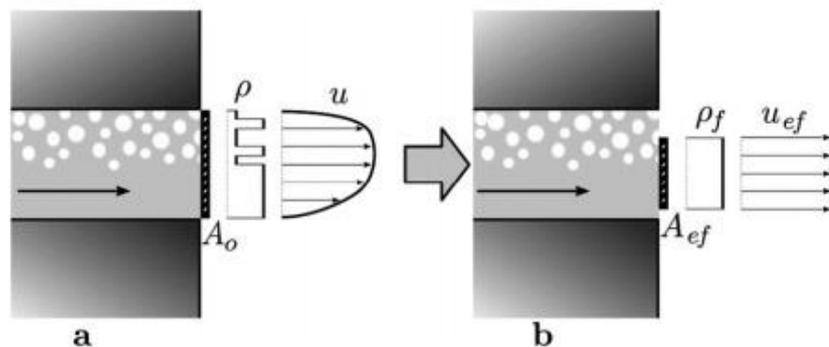


Figura 2.25: Representación de un flujo real a la salida de la tobera y la descripción simplificada del fluido a través de los coeficientes del área y velocidad efectivas. [18]

Esta imagen es una representación realista del flujo a la salida de la tobera y la descripción simplificada del fluido a través de los coeficientes de área y velocidad efectivas. Muestra el perfil de la velocidad de un flujo cavitante en el lado izquierdo y como, definiendo los dos coeficientes, la descripción puede simplificarse por conservación de la masa e inercia. Utilizando la ecuación de Bernoulli al flujo del lado derecho, se puede calcular una velocidad de salida teórica **(2.10)**

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

$$u_{teo} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_f}} \quad (2.10)$$

Siendo  $\Delta p$  la variación de presión entre la entrada y la salida de la tobera. El coeficiente de descarga puede expresarse como el flujo másico dividido entre el flujo másico teórico **(2.11)**.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_0 \rho_f u_{teo}} \quad (2.11)$$

Payri et al. [32] definió al coeficiente del momento **(2.12)** como el momento medido a la salida de las toberas de inyección dividido entre el momento calculado con la velocidad teórica **(2.10)** o "momento teórico". Para discriminar las pérdidas se presentan dos coeficientes adicionales: el coeficiente de área **(2.13)**, que contiene la reducción en el área efectiva, y el coeficiente de velocidad **(2.14)**, que contiene la reducción de la velocidad efectiva. Y el coeficiente de descarga de una tobera puede explicarse combinando los dos coeficientes **(2.15)**.

$$C_M = \frac{\dot{M}_f}{A_0 \rho_f u_{teo}^2} = \frac{\dot{M}_f}{2A_0 \Delta P} \quad (2.12)$$

$$C_a = \frac{A_{ef}}{A_0} = \frac{D_{ef}^2}{D_0^2} \quad (2.13)$$

$$C_v = \frac{u_{ef}}{u_{teo}} \quad (2.14)$$

$$C_d = C_a C_v \quad (2.15)$$

El equipo de prueba utilizado para las medidas de momentos fue diseñado y descrito detalladamente por Gimeno [33]. El diseño consiste en un recipiente que contiene una cámara de volumen constante y un acceso óptico pequeño, como se observa en la **Figura 2.26**, y que puede ser presurizada hasta presiones de  $p=10$  MPa para simular las condiciones internas de un motor. Originalmente fue diseñado para pruebas de inyectores diésel, por lo que se le tuvieron que realizar modificaciones y acoplar piezas diseñadas para poder adaptarlo a los requerimientos del inyector GDI. El recipiente se diseñó para medir la cantidad de movimiento de la inyección a partir de la fuerza

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

de impacto del combustible atomizado contra un sensor piezoeléctrico calibrado.

Como comprobaron Gimeno [20] y Desantes et al. [34] a través de sus diferentes hipótesis, la cantidad de combustible que salía del inyector era equivalente a la fuerza medida por el sensor. Dejando a un lado los efectos de la gravedad y suponiendo presión uniforme en el recipiente, la hipótesis principal es que la dirección del arrastre de aire es perpendicular a la del combustible después de chocar contra el sensor. Implica que la cantidad de movimiento por la interacción del aerosol con la atmósfera que lo rodea y la tensión viscosa en la dirección axial son cero.



*Figura 2.26: Renderizado del equipo de prueba para la medición de la cantidad de movimiento mostrando el sensor piezoeléctrico (en amarillo) a través del acceso óptico. [18]*

Gimeno [34] estableció que, asumiendo dichas hipótesis y el estado estacionario, la fuerza medida por el sensor es igual a la cantidad de movimiento del spray. Dichas hipótesis se establecieron cuando se ensayaba con los inyectores diésel. Cuando se ensayaba con inyectores diésel de un solo orificio se utilizaba una “configuración frontal” con el sensor alineándolo con los ejes del inyector y del recipiente, si se utilizaba un inyector diésel de múltiples orificios, se instalaba una “configuración lateral” en lugar de una frontal, con el sensor en un lado del recipiente y el inyector con un ángulo respecto al eje del recipiente, de manera que los orificios del inyector estuviesen alineados con el sensor. Por la diferencia geométrica de los

inyectores GDI y los patrones del atomizado que se producían, el trabajo fue más complicado y con mayor incertidumbre que con los inyectores diésel, como explicó Payri et al. [22].

Los inyectores GDI poseen un ángulo aproximado de  $80^\circ$  en sus orificios, lo que produce un atomizado más estrecho que un inyector diésel normal para promover la interacción laminar y la propagación de la llama [35, 36]. Por eso se descarta la configuración lateral usada en los inyectores diésel, ya que el sensor necesita estar más alejado del inyector, para no captar dos chorros al mismo tiempo. Como se muestra en la **Figura 2.28**.

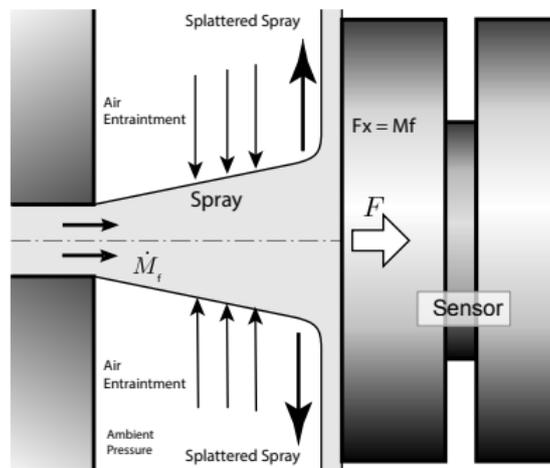


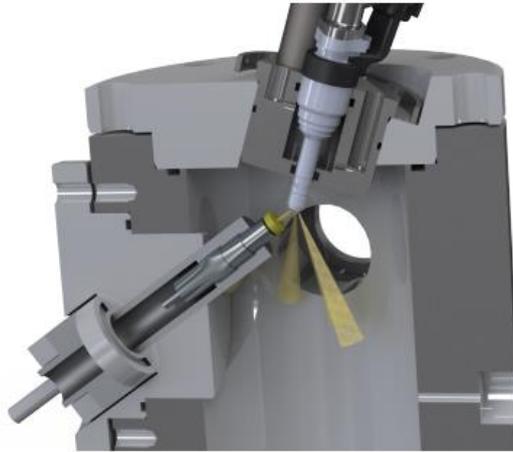
Figura 2.27: Representación esquemática del choque del fluido contra el sensor. [18]

Por la necesidad de tener que poner el sensor más alejado de la salida de la tobera, no hay seguridad de que todo el atomizado impacte en el sensor, además de que se ralentizaría el atomizado y, por ende, disminuiría la medida de la cantidad de movimiento. Dado esto, se optó por utilizar la configuración frontal que se utiliza para medir en los inyectores diésel de un solo orificio, con el objetivo de captar los ocho chorros de la inyección al mismo tiempo y con la ventaja de que todas las gotas pueden ser captadas por el sensor debido a la cercanía con la salida del inyector.

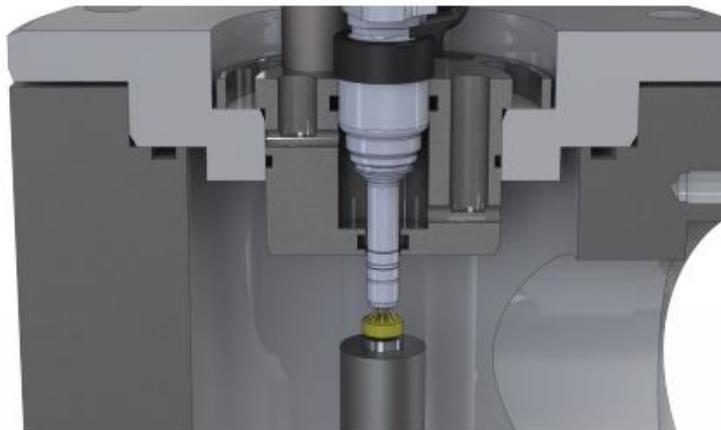
Se puede ver una imagen similar a la de la configuración lateral para la configuración frontal en la **Figura 2.29**. A la vez que resuelve problemas, también crea otras dudas porque el atomizado no impacta al sensor con un ángulo de  $90^\circ$ . Además, el arrastre de aire para los chorros en los inyectores GDI es mucho

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

más complejo que la entrada de aire simplificada en la **Figura 2.27**, y es probable que afecte en la medida.



*Figura 2.28: Renderizado del equipo de medición de la cantidad de movimiento con el sensor, inyector GDI y soporte del inyector en la configuración lateral. [18]*



*Figura 2.29: Renderizado del equipo de medición de la cantidad de movimiento con el sensor, inyector GDI y soporte del inyector en la configuración frontal. [18]*

Con el fin de corregir la medida de la configuración frontal, hay que conocer el ángulo con el que impacta el atomizado contra el sensor. Por esto y para asegurar de que todos los chorros atomizados salientes del inyector chocaran con el sensor a las distancias seleccionadas, se montó una cámara de alta velocidad (Photron SA-X2) con un objetivo microscópico de larga distancia delante del acceso óptico del montaje. En la **Figura 2.30** se observan seis fragmentos capturados por la cámara durante la inyección. Se puede apreciar como todos los chorros impactan contra el sensor. Por eso, se posicionó al inyector de manera que

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

el chorro que estuviese más a la derecha fuese perpendicular a la cámara. Pudiendo así, determinar el ángulo de impacto gráficamente. Por las pequeñas diferencias entre el ángulo medido y el ángulo nominal del taladro de los orificios ( $40^\circ$  vs  $37^\circ$ ), y el hecho de que dicha metodología no sea lo suficientemente sólida, el ángulo del taladro del inyector fue usado para escalar la fuerza medida por el sensor (componente axial) para la cantidad de movimiento del chorro.

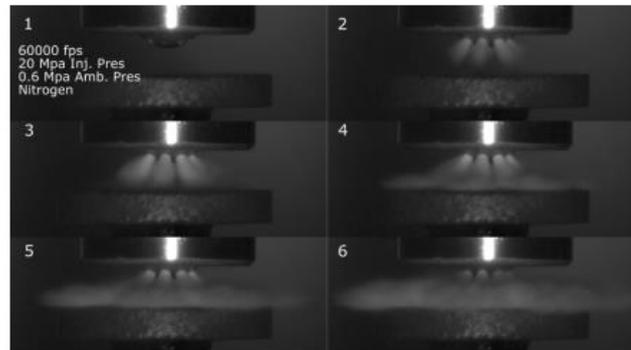


Figura 2.30: Seis fragmentos del momento de inyección grabado con una cámara de alta velocidad a través del acceso óptico del equipo de prueba de cantidad de movimiento. [18]

### 3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO

#### 3.1. SIMULINK

Con el software Simulink se realizaron los primeros ensayos para demostrar la viabilidad de este proyecto mediante las simulaciones 1D de los modelos sencillos de tasímetro. Los primeros modelos están conformados por un acumulador principal que tiene aguas arriba un volumen de valor constante y aguas abajo un elemento que simula las funciones de un inyector (fuente de caudal másico controlado), se encuentra aislado térmicamente y tiene definida una señal de inyección en el elemento que simula las funciones del inyector. En él se simuló el recorrido de las ondas de presión a lo largo de la tubería, y se concluyó que para realizar las simulaciones de forma correcta la señal tiene que estar definida en la salida del inyector (**Figura 3.1** o **Figura 6.4**) y no en el inicio del mismo (**Figura 6.1**), tal y como se puede observar en los anexos, específicamente en el modelo 1 y en el modelo 2.

Siendo la **Figura 6.4**, la correspondiente al modelo 2 de los anexos, la representación del modelo inicial para los ensayos, se definieron algunos factores de contorno y las características de la tubería (**Tabla 3.1**):

- Se definió a la presión atmosférica como  $p_{amb}=1$  bar ( $p_{amb}\approx 0,1$  MPa).
- Las condiciones iniciales en las que se encuentra la tubería son: temperatura  $T_0=293,15$  K, presión  $p_0=100$  bar y  $\dot{m}_0=0$  kg/s.
- La tubería se encuentra aislada térmicamente para evitar la transmisión de calor entre el ambiente y la tubería, por lo que  $\Delta T=0$  K.
- La salida de la fuente de caudal másico controlado está conectada a un reservorio que simula las condiciones del ambiente y se encuentra a  $p_{amb}=1$  bar y  $T=293,15$  K.
- En la salida del elemento que simula un inyector se definió la señal de inyección deseada con un elemento que transforma la señal sin unidades, en una señal de kg/s en función del tiempo.
- El fluido que se utilizó para realizar las simulaciones fue el agua, debido a que sus propiedades son conocidas. Por

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

ejemplo, su densidad que tiene un valor de  $\rho=998,21$  kg/m<sup>3</sup>.

MODELO 2-3	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	5	-	-
Diámetro (mm)	3	-	-
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	-	-
Nro. Segmentos	1	-	-
Especificación de pared de la tubería	Rígida	-	-

Tabla 3.1: Características de los modelos compuestos por una sola tubería (en los modelos 1, 2 y 3).

Este modelo tiene dos configuraciones, la primera tiene como objetivo obtener las señales de presión en el inicio y en el final del sistema, a través de la definición de la señal de inyección, como se observa en la **Figura 3.1**.

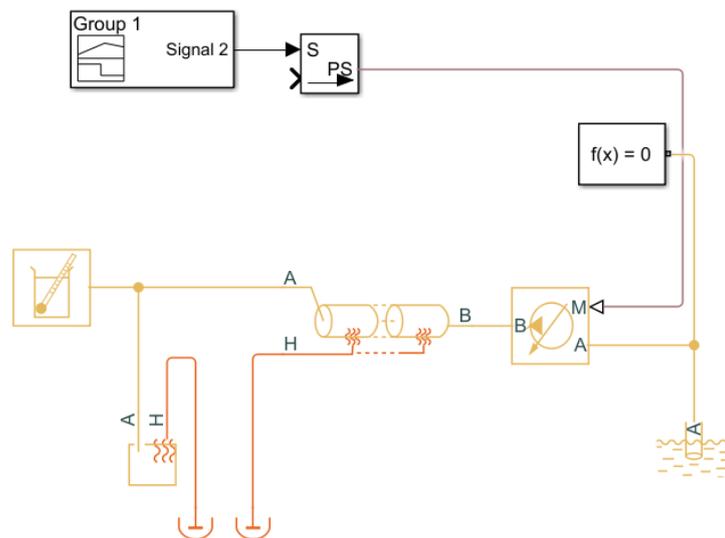


Figura 3.1: Representación esquemática de los modelos en los cuales se obtienen las señales de presión.

La segunda configuración del modelo tiene el objetivo de replicar la señal de inyección a través de las señales de presión obtenidas en la otra configuración, que se definieron a ambos extremos del sistema, como se muestra en la **Figura 3.2**.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

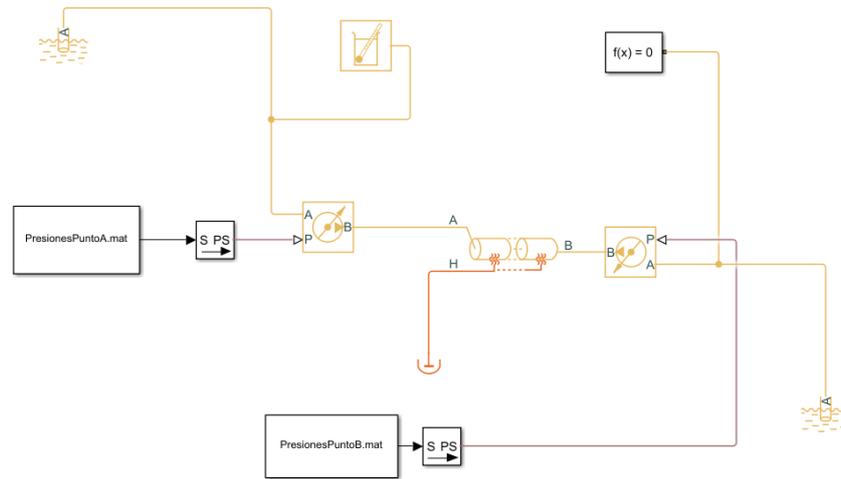


Figura 3.2: Representación esquemática de los modelos en los cuales se obtienen las señales de tasa de inyección.

Para estas simulaciones iniciales, se utilizó una señal de inyección con forma trapezoidal, vista en la **Figura 6.2** de los anexos, que se utilizó en el modelo 1 y en el modelo 2.

Como resultado de estas simulaciones se obtuvo que es posible replicar la señal de la tasa de inyección de manera casi exacta a través de la definición de las dos señales de presión en los extremos del sistema.

Demostrado el correcto funcionamiento de los modelos, se procedió a realizar el diseño hidráulico del ensamblaje utilizando el software Simulink. Partiendo de las características del modelo anterior, se modificaron las mismas en los modelos posteriores, también se modificó la cantidad de tuberías que conforman el sistema. Los modelos siguientes pasaron a estar conformados por tres tuberías que, en el orden que se encuentran, representan a la tubería de alimentación del acumulador (tubería larga), el acumulador principal (raíl) y la línea de inyección que comunica la salida del acumulador con la entrada del inyector (línea corta).

Dichas tuberías tienen configuraciones diferentes, como por ejemplo: se toman en cuenta la inercia del fluido y la flexibilidad de las tuberías para las simulaciones, cada tubería tiene las dimensiones del elemento al que representa, etc. como se puede observar en la **Tabla 3.2**.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

MODELO 9-10-11	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	7,06x10 <sup>-6</sup>	2,94x10 <sup>-4</sup>	5,72x10 <sup>-6</sup>
Nro. Segmentos	1	45	45
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 3.2: Características de los modelos conformados por tres tuberías (desde el modelo 4 hasta el modelo 11).

Estos modelos también varían en la señal de inyección que se definió en el inyector, todo esto con el objetivo de hacer cada modelo más realista que el anterior. Se utilizó una señal de inyección trapezoidal, pero con una cantidad mayor de tasa de inyección que se muestra en la **Figura 6.12** (usada en el modelo 5), luego se aumentó la complejidad del sistema y se definió una señal de inyección ECN, como en la **Figura 6.17** (utilizada en los modelos 7, 9 y 11).

Una vez conseguido que se replicaran con éxito todo tipo de señales de inyección, se dividió al sistema en la mayor cantidad posible de elementos finitos, para obtener un sistema discreto y evaluar la evolución de las gráficas a lo largo de cada tubería y poder decidir los puntos óptimos donde se ubicarán los sensores de medición de presión.

El último modelo realizado en Simulink (el modelo 11) tuvo como finalidad evaluar las distintas posiciones donde se colocarán los sensores de presión. Se decidió evaluar la posición del primer sensor, ya que el segundo sensor se quedará fijo en la parte final de la línea corta.

Las posiciones estudiadas para el primer sensor fueron en el raíl y en la línea corta, porque únicamente se realizó el diseño mecánico del acumulador principal y de la línea de inyección, la razón de esto es que la tubería de alimentación es un sistema que ya está fabricado y, como se explica en los factores a considerar de SolidWorks, la entrada superior del raíl se diseña en base a este sistema de alimentación. Se estudiaron las siguientes posiciones: el inicio del raíl y la línea corta (segmento 1), a un cuarto del inicio del raíl aproximadamente (segmento 11), a un tercio del inicio del raíl (segmento 15), la mitad del raíl aproximadamente (segmento

22) y a una distancia de dos tercios del inicio del raíl (segmento 30).

Para la realización de las simulaciones se utilizó como mínimo un tiempo de simulación de  $t=0,001$  s, para que la señal de inyección quedara definida en un intervalo de tiempo en el cual su valor regresa a  $\dot{m}=0$  kg/s, y evaluar el comportamiento de las señales de presión a lo largo del fenómeno de la inyección.

### 3.2.SOLIDWORKS

A partir del diseño hidráulico realizado en Simulink se inició el planteamiento inicial de las dimensiones del diseño mecánico en acero inoxidable del raíl y de la línea corta, a los cuales se le agregaron más piezas a raíz de la evolución del diseño.

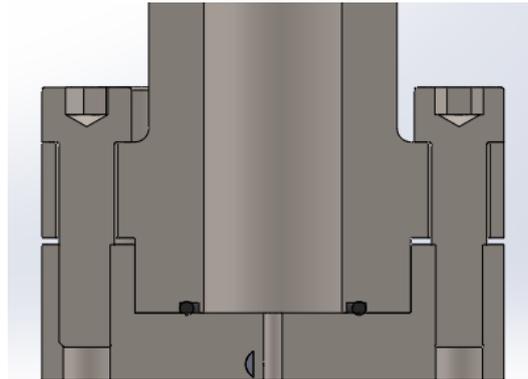
El raíl tiene como dimensiones internas una longitud  $L=340$  mm y un diámetro  $\Phi=19,35$  mm, por otro lado, la línea corta tiene como dimensiones una longitud  $L=100$  mm y diámetro  $\Phi=2,7$  mm. Con estos datos se realizó el primer diseño de ambas piezas, a través del cual se definieron otras dimensiones de las mismas y se modificaron algunas ya existentes.

El primer diseño consistió en una tubería con las dimensiones internas del raíl, con un diámetro exterior de  $\Phi_{ext}=36$  mm (para resistir las altas presiones) y una longitud exterior de  $L_{ext}=360$  mm, que se acopló a un elemento definido como la base, con mismo diámetro externo, longitud  $L_{ext}=100$  mm y las dimensiones internas de la línea corta. Debido a las altas presiones a las que será sometido el ensamblaje, estas dos piezas tienen que encajar entre sí y la base debe tener una especie de escalón con un poco de juego en su contacto con el raíl para evitar que se produzcan deformaciones y separaciones por las fuerzas ejercidas por las presiones y los tornillos que sujetan ambas piezas, como se puede observar en la **Figura 3.3**.

Además, el ensamblaje tiene que atornillarse a la maqueta en la cual se vayan a realizar los ensayos, por lo que el raíl y la base deben tener un diámetro mayor en el área que está en contacto entre ambas piezas, para poder realizar los orificios de taladro para los tornillos. Se realizaron seis orificios de tornillo en cada pieza, cuatro para acoplarse entre sí y dos para el montaje

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

en la maqueta. Los orificios del raíl son pasantes y poseen un diámetro  $\Phi=9$  mm, ya que la fuerza de sujeción la realiza la cabeza del tornillo contra la parte plana del raíl. La base posee dos orificios pasantes de diámetro  $\Phi=9$  mm, que son por donde pasan los tornillos de montaje en la maqueta, y cuatro orificios roscados de la métrica de los tornillos encargados de la sujeción entre el raíl y la base. Para el ensamblaje se utilizaron tornillos de métrica ocho (M8).



*Figura 3.3: Detalle de acople mediante tornillos entre el raíl y la base, y de la tórica.*

El raíl posee en una rosca mecanizada 9/16-18 UNF en su extremo superior para la conexión con la tubería larga, ya que esta pieza se encuentra fabricada, y una unión con cierto ángulo para que el combustible entre en raíl. Además, el raíl posee un pequeño orificio que cumple las funciones de desahogo para disminuir las altas presiones en dicha unión y el mecanizado para la instalación del sensor piezorresistivo (**Figura 6.44**), que es el encargado de medir la presión en el primer punto de medida. Por esto, el raíl en su parte superior sufre un cambio de diámetro y el aplanado de una parte del cilindro para poder incluir dicho mecanizado y que el sensor encaje perfectamente en el raíl, como se muestra en la **Figura 3.4**, en vez de acoplarle un casquillo que posteriormente tuviese que soldarse.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

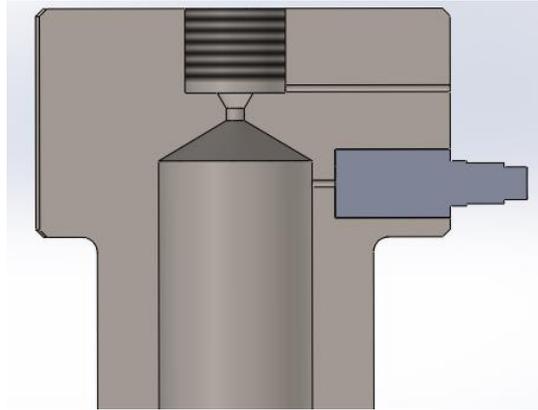


Figura 3.4: Detalle en parte superior del raíl de la rosca 9/16-18 UNF, del orificio de desahogo y del acople directo del inyector.

El raíl en su parte superior e inferior posee el mismo diámetro exterior que la base  $\Phi=67$  mm, que es el diámetro mínimo con el cual los tornillos encajan entre los dos diámetros del raíl. En su parte inferior el raíl posee una cavidad para una tórica de diámetro  $\Phi=1$  mm, que tiene la función de reducir los esfuerzos que provocan las presiones en la unión con la base, como se ve en la **Figura 3.3**.

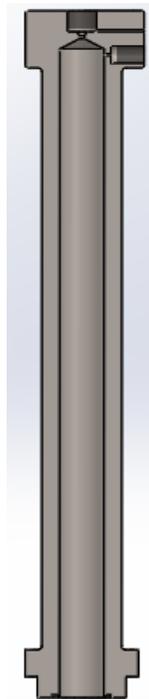
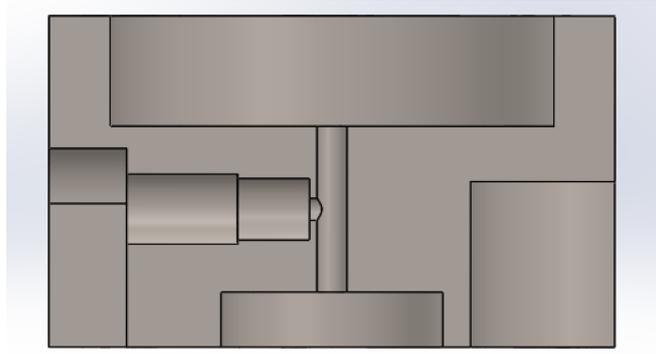


Figura 3.5: Sección del raíl.

El primer diseño realizado poseía una línea corta de longitud  $L=100$  mm, pero se decidió modificar dicha longitud por condiciones de diseño, ya que los tornillos no podían acoplar el

ensamblaje a la maqueta por su longitud, además de mejorar la manejabilidad del ensamblaje al reducir su longitud. Se planteó una longitud  $L=10$  mm, pero debido al diseño propio de la base se tuvo que modificar posteriormente la longitud a  $L=15$  mm, por los mecanizados de la unión con el raíl, la unión con el casquillo del inyector y el orificio para el sensor (**Figura 3.6**).



*Figura 3.6: Detalles de la base: unión con el raíl, unión con el casquillo del inyector, mecanizado para el sensor y mecanizado para las conexiones electrónicas del inyector.*

La base, al contener la línea corta, es la pieza sobre la cual se tiene que instalar el sensor piezoeléctrico. Al igual que con el raíl, se aplanó una parte del cilindro para poder realizar el mecanizado para el montaje del sensor, que se quería que estuviese lo más cercano posible a la línea corta (aproximadamente 1 mm).

En el primer diseño donde se incluyó el montaje del sensor piezoeléctrico, el aplanado realizado fue el mínimo para que el diámetro del taladro se pudiese realizar y observó que el sensor estaba muy apartado del punto donde se quiere realizar la medición, en el segundo diseño se realizó el aplanado hasta el área imaginaria que forman las cabezas de los tornillos en la base, para evitar el riesgo de rotura al tener fuerzas de alta magnitud en los orificios del taladro, y se observó, de nuevo, que el sensor se encontraba apartado de la línea corta. Para solucionar esto, se tuvo que realizar un fresado en la pieza que no interrumpiese los orificios por donde pasan los tornillos y lo suficientemente profundo para lograr posicionar al sensor lo más cerca posible de la línea corta tal y como se deseaba, esto se muestra en la **Figura 3.6**.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

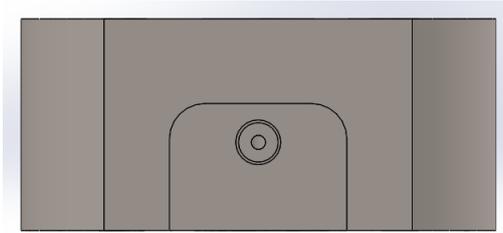


Figura 3.7: Detalle del aplanado y del fresado en la base para conexión del sensor piezoeléctrico.

Al modificar los diseños, se agregaron piezas que lo hacían más complejo, como el casquillo del inyector. Dicho casquillo asegura la unión entre el final de la línea corta y la entrada del inyector, ya que hace de aguante para el inyector y además, es una pieza importante en el diseño mecánico porque permite la adaptación de distintos inyectores con características similares a los inyectores GDI. El casquillo tiene las dimensiones para quedar acoplado a la base, porque su diámetro externo es igual al diámetro interno de la base en su parte inferior, su diámetro interno está diseñado para que el inyector Spray G encaje perfectamente en él mediante la tórica del inyector. Todos estos ajustes entre piezas tienen sus respectivas tolerancias que se muestran en los planos de las mismas.

El casquillo posee en su cara superior una cavidad para una tórica de diámetro  $\Phi=1$  mm, lo más cercano posible al diámetro interno para evitar que las presiones separen al casquillo de la base y se produzcan fugas durante los ensayos, puesto que estas piezas en vez de encontrarse atornilladas entre sí, se encuentran presionadas por una pieza que se coloca en la parte final del ensamblaje, la placa de ajuste.

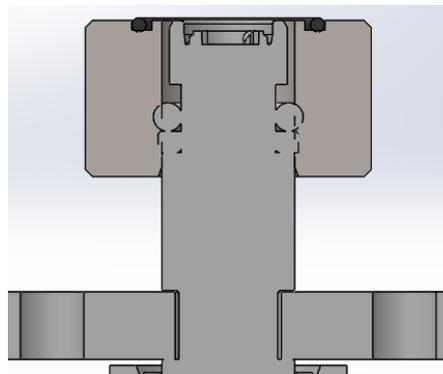


Figura 3.8: Detalle de unión entre el casquillo y el inyector, y de la tórica en la cavidad.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

La última pieza que se añadió al ensamblaje fue la placa de ajuste y juega un papel fundamental en la estabilidad del inyector, del casquillo y de la base durante los ensayos. Dicha placa tiene la misma geometría que la cara inferior de la base y está unida a ella mediante tornillos, tiene dos orificios pasantes de diámetro  $\Phi=9$  mm, para los tornillos que unen el ensamblaje a la maqueta, y cuatro de diámetro  $\Phi=8,4$  mm que son ajustados para tener una buena sujeción de la placa de ajuste con la base. Debido a esto, se cambió el diseño de la base, se modificaron los orificios de M8 para volverlos pasantes y utilizarlos para la unión con la placa de ajuste.

La placa de ajuste tiene un orificio pasante en su centro con dos diámetros diferentes: en el diámetro mayor está la unión entre la placa de ajuste y el casquillo del inyector, por lo que el diámetro tiene que ser igual al del casquillo del inyector, y el diámetro menor tiene que ser mayor que el del inyector para que no dificulte el acople del inyector en el casquillo. Dicho cambio en el diámetro interno ocasiona que se forme una especie de escalón en la placa de ajuste que evita desplazamientos o deformaciones de la misma, como se observa en la **Figura 3.10**.

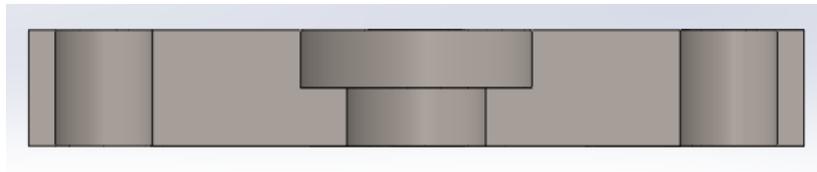


Figura 3.9: Detalle de la sección de la placa de ajuste.

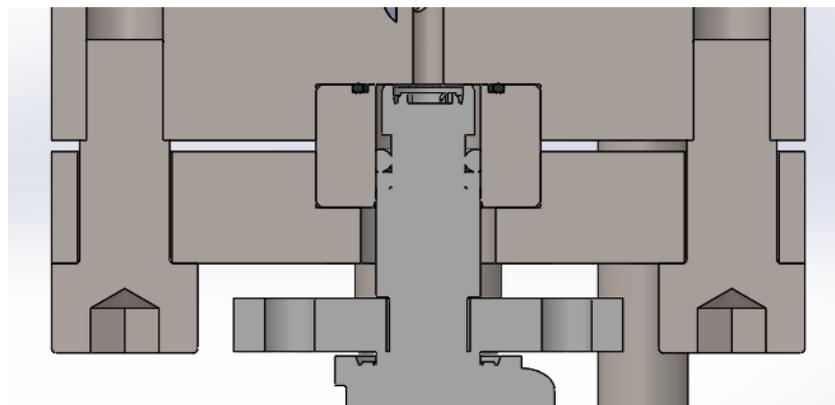
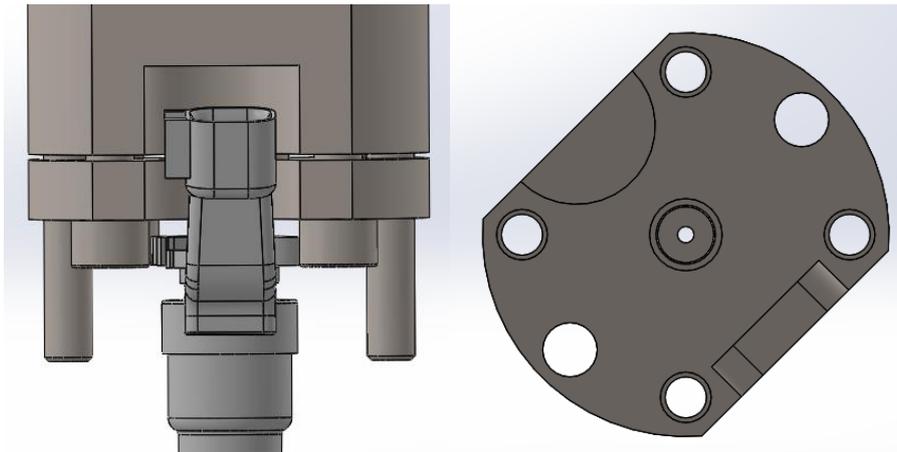


Figura 3.10: Detalles de la placa de ajuste: acople mediante tornillos entre la base y la placa de ajuste, unión con el casquillo del inyector y ajuste holgado con el inyector.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Una vez realizado el diseño completo del ensamblaje, se le agregó el renderizado del inyector Spray G, previamente diseñado, para evaluar que el diseño no interfiriera con la geometría del inyector. Al hacer esto se observó que las conexiones electrónicas del inyector chocaban con la placa de ajuste y la base, por lo que se realizó un aplanado y un fresado en estas piezas para que se pudieran realizar de manera cómoda las conexiones electrónicas del inyector, como se muestra en la **Figura 3.11**.



*Figura 3.11: Detalle del mecanizado realizado para las conexiones electrónicas del inyector.*

Para optimizar el ensamblaje se decidió diseñar las piezas lo más ligeras posibles, por lo que se modificaron dimensiones de las mismas y se eliminaron fragmentos que no influyesen en el funcionamiento del ensamblaje, esto trajo como consecuencia que la pieza tuviese una mejor manejabilidad. Las piezas que se redujeron fueron el raíl, la base y la placa de ajuste, la manera en que se distribuyeron los orificios de taladro para los tornillos permitió realizar cortes en el volumen excedente de estos, como se muestra en la **Figura 3.12** (donde se observa que no es simétrico por la inclusión del mecanizado del montaje del sensor en la pieza), la **Figura 3.13** y la **Figura 3.14**.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

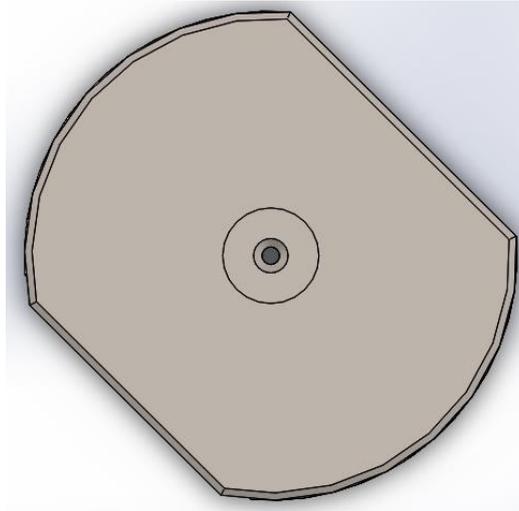


Figura 3.12: Detalle de los cortes en la parte superior del raíl.

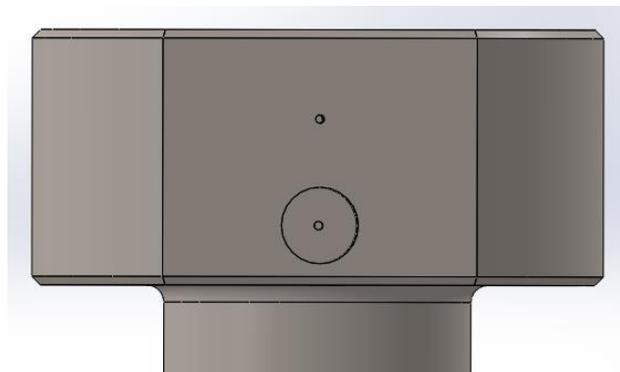


Figura 3.13: Detalle del corte en la ubicación del sensor piezorresistivo en el raíl.

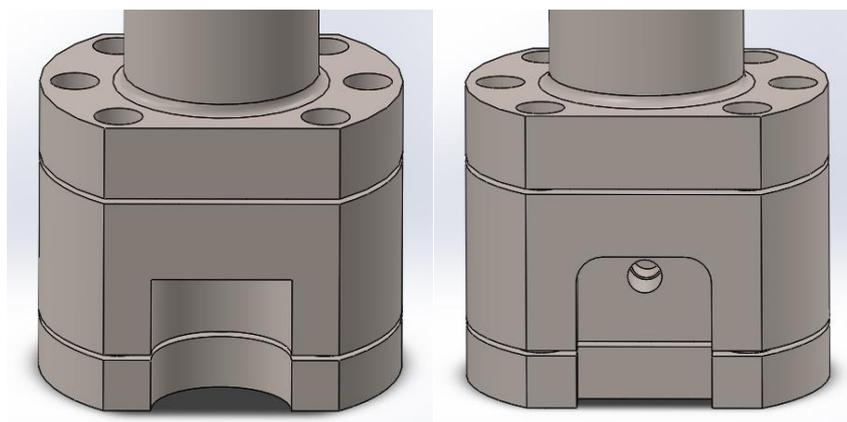
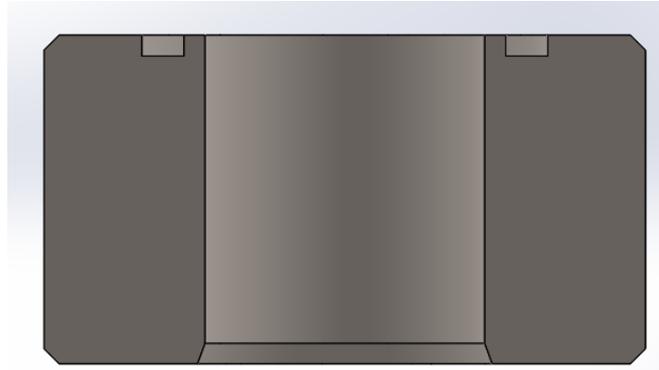


Figura 3.14: Detalle de los cortes en ambos lados de la base, de la placa de ajuste y de la parte inferior del raíl.

Por último se realizaron los redondeos en las zonas del raíl donde se produce un cambio de diámetro pronunciado, como se puede observar en la **Figura 3.13**, en la **Figura 3.14** y en la **Figura 6.41** en los anexos, donde se muestra el renderizado de la pieza.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

También se realizaron chaflanes en las esquinas del diámetro en la parte superior del raíl, como se puede observar en la **Figura 3.13**, en las piezas que encajan en otra y donde encaja el inyector, como sucede con el casquillo del inyector (**Figura 3.15**).



*Figura 3.15: Detalle de los chaflanes en el casquillo del inyector.*

## 4. SOLUCIONES ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO

### 4.1. DISEÑO

Debido a todo lo realizado en el diseño mecánico, que se explicó en el punto anterior, se presentaron distintas propuestas para la ubicación de los puntos de medición, la conexión entre la base y el inyector, la longitud de la línea corta, cómo se conectarán los sensores al ensamblaje, cómo se acoplarán la base y el raíl, y cuáles elementos compondrán el ensamblaje.

#### 4.1.1. Conexión entre el raíl y la base

Fue la primera parte del diseño mecánico que presentó distintas soluciones, ya que es fundamental para la correcta realización de los ensayos y tiene que evitar que se produzcan fugas por movimientos de las piezas del ensamblaje:

1. Roscada: fue la primera opción que se presentó para acoplar dichas piezas, debido a que aseguraría una unión sin fugas, pero supondría buscar una solución diferente para el montaje en la maqueta, como por ejemplo un montaje a la misma mediante tornillos.
2. Atornillada: esta opción permite asegurar que no exista ningún tipo de movimiento en el ajuste entre el raíl y la base, además se utilizaría un solo tipo de conexión entre las piezas y para el ensamblaje con la maqueta. Se puede observar un ejemplo en la **Figura 3.3**.

#### 4.1.2. Ubicación de los puntos de medición

Por la variación que se produce en la reproducción de la señal de inyección dependiendo de los puntos donde se midan las presiones, se propuso variar la posición del primer punto de medición y dejar fijo el segundo punto de medición al final de la línea corta. Para obtener las presiones de estos puntos hay que obtenerlas mediante simulaciones en el modelo 9 y posteriormente utilizarlas en el modelo 10 y en el modelo 11 para replicar la señal de inyección. Los puntos de medida propuestos a lo largo del sistema fueron:

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

1. Al Inicio del raíl: al utilizar este punto de medición se reproduce casi con exactitud la señal de inyección, debido a que al estar tan distante del otro punto de medición permite tener un conocimiento mayor del comportamiento de las ondas a lo largo del ensamblaje.

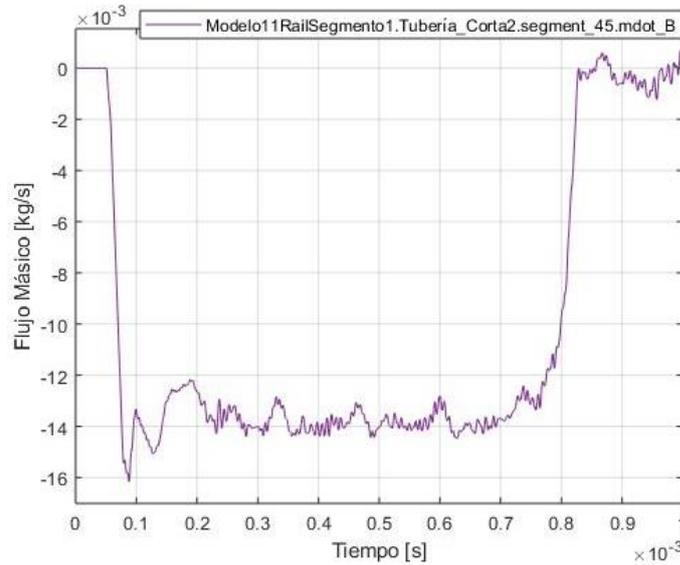


Figura 3.16: Gráfica del flujo másico utilizando la presión en el inicio del raíl.

2. A un cuarto de la longitud del inicio del raíl: la gráfica obtenida en esta simulación tiene muy pocas diferencias con la señal obtenida al inicio del raíl, se produce más ruido en las gráficas y no replica con tanta exactitud a la señal real.

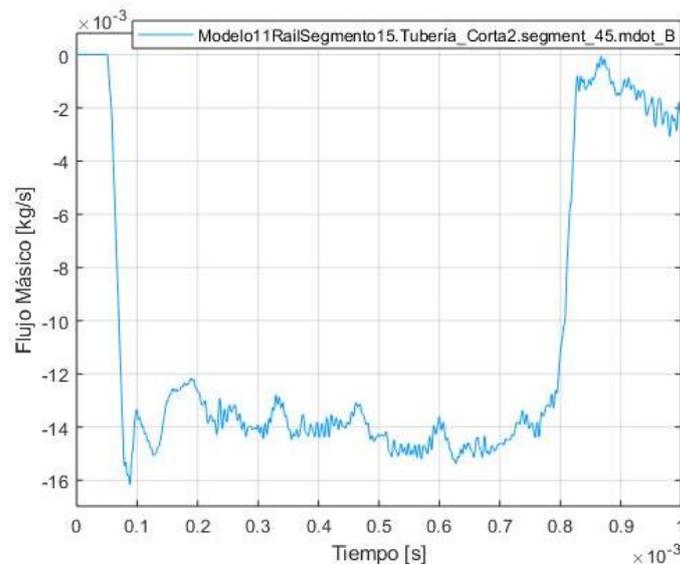


Figura 3.17: Gráfica del flujo másico utilizando la presión a un cuarto del inicio del raíl.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

3. A la mitad del raíl: con esta simulación se observó que a medida que se iba reduciendo la distancia entre los dos puntos de medición se va perdiendo exactitud en la reproducción de la señal.
4. A un cuarto del final del raíl: a esta altura del raíl se produce una diferencia muy notoria entre la señal de inyección y la señal obtenida, debido a la poca distancia entre ambos puntos no se puede observar con exactitud el comportamiento de las ondas de presión a lo largo de todo el raíl. Además causaría problemas en el montaje del ensamblaje porque interferiría en la instalación de los tornillos.
5. Al inicio de la línea corta: esta última opción no es viable por motivos del diseño mecánico, debido a que la base podría tener problemas durante la realización de los ensayos, ya que los mecanizados para realizar el montaje de los sensores pueden provocar que la base quede diseñada con espesores muy pequeños que no puedan soportar las presiones de trabajo. Además, la distancia que pudiese haber entre ambos sensores es muy corta y, como se observó en los ensayos a lo largo del raíl, a medida que se iba disminuyendo la distancia entre ambos puntos de medición la gráfica se distorsionaba más y dejaba de parecerse a la señal original.

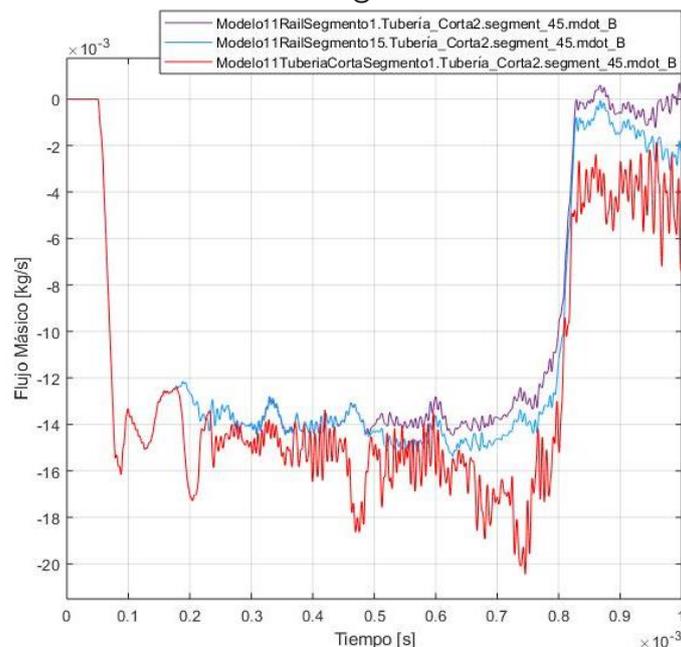


Figura 3.18: Gráfica de comparación del flujo másico utilizando las señales al inicio del raíl, a un cuarto del inicio del raíl y al inicio de la línea corta.

#### 4.1.3. Conexión entre la base y inyector

Este punto es uno de los más importantes para que haya un funcionamiento correcto durante los ensayos, porque es la manera en la que se conectará el inyector al ensamblaje. En estas propuestas se asegura que el combustible llega sin dificultades al inyector y no se produzcan problemas con las medidas:

1. Directa: esta opción se realizaría mediante un mecanizado en la base en función de las dimensiones del inyector para la conexión con el Inyector. En este caso la fuerza que se produce al montar el ensamblaje en la maqueta sería la única que mantendría unido al inyector con la base, agregado a esto, sólo se podría trabajar con un modelo de inyectores.
2. Con casquillo: en este caso se plantea la incorporación de un casquillo con diámetro externo definido en la base, pero con diámetro interior variable en función del inyector con el que se quiera trabajar. Tiene como ventaja que se puede trabajar con distintos modelos de inyectores al diseñar un casquillo con sus las dimensiones del mismo, por otro lado, supone un diseño más costoso por la fabricación de una pieza extra.

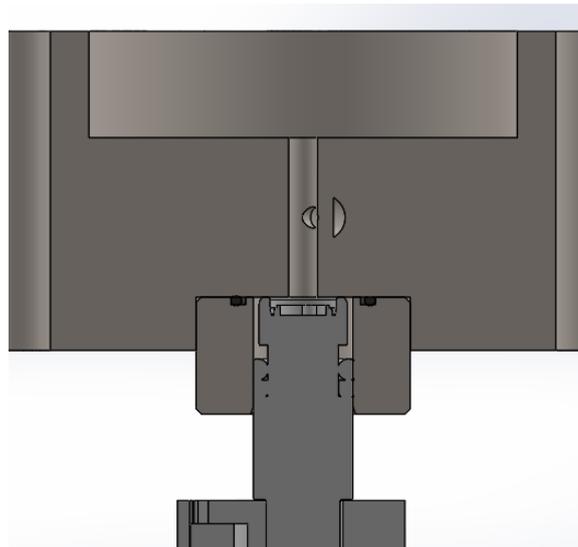


Figura 3.19: Representación de la conexión entre la base y el raíl mediante un casquillo.

#### **4.1.4. Longitud de la línea corta**

Este apartado depende del diseño mecánico del ensamblaje y de elementos externos al mismo que son necesarios y que se tienen que obtener en el mercado:

1.  $L=100$  mm: esta fue la longitud inicial utilizada en las simulaciones realizadas en Simulink. Al realizar el diseño mecánico se visualizó que era poco rentable, porque la longitud de los tornillos necesarios para realizar el montaje en la maqueta es muy grande (no es un tamaño de tornillos M8 comercial). Aunque este diseño podría permitir que se realizaran los puntos de medición de presión en los extremos de la línea corta.
2.  $L=15$  mm: esta opción surge de los cálculos del espacio necesario para mecanizar las uniones con el raíl y el casquillo y de la conexión del sensor, para evitar que se produzcan espesores que puedan suponer un riesgo de rotura durante los ensayos. Además, podrían utilizarse tornillos comerciales para el montaje del ensamblaje en la maqueta.

#### **4.1.5. Conexión de los sensores al ensamblaje**

Los sensores son elementos fundamentales para lograr el objetivo de este proyecto, por ende se tienen que acoplar al ensamblaje de la mejor manera posible para evitar perturbaciones externas que modifiquen la captación de las medidas de presión:

1. Mediante un casquillo externo: de este modo se puede diseñar una pieza que sea más ligera, pero más costosa porque necesita un mayor tiempo de mecanizado, la fabricación de los casquillos y el soldado para unirlos a las piezas.
2. Mediante un casquillo incorporado en la pieza: con esta opción las piezas serán más pesadas porque tendrán más material para poder realizar el montaje de los sensores, pero será más económica la fabricación porque únicamente se realizará el mecanizado. Esta configuración evitará que se produzcan fugas por una mala soldadura.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

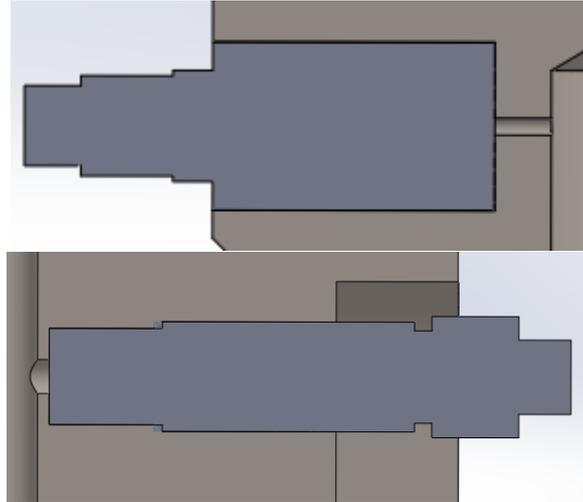


Figura 3.20: Detalle de la conexión de los sensores en el raíl y en la base.

#### 4.1.6. Elementos que componen el ensamblaje

Debido a los cambios que sufre el diseño mecánico por las distintas configuraciones que se pueden adoptar, hay piezas que son necesarias para el funcionamiento y para mantener su estabilidad durante los ensayos:

1. Compuesto por raíl y base: fue el primer modelo diseñado en el que se acoplan la base, el raíl y el inyector. La manera de evitar que el inyector se separe del ensamblaje es por la presión que se produce al realizar el montaje en la maqueta, ya que es muy inestable por la falta de sujeciones entre el ensamblaje y el inyector. Esto se puede observar en la **Figura 3.21**.
2. Compuesto por raíl, base y casquillo del Inyector: a la configuración anterior se le agrega un casquillo con la finalidad de mantener en la posición correcta al inyector durante los ensayos. Diseñar un casquillo donde encajar el inyector permite que el proyecto pueda ser utilizado en otros ensayos, ya que únicamente hay que diseñar el casquillo específico para cada tipo de inyector que se quiera estudiar. Se puede observar una representación en la **Figura 3.22**.
3. Compuesto por raíl, base, casquillo del inyector y placa de ajuste: por motivos de diseño el modelo anterior puede ser inestable, ya que si no se ejerce suficiente fuerza contra la maqueta al momento de realizar el montaje, el casquillo y el inyector se pueden separar del resto del ensamblaje por

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

las fuerzas de las presiones, provocando fugas que demoren la medición de tasa o perjudiquen los experimentos. Por lo que se propuso agregar una placa en la parte inferior del sistema que se atornilla a la base y ejerza presión en el casquillo contra la base, para evitar que se produzcan fugas. Como se observa en la **Figura 3.23**.

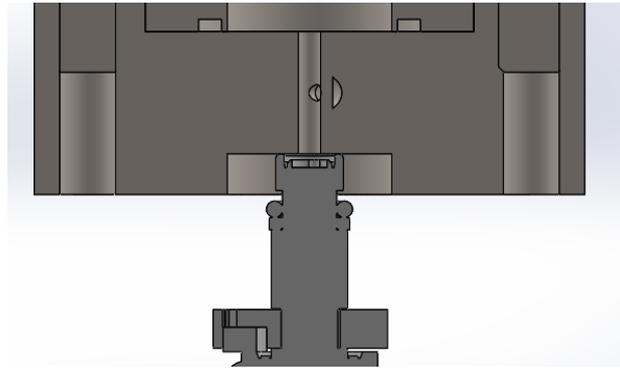


Figura 3.21: Representación de conexión entre la base y el inyector.

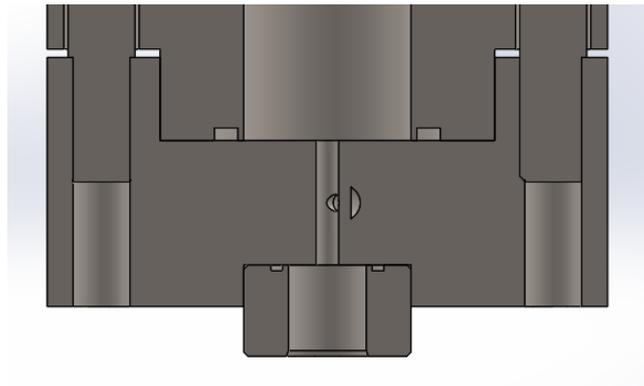


Figura 3.22: Representación de la conexión entre la base y el casquillo del inyector.

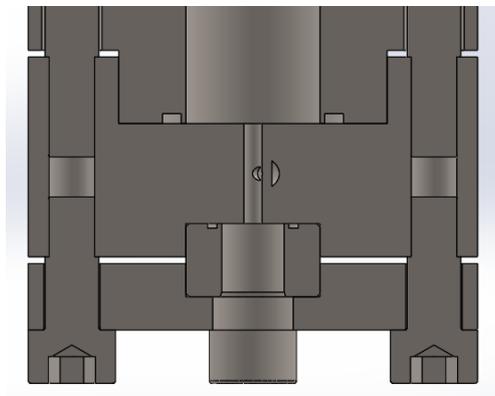


Figura 3.23: Representación del montaje con la placa de ajuste sujetando al casquillo del inyector.

## 4.2. MATERIALES

Como se especificó previamente, el ensamblaje va a estar sometido a presiones y esfuerzos de alta magnitud, por lo que tiene que realizarse en un material que sea resistente y no sufra deformaciones al estar en contacto con la gasolina. Se presentaron propuestas como tuberías de PVC, hierro, acero galvanizado o acero inoxidable, pero se decidió realizar el ensamblaje con acero inoxidable por su resistencia a la corrosión y las buenas propiedades mecánicas que posee (tenacidad, resistencia mecánica, etc.). Únicamente se tiene que definir el tipo de acero inoxidable a utilizar:

- Acero Inoxidable AISI 304:

Es un tipo de acero que es mucho más resistente a la oxidación debido a los elementos que lo conforman, es una aleación de hierro, carbono, cromo, níquel, manganeso, fósforo, sulfuro y silicio, elementos que aumentan su resistencia a la corrosión. Se utiliza comúnmente en cubiertos, tuberías, tornillos, tuercas, elementos de cocina, etc.

- Acero Inoxidable AISI 316:

Además de los elementos que posee el acero inoxidable 304, posee Molibdeno el cual mejora drásticamente su resistencia a la corrosión, haciéndolo más apto para elementos o piezas que vayan a estar expuestos a procesos químicos o ambientes salinos. Utilizado en equipos de preparación de alimentos, equipos de laboratorio, resortes, intercambiadores de calor, etc.

- Acero F-1140:

También conocido como acero de construcción al carbono. Es un acero que puede ser sometido a templado y revenido, y no posee buenas condiciones para ser soldado. Es comúnmente utilizado en piezas que necesiten una resistencia mecánica media o que no estén sometidos directamente a esfuerzos o fatiga. Es usado en piezas estructurales de maquinarias y en las barras de acero corrugado que se utiliza en el hormigón armado.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

- Acero Dúplex AISI 2205:  
Este es un acero que está mejorado con nitrógeno. Es un acero que posee las cualidades de las aleaciones de los aceros austeníticos y de los aceros ferríficos, como lo son: buena resistencia a la corrosión, bueno para soldar, etc., pero no puede trabajar a temperaturas muy elevadas porque se vuelve frágil (aproximadamente a  $T=315\text{ }^{\circ}\text{C}=588,15\text{ K}$ ). Es utilizado en tuberías, procesos alimenticios, intercambiadores de calor, etc.
- Acero bonificado F-1252:  
Es un acero que posee muy buenas condiciones de resistencia y tenacidad, pero no es bueno para realizar soldaduras. Se utiliza en la fabricación de maquinarias y piezas mecánicas como engranajes, bielas, manivelas, piñones, etc.
- Aluminio aleado Al-Zn 7075-T6:  
Es una de aleación de aluminio con zinc que mejora las condiciones del aluminio, como un elevado límite elástico y permite que sea utilizado en aplicaciones de la industria automovilística por tener una menor densidad que los aceros, además es utilizado en la fabricación de cañas de pescar, arcos y flechas, tornillos, armamento, herramientas etc.
- Viton FKM 80SH:  
Este elemento es un caucho fluorado (fluoro-carbono) que presenta buena resistencia mecánica, resistencia a las altas temperaturas, a las grasas, a los combustibles, a los químicos y a los ácidos, etc. Es utilizado en tóricas, mangueras, tuberías, sellos, etc.

## **5. DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN ADOPTADA**

### **5.1. DISEÑO**

#### **5.1.1. Conexión entre el raíl y la base**

Siendo esta una de las primeras configuraciones con varias propuestas, las demás soluciones dependerán de la que se utilice para conectar al raíl con la base.

Por lo que se eligió conectar estas dos piezas mediante tornillos, para tener una mayor rigidez en el ensamblaje y poder utilizar el diámetro mayor que se encuentra en la parte inferior del raíl para poner los orificios de los tornillos con los que se realizará el montaje en la maqueta.

#### **5.1.2. Ubicación de los puntos de medición**

Al momento de decidir cuál era la mejor ubicación para el primer punto de medición se priorizó aquel diseño en el que se replicase con mayor exactitud la señal de inyección ECN. También se tomaron en cuenta aquellos modelos que no comprometieran el montaje en la maqueta, por lo que este punto de medición, al estar alejado de la parte inferior del raíl, permite que los tornillos con los que se realiza el montaje se puedan instalar de manera cómoda. Por último, se valorizó aquellos que fuesen factibles de realizar desde el punto de vista del diseño mecánico, por ejemplo el tener ambos puntos de medición en la línea corta no es posible y esto condujo a elegir al inicio del raíl como la posición del primer sensor de presión.

#### **5.1.3. Conexión entre la base y inyector**

El objetivo principal del tasímetro es la medición de inyectores Spray G, lo que hace atractiva la opción de que el inyector encaje directamente en la base, pero al utilizar un casquillo como medio de conexión entre la base y el inyector es un valor agregado para el diseño, porque permite la opción de diseñar un casquillo específico para cada modelo de inyector que se quiera estudiar.

Se eligió utilizar un casquillo aunque suponga un diseño más costoso por la fabricación del mismo y de la placa de

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

ajuste, pero es un diseño que será más seguro para la realización de los ensayos por las restricciones de movimiento que existen.

#### **5.1.4. Conexión de los sensores al ensamblaje**

Se decidió realizar el mecanizado de cada sensor incorporado en el raíl y en la base, evitando así la realización de soldaduras (donde se pueden producir fugas y problemas en los ensayos si se realizan mal) y la fabricación de dos piezas extras.

#### **5.1.5. Longitud de la línea corta**

Por condiciones de diseño, la base tiene que ser lo más corta posible para que los tornillos del montaje puedan sujetar con firmeza al ensamblaje en la maqueta. Como consecuencia del casquillo para el sensor de presión que se diseñará en la base, la longitud de la línea corta no puede ser tan pequeña porque se producirían espesores muy pequeños en algunos sectores de la base, lo que podría generar roturas por las altas presiones.

#### **5.1.6. Elementos que componen el ensamblaje**

Debido a todas las soluciones adoptadas anteriormente, el ensamblaje tiene que estar conformado por el raíl, la base, el casquillo del inyector y la placa de anclaje, ya que con esos elementos el ensamblaje tendrá una mayor efectividad al momento de mantener a las piezas unidas entre sí y evitando fugas. Todo esto mediante la implementación de la placa de ajuste que realiza esta función al evitar que se separen el casquillo y la base.

### **5.2. MATERIALES**

Se eligió al acero inoxidable AISI 316 para realizar la fabricación del proyecto, debido a que por sus aleaciones es un acero más resistente que el acero inoxidable 304 y también posee buena resistencia a la corrosión, tenacidad y resistencia a los esfuerzos. Lo cual lo favorece sobre los demás elementos por el conjunto de sus características y por la resistencia a los distintos tipos de combustibles con los que se realizarán los ensayos.

## 6. ANEXOS

### 6.1. DISEÑO HIDRÁULICO (SIMULINK)

#### 6.1.1. Modelo 1

Modelo inicial para las simulaciones de dinámica de ondas, en el cual se plantea que la señal trapezoidal (**Figura 6.2**) aparece en el inicio del elemento que simula un inyector (fuente de caudal másico controlado). Se utiliza una única tubería (presión inicial  $p_0=1$  bar), en la cual no se toma en cuenta la inercia del fluido, pero si la compresibilidad dinámica del fluido.

Se tiene un tiempo de simulación de  $t=6$  ms y su finalidad es evaluar las presiones a lo largo de la tubería, pero los resultados no correspondían con lo esperado, ya que los valores de las presiones son muy cercanos a  $p=0$  MPa con un leve descenso.

MODELO 1	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	5	-	-
Diámetro (mm)	3	-	-
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	-	-
Nro. Segmentos	1	-	-
Especificación de pared de la tubería	Rígida	-	-

Tabla 6.1: Características de tuberías en modelo 1.

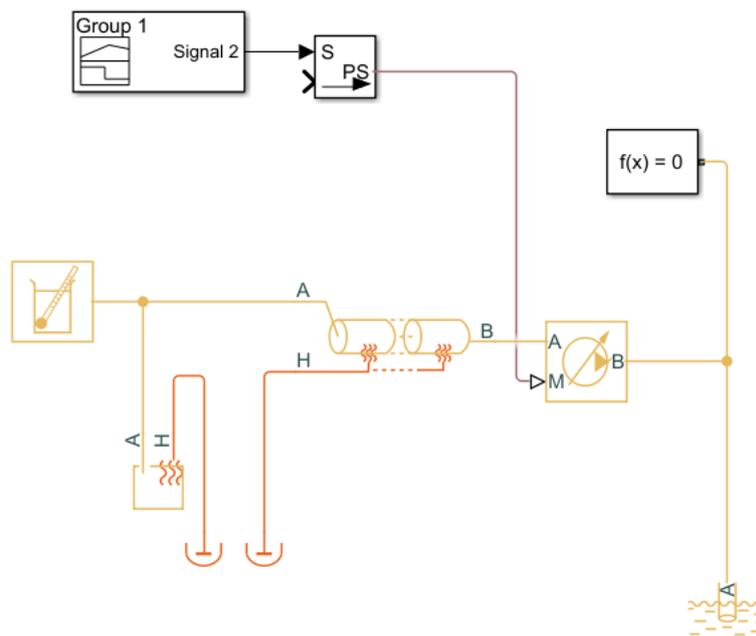


Figura 6.1: Representación de modelo 1 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

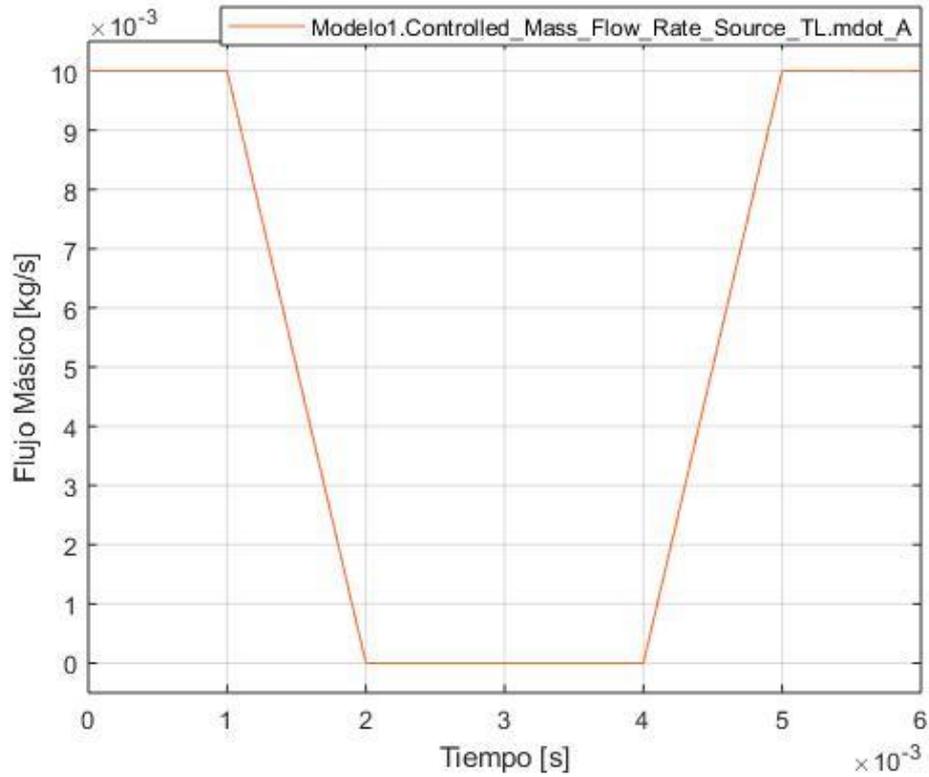


Figura 6.2: Señal de inyección de modelo 1.

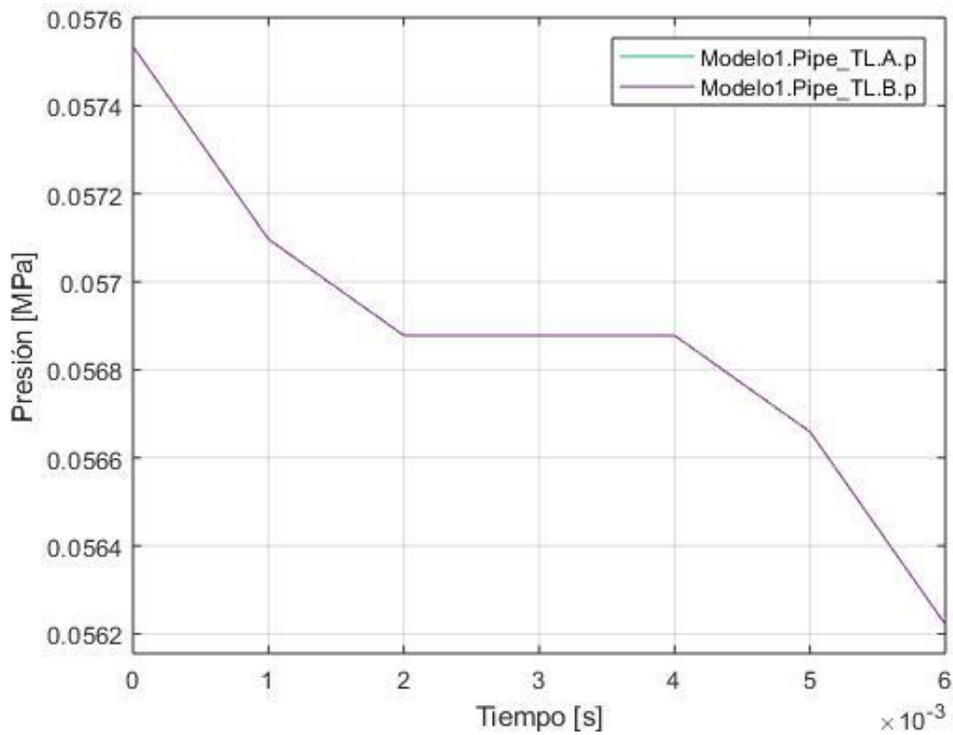


Figura 6.3: Señal de presión del modelo 1.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.2. Modelo 2

Muy similar al modelo 1, con la diferencia de que se toma en cuenta la inercia del fluido y la señal trapezoidal se encuentra en la salida del inyector, se cambia la presión inicial de la tubería a  $p_0=100$  bar (se mantiene para los demás modelos) y el tiempo de simulación se mantiene ( $t=0,03$  s), el objetivo de buscar las presiones al inicio y al final de la tubería. Los resultados tienen mayor credibilidad porque las presiones varían de manera más notable.

MODELO 2	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	5	-	-
Diámetro (mm)	3	-	-
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	-	-
Nro. Segmentos	20	-	-
Especificación de pared de la tubería	Rígida	-	-

Tabla 6.2: Características de tuberías en modelo 2.

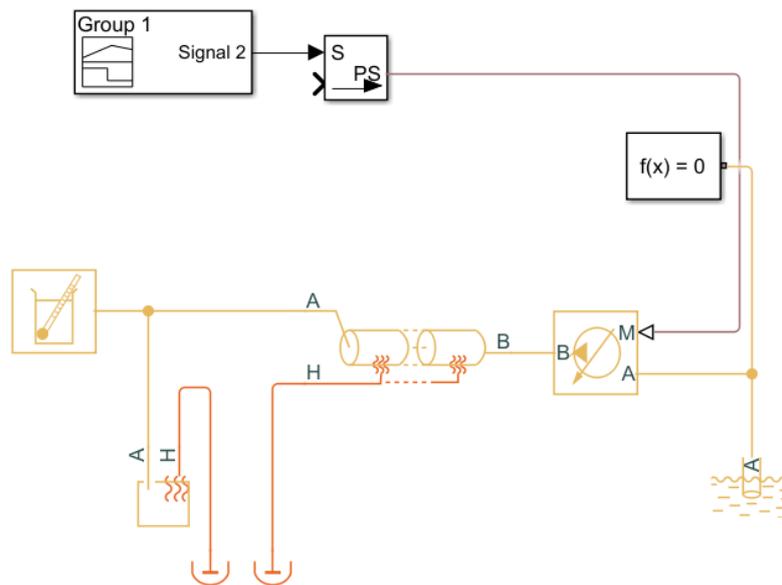


Figura 6.4: Representación del modelo 2 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

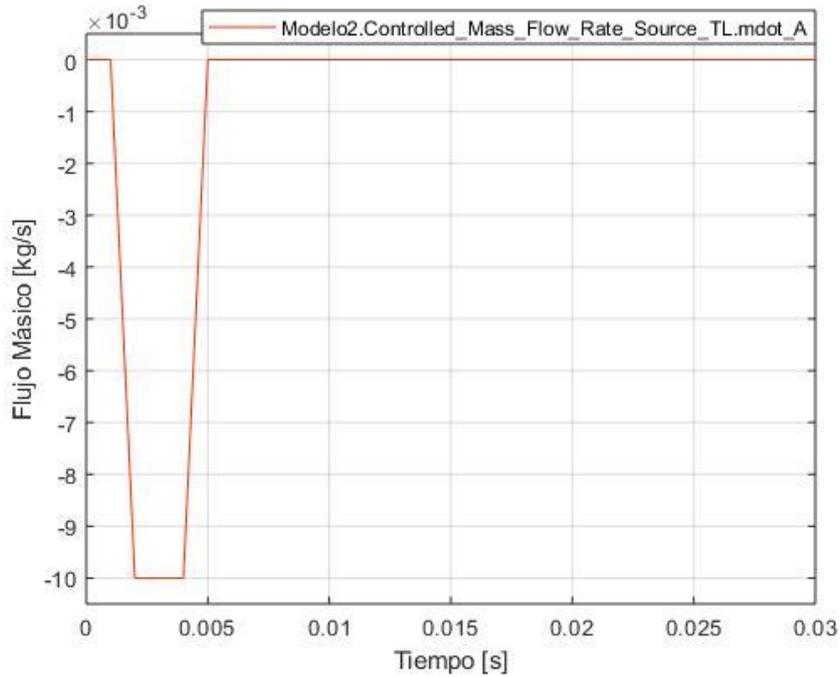


Figura 6.5: Señal de inyección del modelo 2.

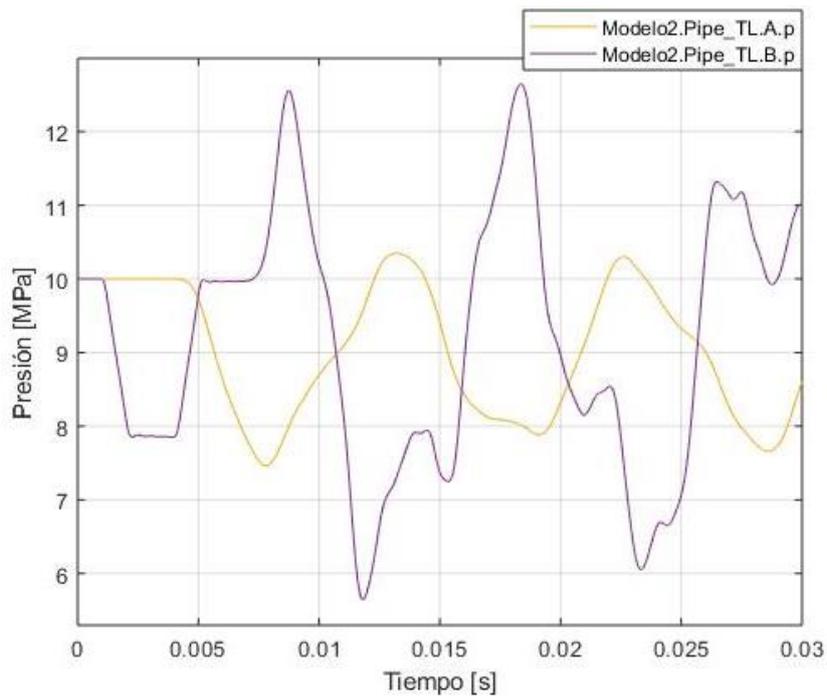


Figura 6.6: Señales de presión del modelo 2.

### 6.1.3. Modelo 3

Con este modelo se busca reproducir la señal de inyección al final de la tubería, se utiliza una tubería de las mismas características que en el modelo 2, pero se cambian los extremos

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

del sistema por las señales de presiones obtenidas del modelo anterior para así tener definidas las presiones. El tiempo de simulación es  $t=0,03$  s.

Se consiguió reproducir de manera casi exacta la señal trapezoidal con un poco de ruido en las líneas.

MODELO 3	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	5	-	-
Diámetro (mm)	3	-	-
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	-	-
Nro. Segmentos	20	-	-
Especificación de pared de la tubería	Rígida	-	-

Tabla 6.3: Características de tuberías en modelo 3.

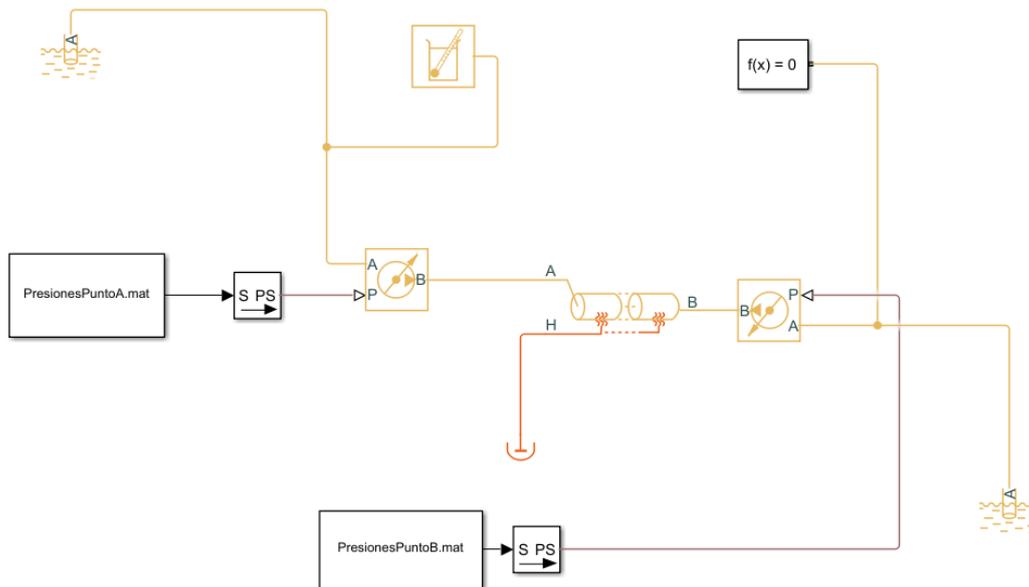


Figura 6.7: Representación del modelo 3 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

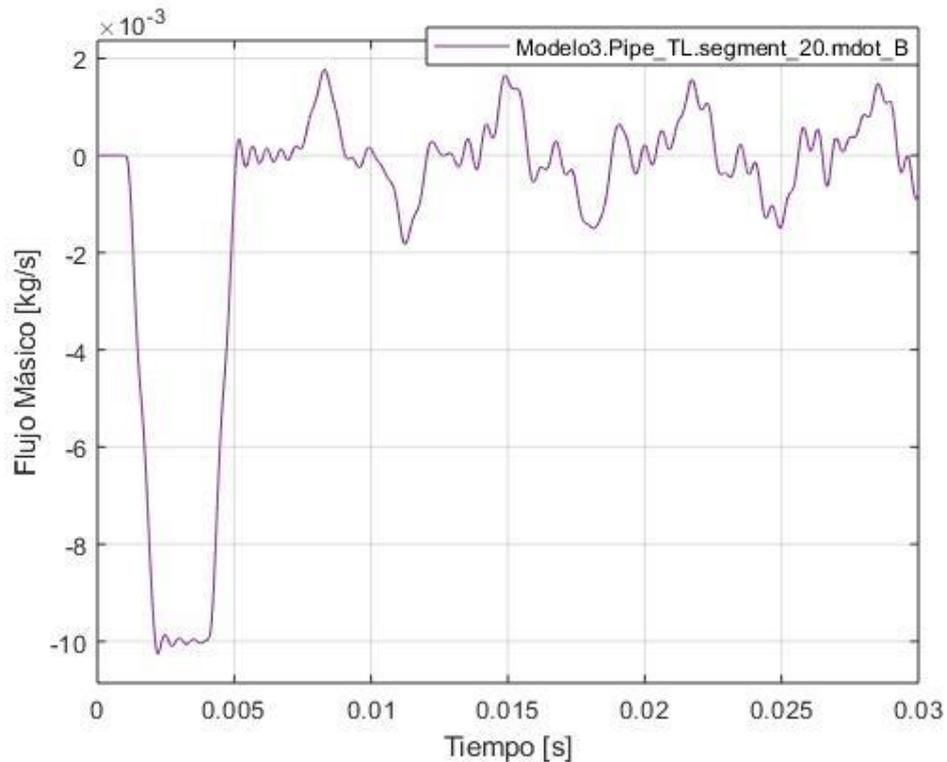


Figura 6.8: Señales del flujo másico en el modelo 3.

#### 6.1.4. Modelo 4

Se aumenta la complejidad del modelo, este está conformado por tres tuberías: tubería larga, raíl y línea corta, además se incluye un cambio de sección repentino. Se utiliza la señal trapezoidal del modelo 2 para buscar valores de presiones al inicio de la tubería larga y al final de la línea corta, justo antes del inyector. Se reduce el tiempo de simulación a  $t=0,006$  s.

Se consigue que aumentando la complejidad del sistema se reproduzcan las señales de presión con curvas similares a las del modelo 2, pero la curva del final de la línea corta tiene mucho más ruido que la del inicio de la tubería larga.

MODELO 4	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	20	10	20
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Rígida	Rígida

Tabla 6.4: Características de tuberías en modelo 4.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

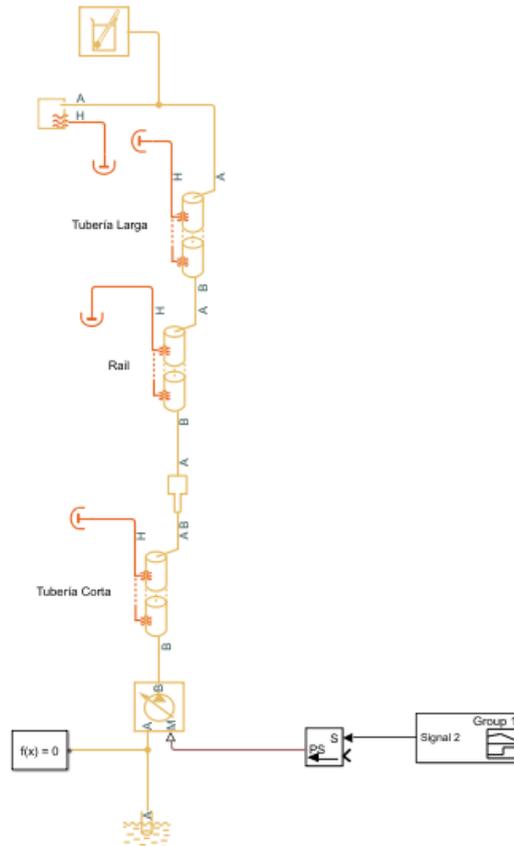


Figura 6.9: Representación del modelo 4 de Simulink.

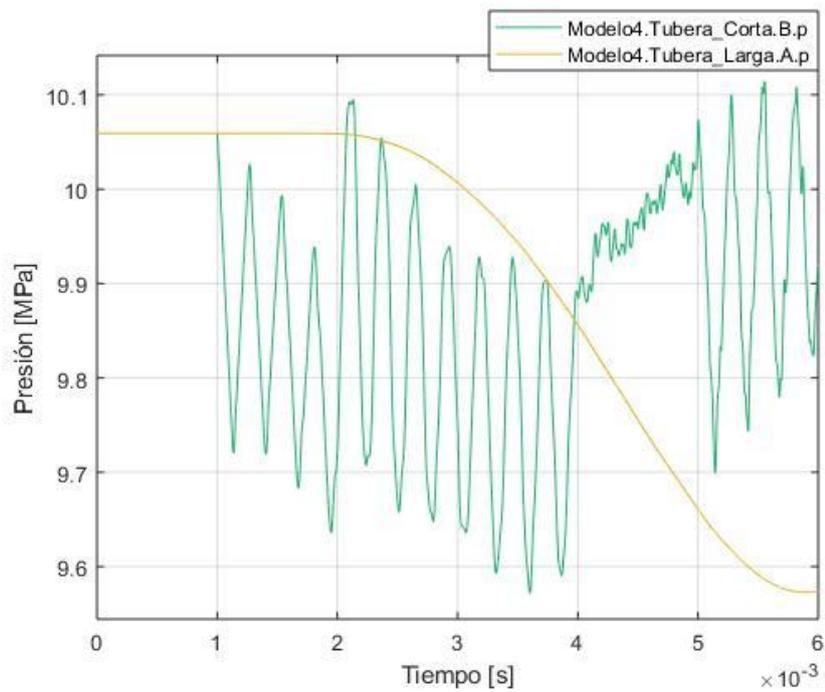


Figura 6.10: Señales de presión del modelo 4.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.5. Modelo 5

En este modelo se utiliza el sistema del modelo 4, pero modificado, sigue conformado por tres tuberías: tubería larga (5 segmentos), raíl (10 segmentos) y línea corta (20 segmentos), también se define una señal al final del sistema que es trapezoidal, pero más alargada y menos amplia, el tiempo de simulación es  $t=0,01$  s.

Con este modelo se buscaron los valores de las presiones a los extremos de las tuberías del sistema y su comportamiento a lo largo del tiempo, ya que el tiempo de simulación es mayor que en los demás modelos.

Se consigue una curva amortiguada en el extremo inicial del sistema y una curva con bastante ruido en el extremo final del mismo.

<b>MODELO 5</b>	<b>Tubería Larga</b>	<b>Raíl</b>	<b>Línea Corta</b>
<b>Longitud (m)</b>	1	0,34	0,1
<b>Diámetro (mm)</b>	3	19,35	2,7
<b>Sección (m<sup>2</sup>)</b>	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
<b>Nro. Segmentos</b>	5	10	20
<b>Especificación de pared de la tubería</b>	Rígida	Rígida	Rígida

Tabla 6.5: Características de tuberías en modelo 5.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

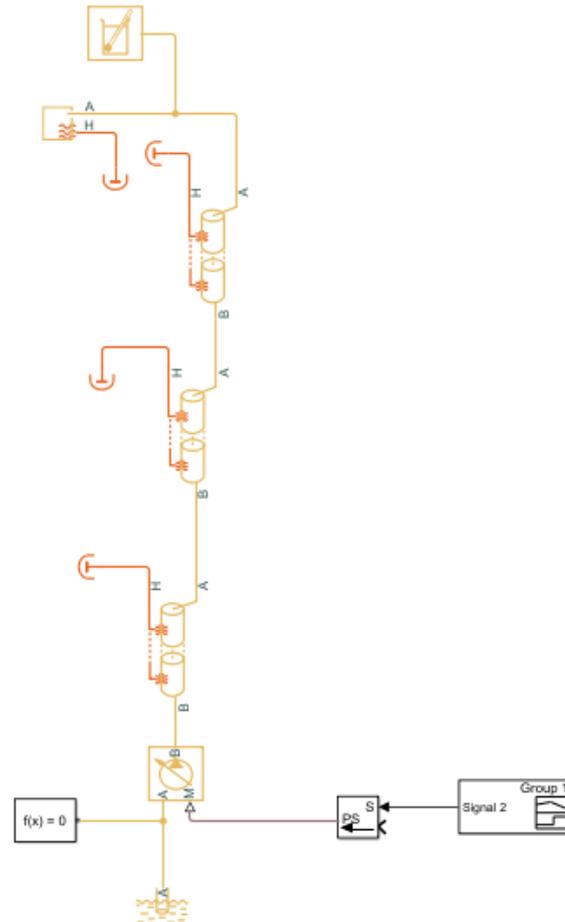


Figura 6.11: Representación del modelo 5 de Simulink.

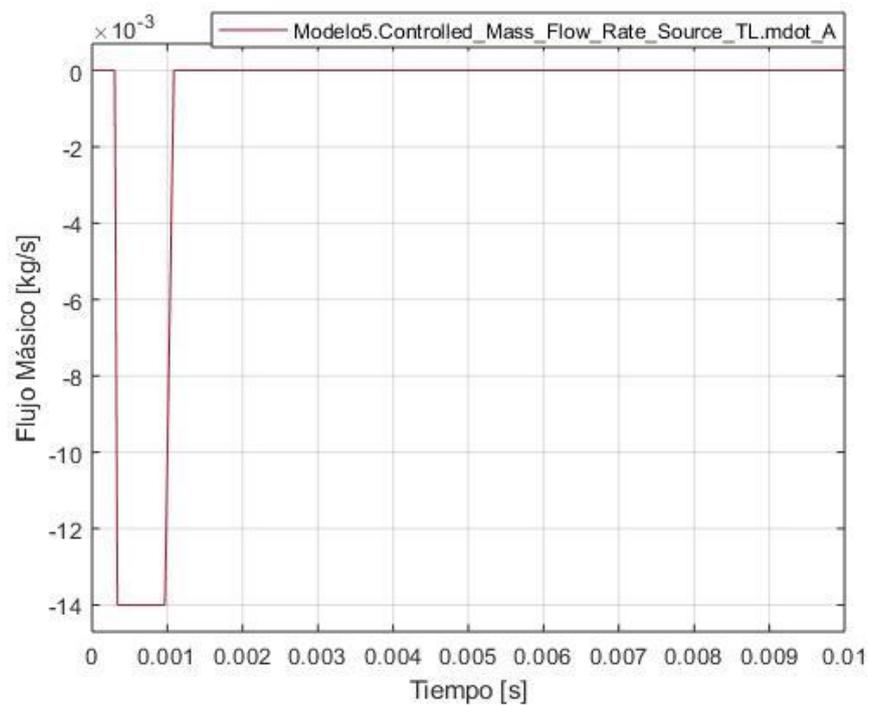


Figura 6.12: Señal de inyección del modelo 5.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

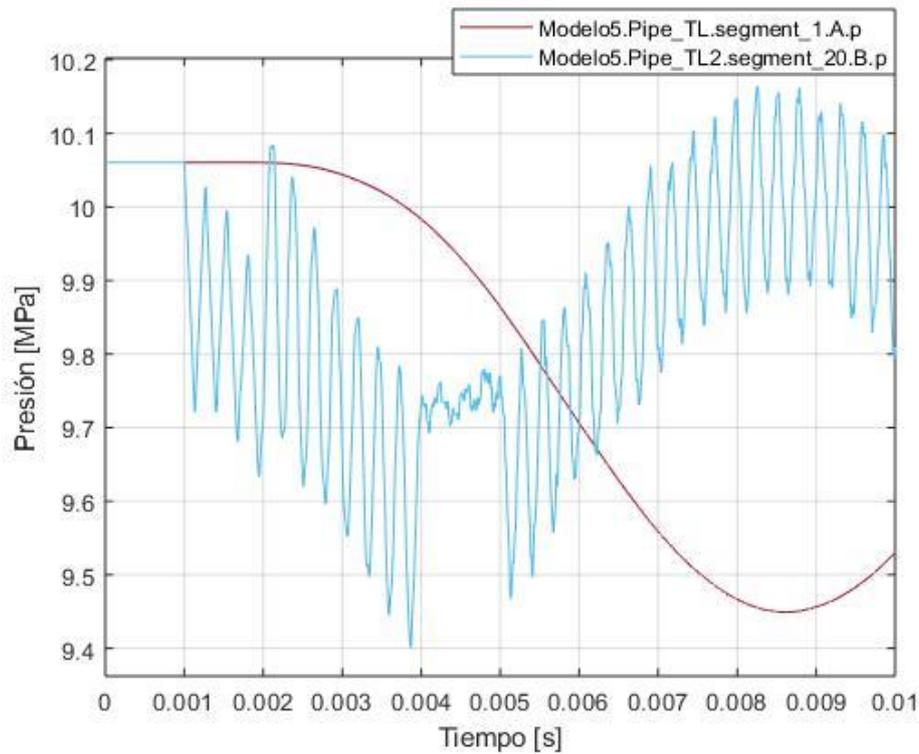


Figura 6.13: Señales de presión del modelo 5.

### 6.1.6. Modelo 6

Utilizamos el mismo sistema que en el modelo anterior, pero con las señales definidas a ambos extremos por la presión en la entrada de la tubería larga y en la salida de la línea corta. El tiempo de simulación se mantiene en  $t=0,01$  s, las tuberías mantienen sus dimensiones, pero pasan a estar todas divididas en 2 segmentos.

La gráfica obtenida al final de la línea corta es muy similar a la señal trapezoidal alargada, con la diferencia en el ruido en las partes planas de la gráfica.

MODELO 6	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	2	2	2
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Rígida	Rígida

Tabla 6.6: Características de tuberías en modelo 6.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

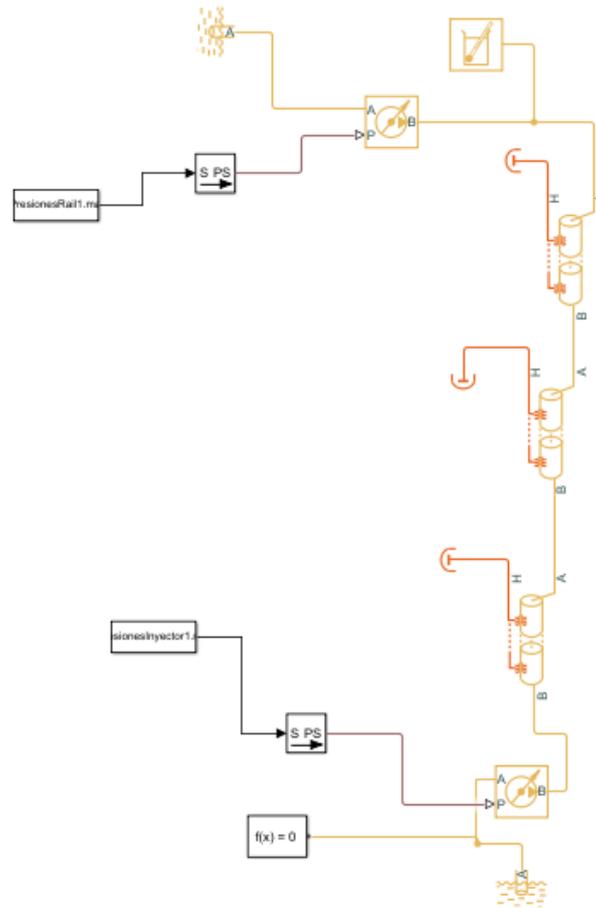


Figura 6.14: Representación del modelo 6 de Simulink.

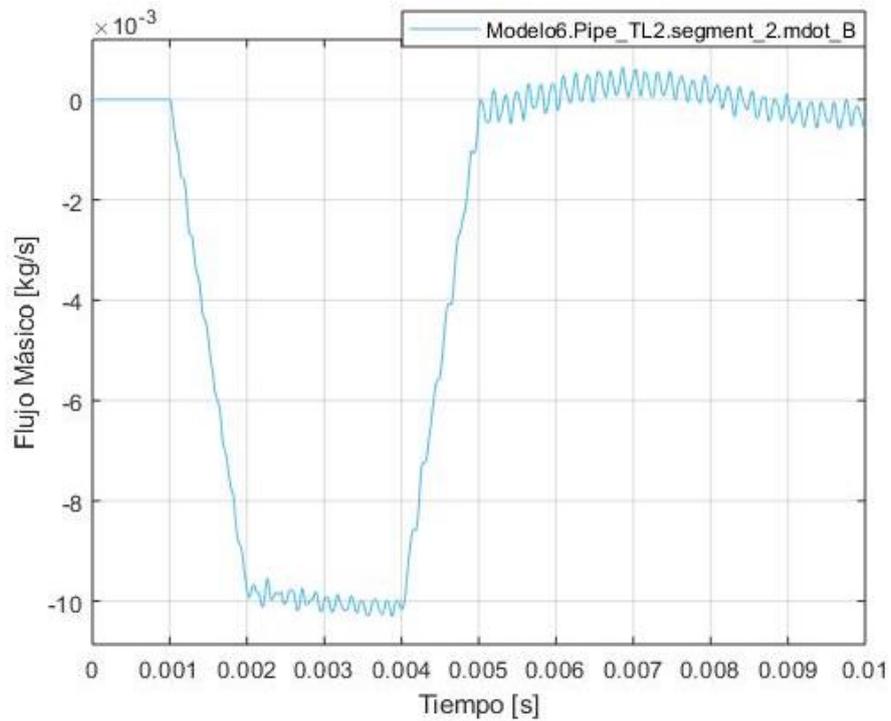


Figura 6.15: Señal de flujo másico del modelo 6.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.7. Modelo 7

Mismas características de las tuberías que en el modelo 5, en el cual ya se utiliza la señal de inyección real (ECN) y un tiempo de simulación  $t=1,5$  ms, para buscar que todo sea más cercano a la realidad y tener mayor exactitud en las medidas.

Se obtiene como presión de entrada en la tubería larga una curva con un valor casi constante y como presión de salida de la línea corta se obtiene una curva que oscila entre valores desde  $p=4$  MPa hasta  $p=16$  MPa aproximadamente.

MODELO 7	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	5	10	20
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Rígida	Rígida

Tabla 6.7: Características de tuberías en modelo 7.

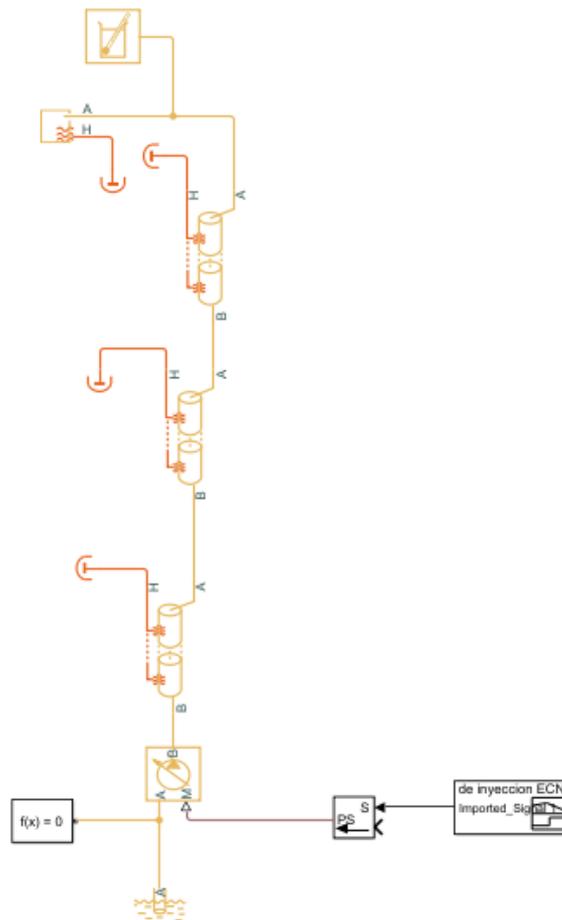


Figura 6.16: Representación del modelo 7 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

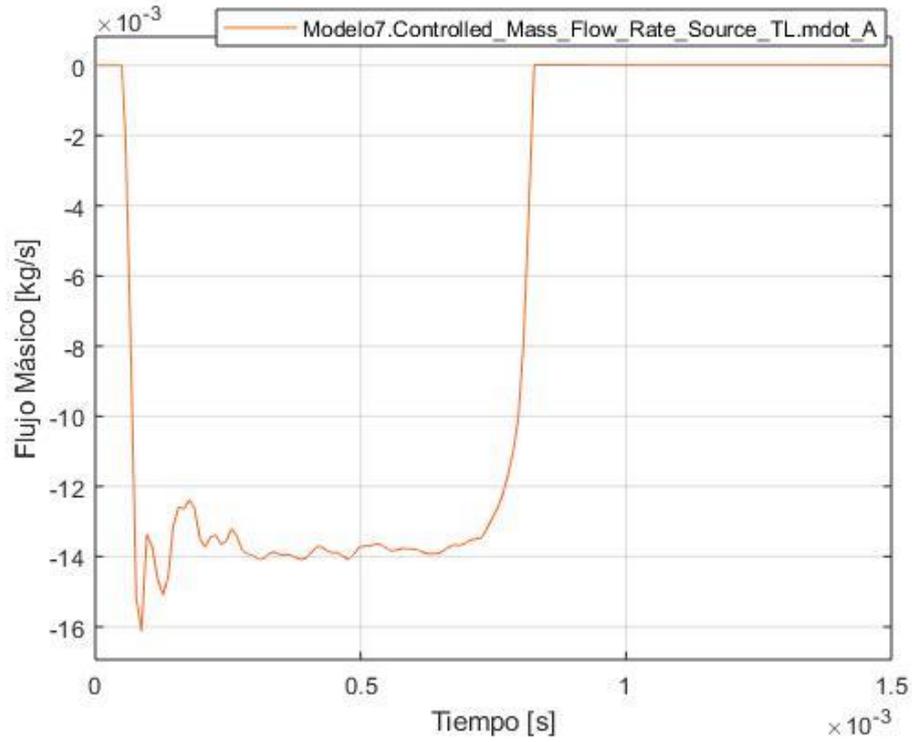


Figura 6.17: Señal de inyección del modelo 7 (ECN).

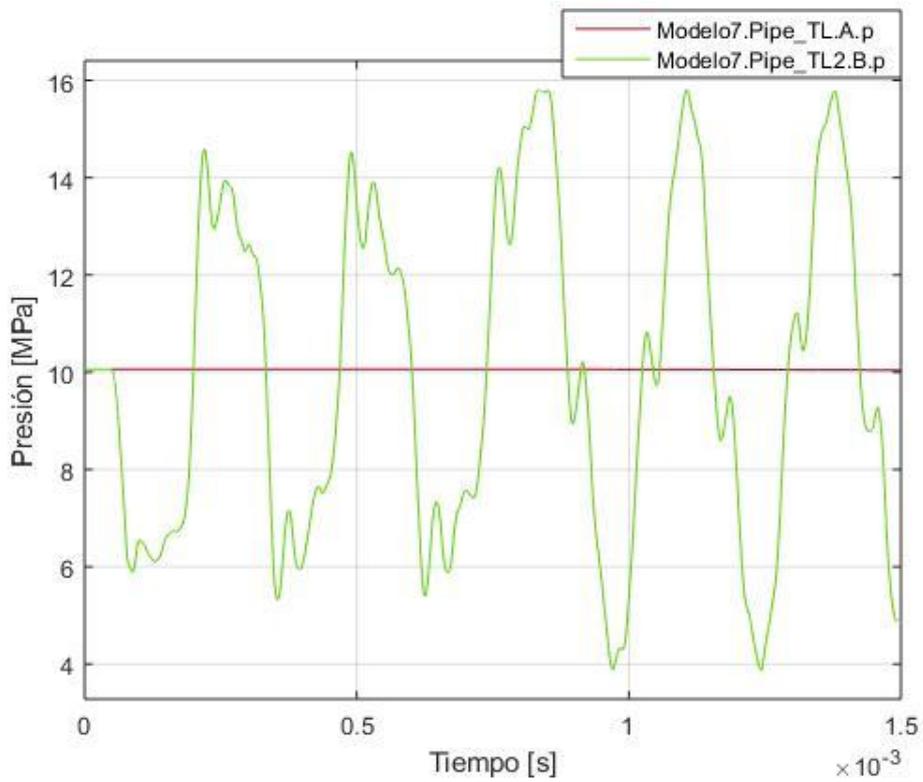


Figura 6.18: Señales de presión del modelo 7.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.8. Modelo 8

En este modelo se definen las presiones a los extremos del sistema para poder obtener una gráfica de la tasa de inyección igual o muy parecida a la señal de inyección real. Se aumenta un poco el tiempo de simulado ( $t=0,005$  s) para poder ver cómo se comporta el flujo másico después de la inyección.

Como resultado se obtiene una gráfica que tiene una gran similitud con la señal de inyección real que se usó para obtener las presiones en el modelo anterior, por lo que se puede decir que los modelos están funcionando de la manera esperada.

MODELO 8	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	20	20	20
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Rígida	Rígida

Tabla 6.8: Características de tuberías en modelo 8.

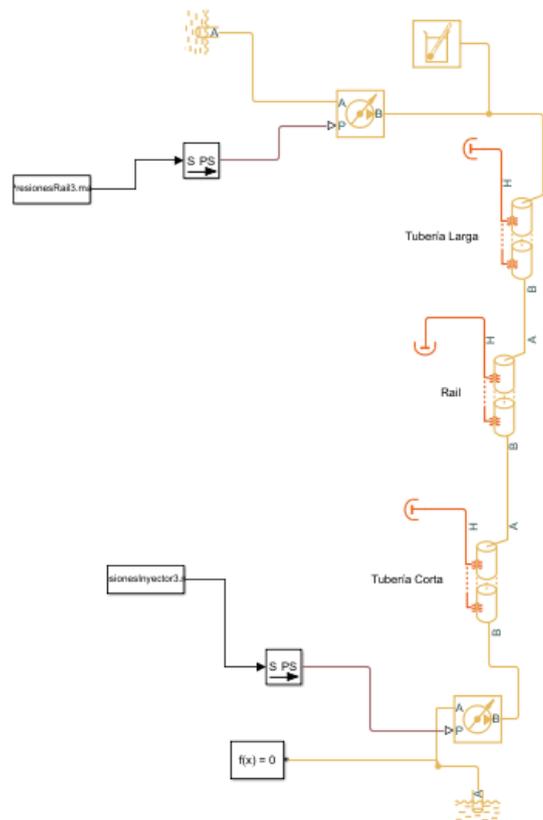


Figura 6.19: Representación del modelo 8 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

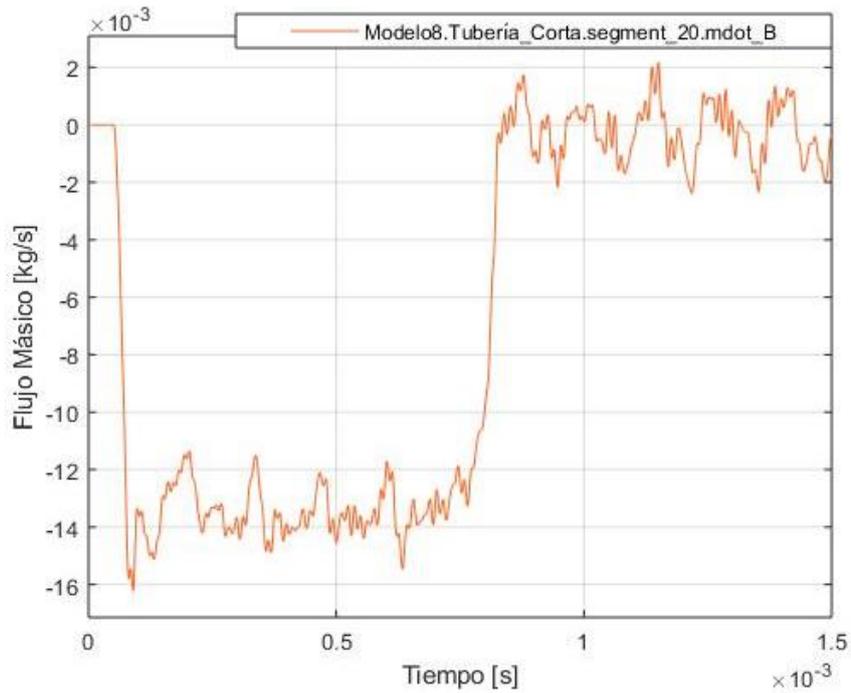


Figura 6.20: Señal de flujo másico del modelo 8.

### 6.1.9. Modelo 9

Se utiliza la señal de inyección real para buscar los valores de las presiones a lo largo del sistema, la estructura es la misma que en el modelo 7, pero varía en la cantidad de elementos finitos en que se dividen las tuberías, en el tiempo de simulación ( $t=0,001$  s) y en que el raíl y la tubería larga tienen una especificación de pared de la tubería flexible (todos los modelos anteriores tenían una especificación de pared de la tubería rígida).

La tubería larga tiene sólo 1 segmento y el raíl, al igual que la línea corta, tiene 45 segmentos. Se consiguen los resultados esperados, ya que las gráficas son similares a las del modelo 7.

MODELO 9	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	1	45	45
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 6.9: Características de tuberías en modelo 9.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

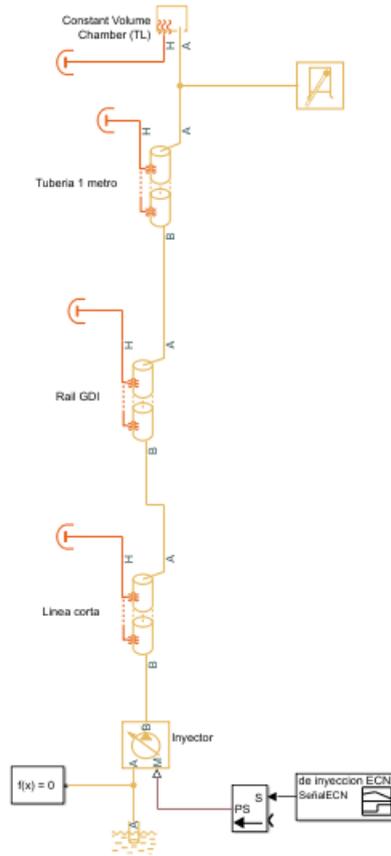


Figura 6.21: Representación del modelo 9 de Simulink.

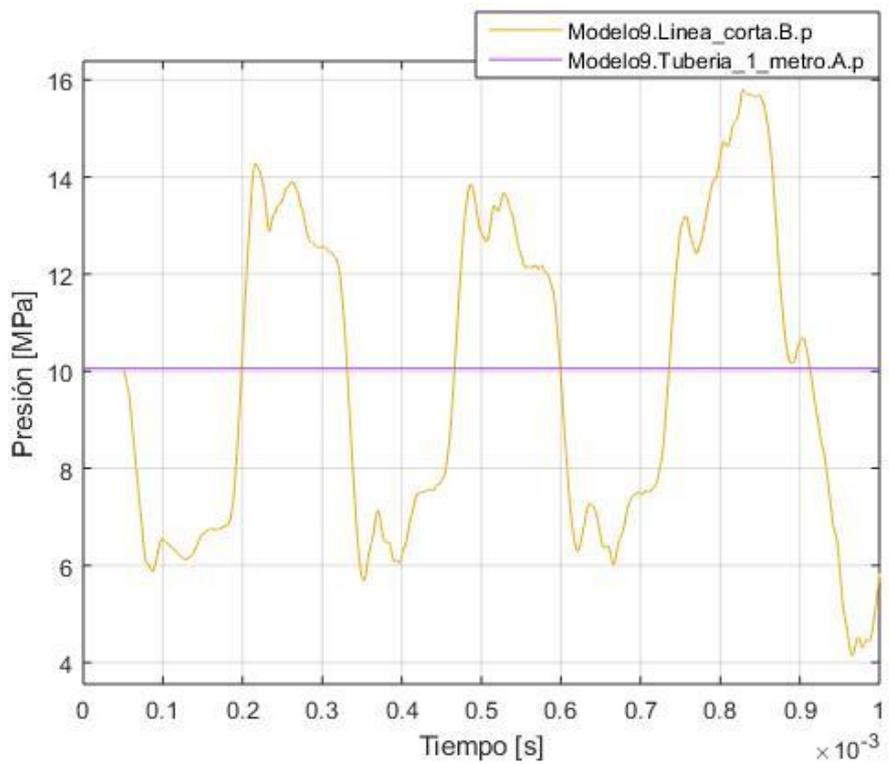


Figura 6.22: Señales de presión del modelo 9.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.10. Modelo 10

Al igual que en el modelo 9, en el raíl y la línea corta las paredes de la tubería son flexibles, el tiempo de simulación es  $t=0,001$  s y se utilizan las presiones del modelo anterior en el inicio de la tubería larga y al final de la línea corta.

Las gráficas que se consiguen son muy similares a las de la señal de inyección real, ya que a diferencia del modelo 8, estas curvas son más amortiguadas.

MODELO 10	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,1
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	1	45	45
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 6.10: Características de tuberías en modelo 10.

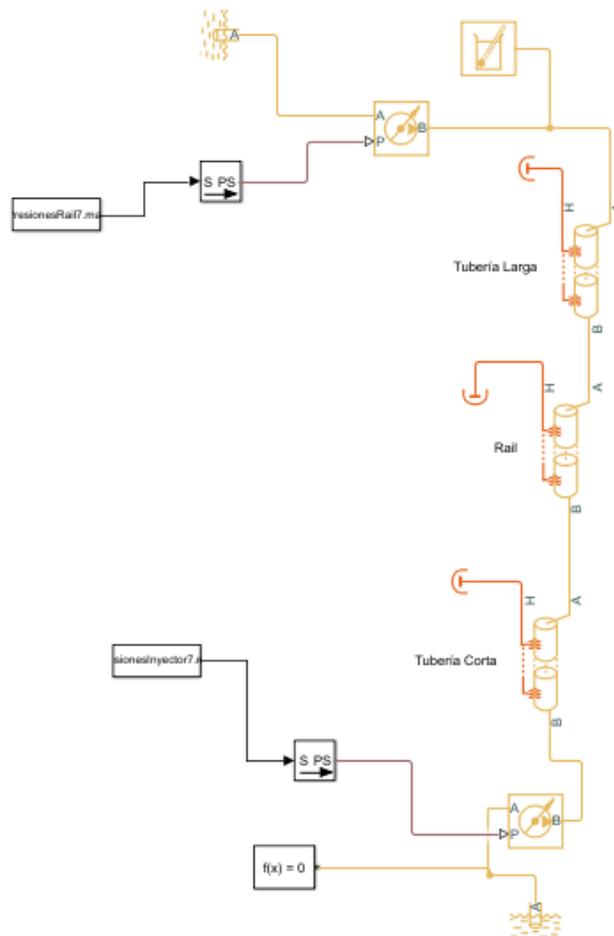


Figura 6.23: Representación del modelo 10 de Simulink.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

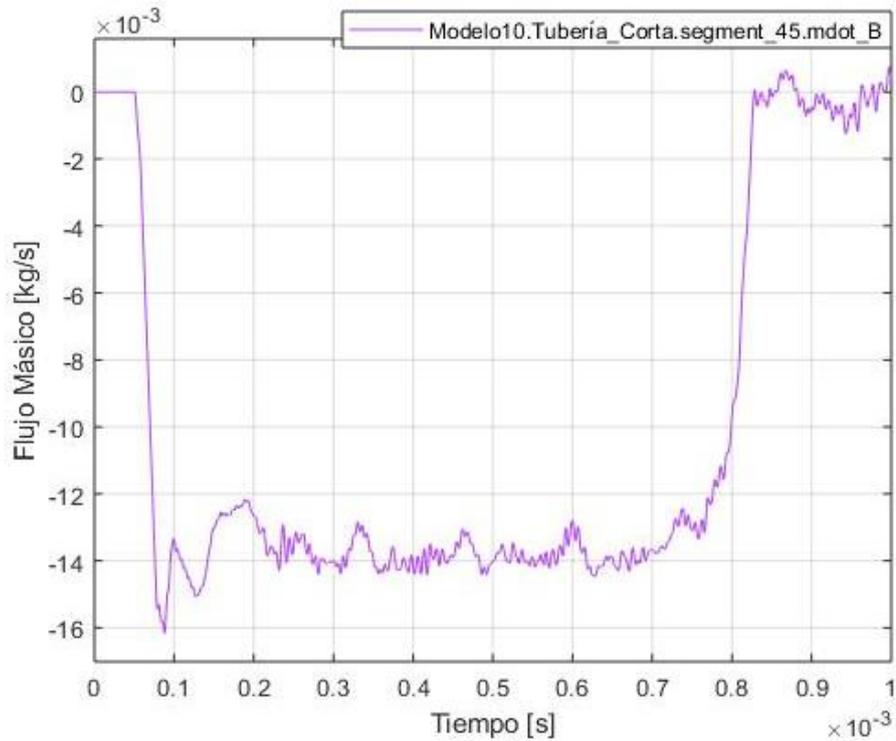


Figura 6.24: Señal de flujo másico del modelo 10.

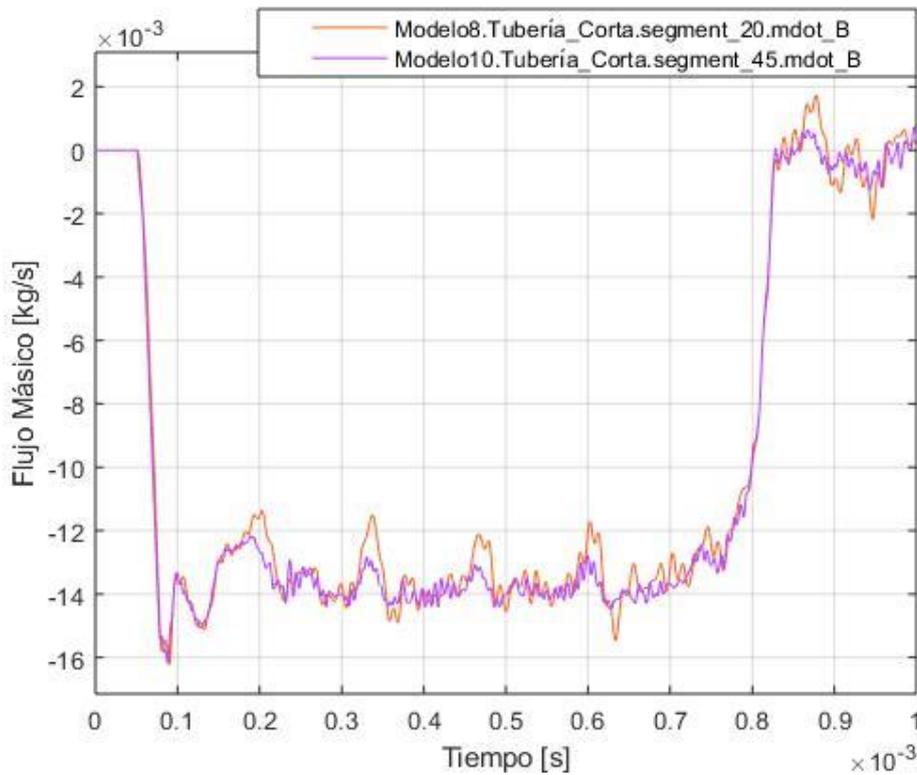


Figura 6.25: Comparación entre las señales de flujo másico de los modelos 8 y 10.

### 6.1.11. Modelo 11

Se utiliza el mismo esquema que en el modelo 10 con la finalidad de desplazar el primer punto de medida a lo largo del sistema, tomando puntos del raíl y de la línea corta como el segmento 1 (inicio), el segmento 11 (un cuarto de la tubería aproximadamente), el segmento 15 (un tercio de la tubería), el segmento 22 (la mitad aproximadamente) y el segmento 30 (dos tercios de la tubería), todo esto debido a que el diseño mecánico del sistema abarca al raíl y a la línea corta.

A medida que la distancia entre los puntos de medida se va reduciendo, se puede observar que las señales no replican exactamente los puntos donde se produce el inicio de la inyección y el final de la misma. Debido a esto seleccionamos como primer punto de medida el inicio del raíl y se comparó con las obtenidas al situar el punto de medida a un cuarto del inicio del raíl.

<b>MODELO 11</b>	<b>Tubería Larga</b>	<b>Raíl</b>	<b>Línea Corta</b>
<b>Longitud (m)</b>	1	0,34	0,1
<b>Diámetro (mm)</b>	3	19,35	2,7
<b>Sección (m<sup>2</sup>)</b>	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
<b>Nro. Segmentos</b>	1	45	45
<b>Especificación de pared de la tubería</b>	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 6.11: Características de tuberías en modelo 11.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

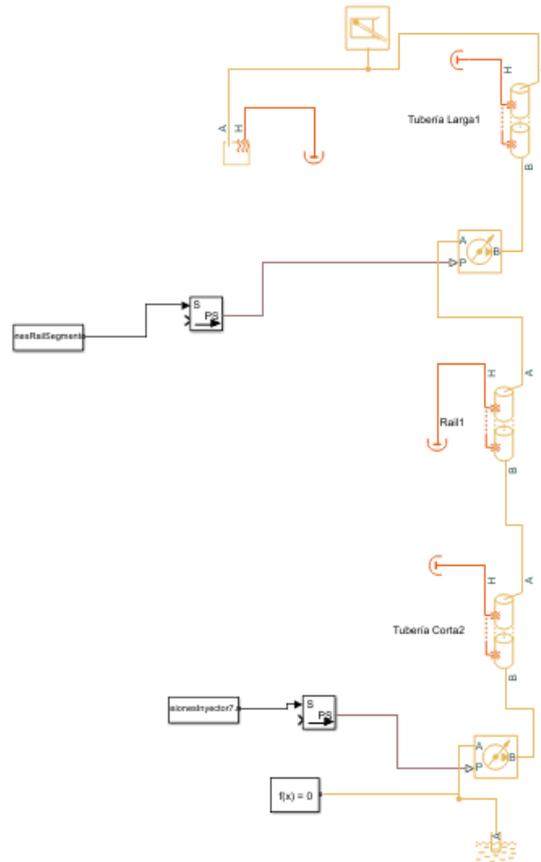


Figura 6.26: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión al inicio del rail.

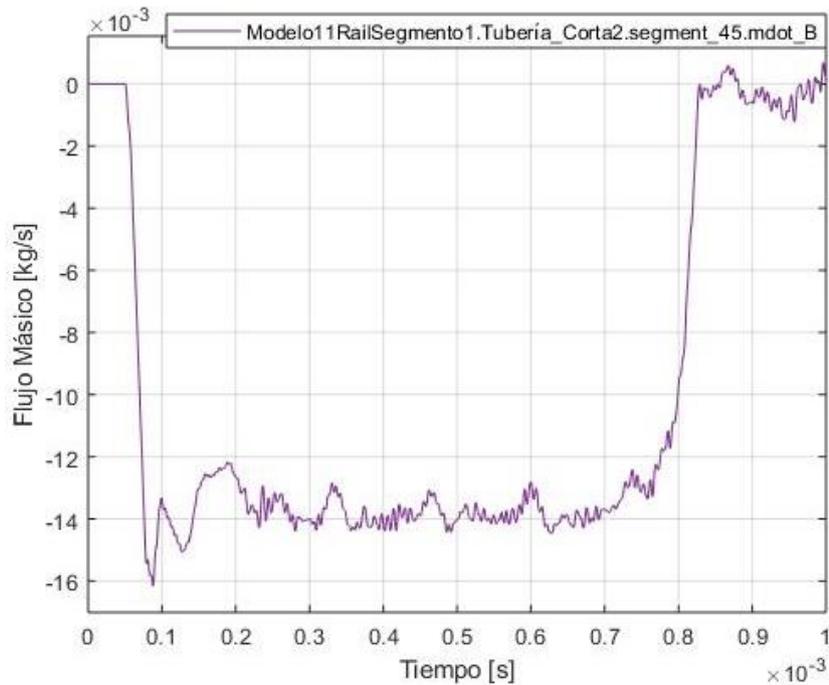


Figura 6.27: Señal de flujo másico del modelo 11 con señal de presión al inicio del rail.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

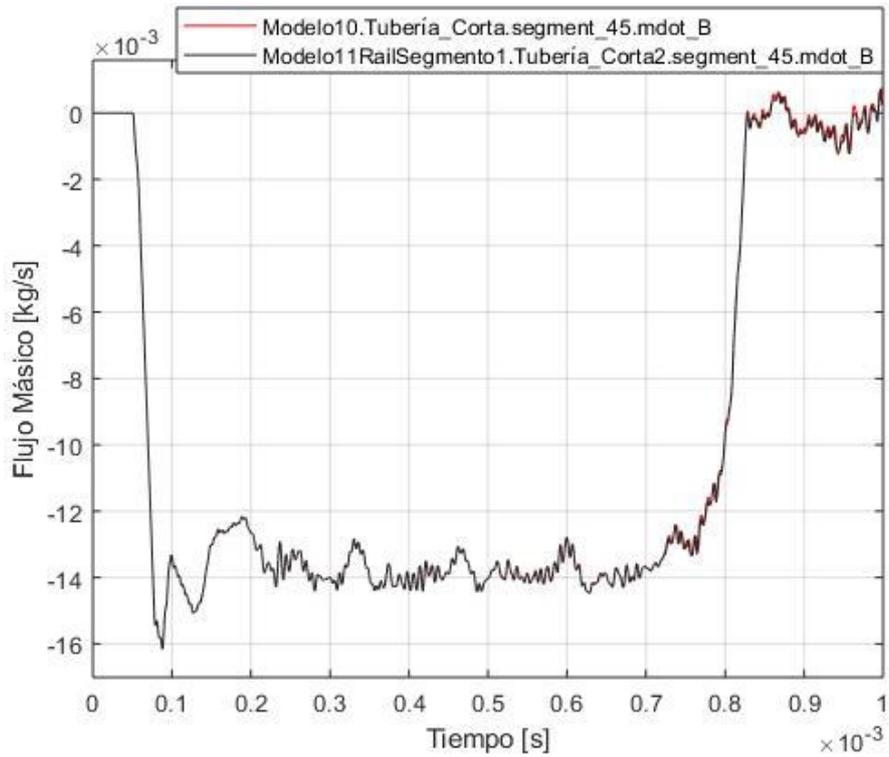


Figura 6.28: Comparación señal de flujo másico entre modelo 10 y modelo 11 con señal de presión en el inicio del rai.

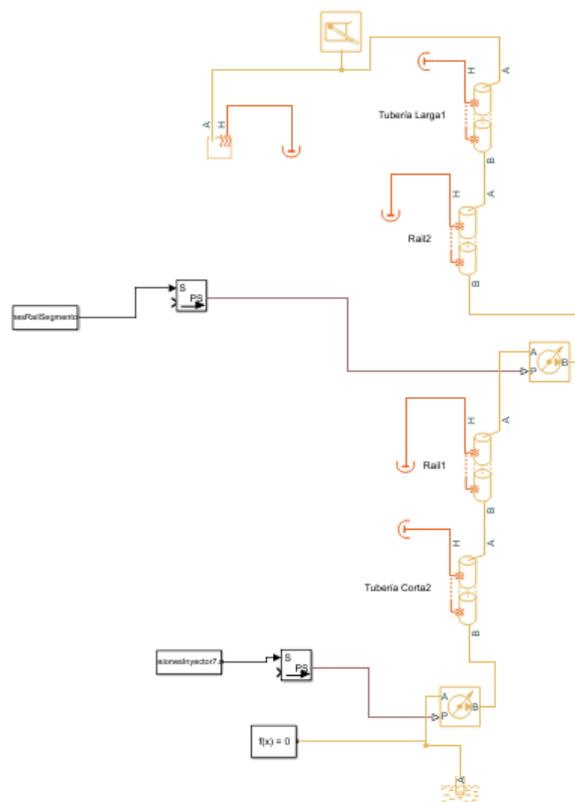


Figura 6.29: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión en punto intermedio del rai.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

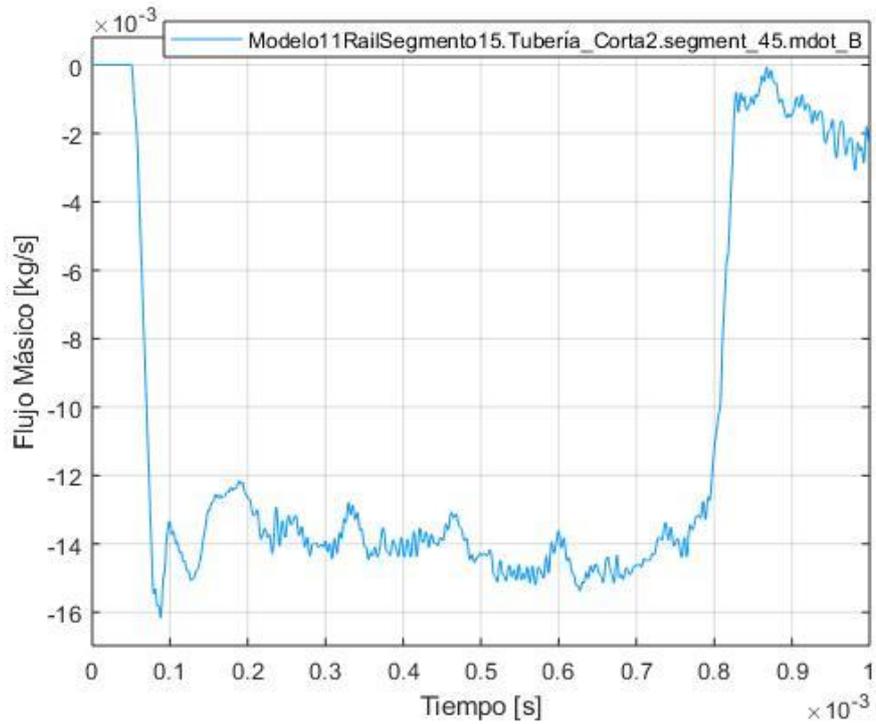


Figura 6.30: Señal de flujo másico del modelo 11 con señal de presión a un cuarto del inicio del raíl.

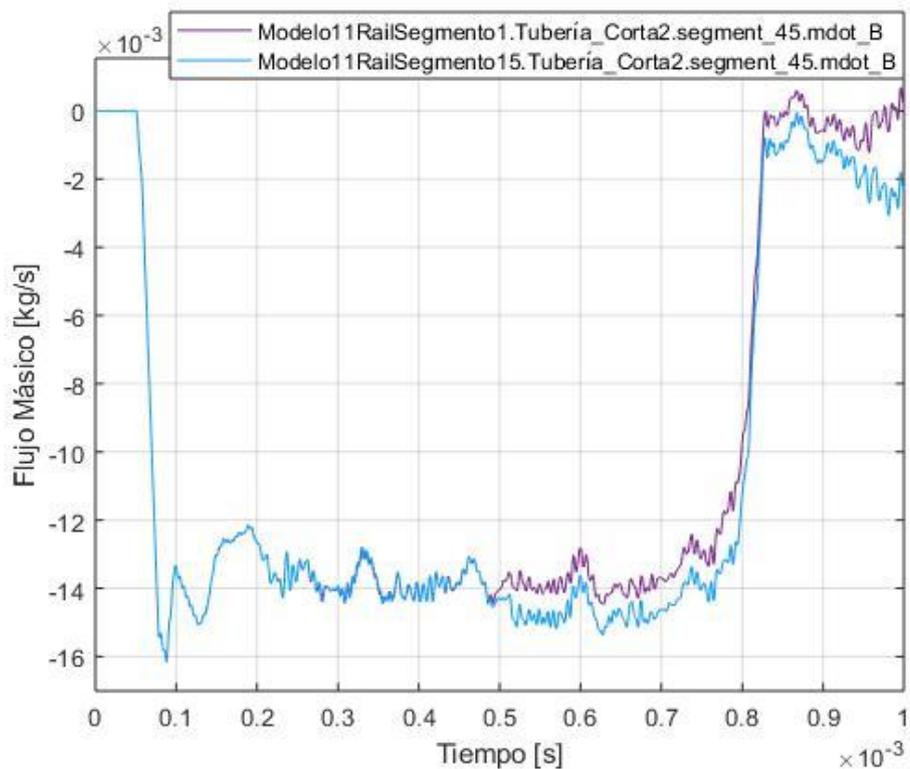


Figura 6.31: Comparación de señal de flujo másico entre modelo 11 con señal al inicio del raíl y modelo 11 con señal de presión a un cuarto del inicio del raíl.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

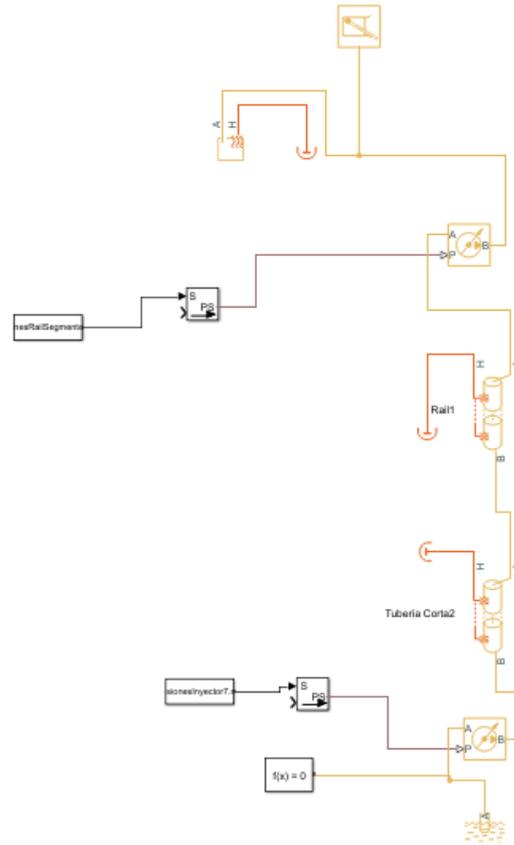


Figura 6.32: Representación del modelo 11 de Simulink simplificado (sin tubería larga).

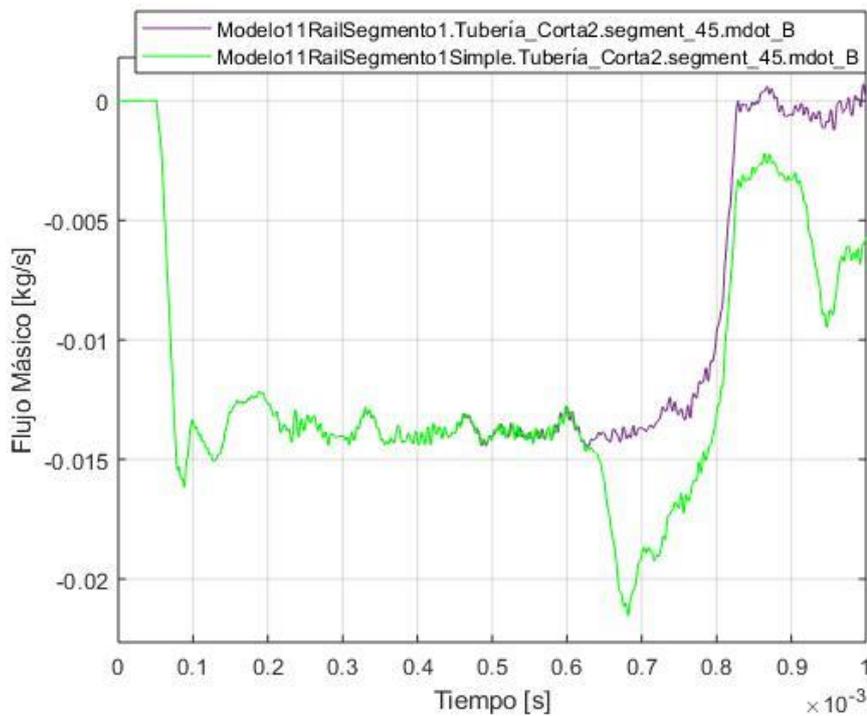


Figura 6.33: Comparación señales de flujo másico entre modelo 11 con señal de presión al inicio del rail y el modelo 11 simplificado.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

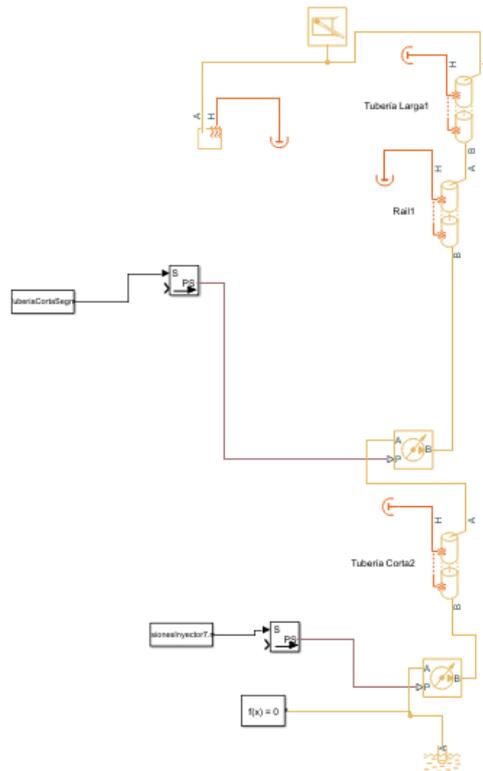


Figura 6.34: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión al inicio de la línea corta.

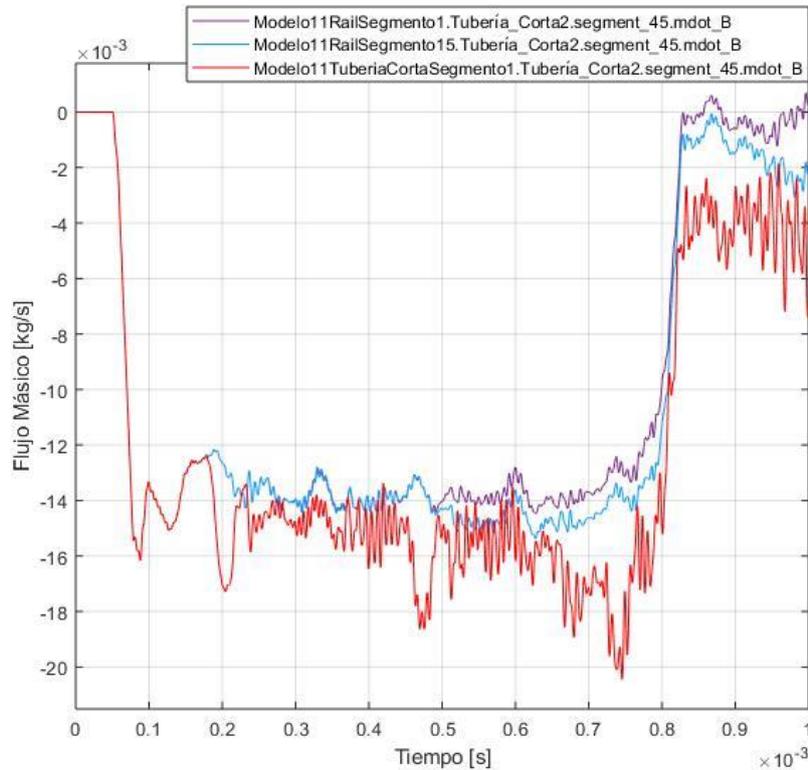


Figura 6.35: Comparación de señal de flujo másico del modelo 11 entre la señal al inicio del rail, a un cuarto del inicio del rail y al inicio de la línea corta.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

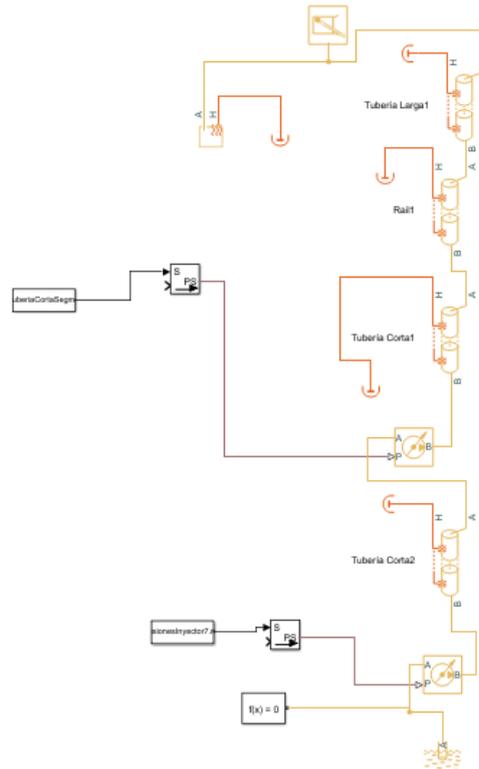


Figura 6.36: Representación del modelo 11 de Simulink con señal de presión en punto intermedio de la línea corta.

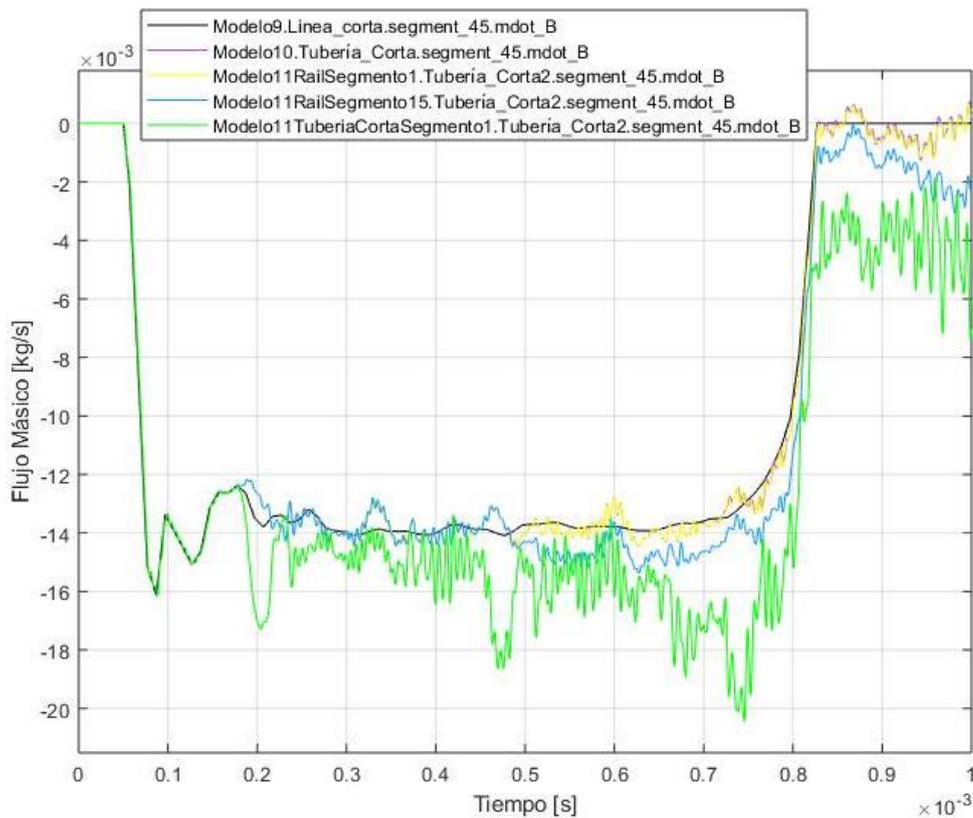


Figura 6.37: Comparación señales de flujo másico entre modelo 8, modelo 10 y las distintas configuraciones del modelo 11.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.12. Modelo 9 corregido

Una vez que se inició el diseño mecánico del ensamblaje, se quiso realizar el diseño de la línea corta lo más corta posible, modificando la medida de  $L=0,1$  m a  $L=0,01$  m. Por motivos de diseño no se puede realizar con  $L=10$  mm, debido al riesgo de rotura que existiría en la pieza (la base) por las altas presiones a las que se someterá. Entonces se diseñará tomando  $L=15$  mm.

MODELO 9 - C	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,015
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	1	45	45
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 6.12: Características de tuberías en modelo 9 (diseño mecánico).

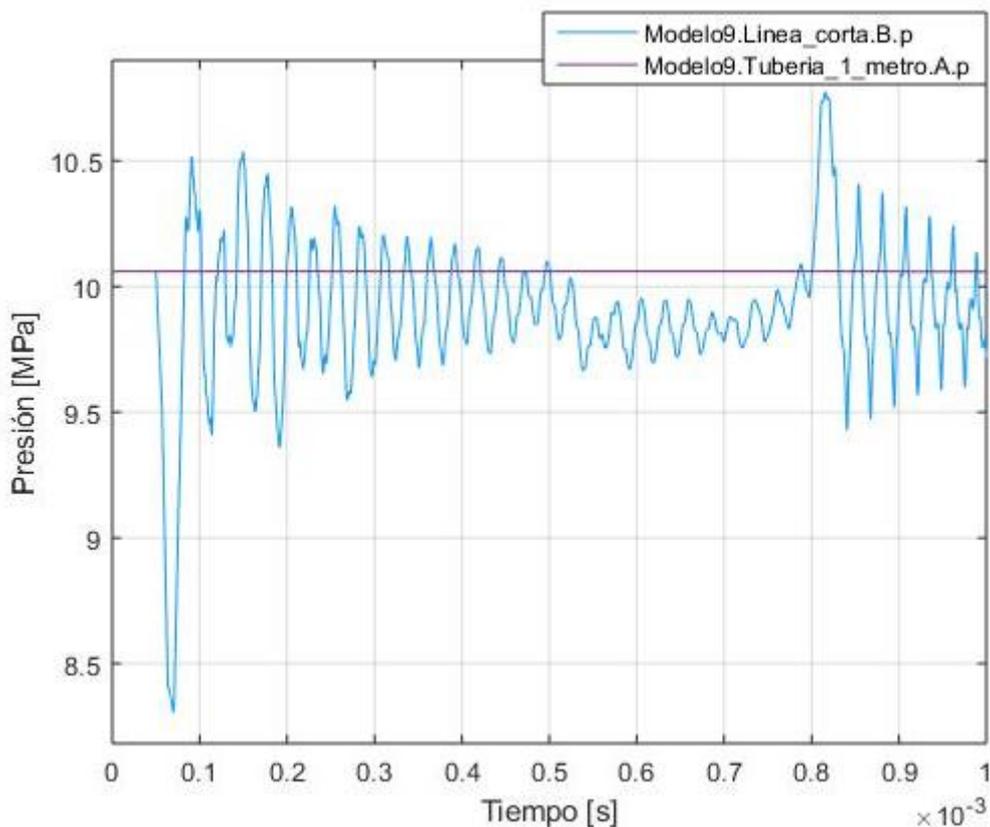


Figura 6.38: Señales de presión del modelo 8 con dimensiones del diseño mecánico.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.1.13. Modelo 10 corregido

Se utiliza la misma dinámica que en los modelos anteriores y se trabaja con la presión obtenida en el modelo 9 corregido con  $L=15$  mm.

MODELO 10 - C	Tubería Larga	Raíl	Línea Corta
Longitud (m)	1	0,34	0,015
Diámetro (mm)	3	19,35	2,7
Sección (m <sup>2</sup> )	$7,06 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-6}$
Nro. Segmentos	1	45	45
Especificación de pared de la tubería	Rígida	Flexible	Flexible

Tabla 6.13: Características de tuberías en modelo 10 (diseño mecánico).

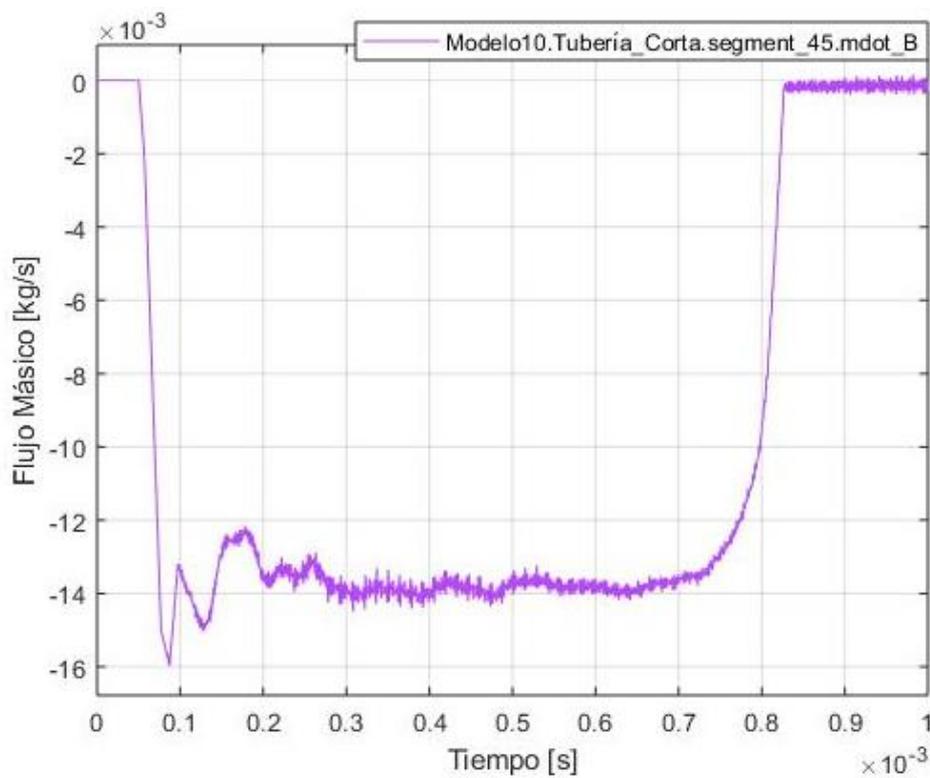


Figura 6.39: Señal de flujo másico del modelo 10 con dimensiones del diseño mecánico.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

## 6.2. DISEÑO MECÁNICO (SOLIDWORKS)

### 6.2.1. Base

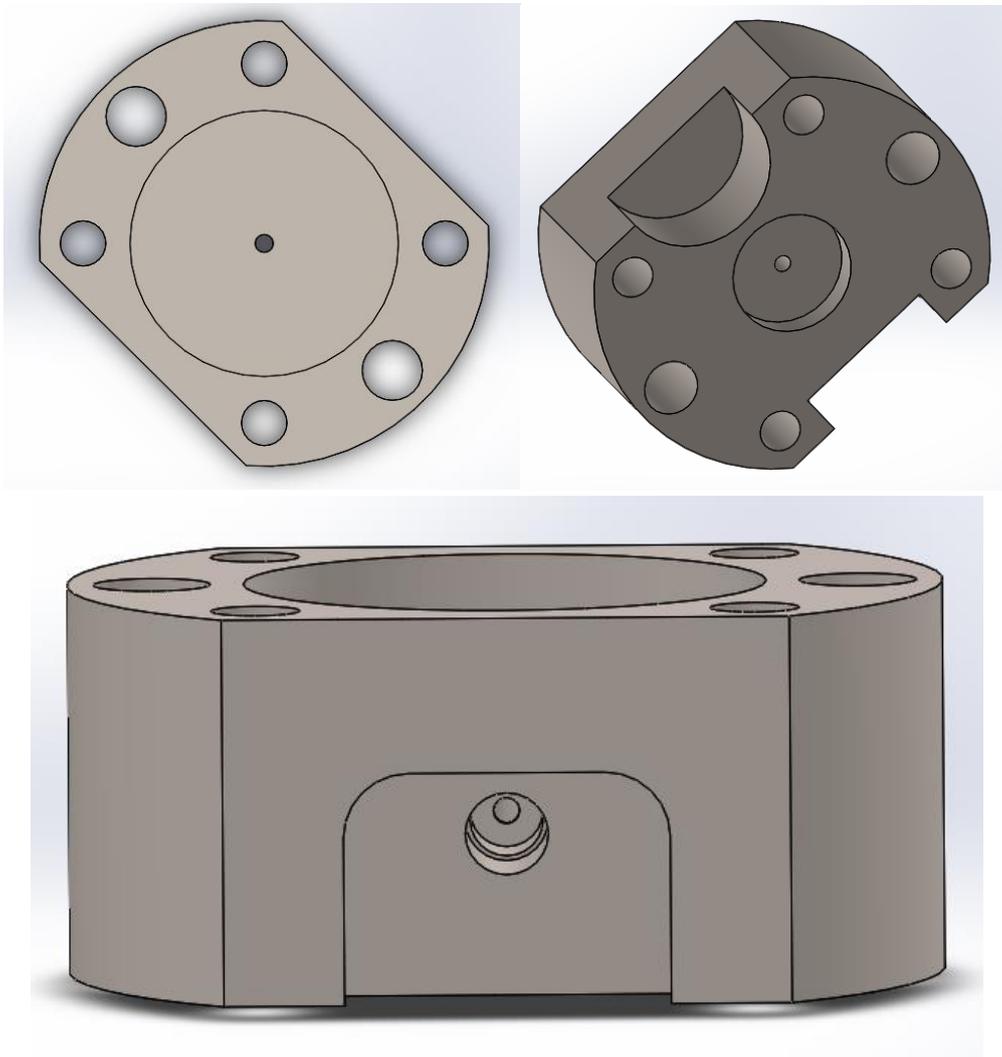


Figura 6.40: Renderizado de la base del ensamblaje.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.2.2. Raíl

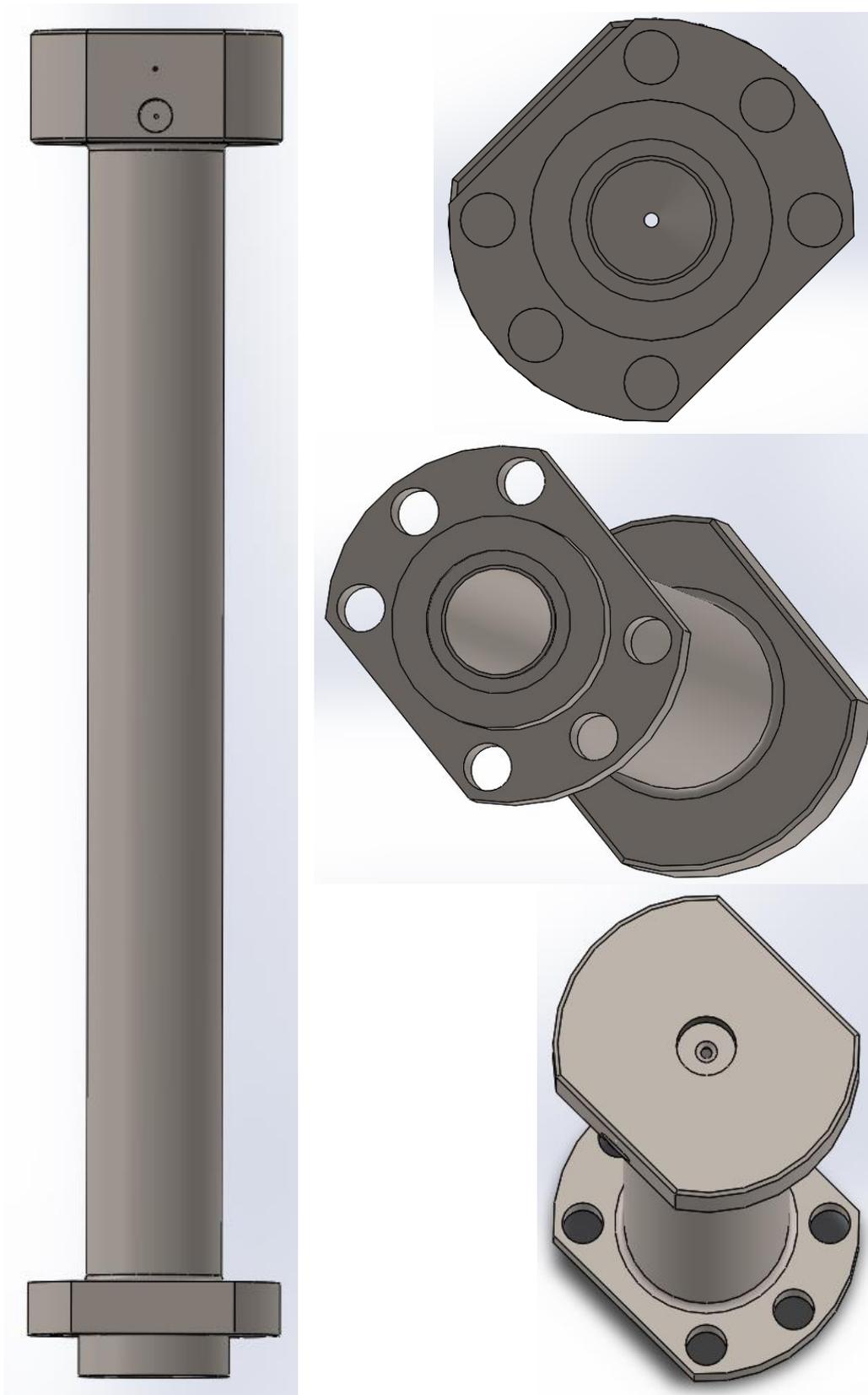


Figura 6.41: Renderizado del raíl del ensamblaje.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.2.3. Casquillo inyector

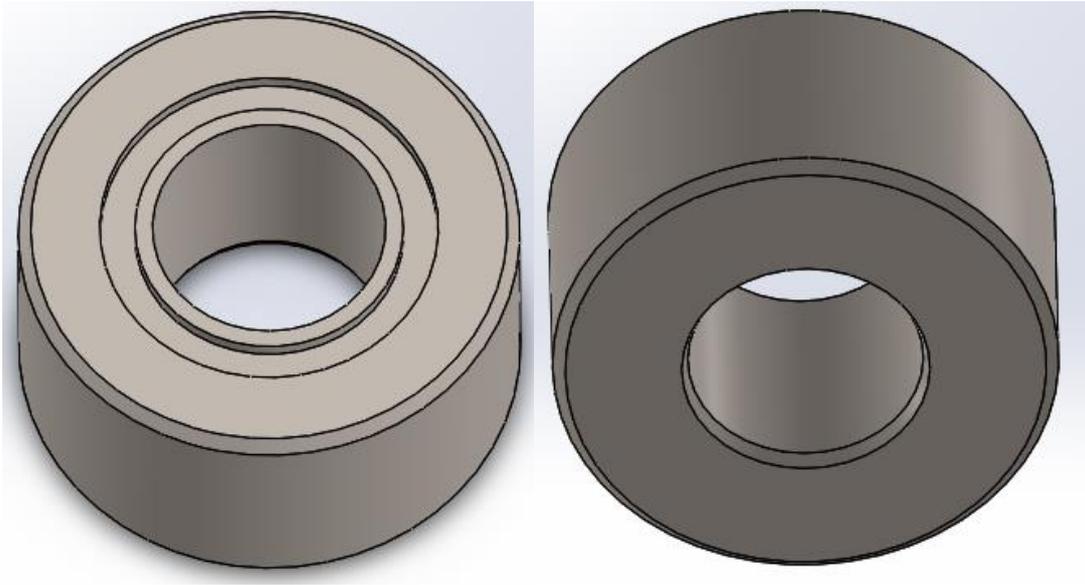


Figura 6.42: Renderizado del casquillo del inyector del ensamblaje.

### 6.2.4. Placa de ajuste

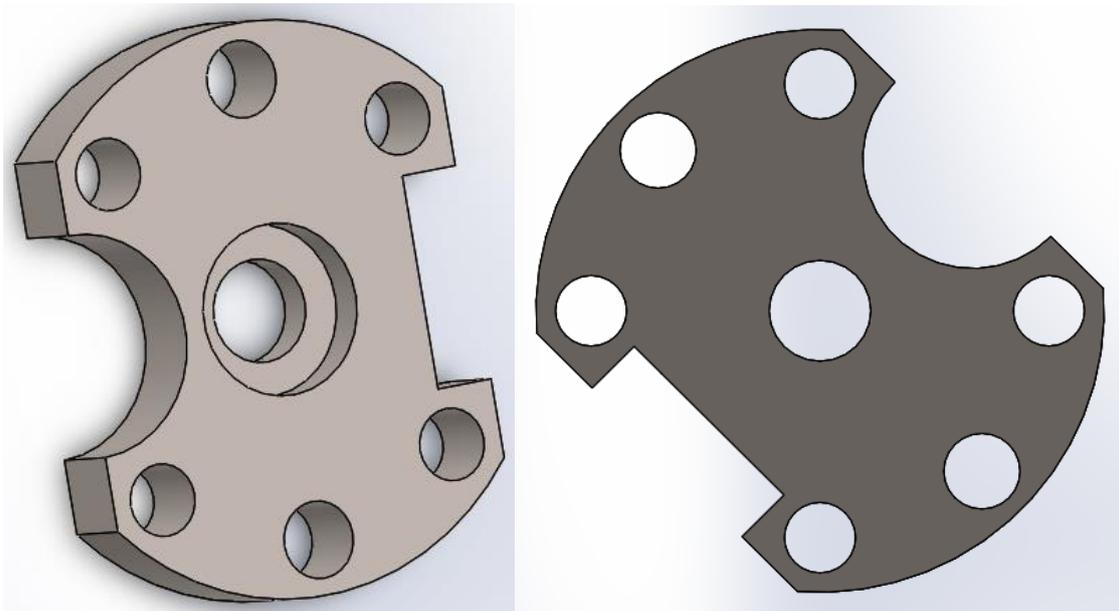


Figura 6.43: Renderizado de la placa de ajuste del ensamblaje.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.2.5. Sensores de presión

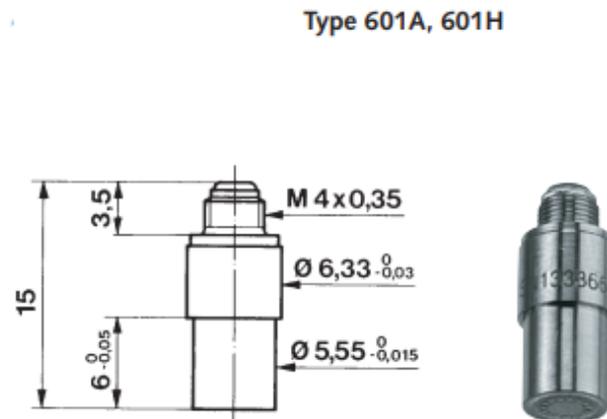


Figura 6.44: Sensor piezoeléctrico Kistler 601H. [37]

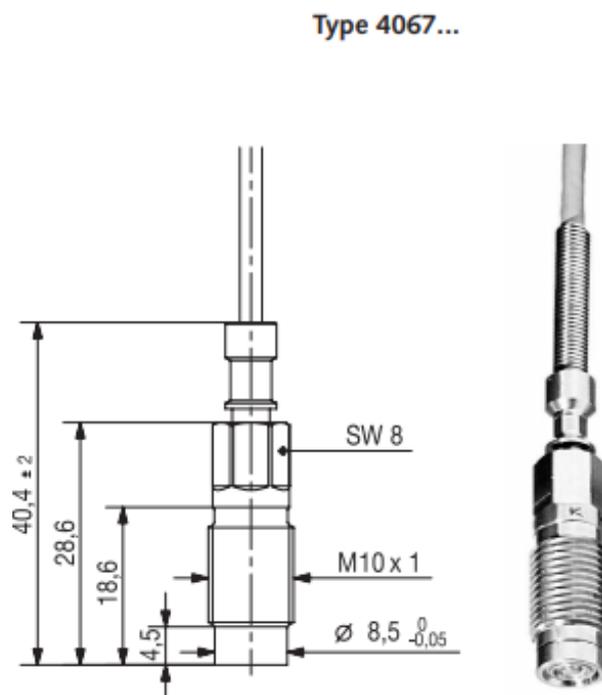


Figura 6.45: Sensor piezorresistivo Kistler 4067. [38]

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.2.6. Inyector Spray G

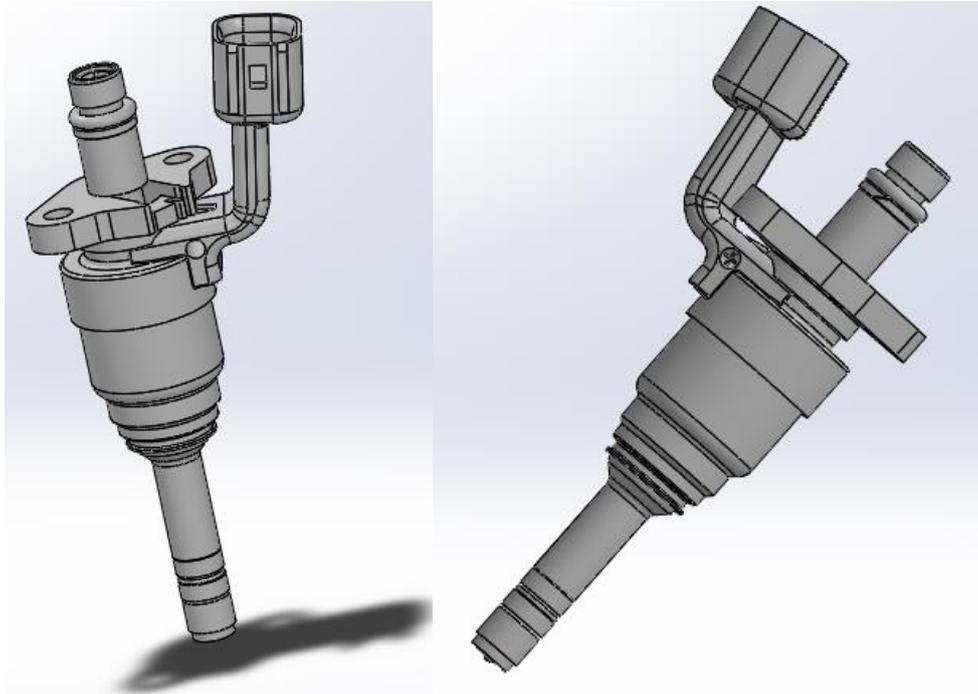


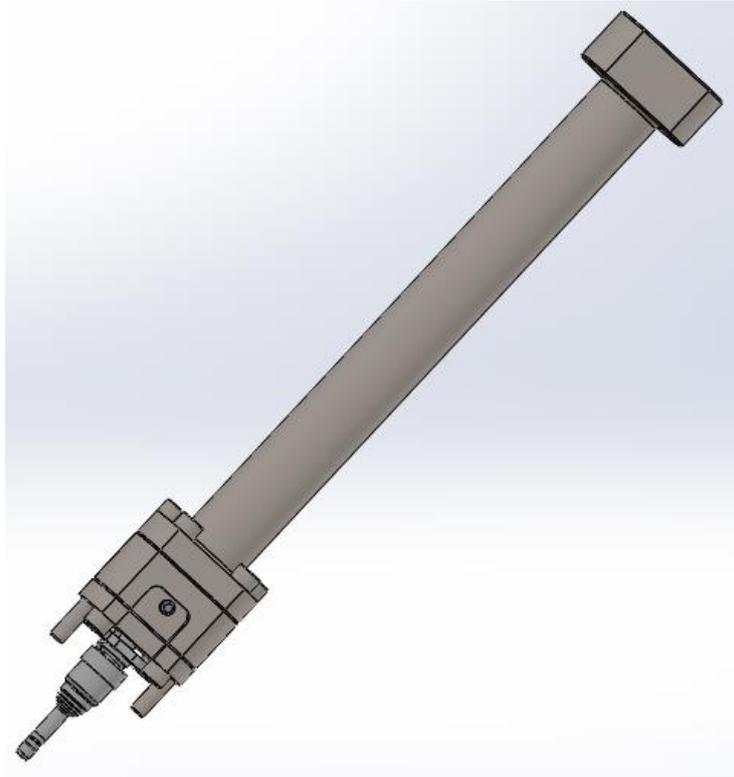
Figura 6.46: Renderizado del inyector Spray G.

### 6.2.7. Ensamblaje



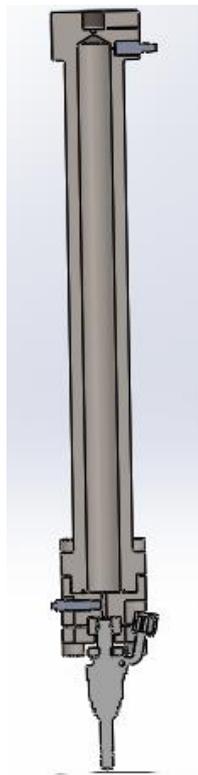
Figura 6.47: Vista lateral derecha del renderizado del ensamblaje.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.



*Figura 6.48: Vista lateral izquierda del renderizado del ensamblaje.*

### **6.2.8. Sección y detalles del ensamblaje**



*Figura 6.49: Representación de una sección del renderizado del ensamblaje.*

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

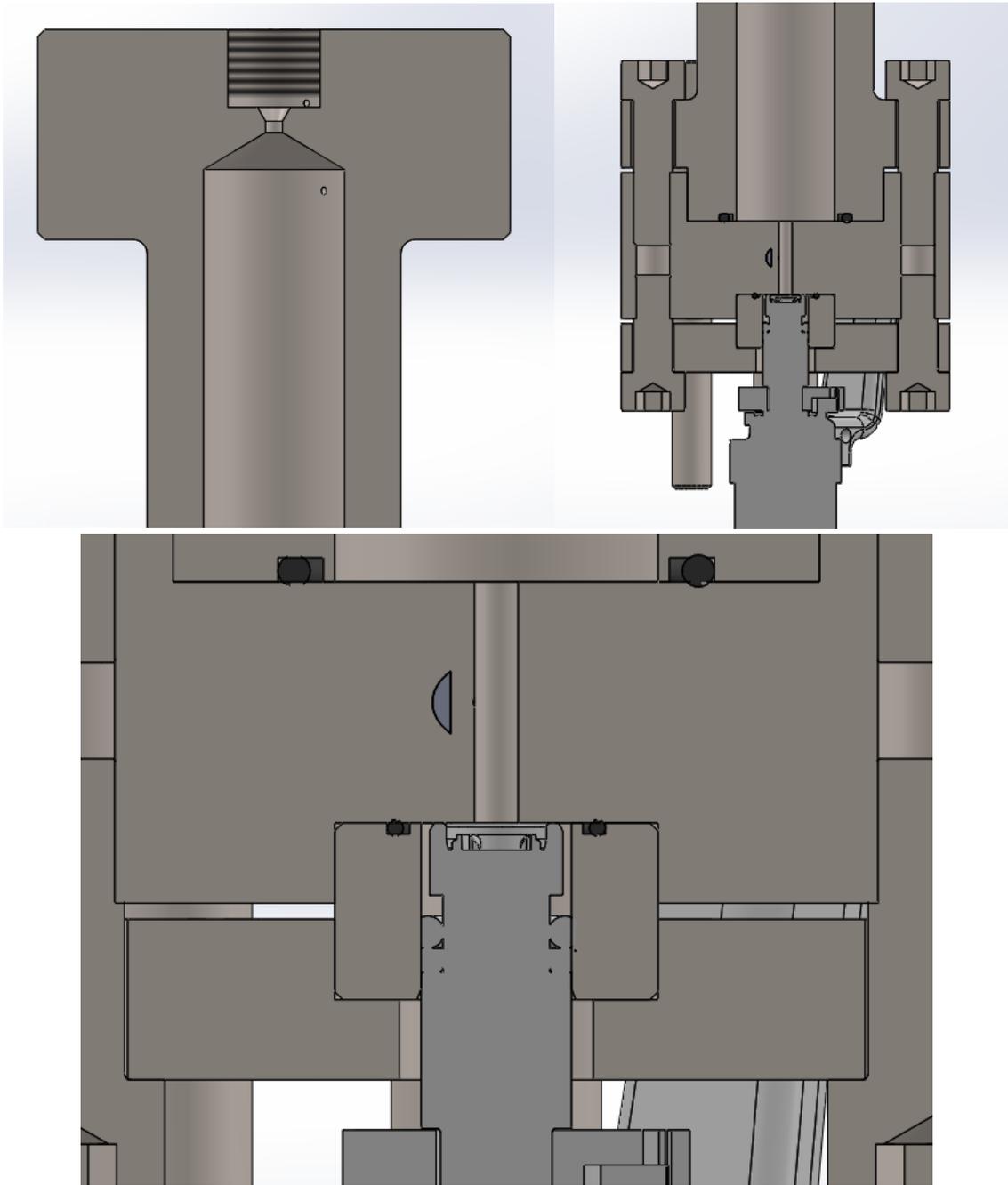


Figura 6.50: Detalles de la sección del renderizado del ensamblaje. Entrada raíl, tornillos ensamblaje y acople entre base, casquillo del inyector, placa de ajuste e inyector.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

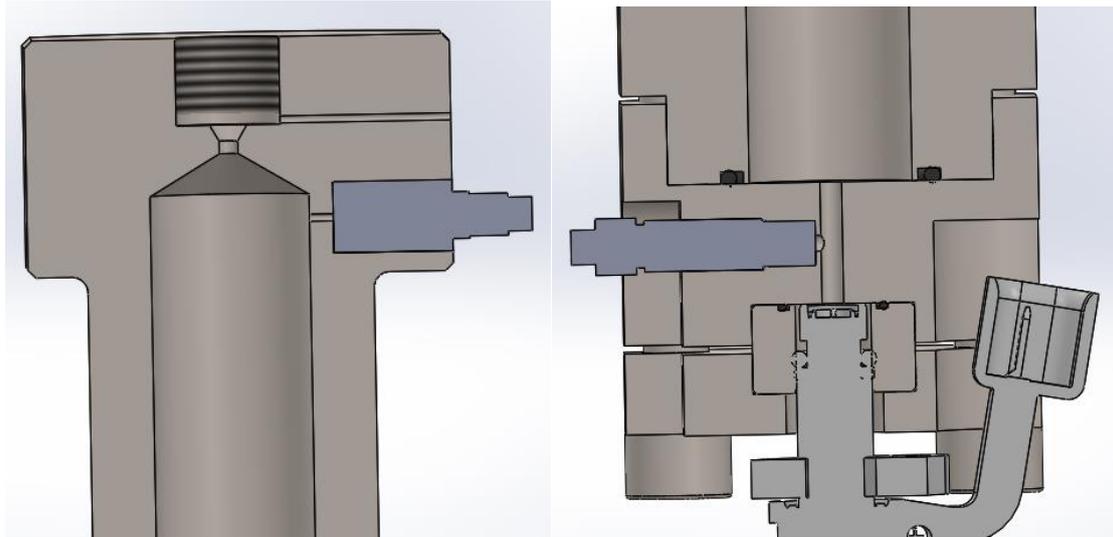


Figura 6.51: Detalles del renderizado del ensamblaje. Montaje del sensor piezoeléctrico en el raíl, montaje del sensor piezorresistivo en la base y mecanizado para facilitar conexiones electrónicas del inyector.

### 6.3. ANÁLISIS ESTÁTICO (SOLIDWORKS)

Para la realización del análisis estático se simplificó lo máximo posible al ensamblaje. Se eliminaron los mecanizados para los sensores de presión en la base y el raíl, el mecanizado para las conexiones electrónicas del inyector, el orificio de desahogo en la parte superior del raíl, las cavidades de las tóricas en el raíl y en el casquillo del inyector, se eliminaron los chaflanes realizados en el raíl y en el casquillo, se eliminaron los redondeos del raíl y se suprimieron los tornillos, pero no los orificios de taladro en las piezas. De esta manera el ensamblaje quedó conformado solamente por la base, el raíl, el casquillo del inyector y la placa de ajuste.

Por último, se realizó una simetría en las piezas, donde se dividió simétricamente el ensamblaje en 4 partes iguales, para trabajar con un cuarto del ensamblaje (**Figura 6.52**) y reducir el tiempo del análisis estático.

Para la realización del análisis estático se definió el tipo de material a utilizar y sus parámetros característicos: el módulo de Young o módulo de elasticidad (representa la relación entre las tensiones aplicadas y los incrementos de deformación longitudinal producidos), el coeficiente de Poisson (constante que representa el estrechamiento de una sección que es perpendicular al estiramiento longitudinal al que está sometido) y el límite elástico

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

(tensión máxima a la que un material elástico puede estar sometido antes de empezar a sufrir deformaciones permanentes, llegando a su comportamiento plástico). En el caso del acero inoxidable AISI 316:

- Módulo de Young:  $E=200.000$  MPa.
- Coeficiente de Poisson:  $\nu=0,3$ .
- Límite elástico cuando se produce una deformación del 0,2%:  $\sigma_{y(0,2\%)}=205$  MPa

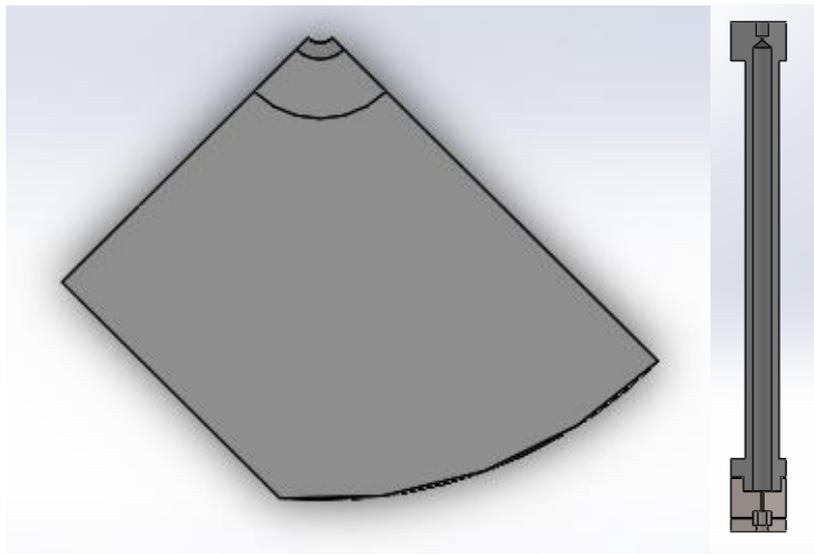


Figura 6.52: Renderizado del ensamblaje simplificado.

Para realizar el análisis se definieron las sujeciones, las cargas externas actuantes sobre el ensamblaje y se determinó que no existía penetración del fluido entre las piezas. La sujeción se encuentra en el área que cubre la cabeza del tornillo y sólo restringe desplazamientos perpendiculares a la superficie plana del raíl, como se muestra en la **Figura 6.53**.

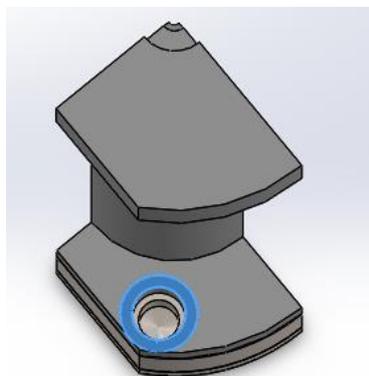


Figura 6.53: Representación del área donde se aplica la sujeción.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Las cargas externas que actúan sobre el ensamblaje son: la presión que actúa en el interior del raíl y de la línea corta que tiene un valor de  $P=300$  bar (**Figura 6.54**), la fuerza con sentido contrario a la dirección en la que se mueve el fluido que ejerce la rosca donde se conecta la tubería de alimentación de valor  $F_{Ent.Rail}=61,07$  N (**Figura 6.55**), la fuerza que ejercen los tornillos en las superficies de las roscas de la base, que tienen dirección hacia la superficie donde queda la cabeza del tornillo,  $F_{Torn.Sup.}=4559$  N y  $F_{Torn.Inf.}=1033$  N, y en la parte inferior de la placa de ajuste en el área que es cubierta por la cabeza del tornillo, con valor  $F_{Torn.Placa}=1033$  N como se ve en la **Figura 6.55**.

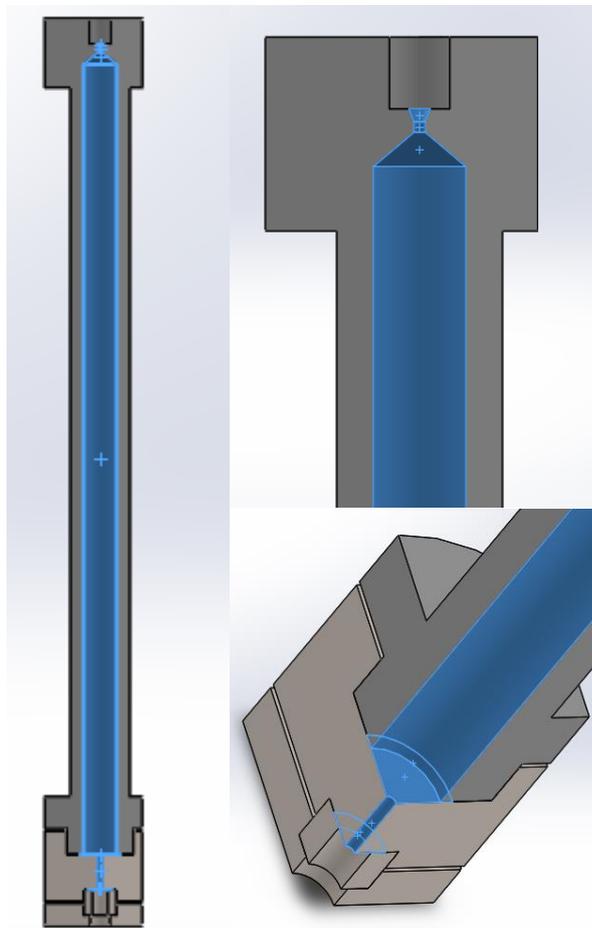


Figura 6.54: Representación de la presión ejercida por el fluido en el raíl y en la base.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

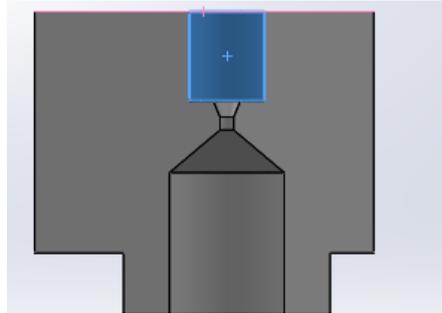


Figura 6.55: Representación de la fuerza ejercida por la tubería de alimentación en la rosca del raíl.

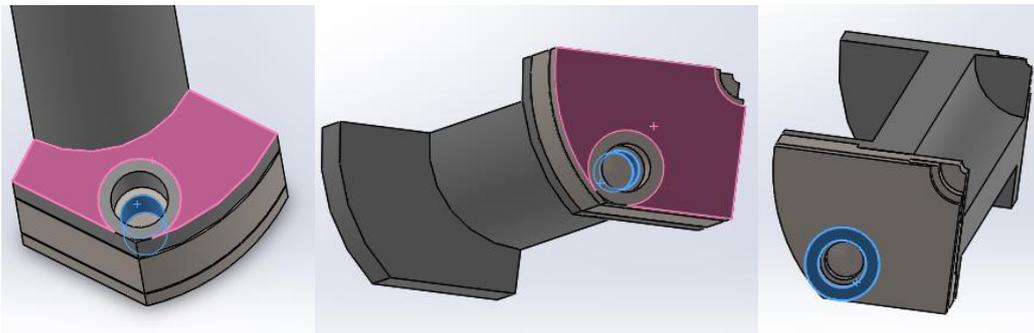


Figura 6.56: Representación de las fuerzas ejercidas por los tornillos. Tornillo superior en la rosca interna de la base, tornillo inferior en la rosca interna de la base y tornillo inferior en la placa de ajuste.

A partir de las configuraciones anteriores y del mallado del ensamblaje, se obtienen como resultado del análisis estático las tensiones de Von Mises, los desplazamientos, las deformaciones unitarias y el factor de seguridad del ensamblaje, respectivamente.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.3.1. Tensiones

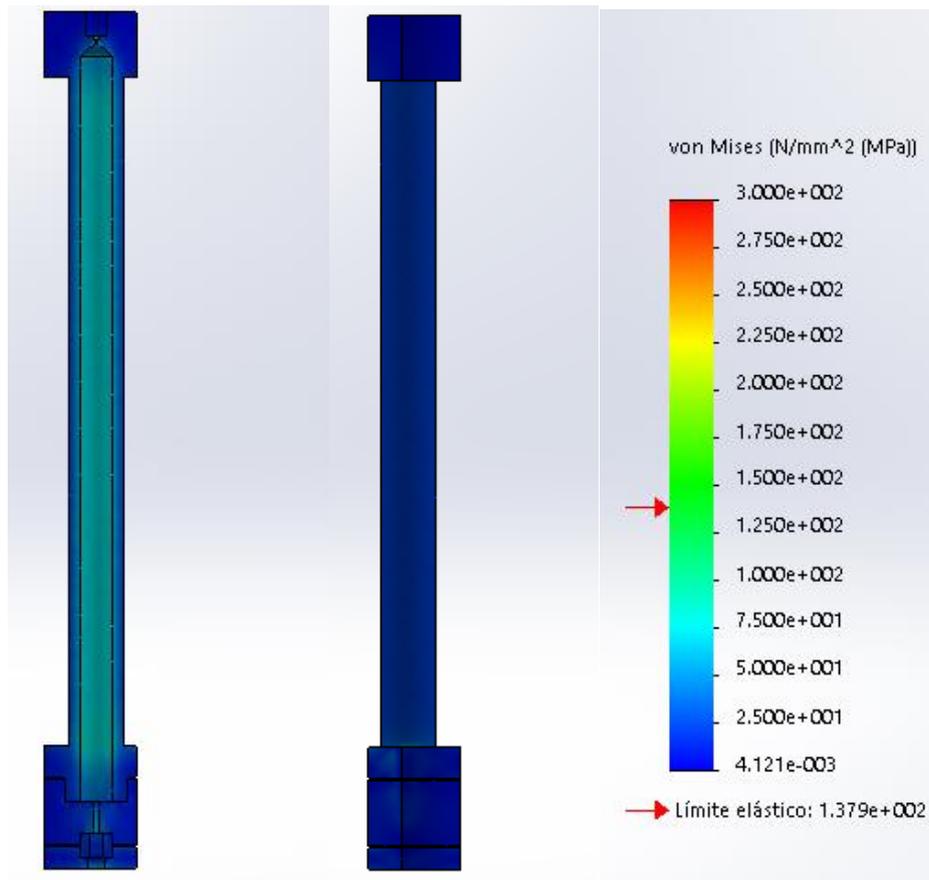


Figura 6.57: Tensiones en la parte interna y externa del ensamblaje simplificado.

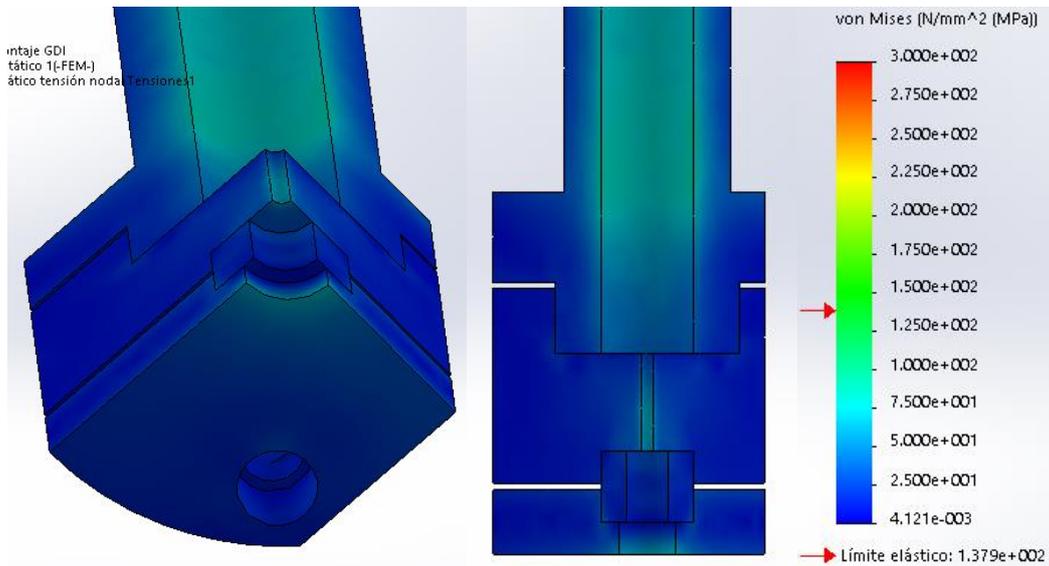


Figura 6.58: Tensiones en la línea corta y en la placa de ajuste.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

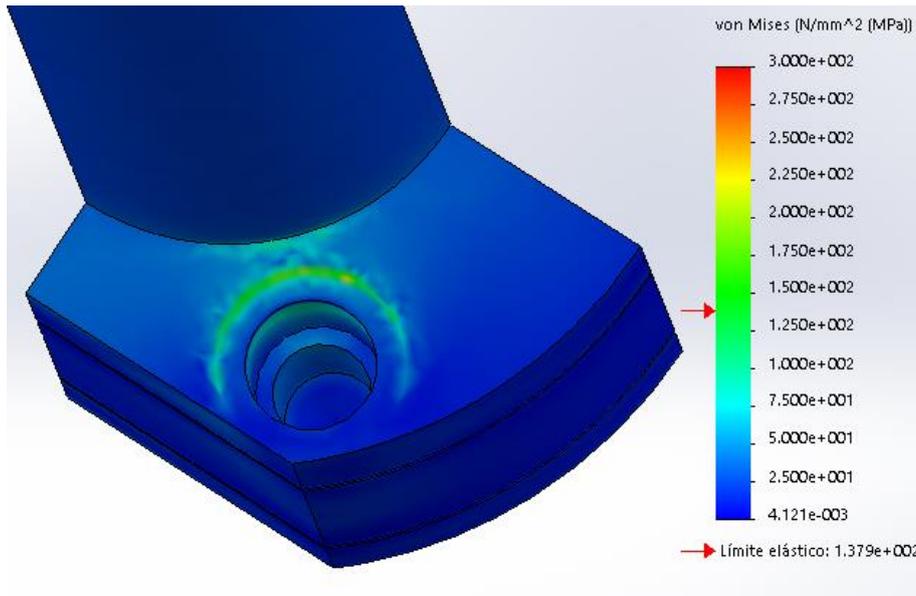


Figura 6.59: Tensiones en los orificios para tornillos.

Se obtuvo como resultado del análisis que la tensión máxima de Von Mises en el ensamblaje fue  $\sigma_{VM\text{máx.}}=226,9$  MPa en la zona del raíl donde apoya la cabeza del tornillo, el cual es un valor que se da por las simplificaciones realizadas al ensamblaje, ya que se producen mayores tensiones en el borde de la arandela causadas por la rigidez de las condiciones de contorno que hacen que se produzca una especie de disco indeformable en esa área, a esto se le suma que los redondeos en el raíl fueron eliminados y se producen concentradores de tensiones en la arista cercana a la arandela. Debido a que este valor no se producirá en condiciones de trabajo normales o en caso de producirse no compromete al funcionamiento del raíl, se decide mantener este diseño mecánico.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

### 6.3.2. Desplazamientos

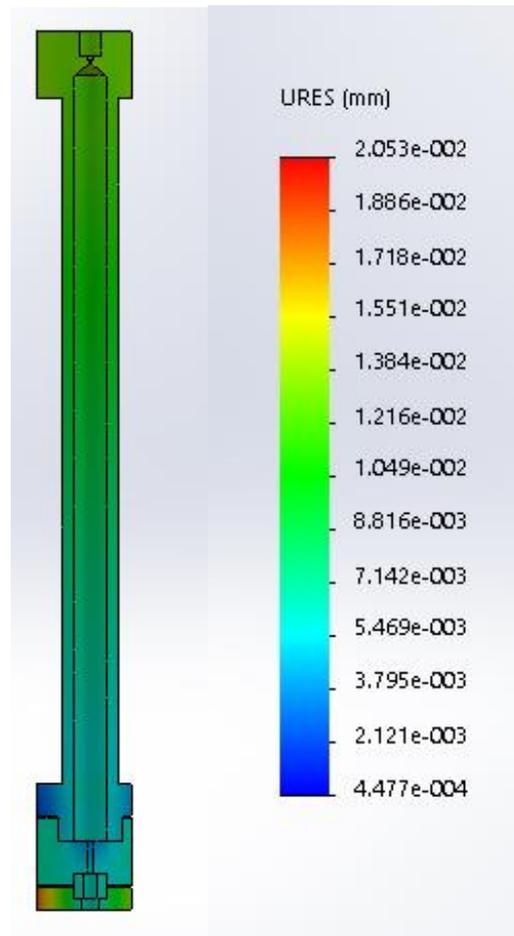


Figura 6.60: Desplazamientos en el ensamblaje.

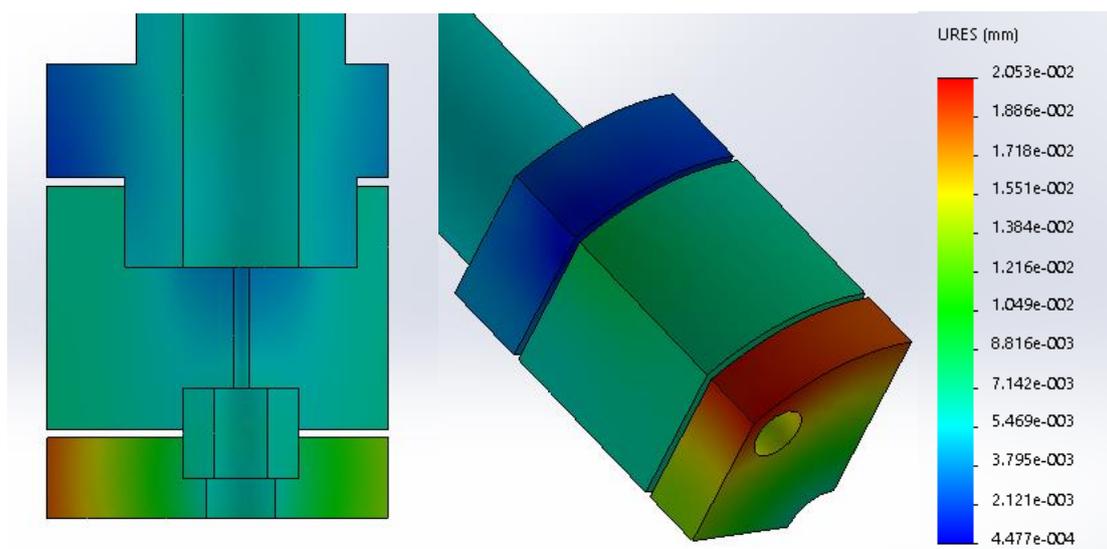


Figura 6.61: Detalle de desplazamientos en parte inferior del raíl, la base y la placa de ajuste.

### 6.3.3. Deformaciones unitarias

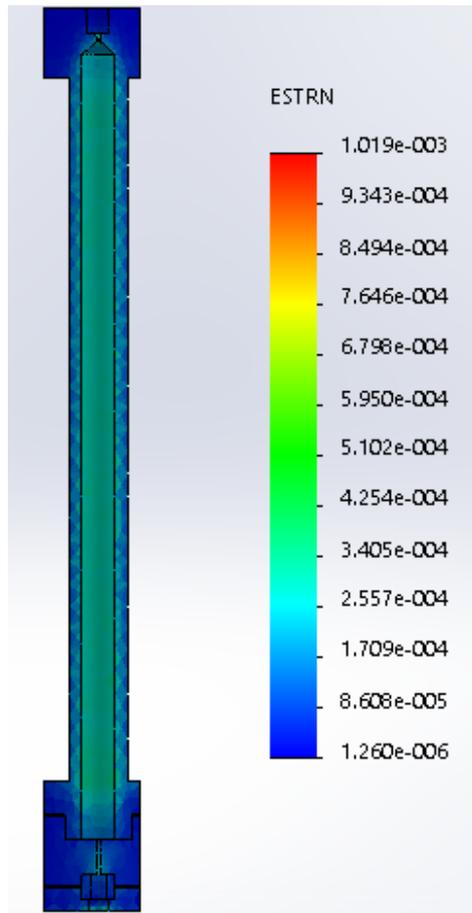


Figura 6.62: Deformaciones unitarias equivalentes en el ensamblaje.

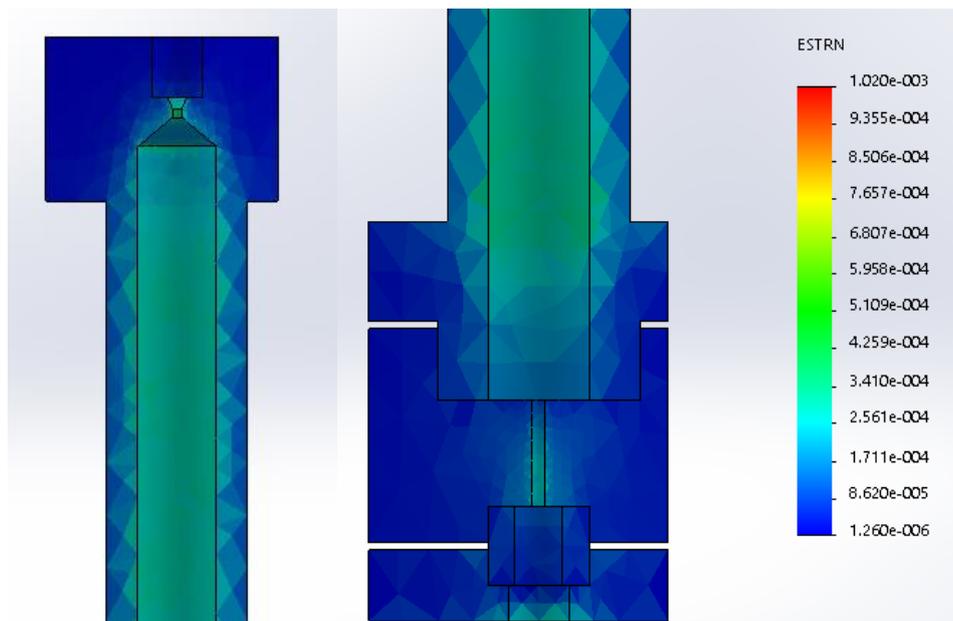


Figura 6.63: Detalle de las deformaciones unitarias equivalentes. Inicio del raíl, final del raíl, base, casquillo y placa de ajuste.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

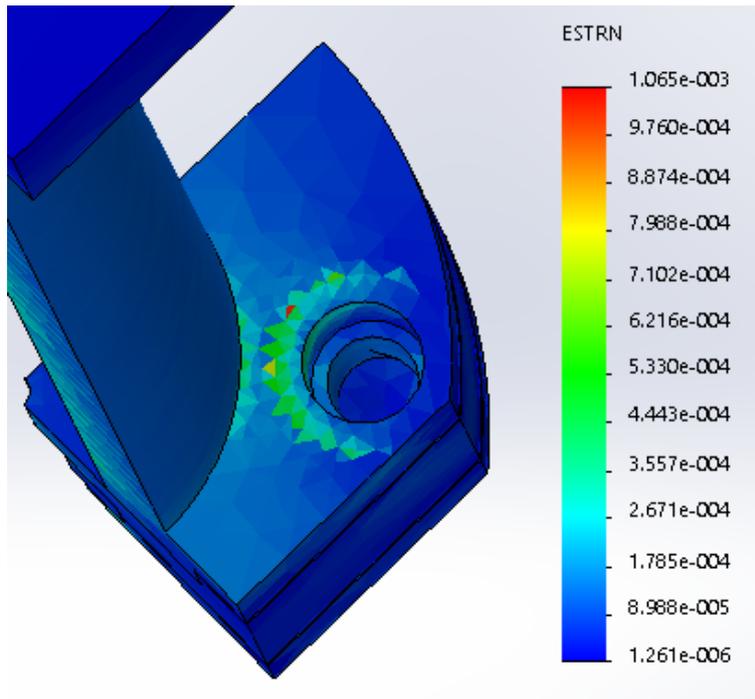


Figura 6.64: Deformaciones unitarias equivalentes en orificio de tornillo en el raíl.

#### 6.3.4. Factor de seguridad

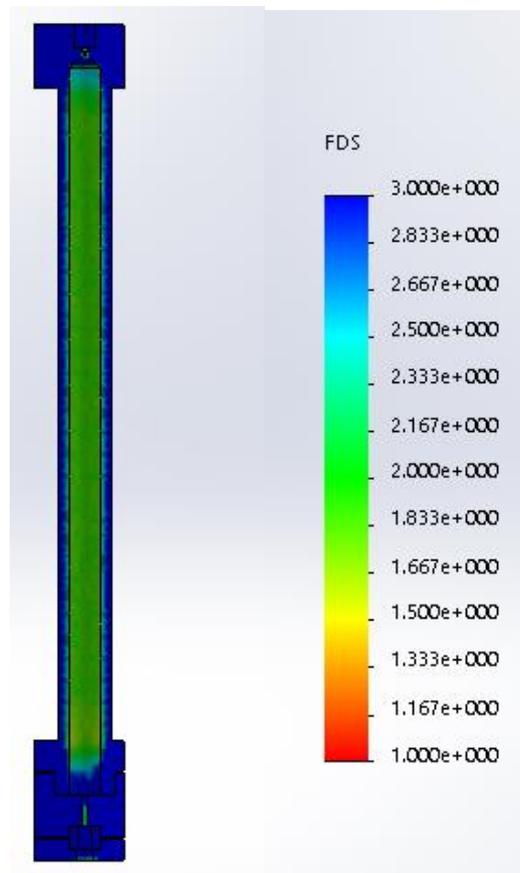


Figura 6.65: Factor de seguridad en el ensamblaje.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

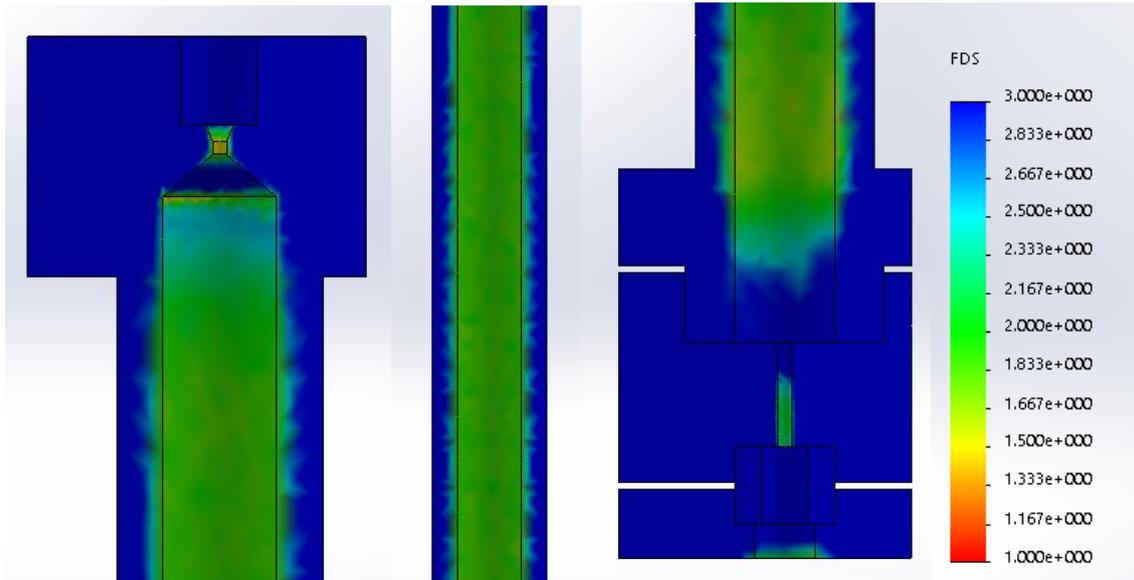


Figura 6.66: Detalles del factor seguridad. Inicio del raíl, tramo medio del raíl y línea corta.

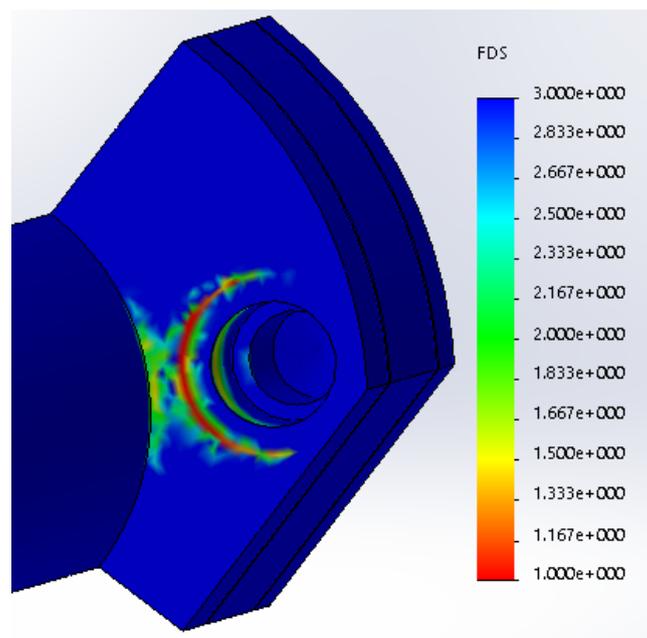


Figura 6.67: Detalle de factor de seguridad de orificio de tornillo en el raíl.

Como se comentó anteriormente, este punto no representa un riesgo para el ensamblaje, porque no compromete el funcionamiento del mismo y es un valor que no se dará en condiciones de funcionamiento normales. Además, todos los demás puntos del ensamblaje presentan un factor de seguridad  $X > 1,5$  que es aceptable.

$$X = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VMm\acute{a}x}} \quad (6.16)$$

## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1. TRABAJO REALIZADO**

Con este trabajo se consiguió emular el funcionamiento de los medidores de tasa de inyección convencionales utilizando el software Simulink, lo que permitió plantear un sistema en el que la medición de presiones se realiza aguas arriba del inyector y no aguas abajo como en el caso de los tasímetros convencionales. Las simulaciones que se mencionaron anteriormente y el diseño hidráulico del ensamblaje que se utilizó como punto de partida para el diseño mecánico fueron realizados con el mismo software. En el diseño hidráulico se lograron diseñar sistemas complejos conformados por más de una tubería para estudiar la dinámica de ondas en los mismos.

Posteriormente se realizó el diseño mecánico con el software SolidWorks, en el que se consiguió realizar un ensamblaje apto para soportar las presiones a las que estará sometido durante los ensayos y a presiones incluso mayores, puesto que se diseñó para tener un factor de seguridad de  $X=1,5$ . Se logró que todas las piezas que conforman el ensamblaje quedaran perfectamente acopladas entre sí evitando las fugas de presiones que provocan errores en la medición de las presiones y puede conllevar a deformaciones de las piezas.

La realización de este trabajo permite incrementar el número de ensayos que se pueden llevar a cabo en el laboratorio de inyección, con los que se podrán obtener nuevos conocimientos sobre las presiones que se presentan en el raíl durante el fenómeno de inyección y mayor precisión en los valores de la tasa de inyección en escenarios más reales, como lo puede ser en un motor instrumentado.

### **7.2. TRABAJOS FUTUROS**

El ensamblaje diseñado con el software SolidWorks se encuentra actualmente en proceso de fabricación, una vez esté finalizada su fabricación y esté en posesión del Instituto Universitario CMT se realizarán ensayos en su laboratorio para comparar los resultados arrojados por el nuevo medidor de tasa con el antiguo.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Los pasos a seguir para el inicio de los ensayos son: puesta a punto del tasímetro aguas arriba del inyector y la preparación del procesador de datos del sistema de medidas.

La puesta a punto del tasímetro es necesaria porque se tiene que realizar la calibración del instrumento para evitar que se produzcan errores durante los ensayos, debido a que es un sistema completamente novedoso.

Por otro lado el procesador de datos del sistema de medidas tiene un funcionamiento ya definido, este sistema tomará como entradas las señales de presión medidas y devolverá la señal de tasa de inyección. Estará basado en un modelo 1D del sistema hidráulico, específicamente el modelo 10 corregido que se corrigió con las dimensiones correctas de cada elemento, el cual estará implementado en Simulink, y para su correcto funcionamiento deberá incluir todos los detalles del sistema (dimensiones, deformación de líneas, rozamiento con las paredes, pérdidas de carga en singularidades, etc.).

## 8. BIBLIOGRAFÍA

[1] *Ciclo Otto*. Wiki del Departamento de Física Aplicada III en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. 13 abril 2015, 15:53 [consulta: 2 mayo 2020]. Disponible en: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo\\_Otto](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto)

[2] Haya Álvarez, Santiago. *Motores de inyección directa de encendido por chispa: Análisis conceptual de las tecnologías e implicaciones en las prestaciones*. Trabajo final de grado. Sevilla: Universidad de Sevilla. 2015 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/51491719-Dep-ingenieria-energetica-escuela-tecnica-superior-de-ingenieria-universidad-de-sevilla.html>

[3] *Inyección de combustible*. Wikipedia: la enciclopedia libre. 30 abril 2020, 21:29 [consulta 4 mayo 2020]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Inyecci%C3%B3n\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Inyecci%C3%B3n_de_combustible)

[4] *Toyota presenta su nueva generación de motores compactos atmosféricos*. RutaMotor. 16 abril 2015 [consulta: 2 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.rutamotor.com/toyota-presenta-su-nueva-generacion-de-motores-compactos-atmosfericos/>

[5] *Ciclo Atkinson - Motor Atkinson*. Thermal Engineering. 11 enero 2020 [consulta 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-ciclo-atkinson-motor-atkinson-definicion/>

[6] *El motor diésel de cuatro tiempos*. Universitat Politècnica de València. 23 junio 2013 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/06/23/el-motor-diesel-de-cuatro-tiempos/>

[7] *Ciclo Diésel*. Física Termodinámica. [Consulta: mayo 2020]. Disponible en: <https://tatofisicatermodinamica.wordpress.com/tercer-corte/ciclos-terricos/ciclo-diesel/>

[8] *Primary Spray G Datasets*. ECN: Engine Combustion Network. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/primary-spray-g-datasets/>

[9] *BMW 3.0l*. Bosch Auto Parts. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.boschautoparts.com/en/bosch-for-gdi/bmw-3.0l>

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

[10] *Common-rail*. Wikipedia: la enciclopedia libre. 15 marzo 2020, 14:46 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Common-rail>

[11] *¿Cómo funciona un inyector de gasolina?*. Petrolhead Garage. [Consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://petrolheadgarage.com/cursos-automocion/injector-gasolina/>

[12] *Inyección electrónica gasolina*. Full Mecánica. 2014 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/i/1596-inyectores-de-gasolina-funcionamiento>

[13] *Inyectores de combustible piezoeléctricos en motores*. YouTube. 24 marzo 2015 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=F8lpyQYvzbz>

[14] *Tipos de inyectores diésel y consejos de mantenimiento*. Ruta 401: el blog de los profesionales del taller. [Consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-inyectores-diesel-y-consejos-de-mantenimiento>

[15] *Mesh and Geometry*. ECN: Engine Combustion Network. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/computational-method/mesh-and-geometry/>

[16] *"Spray G" Operating Condition*. ECN: Engine Combustion Network. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/spray-g-operating-condition/>

[17] *"Spray G" Plume Orientation*. ECN: Engine Combustion Network. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://ecn.sandia.gov/gasoline-spray-combustion/target-condition/spray-g-plume-orientation/>

[18] Vaquerizo, Daniel. *Study on advanced spray-guided gasoline direct injection systems*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2017 [consulta: mayo 2020].

[19] Payri, R., Salvador, F.J., Gimeno, J. y Bracho, G. A new methodology for correcting the signal cumulative phenomenon on

injection rate measurements. En: *Experimental Techniques*. Febrero 2008, vol. 32, pp. 46–49. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2007.00188.x

[20] Zhao, Hua. *Advanced direct injection combustion engine technologies and development*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. ISBN: 978-1-84569-389-3

[21] Payri, R., Gimeno, J., Martí-Aldaraví, P. y Vaquerizo, D. Internal flow characterization on an ECN GDI injector. En: *Atomization and Sprays*. 2016, vol. 26.9, pp. 889–919. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2015013930

[22] Payri, R., Gimeno, J., Martí-Aldaraví, P. y Vaquerizo, D. Momentum Flux Measurements on an ECN GDi Injector. En: *SAE Technical Paper*. Septiembre 2015, 2015-01-1893. DOI: 10.4271/2015-01-1893

[23] Bardi, Michele. *Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the Diesel spray*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2014. DOI: 10.4995/Thesis/10251/37374

[24] Venegas, Óscar. *Estudio del fenómeno de la cavitación en la inyección diésel mediante la visualización del flujo interno en orificios transparentes*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2014.

[25] Payri, R., Gimeno, J., Novella, R. y Bracho, G. On the rate of injection modeling applied to direct injection compression ignition engines. En: *International Journal of Engine Research*. Marzo 2016. DOI: 10.1177/1468087416636281

[26] Plazas, Alejandro Hernán. *Modelado unidimensional de inyectores common-rail Diésel*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, E.T.S. Ingenieros Industriales. 2005.

[27] Bosch, Wilhelm. The Fuel Rate Indicator: a New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection. En: *SAE Paper*. 1966, 660749.

[28] Juárez Enríquez, Pedro Ángel. *Estudio de la influencia de la temperatura en el proceso de medida de tasa de inyección diésel*. Trabajo final de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, E.T.S. Ingenieros Industriales. 2018.

[29] Payri, R., Gimeno, J., Viera, J.P. y Plazas, A.H. Effect of Partial Needle Lift on the Hydraulic and Evaporative Performance Characteristics of a Common rail Diesel Fuel Injector. En: *THIESEL 2012 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines*. 2012, pp. 1–19.

[30] Linstrom, P.J., Mallard, W.G y Eds., Gaithersburg. Thermophysical Properties of Fluid Systems. En: *NIST Chemistry WebBook*. 2011.

[31] Payri, R., Gimeno, J., Venegas, Ó. y Plazas, A.H. Experimental and computational study of the influence of partial needle lift on nozzle flow in diesel fuel injectors. En: *Atomization and Sprays*. 2012, vol. 22, pp. 687–714. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2012005810.

[32] Payri, R., García, J.M., Salvador, F.J. y Gimeno, J. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. En: *Fuel*. 2005, vol. 84.5, pp. 551–561.

[33] Gimeno, Jaime. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diésel*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2008.

[34] Desantes, J.M., Payri, R., Salvador, F.J. y Gil, A. Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration. En: *Fuel*. 2006, vol. 85.7-8, pp. 910–917.

[35] Moon, S., Komada, K., Sato, K., Yokohata, H., Wada, Y. y Yasuda, N. Ultrafast X-ray study of multi-hole GDI injector sprays: Effects of nozzle hole length and number on initial spray formation. En: *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, vol. 68, pp. 68–81. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.03.027

[36] Payri, R., Salvador, F.J., Martí-Aldaraví, P. y Vaquerizo, D. ECN Spray G external spray visualization and spray collapse description through penetration and morphology analysis. En: *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 112, pp. 304–316. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.023

[37] *Quartz High-Pressure Sensor (type 601A, 601H)*. Kistler. [Consulta: 15 abril 2019]. Disponible en: [https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure\\_Model\\_601A\\_601H.pdf](https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure_Model_601A_601H.pdf)

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

[38] *Piezoresistive High Pressure Sensor (type 4067...)*. Kistler. [Consulta: 15 abril 2019]. Disponible en: [http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/4067a1000\\_czujnik\\_cisnienia\\_kistler\\_helmar\\_monitoring\\_silniki\\_nn3903.pdf](http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/4067a1000_czujnik_cisnienia_kistler_helmar_monitoring_silniki_nn3903.pdf)

*A Brief History of Aircraft Carburetors and Fuel Systems*. Aircraft Engine Historical Society. Agosto 2013 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.enginehistory.org/Accessories/HxFuelSys/FuelSysHx01.shtml>

*Acero al carbono de construcción*. Laboratorio de forjado. 29 agosto 2016 [consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/2016/08/29/acero-al-carbono-de-construccion/>

*Acero Inoxidable Duplex 2205*. Mega Mex. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <http://megamex.com/span/acero-inoxidable-duplex-2205.html>

*Aplicaciones de cauchos fluorados de alto rendimiento Viton*. Viton. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.viton.com/es/applications>

*Barra aluminio 7075 T6 redonda*. Randrade. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.randrade.com/barras/209-barra-aluminio-7075-t6-redonda.html>

*BMW 3.0l*. Bosch Auto Parts. 2019 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.boschautoparts.com/en/bosch-for-gdi/bmw-3.0l>

Desantes Fernández, J.M., Payri González, F. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Valencia: SPUPV/Ed. Reverté, UPV, 2011.

*El motor diésel de cuatro tiempos*. Universitat Politècnica de València. 23 junio 2013 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/06/23/el-motor-diesel-de-cuatro-tiempos/>

*Engine Combustion Network*. ECN: Engine Combustion Network. 2019 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://ecn.sandia.gov/>

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

*F-1140: Acero de construcción al carbono*. Ipargama. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.ipargama.com/pdf/F-1140.pdf>

*Gasolina*. EcuRed: Enciclopedia Cubana. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Gasolina>

Guardiola, C., Ruiz, S., Pla, B., Blanco-Rodríguez, D. *Motores térmicos para ingeniería mecánica*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Ref: 61591\_01\_01\_01.

Howell, J.R. y Buckius, R.O. *Principios de termodinámica para ingenieros*. México, Editorial McGraw-Hill, traducción: Ileana Velasco Ayala, 1990. ISBN: 968-422-571-7

*Inox 304 vs Inox 316: las diferencias entre los dos tipos de acero*. Ferros Planes. 24 noviembre 2018 [consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <https://ferrosplanes.com/inox-304-vs-inox-316-diferencias/>

*Inyección*. Real Academia Española. [Consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://dle.rae.es/inyecci%C3%B3n>

*Inyección directa de gasolina*. MECANICAVirtual. 31 julio 2007 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20090415132718/http://www.mecanicavirtual.org/inyec-gasoli-direc.htm>

*Inyección indirecta e inyección directa*. ActualidadMotor. [Consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.actualidadmotor.com/inyeccion-indirecta-e-inyeccion-directa/>

*Inyector (motor)*. Wikipedia: la enciclopedia libre. 27 febrero 2020, 01:22 [consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Inyector\\_\(motor\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Inyector_(motor))

*Inyector piezoeléctrico*. Tecnología del Automóvil. 11 marzo 2015 [consulta: 3 mayo 2015]. Disponible en: <https://www.tecnologia-automovil.com/actualidad/inyector-piezoelctrico/>

*Premium 1.7225+QT*. Abrams Aceros Premium. 2020 [consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: [https://shop.premium-steel.eu/es\\_sp/acero-bonificado-de-cementacion-y-de-nitruracion/f-1252-qt.html](https://shop.premium-steel.eu/es_sp/acero-bonificado-de-cementacion-y-de-nitruracion/f-1252-qt.html)

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

*Tipos de inyectores diésel y consejos de mantenimiento.* Ruta 401: el blog de los profesionales del taller. [Consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-inyectores-diesel-y-consejos-de-mantenimiento>

*Ventajas del Common Rail.* Commonrail.es. Standard del Motor V. 2010 [consulta: 3 mayo 2020]. Disponible en: [http://www.commonrail.es/ventajas\\_common\\_rail.html#:~:text=Una%20de%20las%20ventajas%20mas,emisiones%20contaminantes%20en%20el%20escape.](http://www.commonrail.es/ventajas_common_rail.html#:~:text=Una%20de%20las%20ventajas%20mas,emisiones%20contaminantes%20en%20el%20escape.)

## Parte II

# PRESUPUESTO

## 9. PRESUPUESTO

### 9.1.MANO DE OBRA

En este apartado del presupuesto se procede a calcular el coste de las personas que han intervenido en la realización del proyecto. El proyecto fue llevado a cabo por un ingeniero mecánico bajo la supervisión y tutela de un técnico de laboratorio, un ingeniero medio (estudiante de doctorado) y un ingeniero pro (director del proyecto).

Descripción	Unidad	Medición	Precio unitario (€/h)	Importe (€)
Ingeniero mecánico	h	450	18,90	8.505,00
Ingeniero medio	h	240	35,00	8.400,00
Ingeniero pro	h	30	47,50	1.425,00
Técnico de laboratorio	h	20	20,35	407,00
			<b>Mano de Obra</b>	<b>18.737,00</b>

Tabla 9.1: Coste mano de obra.

### 9.2.COSTE EQUIPOS

El único equipo utilizado para la realización de este proyecto fue la computadora, por lo que se realiza la amortización del equipo para obtener el coste por hora y posteriormente el importe total de su uso.

Se definen la amortización **(9.17)** y el coste por hora **(9.18)**, respectivamente, como:

$$A = \frac{V_c - V_r}{t} \quad (9.17)$$

$$\text{Coste por hora} = \frac{A + m}{h} \quad (9.18)$$

Donde  $A$  es la amortización,  $V_c$  es el valor de compra,  $V_r$  es el valor residual,  $t$  es el tiempo de amortización o vida útil del equipo expresado en años,  $m$  es el coste de mantenimiento anual y  $h$  son las horas anuales de uso del equipo **(9.19)**.

$$h = \text{horas de trabajo semanal} \times \text{semanas de trabajo al año} \quad (9.19)$$

Se consideran como máximo tiempo de funcionamiento 40 horas semanales y 46 semanas al año, quedando  $h=1840$  horas.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Una vez calculado el coste por hora se calcula el coste del equipo utilizado.

Elemento	$V_c$ (€)	$t$	$V_r$ (€)	A (€/año)	m (€/año)	$h$	Coste por hora (€/h)	Horas utilizado	Coste (€)
Computadora	450	5	90	72	20	1840	0,05	350	17,50

Tabla 9.2: Coste equipos.

### 9.3. COSTE MATERIALES FUNGIBLES

En este apartado se calcula el coste de los elementos que fueron utilizados y no se puede sacar más provecho, como el consumo eléctrico por ejemplo (**Tabla 9.3**). Además, se puede calcular el coste de los materiales como las hojas y la tinta de la impresora (**Tabla 9.4**).

Elemento	Potencia (kW)	Rendimiento	Tiempo (h)	Coste (€/kWh)	Consumo Eléctrico (€)
Computadora	0,5	100%	350	0,11	19,25

Tabla 9.3: Coste consumo eléctrico.

Descripción	Precio (€/hojas)	Precio unitario (€)	Cantidad utilizada (-)	Coste (€)
Hojas	4,5/500	0,009	100	0,90
Tinta de impresora	28,99/300	0,097	60	5,80
Consumo eléctrico	---	---	---	19,25
<b>Materiales fungibles</b>				<b>25,95</b>

Tabla 9.4: Coste materiales fungibles.

### 9.4. COSTE MATERIAL INFORMÁTICO

Se incluye el coste de las licencias de los softwares y programas informáticos que fueron necesarios para la realización del proyecto, dichos softwares no fueron adquiridos al poseer las licencias educacionales de la universidad y el CMT. Aun así, se toman en cuenta sus costes para realizar el presupuesto.

Diseño y calibración de un medidor de tasa de inyección para inyectores GDI con medidas de presión instantáneas.

Programa Informático	Precio licencia (€)
Microsoft Office	126,00
Matlab	800,00
SolidWorks	1500,00
<b>Material informático</b>	<b>2,426.00</b>

Tabla 9.5: Coste material informático.

## 9.5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

El presupuesto de ejecución material es la sumatoria de los costes obtenidos anteriormente (mano de obra, coste de equipos, coste de materiales fungibles y coste del material informático).

Descripción	Importe (€)
Mano de obra	18.737,00
Materiales	17,50
Programas informáticos	2.426,00
Materiales fungibles	25,95
<b>P.E.M.</b>	<b>21.206,45</b>

Tabla 9.6: Presupuesto de ejecución material.

## 9.6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE CONTRATA

Al P.E.M. se le suma el IVA de la mano de obra, porque los demás componentes ya lo tienen incluido en su precio, los gastos generales y el beneficio industrial.

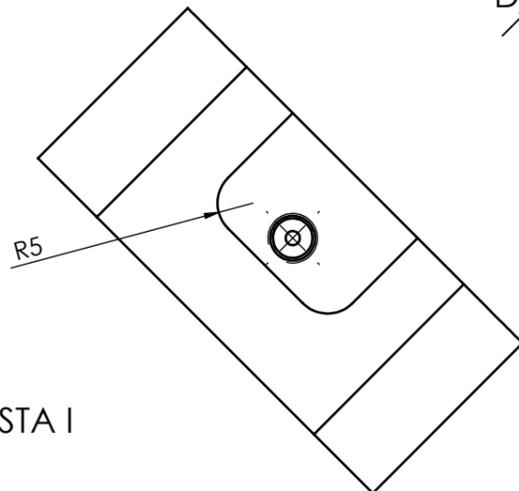
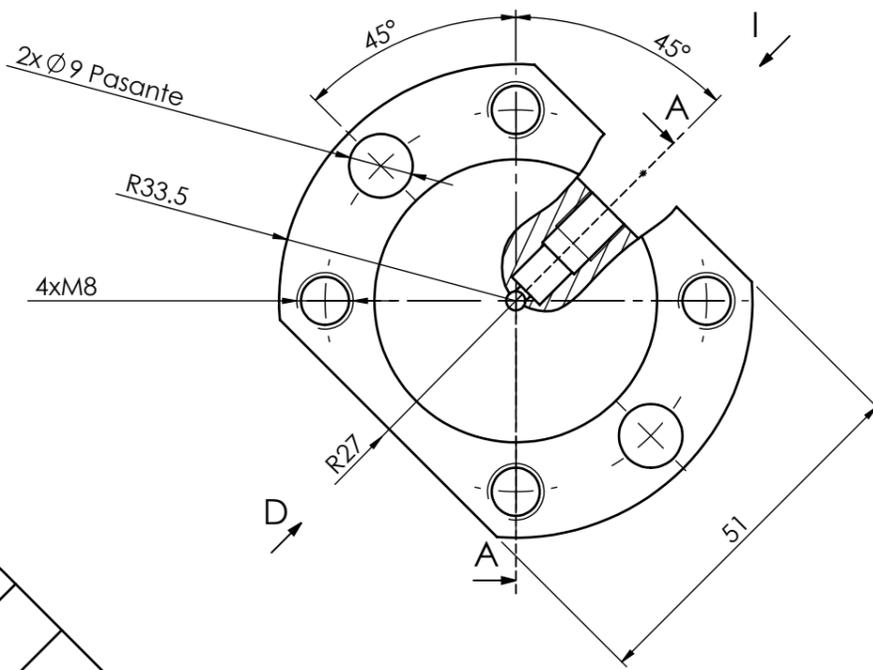
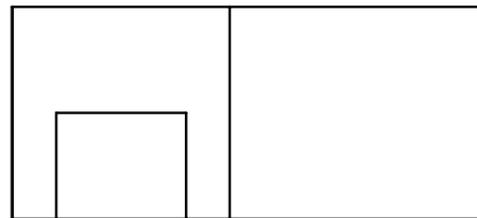
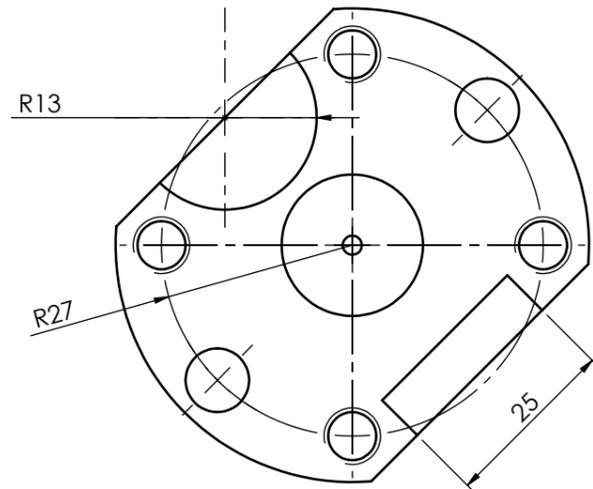
Descripción	Importe (€)
P.E.M.	21.206,45
Gastos generales (13%)	2.756,84
Beneficio industrial (6%)	1.272,39
IVA (21%)	3.934,77
<b>P.E. Contrata</b>	<b>29.170,45</b>

Tabla 9.7: Presupuesto de ejecución de contrata.

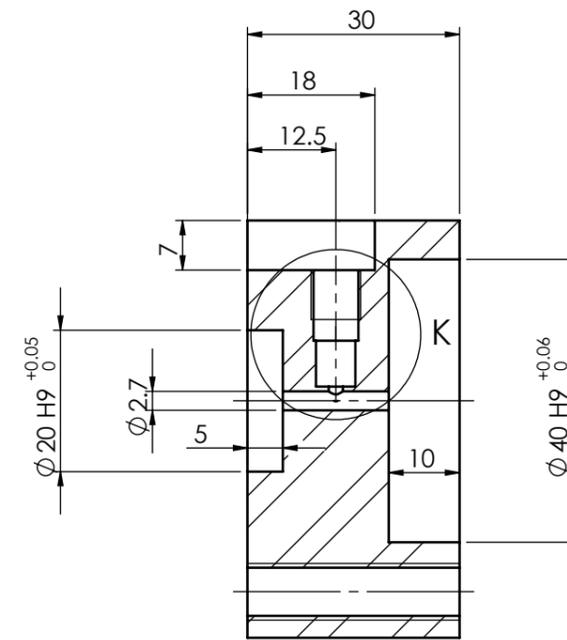
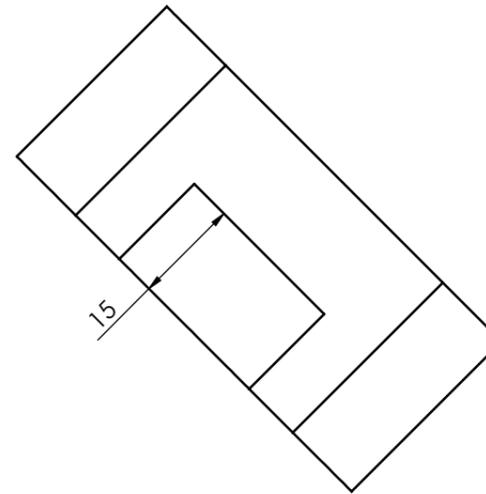
El presupuesto de ejecución de contrata asciende a **VEINTINUEVE MIL CIENTO SETENTA EUROS CON 45 CÉNTIMOS.**

**Parte III**

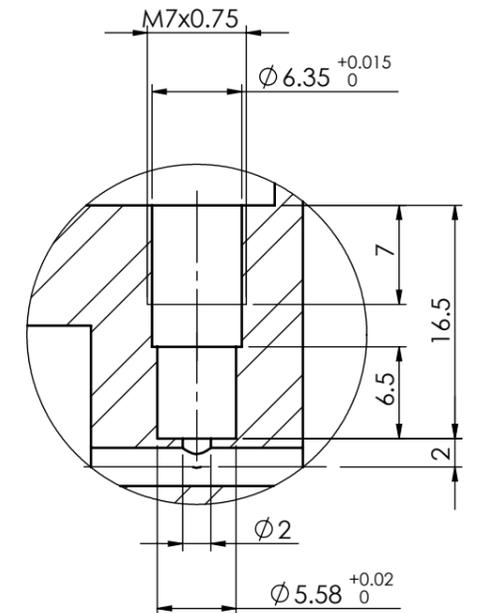
# **PLANOS**



VISTA D

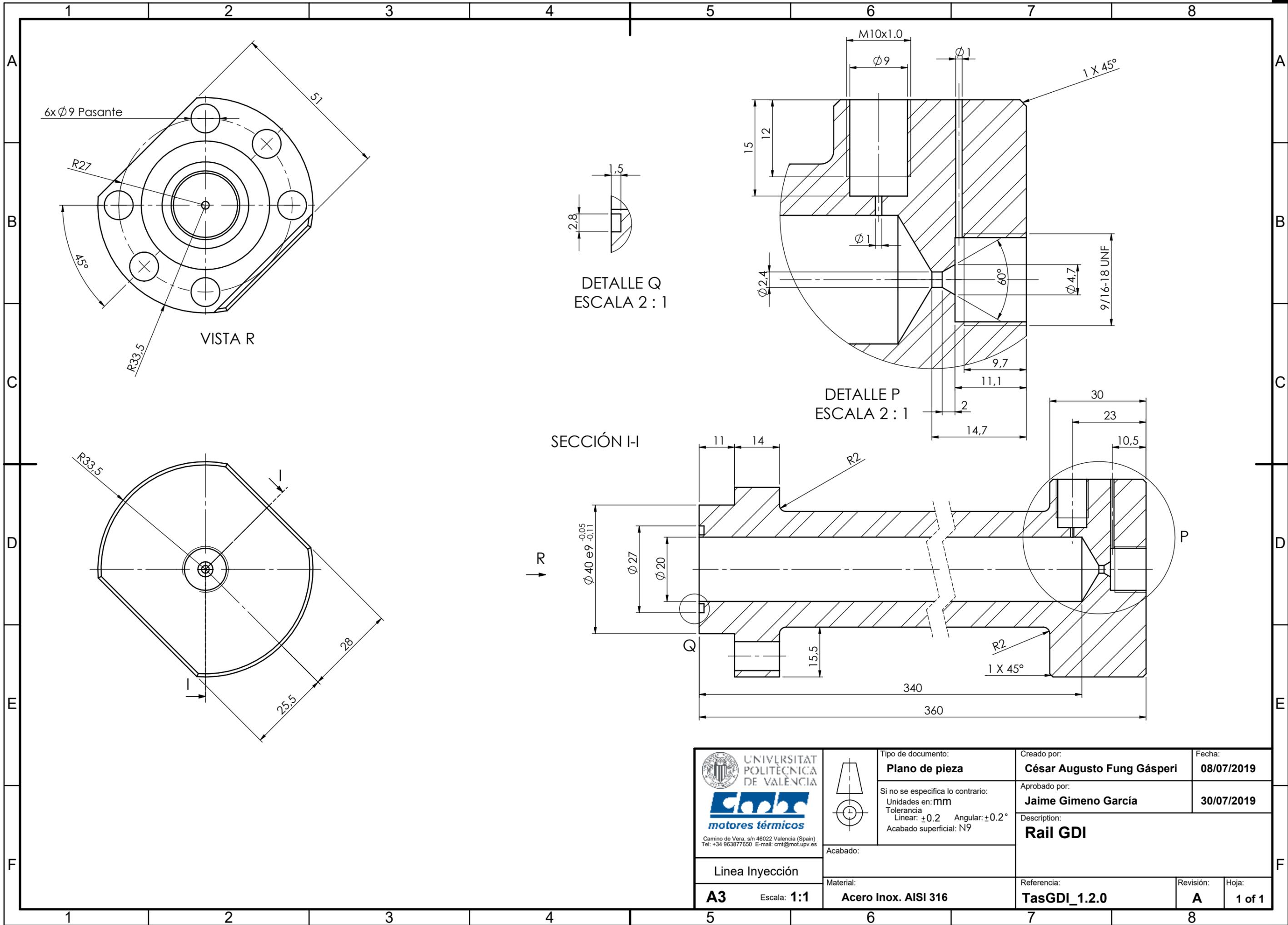


SECCIÓN A-A



DETALLE K  
ESCALA 2 : 1

 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b>  Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es	Tipo de documento: <b>Plano de pieza</b>	Creado por: <b>César Augusto Fung Gásperi</b>	Fecha: <b>08/07/2019</b>
	Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: $\pm 0.2$ Angular: $\pm 0.2^\circ$ Acabado superficial: N9	Aprobado por: <b>Jaime Gimeno García</b>	<b>30/07/2019</b>
Acabado:  Material: <b>Acero Inox. AISI 316</b>	Description: <b>Base GDI</b>		
Linea Inyección <b>A3</b> Escala: <b>1:1</b>	Referencia: <b>TasGDI_1.1.0</b>	Revisión: <b>A</b>	Hoja: <b>1 of 1</b>



 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</b>  <b>motores térmicos</b> <small>Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)          Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es</small>	Tipo de documento: <b>Plano de pieza</b>	Creado por: <b>César Augusto Fung Gásperi</b>	Fecha: <b>08/07/2019</b>
	Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: $\pm 0.2$ Angular: $\pm 0.2^\circ$ Acabado superficial: N9	Aprobado por: <b>Jaime Gimeno García</b>	Descripción: <b>Rail GDI</b>
Linea Inyección <b>A3</b> Escala: <b>1:1</b>	Acabado:  Material: <b>Acero Inox. AISI 316</b>	Referencia: <b>TasGDI_1.2.0</b>	Revisión: <b>A</b> Hoja: <b>1 of 1</b>

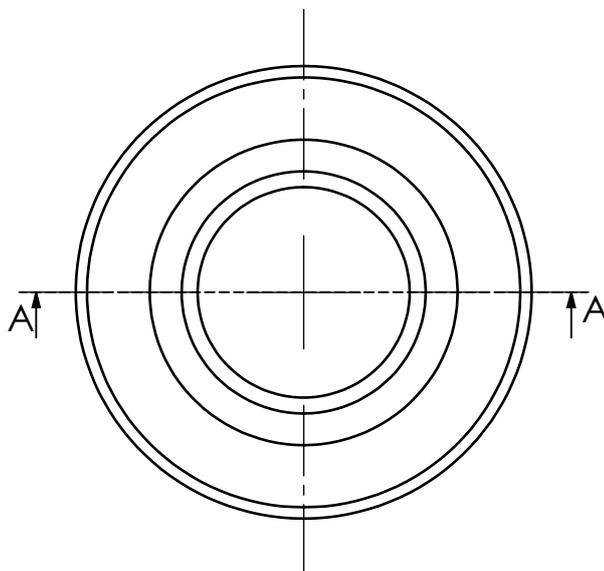
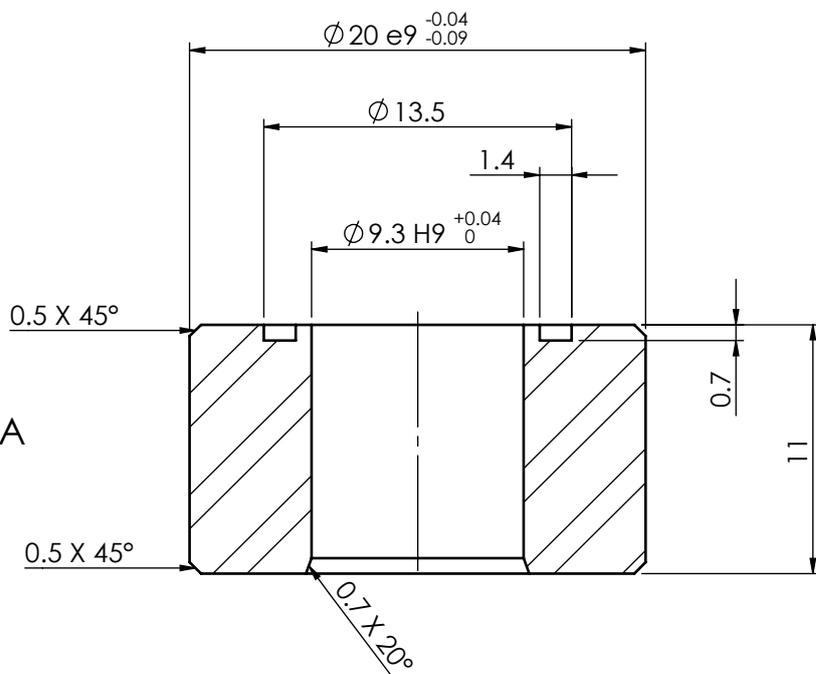
1

2

3

4

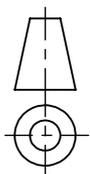
SECCIÓN A-A



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)  
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Acabado:

Tipo de documento:

**Plano de pieza**

Si no se especifica lo contrario:

Unidades en: mm

Tolerancia

Linear:  $\pm 0.2$  Angular:  $\pm 0.2^\circ$ 

Acabado superficial: N9

Creado por:

**César Augusto Fung Gásperi**

Fecha:

**08/07/2019**

Aprobado por:

**Jaime Gimeno García****30/07/2019**

Description:

**Casquillo Inyector SprayG-Base**

Linea Inyección

**A4**Escala: **3:1**

Material:

**Acero Inox. AISI 316**

Referencia:

**TasGDI\_1.3.1**

Revisión:

**A**

Hoja:

**1 of 1**

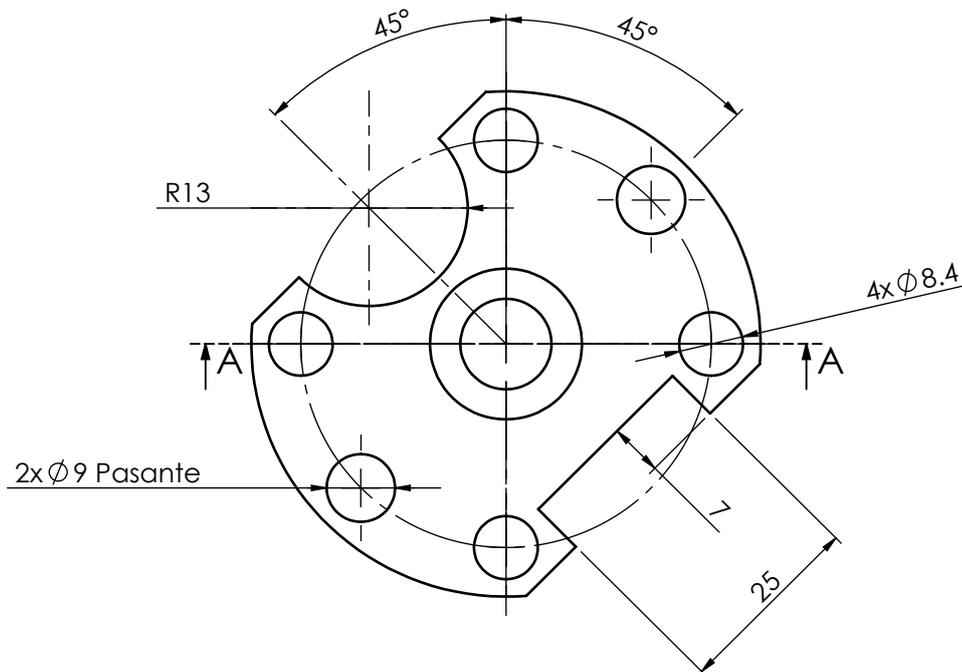
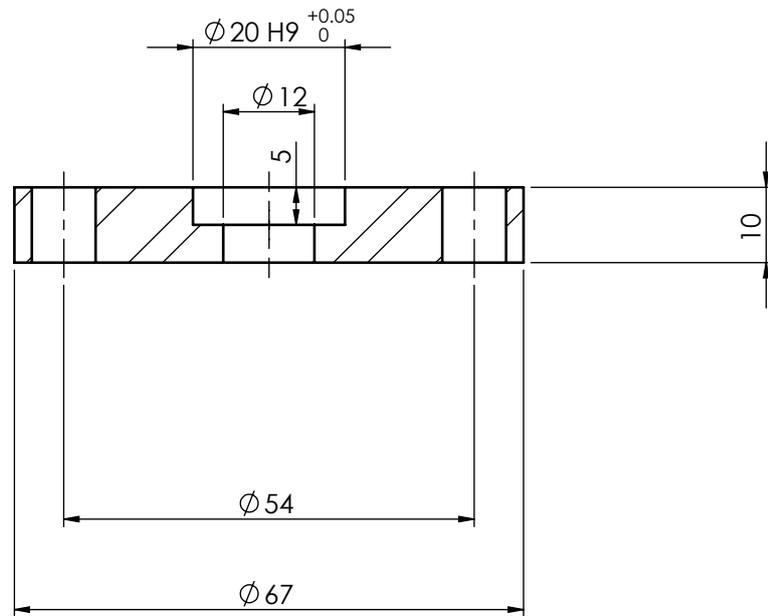
1

2

3

4

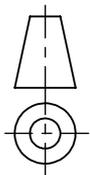
SECCIÓN A-A



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)  
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Tipo de documento:

**Plano de pieza**

Si no se especifica lo contrario:

Unidades en: mm

Tolerancia

Linear:  $\pm 0.2$  Angular:  $\pm 0.2^\circ$

Acabado superficial: N9

Creado por:

**César Augusto Fung Gásperi**

Fecha:

**05/07/2019**

Aprobado por:

**Jaime Gimeno García**

**30/07/2019**

Description:

**Placa de Ajuste**

Acabado:

Linea Inyección

**A4**

Escala: **1:1**

Material:

**Acero Inox. AISI 316**

Referencia:

**TasGDI\_1.4.0**

Revisión:

**A**

Hoja:

**1 of 1**

A

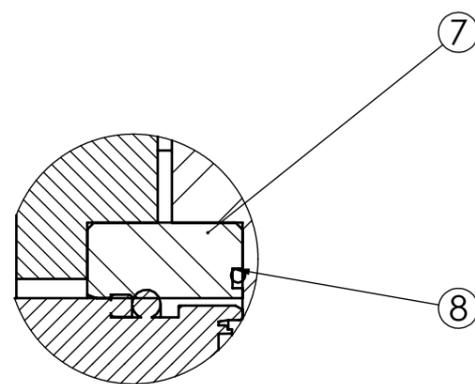
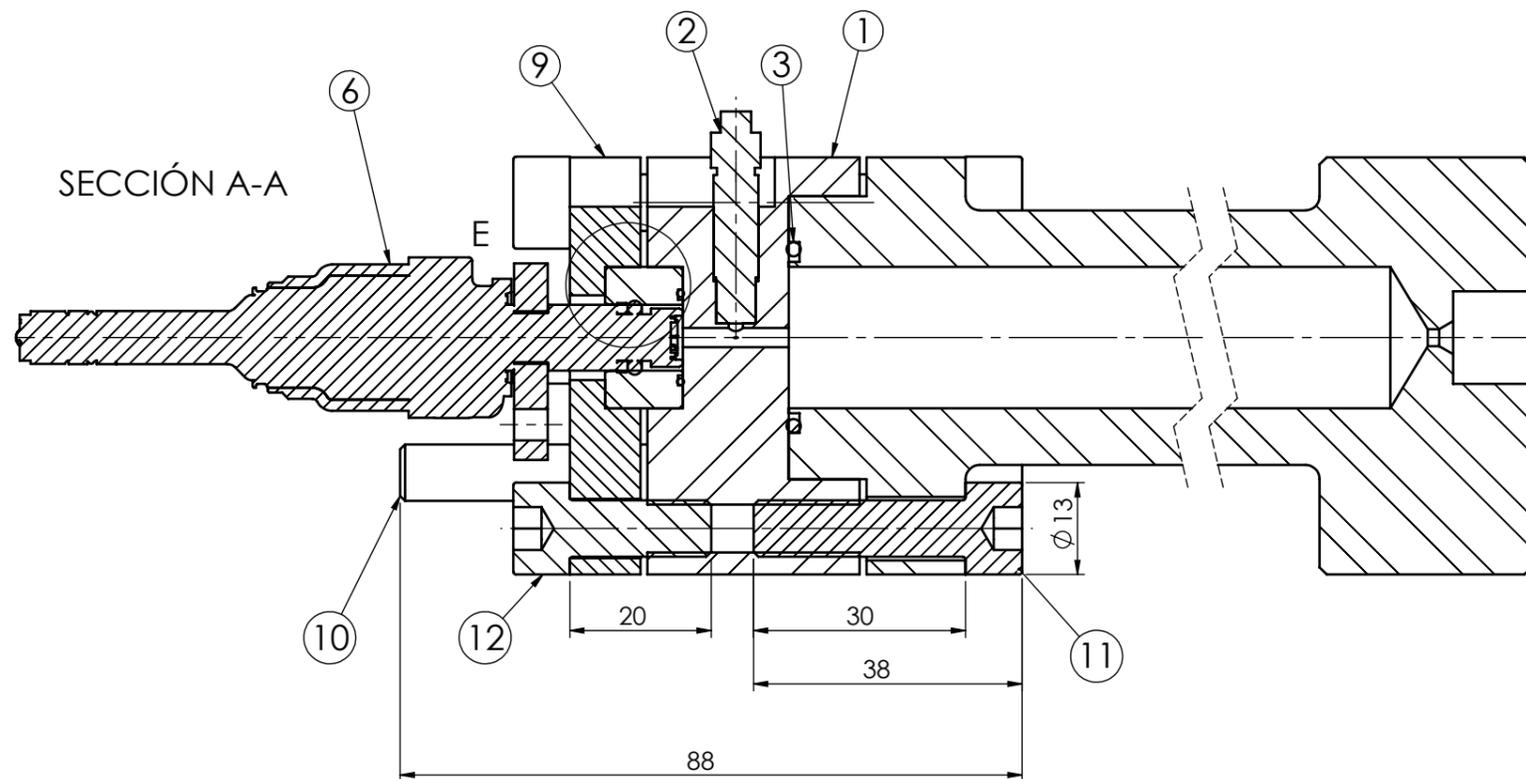
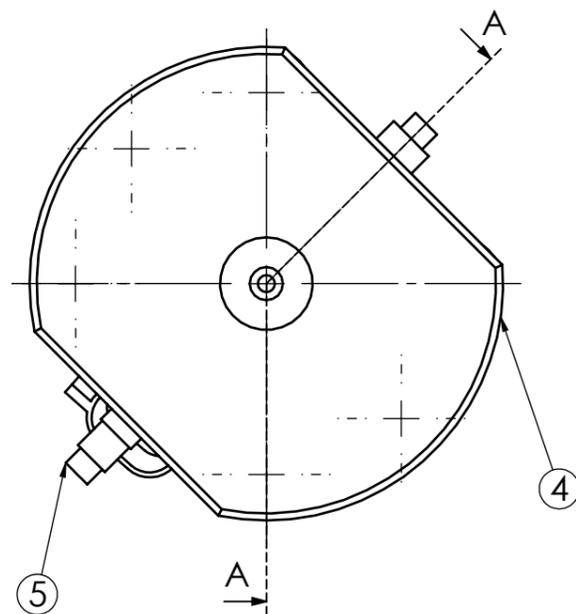
B

C

D

E

F



DETALLE E  
ESCALA 2 : 1

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1.1.0	Base GDI	1
2	1.1.1	Sensor Kistler 601H	1
3	1.1.2	Tórica Base	1
4	1.2.0	Rail GDI	1
5	1.2.1	Sensor Kistler 4067	1
6	1.3.0	Inyector SprayG	1
7	1.3.1	Casquillo Inyector SprayG-Base	1
8	1.3.2	Tórica Casquillo	1
9	1.4.0	Placa de Ajuste	1
10	ISO 4762 M8 x 80 --- 80N		2
11	ISO 4762 M8 x 30 --- 30N		4
12	ISO 4762 M8 x 20 --- 20N		4



Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain)  
Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es



Tipo de documento:  
**Plano de conjunto**  
Si no se especifica lo contrario:  
Unidades en: mm  
Tolerancia  
Linear:  $\pm 0.2$  Angular:  $\pm 0.2^\circ$   
Acabado superficial: N9

Creado por:  
**César Augusto Fung Gásperi** Fecha:  
**08/07/2019**

Aprobado por:  
**Jaime Gimeno García** **30/07/2019**

Description:  
**Montaje GDI**

Linea Inyección

**A3** Escala: **1:1**

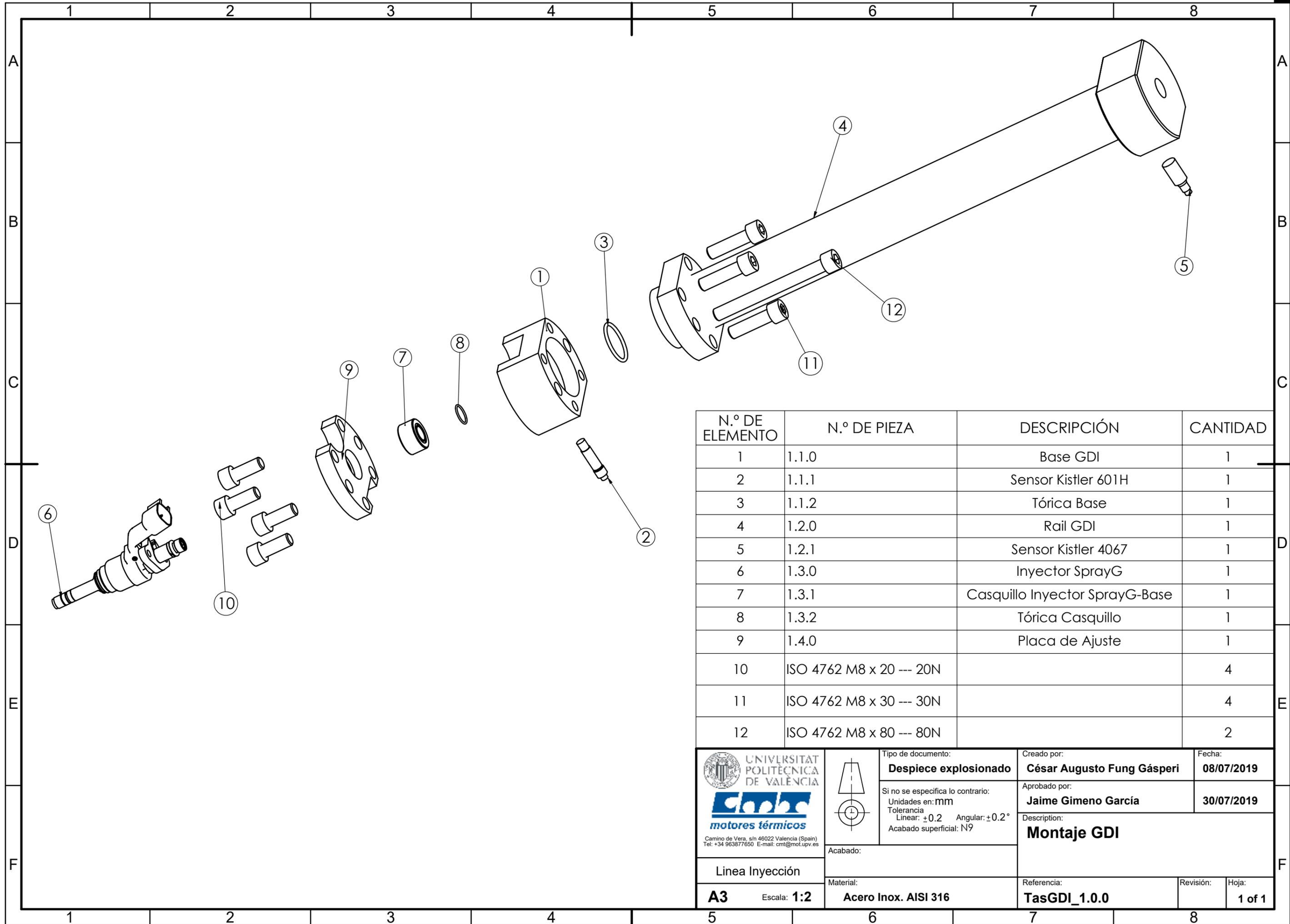
Acabado:

Material:

**Acero Inox. AISI 316**

Referencia:  
**TasGDI\_1.0.0**

Revisión: Hoja:  
**1 of 1**



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	1.1.0	Base GDI	1
2	1.1.1	Sensor Kistler 601H	1
3	1.1.2	Tórica Base	1
4	1.2.0	Rail GDI	1
5	1.2.1	Sensor Kistler 4067	1
6	1.3.0	Inyector SprayG	1
7	1.3.1	Casquillo Inyector SprayG-Base	1
8	1.3.2	Tórica Casquillo	1
9	1.4.0	Placa de Ajuste	1
10	ISO 4762 M8 x 20 --- 20N		4
11	ISO 4762 M8 x 30 --- 30N		4
12	ISO 4762 M8 x 80 --- 80N		2

<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CMT motores térmicos</p> <p>Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain) Tel: +34 963877650 E-mail: cmt@mot.upv.es</p>		Tipo de documento: <b>Despiece explosionado</b>	Creado por: <b>César Augusto Fung Gásperi</b>	Fecha: <b>08/07/2019</b>
		Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Tolerancia Linear: ±0.2 Angular: ±0.2° Acabado superficial: N9	Aprobado por: <b>Jaime Gimeno García</b>	<b>30/07/2019</b>
Acabado: Material: <b>Acero Inox. AISI 316</b>		Description: <b>Montaje GDI</b>		
Línea Inyección <b>A3</b> Escala: <b>1:2</b>	Referencia: <b>TasGDI_1.0.0</b>	Revisión:	Hoja: <b>1 of 1</b>	