



**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBA PARA LA ATOMIZACIÓN DE  
COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ATOMIZACIÓN  
DE UN FLUIDO LÍQUIDO EN CONDICIONES ATMOSFÉRICAS.**

Jesus David Pineda Blanco

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesor

Andrés Felipe Colorado Granda, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica y Aeroespacial.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Pineda Blanco [1]
<b>Referencia</b>	[1] Pineda Blanco. J, “DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBA PARA LA ATOMIZACIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ATOMIZACIÓN DE UN FLUIDO LÍQUIDO EN CONDICIONES ATMOSFÉRICAS”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
Estilo IEEE (2020)	



Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su arduo esfuerzo, amor incondicional y apoyo constante han sido pilares fundamentales a lo largo de mi vida académica y personal. Su ejemplo y dedicación me han impulsado a superar cada desafío que encontré en el camino.

A mi querida abuela, GABINA BLANCO DE BLANCO, cuyo amor, guía y sabios consejos fueron un soporte invaluable durante mi carrera. Su apoyo constante y sus palabras de aliento me acompañaron en cada paso de este recorrido.

Finalmente, dedico este logro a todas las personas que formaron parte de mi vida académica en el pregrado, por sus consejos, apoyo y afecto, que me ayudaron a alcanzar cada meta y superar cada obstáculo. Su presencia y contribuciones dejaron una huella imborrable en mi formación.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al grupo de investigación GASURE por su invaluable apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por el préstamo de equipos, los espacios proporcionados, y los conocimientos compartidos, que fueron esenciales para llevar a cabo este proyecto.

Agradezco profundamente a mi asesor interno, el Dr. Andrés Felipe Colorado Granda, por su constante guía, orientación y respaldo durante todo el proceso. También extendo mi gratitud al Magíster Alejandro Restrepo Román, cuya paciencia, conocimiento y asesoría fueron fundamentales para la culminación de este trabajo de grado.

Finalmente, agradezco a las empresas EXA AUTO PARTS SAS y RESISTENCIAS Y EQUIPOS INDUSTRIALES S.A.S, por brindarme su experiencia y asesoría técnica a lo largo de todo el proceso de diseño del banco de pruebas. Sin su apoyo, este proyecto no hubiera sido posible.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
2.1. <i>Objetivo general</i>	15
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>16</b>
3.1. <i>Sistema Común-Riel</i>	16
3.1.1. Etapa de alta presión	18
3.1.2. Componentes principales del sistema de alta presión	18
3.2. <i>Técnica Schlieren</i>	28
3.3. <i>Técnica Shadowgraph</i>	30
3.3.1. Shadowgraph directo con luz divergente	30
3.3.2. Shadowgraph directo con luz paralela	32
3.4. <i>Descripción general del chorro diésel</i>	32
3.5. <i>Análisis dimensional del proceso de atomización</i>	35
3.6. <i>Atomización de la vena líquida o atomización primaria</i>	36
3.6.1. Ruptura debido a inestabilidad aerodinámica	36
3.6.2. Turbulencia	37
3.6.3. Cavitación	37
3.7. <i>Atomización secundaria</i>	37
3.8. <i>Caracterización de pulverización externa</i>	38
3.8.1. Penetración	38
3.8.2. Ángulo de chorro	39
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>40</b>
4.1. <i>Diseño</i>	40

4.1.1.	Identificación de la necesidad	40
4.1.2.	Investigación preliminar	40
4.1.3.	Planteamiento de los objetivos	40
4.1.4.	Diseño conceptual	41
4.1.5.	Diseño a detalle	41
4.1.6.	Ensamble	41
4.1.7.	Puesta a punto	41
4.1.8.	Manual de operaciones	42
4.2.	<i>Experimentación</i>	42
4.2.1.	Definición del objeto	42
4.2.2.	Diseño del experimento	42
4.2.3.	Configuración del banco de prueba	42
4.2.4.	Ejecución y análisis de datos experimentales	43
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>44</b>
5.1.	<i>Diseño del banco</i>	44
5.1.1.	Identificación de la necesidad	44
5.1.2.	Investigación preliminar	44
5.1.3.	Planteamiento de los objetivos	47
5.1.4.	Diseño conceptual	47
5.1.5.	Diseño a detalle	53
5.1.6.	Ensamble	64
5.1.7.	Puesta a punto	66
5.1.8.	Manual de operación	67
5.2.	<i>Diseño experimental</i>	68
5.2.1.	Definición del objetivo	68
5.2.2.	Diseño del experimento	68
5.2.3.	Configuración del banco de prueba	71
5.2.4.	Ejecución y análisis de datos experimentales.	74
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>78</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>84</b>

<i>Anexo A. Plano adaptador</i>	84
<i>Anexo B. Código Python</i>	85
<i>Anexo C. Planos banco de pruebas</i>	86
<i>Anexo D. Manual de operación</i>	96

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES DE LA BOMBA TIPO HP3 DENSO [7].	20
TABLA II. CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPONENTES [7].	23
TABLA III. MATRIZ DE DECISIÓN.	52
TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL BANCO TD-7500 Y PTBRX-A.	53
TABLA V. COMPONENTES SELECCIONADOS DEL SISTEMA DE VELOCIDAD VARIABLE.	54
TABLA VI. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.	61
TABLA VII. MONTAJES ÓPTICOS DE SHADOWGRAPH Y SCHLIEREN.	70
TABLA VIII. DISEÑO MUESTRAL.	71

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema de un sistema Común Riel en un motor de 4 cilindros [1].	17
Fig. 2. Etapa de alta presión del sistema Común Riel, (Robert Bosch GmbH) [5].	18
Fig. 3. Componentes de bomba tipo HP3 Denso[7].	20
Fig. 4. Señales emitidas por la ECU para el control de apertura de válvula [7].	21
Fig. 5. Componentes de la rampa [7].	22
Fig. 6. Sensor de presión de la rampa (sensor Pc) [7].	23
Fig. 7. Componentes de inyector Denso tipo G2 [7].	25
Fig. 8. Ejemplo de modelo con cinco inyecciones [7].	25
Fig. 9. Funciones del inyector [7].	27
Fig. 10. Circuito de funcionamiento del inyector Denso [7].	28
Fig. 11. Fundamentos de la técnica Schlieren [9].	29
Fig. 12. Interacción de una onda luminosa con un flujo de fluido [9].	29
Fig. 13. Diagrama de técnica de Shadowgraph directo con luz divergente [11].	31
Fig. 14. Diagrama de una configuración de sombra directa de luz paralela utilizando la mitad de la óptica de un sistema Schlieren tipo z para colimar el haz de luz [11].	32
Fig. 15. Regímenes de atomización [14].	33
Fig. 16. Longitud de rotura y ángulo del chorro diésel en función del número de Weber [14].	36
Fig. 17. Estructura base del Diseño 1.	48
Fig. 18. Sistema experimental y protección del DISEÑO 1.	49
Fig. 19. Sistema de velocidad variable del DISEÑO 1.	49
Fig. 20. Ensamble final del DISEÑO 1.	50
Fig. 21. Sistemas implementos del DISEÑO 1 al DISEÑO 2.	50
Fig. 22. Estructura base del Diseño 2.	51
Fig. 23. Ensamble final del DISEÑO 2.	51
Fig. 24. Distribución del sistema óptico.	56
Fig. 25. Base del banco de acero galvanizado.	57
Fig. 26. Tapa de protección de policarbonato.	58
Fig. 27. Material base.	59
Fig. 28. Geometría de la base.	59

Fig. 29. Mallado de la base.	60
Fig. 30. Carga en la base y fijación de cargas.	60
Fig. 31. Deformación de la base.	62
Fig. 32. Esfuerzo directo.	62
Fig. 33. Diseño del ensamble propuesto.	64
Fig. 34. Ensamblaje final del banco de pruebas.	65
Fig. 35. Gabinete del sistema de velocidad variable.	66
Fig. 36. Puesta a punto. A) funcionamiento del banco, B) Emulador CIT800.	67
Fig. 37. Esquema del montaje de pulverización.	69
Fig. 38. Montaje del Sistema para Shadowgraph. A. Vista del sistema óptico, B. Vista total del sistema.	72
Fig. 39. Montaje del Sistema para Schlieren. A. Vista del sistema óptico, B. Vista total del sistema.	73
Fig. 40. Montaje del sistema de inyección.	73
Fig. 41. Imágenes Schlieren para inyectores: (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm, (3) Danfoss y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.	75
Fig. 42. Imágenes Shadowgraph para inyectores: (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm, (3) Danfoss y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.	75
Fig. 43. Ángulo de atomización. (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.	76

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>PIV</b>	Velocimetría por imágenes de partículas
<b>PLIF</b>	Fluorescencia planar inducida por láser
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit
<b>EPM</b>	Empresas Públicas de Medellín
<b>EDC</b>	Electronic Diesel Control
<b>SCV</b>	Válvula de control de succión
<b>DPNR</b>	Sistema diésel de reducción de $NO_x$ y partículas
<b>TWV</b>	Válvula de dos vías
<b>PhD</b>	Philosophiae Doctor
<b>CAD</b>	Diseño asistido por computadora
<b>LIEF</b>	Laser Induced Exciplex Fluorescence
<b>Pi</b>	Presión de inyección
<b>LTI</b>	Ignición a baja temperatura
<b>HTI</b>	Ignición a alta temperatura

---

## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo de un banco de prueba para estudiar la atomización de combustibles líquidos bajo condiciones atmosféricas, utilizando técnicas ópticas como Schlieren y Shadowgraph. El objetivo principal es caracterizar el comportamiento de la atomización de un fluido para determinar la técnica más adecuada en futuros estudios con combustibles diésel.

La metodología incluye la selección de componentes y el diseño de un sistema experimental que permite la inyección de líquidos a diferentes presiones, visualizando el patrón de atomización. El banco de pruebas fue diseñado para minimizar vibraciones y garantizar la seguridad del operario. La técnica Shadowgraph mostró ser más eficiente para la visualización de atomización de líquidos, proporcionando imágenes claras y detalladas del patrón de atomización.

Los resultados indican que el banco es adecuado para estudios de atomización de combustibles líquidos. Se concluye que la técnica Shadowgraph es la más adecuada para el análisis o visualización de los procesos de atomización. Por último, se recomienda la implementación de la medición de presión en el sistema riel común para mejorar la precisión de los experimentos.

**Palabras claves:** Atomización, banco de pruebas, fluido líquido, técnicas ópticas, Shadowgraph, Schlieren.

---

ABSTRACT

This work presents the design and development of a test bench to study the atomization of liquid fuels under atmospheric conditions, using optical techniques such as Schlieren and Shadowgraph. The main objective is to characterize the atomization behavior of a fluid to determine the most suitable technique for future studies with diesel fuels.

The methodology includes the selection of components and the design of an experimental system that allows liquid injection at different pressures, visualizing the atomization pattern. The test bench was designed to minimize vibrations and ensure operator safety. The Shadowgraph technique proved more efficient for visualizing liquid atomization, providing clear and detailed images of the atomization pattern.

The results indicate that the test bench is suitable for liquid fuel atomization studies. It is concluded that Shadowgraph is the most suitable technique for atomization analysis or visualization. Lastly, the implementation of pressure measurement in the common rail system is recommended to improve the accuracy of experiments.

**Keywords:** Atomization, test bench, liquid fluid, optical techniques, Shadowgraph, Schlieren.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por la calidad del aire y el impacto ambiental de las diferentes actividades humanas está en constante aumento. Dentro de este contexto, la reducción de los gases emitidos por los motores diésel se ha convertido en un tema de gran relevancia. Los motores diésel, presentes en una amplia gama de sectores industriales y de transporte, son conocidos por su eficiencia y potencia, pero también por su contribución a la contaminación atmosférica. Los gases emitidos por los motores diésel, como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ) cubren más del 99% de la masa total de las emisiones diésel. Adicionalmente, pueden emitirse en la fase gaseosa cantidades reducidas de dióxido de azufre, junto con una variedad de compuestos orgánicos, que incluyen carbonilos de peso molecular bajo, ácidos carboxílicos, alcanos, alquenos y compuestos aromáticos [1]. Por consiguiente, el estudio de la inmenología de la atomización de combustibles líquidos es esencial para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones, puesto que una correcta inyección del combustible en la cámara de combustión de un motor afecta directamente la eficiencia y la generación de potencia de este. No obstante, una atomización inadecuada puede llevar a problemas como la formación de hollín y una combustión incompleta, afectando la eficiencia y aumentando las emisiones.

El artículo "Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques – A review" ofrece una visión exhaustiva de las diversas técnicas ópticas empleadas para analizar y caracterizar estos procesos en motores de combustión interna. Se enfoca en la aplicación de técnicas de visualización como Schlieren, Shadowgraph, Mie scattering, y la velocimetría por imágenes de partículas (PIV), entre otras. Estas técnicas permiten una observación detallada estudiando los parámetros macroscópicos y microscópicos y en tiempo real de los procesos de inyección y combustión, proporcionando datos cruciales sobre la distribución del combustible, la formación de mezclas aire-combustible, las características del chorro de inyección, la propagación de la llama, y la dinámica de la combustión. La revisión resalta cómo estas técnicas mejoran la comprensión de los fenómenos complejos en los motores, facilitando el desarrollo de tecnologías más eficientes y menos contaminantes [2].

---

Estas técnicas se han aplicado a estudios de la morfología de la atomización de la inyección de combustible líquido aplicando la técnica Schlieren, en los cuales se evidencia el análisis en los procesos de ignición y combustión a baja y alta temperatura en una llama de pulverización de alta presión de n-dodecano utilizando fluorescencia planar inducida por láser (PLIF) de formaldehído (HCHO) de 50 kHz e imágenes Schlieren de 100 kHz simultáneamente. Por ende, se halló que para el rociado que incide sobre la pared, con la disminución de la temperatura del combustible, la disminución de la concentración de vapor cerca de la pared se evidencia notablemente. Además, el incremento de la presión de inyección prevalece sobre la difusión del spray a lo largo de la pared y la distribución de la concentración de vapor. Las mediciones realizadas demuestran el fenómeno denominado “propagación de ondas de llama fría”, también se encontró que la ignición a alta temperatura consume el HCHO formado en el chorro, mientras que este persiste en la zona rica de combustible cerca a la base de la llama durante todo el tiempo de combustión [3].

Se halla igualmente en la literatura científica sobre las características de pulverización y combustión de la inyección dual diésel/metanol, enfatizando en los tiempos de inyección sobre el desarrollo de llamas para varios intervalos y presiones de inyección del combustible, aplicando Schlieren para el análisis óptico, entre las conclusiones se encontró que para un presión de inyección alta y un delta de tiempo largo son favorables para la evaporación y atomización de la pulverización mixta de diésel y metanol, lo cual es extremadamente importante para el consiguiente proceso de ignición y combustión. Además, se encontró que, para una presión de inyección de 100 MPa, hay un retraso de encendido de la combustión más corto, una mayor longitud de despegue de la llama y una reducción de la generación de hollín [4].

Por lo cual, en este trabajo se desarrollará un banco de prueba desde el diseño hasta la puesta a punto de este para la posterior caracterización de la atomización de un fluido líquido mediante técnicas ópticas como Schlieren y Shadowgraph a diferentes presiones de inyección cuando se descarga a la atmosfera.

---

## 2. OBJETIVOS

### *2.1. Objetivo general*

Caracterizar la atomización de un fluido líquido mediante técnicas ópticas a diferentes presiones de inyección cuando se descarga a la atmosfera.

### *2.2. Objetivos específicos*

- Diseñar un banco de prueba de atomización para combustibles líquidos con inyección electrónica para un rango de presiones 200 bar – 1800 bar.
- Realizar el montaje del diseño del banco de prueba.
- Verificar el funcionamiento y puesta a punto.
- Escribir el manual de operación del banco de prueba.
- Analizar las características de atomización de un fluido a varias presiones por medio de técnicas de visualización óptica.

---

### 3. MARCO TEÓRICO

El combustible diésel o gasóleo es un combustible líquido derivado del proceso de refinamiento de petróleo crudo, la composición de este varía según el grado de refinamiento y especificaciones del producto final, pero generalmente consiste en hidrocarburos de cadena larga, con una proporción significativa de alcanos, alquenos y aromáticos. Este combustible es utilizado en motores Diesel en los procesos de compresión del aire, inyección de combustible, indignación por compresión, expansión y generación de potencia. Estos procesos contribuyen en la alta eficiencia térmica aprovechando al máximo el calor generado durante la combustión, además del control de la combustión del motor diésel, puesto que supervisa continuamente el proceso para optimizar el rendimiento y reducir las emisiones. Esto incluye el ajuste preciso del momento y la duración de la inyección de combustible, así como la regulación de la presión de inyección, todo ello con el objetivo de maximizar la eficiencia y minimizar la generación de contaminantes. En consecuencia, el sistema Común-Riel del motor es el encargado de cumplir la función de almacenamiento y suministro utilizando una unidad de control electrónico (ECU) para regular el tiempo y la cantidad de inyección de combustible en cada cilindro del motor.

La atomización del combustible en pequeñas gotas es fundamental para la combustión eficiente por medio de la inyección de combustible a alta presión a través de los inyectores del motor diésel asegurando que el combustible se distribuya uniformemente en la cámara de combustión, aumentando el área de contacto con el aire y facilita su ignición rápida y completa. Por consiguiente, la técnica encargada del estudio de la optimización es la técnica Schlieren, la cual es un método óptico utilizado para visualizar diferencias en la densidad del aire, especialmente en cambios en la temperatura, presión o densidad. Por ende, para mejorar la compresión del análisis experimental de la atomización del diésel se proceden a aclarar los siguientes conceptos.

#### *3.1. Sistema Común-Riel*

El sistema permite cambiar de manera fácil la presión y el tiempo de inyección dentro de un intervalo amplio. Esto se consigue separando los componentes de generación de presión (bomba

de alta presión) y de inyección de combustible (inyectores electrónicos). Utilizando un “riel” o conducto actuando como acumulador de presión, por esto es independiente el régimen de giro del motor con el caudal de inyección, el cual puede variar la presión dependiendo del punto de operación del motor. El anterior sistema es muy parecido al sistema que se utilizaban en los motores de inyección de directa de gasolina con la diferencia que los sistemas Común-Riel pueden alcanzar presiones máximas mayores a 2000 bar. En la **Fig. 1** se observa un sistema Común Riel en un motor de 4 cilindros [5].

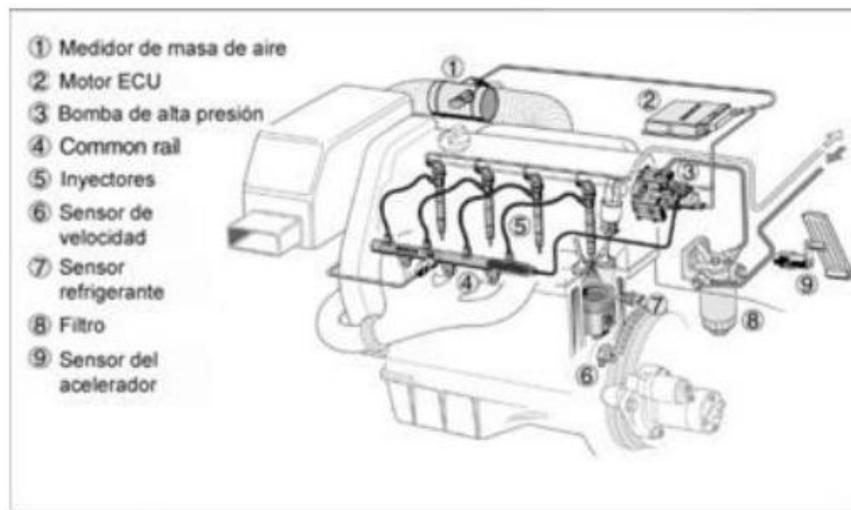


Fig. 1. Esquema de un sistema Común Riel en un motor de 4 cilindros [1].

Los sistemas de inyección se pueden clasificar en tres grupos. Primero, es la etapa de baja presión, la cual está formada por los componentes encargado de llevar el combustible a la etapa de alta presión. Segundo, es el sistema de alta presión conformado por la bomba de alta presión, “riel”, inyectores y línea de alta presión. Por último, el sistema de regulación electrónica EDC (Electronic Diesel Control), este está constituido por una serie de sensores (medidor de masa de aire, sensor de velocidad del cigüeñal, sensor del pedal del acelerador...), la unidad de control ECU (Electronic Control Unit) y los actuadores. Para nuestro objeto de estudio nos enfocares en el sistema de alta presión [5].

### 3.1.1. Etapa de alta presión

La etapa de alta presión se divide en tres partes: la creación de la presión, la acumulación de esta y la dosificación del combustible. La bomba de alta presión es responsable de generar la alta presión. La acumulación de esta presión tiene lugar en el "riel" o acumulador, donde se encuentran instalados el sensor de presión y la válvula reguladora o limitadora de la presión. Los inyectores se encargan de dosificar con precisión la cantidad de combustible a inyectar, garantizando tanto el tiempo como el volumen adecuado de inyección. En la **Fig. 2** se puede ver el circuito de alta presión del sistema Común Riel [5].

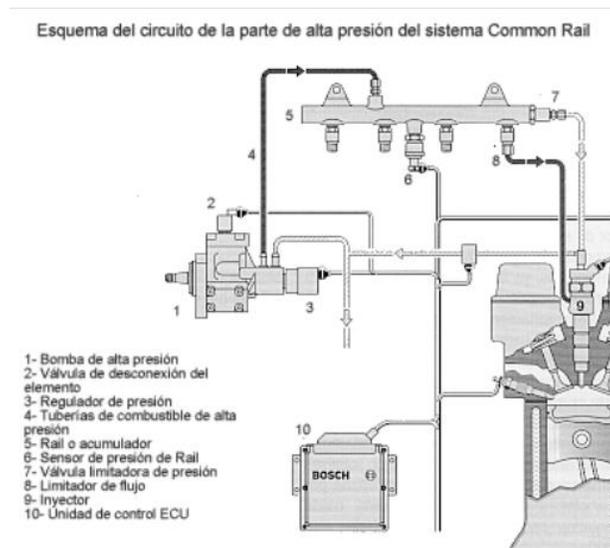


Fig. 2. Etapa de alta presión del sistema Común Riel, (Robert Bosch GmbH) [5].

### 3.1.2. Componentes principales del sistema de alta presión

#### 3.1.2.1. Bomba de alta presión

Es la interfaz entre la etapa de baja y alta presión de un sistema Común riel. La función del componente es mantener la cantidad de combustible requerida por el sistema a la presión deseada con el objetivo de trabajar en el punto de operación. No obstante, no solo incluye la cantidad de combustible inyectado que el motor necesita según los requerimientos de operación sino también

de la cantidad de combustible para un arranque rápido y un rápido aumento de la presión en el carril por posibles fugas, es decir, un control de la presión de los componentes del sistema. Los motores de combustión accionan las bombas de alta presión con una tasa de transferencia fija. Las relaciones 1:2 y 2:3 de las velocidades del motor están vinculadas con los motores de cuatro tiempo y bombas de tres pistones, por lo que las bombas presentan un tamaño pequeño. Por otro lado, las relaciones más grandes exigen mayor estabilidad de la velocidad de una bomba [6].

Para este trabajo se implementará una bomba de suministro diésel de la marca Denso, según el manual de servicio general del funcionamiento de los sistemas denso existen cuatro diferentes bombas, los cuales están divididos en dos generaciones. La primera generación está conformada por la bomba de HP0 con la cual se alcanzan presiones de 120 MPa y la segunda generación constituida por las bombas HP2, HP3 y HP4, estas manejan presiones de 135 MPa, 180 MPa Y 180 MPa, respectivamente. No obstante, el uso de las bombas está relacionado tanto con el uso en la industria automotriz como en el tiempo de creación de este.

Se hace el diseño del banco con base a una bomba tipo HP3 Denso (**Fig. 3**), las principales características y construcción son las siguientes [7]:

- La bomba de suministro se compone principalmente de la unidad de bomba, que incluye una leva excéntrica, una leva anular y dos émbolos buzo, junto con la SCV (válvula de control de succión), el sensor de temperatura del combustible y la bomba de alimentación de tipo trocoide. Esta se activa mediante una rotación o media rotación del motor.
- Los dos émbolos buzo de la unidad de bomba compacta están dispuestos simétricamente por encima y por debajo de la parte exterior de la leva anular.
- La SCV regula el volumen de descarga del combustible para reducir la carga de actuación y prevenir el aumento de temperatura del combustible. Además, hay dos tipos de SCV en el HP3: el tipo normalmente abierto, donde la válvula de succión se abre cuando no está energizada, y el tipo normalmente cerrado, donde la válvula de succión se cierra cuando no está energizada.
- Con respecto al sistema DPNR (sistema diésel de reducción de  $NO_x$  y partículas), también se incluye un amortiguador de flujo. Su función es cerrar automáticamente el paso de combustible en caso de una fuga en la válvula de adición de combustible dentro del DPNR.

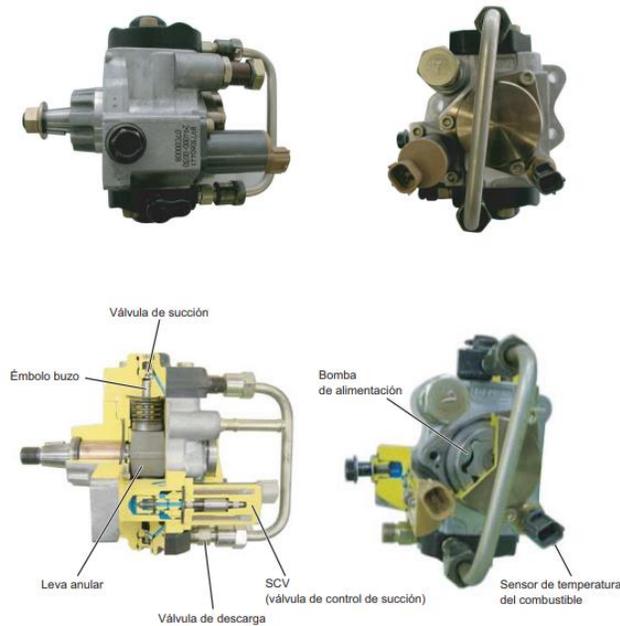


Fig. 3. Componentes de bomba tipo HP3 Denso[7].

Las funciones de los principales componentes se aprecian en la **TABLA I**.

TABLA I. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES DE LA BOMBA TIPO HP3 DENSO [7].

Piezas componentes		Funciones
<b>Bomba de alimentación</b>		Aspira el combustible desde el depósito y se lo suministra al émbolo buzo.
<b>Válvula reguladora</b>		Regula la presión del combustible en la bomba de suministro.
<b>SCV (válvula de control de succión)</b>		Controla el volumen de combustible que se suministra a los émbolos buzo.
<b>Unidad de bomba</b>	Leva excéntrica	Activa la leva anular.
	Leva anular	Activa el émbolo buzo.
	Émbolo buzo	Se mueve en vaivén para aspirar y comprimir el combustible.
<b>Válvula de succión</b>		Evita el flujo inverso de combustible comprimido hacia la SCV
<b>Válvula de descarga</b>		Evita el flujo inverso desde la rampa del combustible que se bombea desde el émbolo buzo.
<b>Sensor de temperatura del combustible</b>	<b>del</b>	Detecta la temperatura del combustible.

Se cuenta con una bomba normalmente abierta, es decir cuando la válvula solenoide (ON/OFF) no está activa el muelle de retorno empuja el cilindro, abriendo por completo el conducto de combustible y suministrando combustible a los émbolos buzo. La ECU del motor emite señales de onda en diente de sierra con una frecuencia constante. El valor de la corriente es el valor efectivo (medio) de estas señales. Cuando aumenta el valor efectivo, aumenta la apertura de la válvula, y cuando disminuye el valor efectivo, la apertura de la válvula disminuye [7]. Lo anterior se aprecia en la **Fig. 4**.

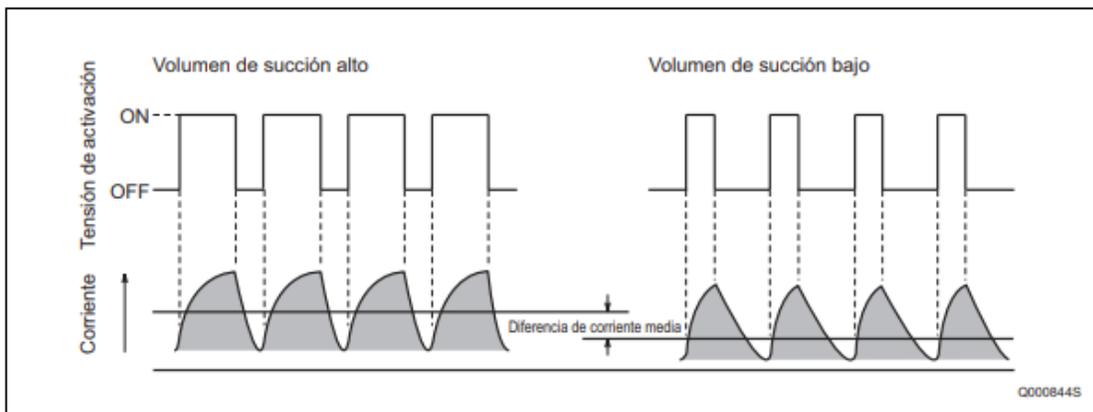


Fig. 4. Señales emitidas por la ECU para el control de apertura de válvula [7].

### 3.1.2.2. Riel o acumulador

Tiene como principal función acumular combustible a alta presión y distribuir el combustible a los inyectores, incluyendo la amortiguación de las fluctuaciones de presión cuando por la extracción de combustible y el suministro en el riel. Las siguientes son funciones secundarias que realiza el riel: es un punto adicional para sensores y actuadores en el circuito de alta presión y un elemento de estrangulación para amortiguar las oscilaciones de presión de la línea entre bomba y el riel, de igual forma de los inyectores y el riel. El sensor de presión que posee el riel sirve para identificar la presión, este es ubicado directamente en el riel y este está conectado a una unidad de control. Asimismo, la válvula de control de presión busca establecer la presión del riel, esto se logra alterando una sección transversal en la válvula de control de presión se despresuriza más o menos combustible de alta a baja presión. No obstante, existe otro componente que es la válvula limitadora de presión que es utilizada generalmente para vehículos comerciales que requieren

funcionamiento en seco del motor y no tienen ningún actuador del lado de alta presión en el circuito de control de presión, esta válvula cumple la función de controlar la presión en el rango restringido, limitando el sistema a un valor máximo [6].

Se utiliza un riel Denso, el cual la configuración de la rampa se adapta según el modelo, y las partes que la componen varían en consecuencia. Adicionalmente, Estas partes incluyen el sensor de presión de la rampa (sensor Pc), el regulador de presión y, en algunos modelos, un amortiguador de flujo y una válvula de liberación de presión [7], **Fig. 5**.

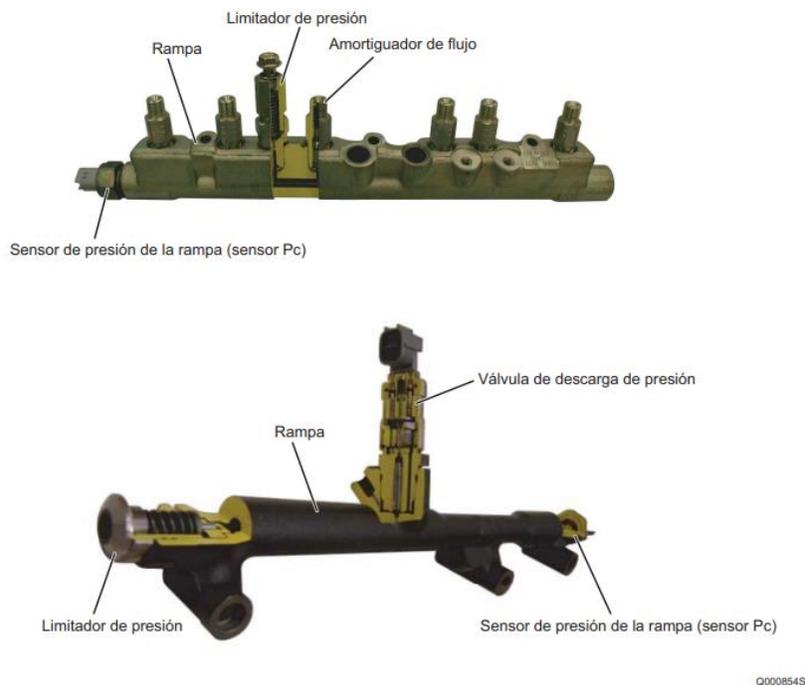


Fig. 5. Componentes de la rampa [7].

No obstante, la construcción y funcionamiento de las piezas componentes del riel cuenta con los siguientes mecanismos, **TABLA II**.

TABLA II. CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPONENTES [7].

Piezas componentes	Funciones
<b>Rampa</b>	Almacena el combustible a presión bombeado por la bomba de suministro y distribuye el combustible a cada inyector de cilindro.
<b>Limitador de presión</b>	Abre la válvula para liberar la presión si ésta es anormalmente alta en la rampa.
<b>Sensor de presión de la rampa (sensor Pc)</b>	Detecta la presión del combustible de la rampa.
<b>Amortiguador de flujo</b>	Reduce las pulsaciones de la presión del combustible de la rampa. Si el combustible fluye hacia fuera en exceso, el amortiguador cierra el conducto de combustible para evitar que siga fluyendo. Se utiliza sobre todo en los motores de vehículos grandes.
<b>Válvula de descarga de presión</b>	Controla la presión del combustible de la rampa. Se utiliza sobre todo en los motores de vehículos de pasajeros.

La rampa asignada para este trabajo cuenta solo con el cuerpo (riel) y el sensor de presión de la rampa (sensor Pc), este se sitúa en la rampa y su función es detectar la presión del combustible en dicha rampa, enviando una señal a la ECU del motor. Este sensor es un dispositivo semiconductor que opera mediante el efecto piezoeléctrico, el cual modifica la resistencia eléctrica cuando se ejerce presión sobre el elemento de silicona [7], **Fig. 6**.

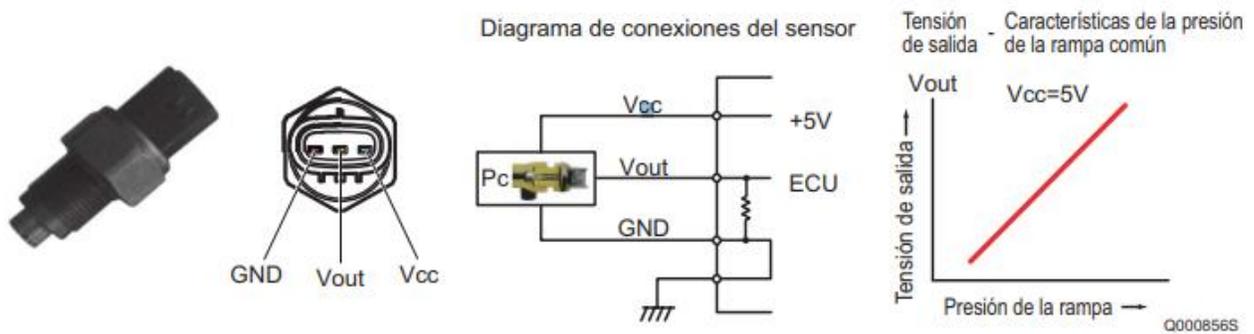


Fig. 6. Sensor de presión de la rampa (sensor Pc) [7].

---

### 3.1.2.3. Inyector

Los inyectores están constituidos por una boquilla de inyección, el cuerpo del inyector, válvula de control (solenoidal o actuador piezoeléctrico) y cámara de control. Utilizar un actuador piezoeléctrico como válvula de control tiene como ventaja la gran fuerza y el corto tiempo de accionamiento. Los inyectores están conectados a un común riel, una línea corta de alta presión ubicados en una junta de cobre que los sella en la cámara de combustión. Los inyectores común riel son adecuados en motores diésel de inyección directa dependiendo del diseño de la boquilla, puesto que generan presión de inyección independiente de la velocidad del motor y la cantidad combustible con un sistema de control eléctrico que permite manejar los tiempos de inicio de inyección y la cantidad de combustible. El control electrónico diésel (EDC) ángulo-tiempo, es el encargado de controlar el tiempo de la inyección [6].

Se cuenta con un inyector Denso, el cual controla la inyección utilizando una TWV (válvula de dos vías) y un orificio. La TWV controla la presión de la cámara regula el inicio y el final de la inyección al controlar la presión en la cámara de control. El orificio ajusta la relación de inyección al determinar cuándo se abre la tobera mediante la modulación del régimen, es decir, cuando la válvula se abre, la tobera pulveriza el combustible y lo inyecta. Además, Denso maneja tres tipos de inyectores: el X1, X2 y G2. De estos, se utiliza el tipo de inyector G2, el cual comprende de una boquilla que se asemeja a la convencional "tobera y portainyector", un agujero que regula la proporción de inyección, un pistón de control y una TWV, **Fig. 7**. La estructura fundamental es idéntica en los modelos X1, X2 y G2 [7].

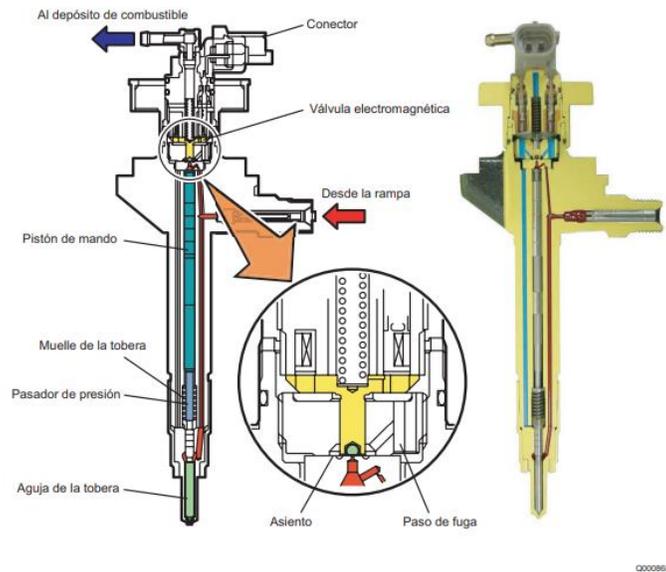


Fig. 7. Componentes de inyector Denso tipo G2 [7].

El tipo de G2 para garantizar una presión elevada, el modelo G2 ha mejorado la fuerza de la presión, la eficiencia del sellado y la resistencia al desgaste de la presión. Además, ha optimizado el funcionamiento a altas velocidades, lo que permite un control más preciso de la inyección y la posibilidad de realizar inyecciones múltiples. La inyección múltiple implica que la inyección principal se lleva a cabo mediante varias dosis de combustible, que pueden oscilar entre una y cinco, sin modificar la cantidad total de inyección, **Fig. 8**. Esto se realiza con el propósito de disminuir las emisiones de gases de escape y el ruido [7].

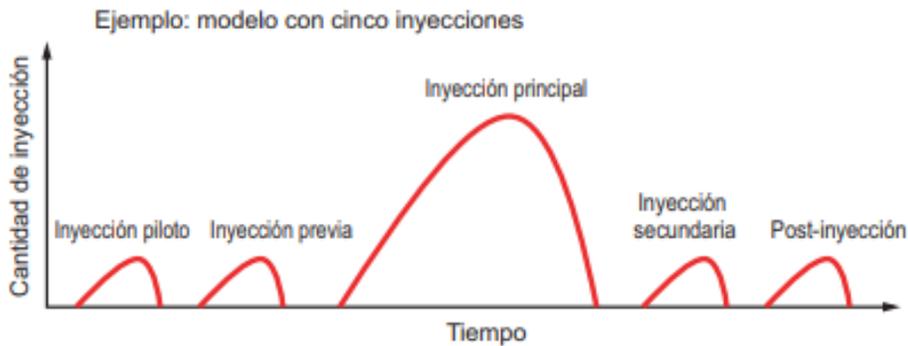


Fig. 8. Ejemplo de modelo con cinco inyecciones [7].

---

### 3.1.2.3.1. *Funcionamiento del inyector*

A continuación se explicarán las diferentes funciones del inyector, esta se puede complementar con la **Fig. 9**.

#### a. *Sin inyección:*

Cuando la TWV no está activada, bloquea el flujo de escape desde la cámara de control para igualar la presión del combustible en la cámara de control y la presión del combustible aplicada a la aguja de la tobera con la presión de la rampa. Como resultado, la aguja de la tobera se cierra debido a la disparidad entre el área de la superficie bajo presión del pistón de control y la fuerza del resorte de la tobera, evitando así la inyección de combustible. El tipo G2, el orificio de salida de la cámara de control se cierra directamente por la fuerza del muelle [7].

#### b. *Inyección:*

Cuando la TWV comienza a activarse, esta válvula se eleva, permitiendo que el escape desde la cámara de control se abra. Con la apertura de este escape, el combustible contenido en la cámara de control se libera, disminuyendo la presión en su interior. Esta disminución de presión dentro de la cámara de control provoca que la presión en la aguja de la tobera supere la fuerza que la mantiene cerrada, lo que resulta en que la aguja se desplace hacia arriba y se inicie el proceso de inyección. A medida que se producen fugas de combustible desde la cámara de control, el flujo se controla a través de un orificio, permitiendo que la tobera se abra de manera gradual. Con la apertura de la tobera, aumenta la relación de inyección. Al continuar suministrando corriente a la TWV, se alcanza un punto en el que la aguja de la tobera llega a su máxima elevación, lo que resulta en la máxima relación de inyección. El combustible adicional regresa al depósito a través de la ruta indicada [7].

#### c. *Final de inyección*

Al concluir la activación de la TWV, la válvula se mueve hacia abajo, bloqueando el escape desde la cámara de control. Con el cierre del escape, la presión del combustible en la cámara de

control regresa de inmediato a la presión de la rampa, lo que provoca un cierre súbito de la tobera y detiene la inyección [7].

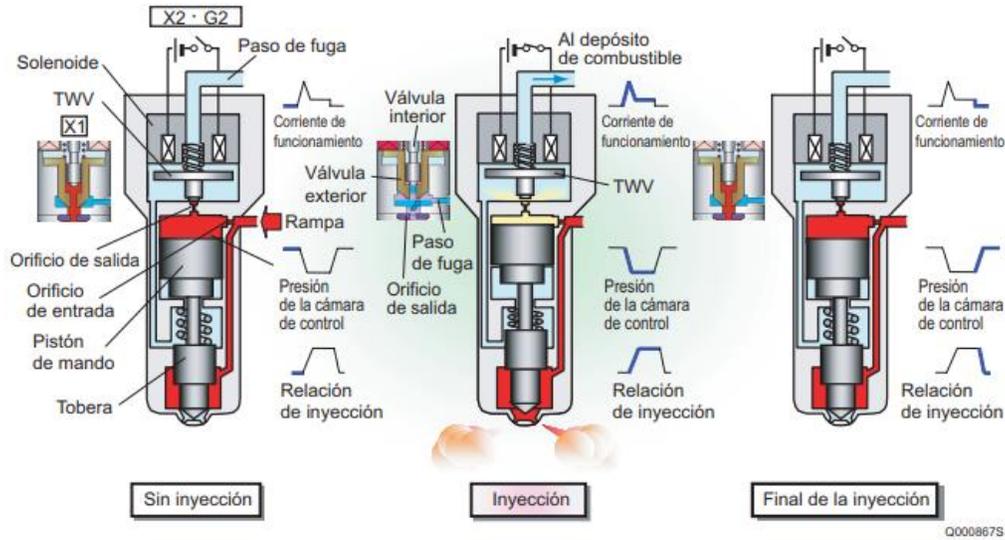
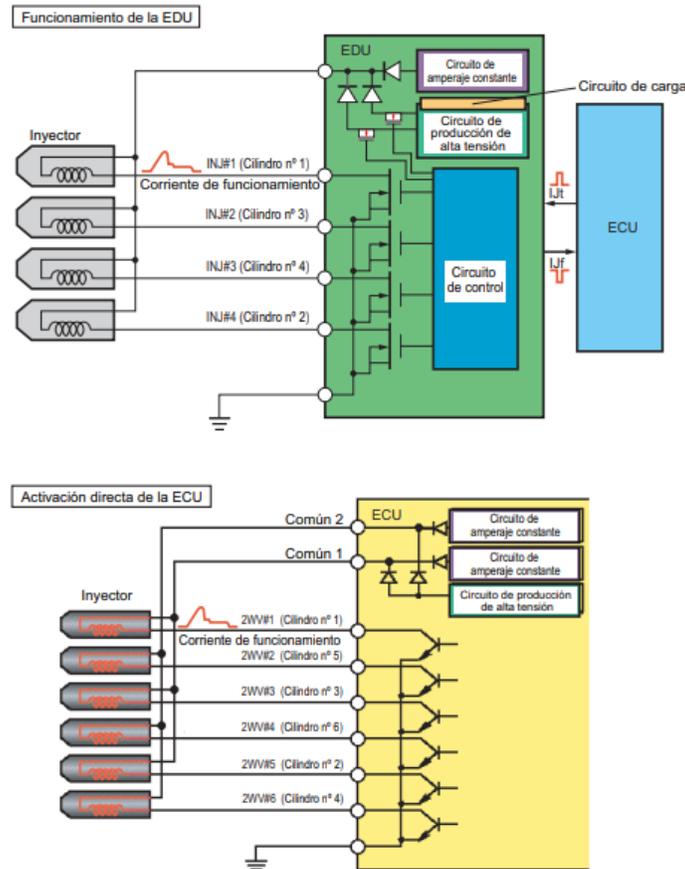


Fig. 9. Funciones del inyector [7].

*d. Circuito de funcionamiento del inyector*

Ese ha cambiado la tensión de funcionamiento a alta tensión, activando de esa forma la magnetización del solenoide como la respuesta de la TWV. LA EDU del circuito de la ECU aumenta la tensión de la batería alrededor de 110V, suministrando al inyector la señal de la ECU para activarlo [7], **Fig. 10**.



00026688

Fig. 10. Circuito de funcionamiento del inyector Denso [7].

### 3.2. Técnica Schlieren

El principio básico de la técnica Schlieren implica dirigir un haz de luz paralelo a través del medio en estudio. Cuando la luz atraviesa regiones con gradientes de densidad donde hay cambios de temperatura, flujos de alta velocidad o la mezcla de diferentes materiales, se produce una desviación en su trayectoria. Este cambio en la dirección de la luz crea patrones de sombra o contraste en una pantalla o detector colocado detrás del medio. Estos patrones revelan las variaciones en el índice de refracción del medio y permiten visualizar fenómenos como ondas de choque, flujos de aire y otros cambios en la densidad del medio. En la **Fig. 11** se ve el fundamento de la técnica Schlieren [8].

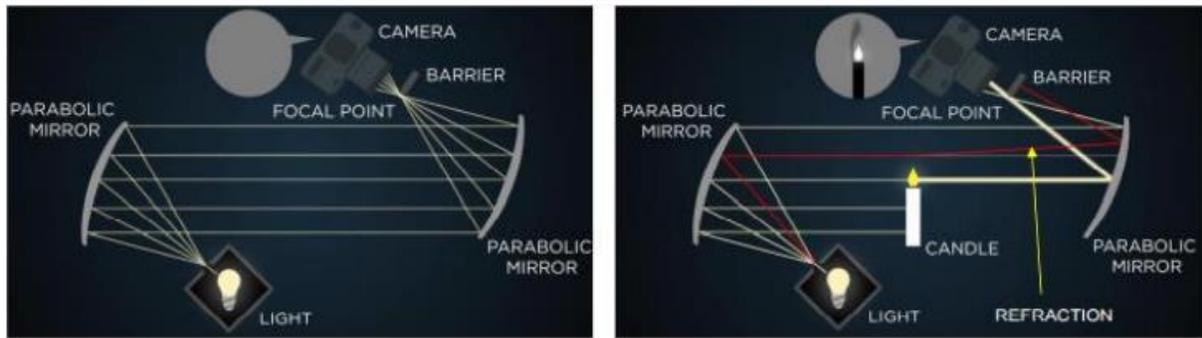


Fig. 11. Fundamentos de la técnica Schlieren [9].

Una onda de luz que índice en el campo de flujo, **Fig. 12**, puede interactuar con el fluido de dos maneras. La primera, la luz puede dispersarse desde las moléculas del fluido o desde las partículas trazadoras con las que se siembra el fluido y la segunda que las propiedades de la onda luminosa pueden cambiar debido a un cierto comportamiento óptico del fluido y, como consecuencia, la luz transmitida a través del flujo es diferente de la luz incidente. Este último, es función de la densidad, el cual puede se puede describir exactamente mediante la ecuación de Clausius-Mosotti.

$$n - 1 = k\rho \quad (1)$$

Siendo  $n$  el índice de refracción,  $\rho$  la densidad el gas y  $k$  es la constante de Gladstone-Dale, la cual es diferente para cada gas y depende débilmente de la longitud de onda de la luz [9].

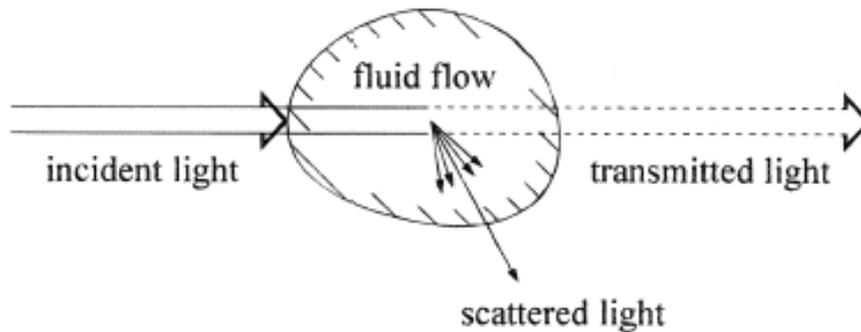


Fig. 12. Interacción de una onda luminosa con un flujo de fluido [9].

---

### 3.3. Técnica Shadowgraph

El método de sombra “simple” o “directo” nombrado por Schardin [10]. Es un método sencillo donde solo se requiere una fuente de luz, el objeto Schlieren  $S$ , y una pantalla reflectante donde se proyecta la sombra. La fuente de luz brillante de “punto” con el objeto  $S$ , algunos rayos se refractan, doblan y desviando de sus trayectorias originales, llegando a la pantalla con un ángulo y una desviación generando una sombra. Existen dos métodos para la aplicación de la técnica los cuales son: Shadowgraph directo con luz divergente y Shadowgraph directo con luz paralela, estos se explicarán a continuación [11].

#### 3.3.1. Shadowgraph directo con luz divergente

La teoría geométrica-óptica [10], [12] es consecuente a la **Fig. 13**. El objeto Schlieren  $S$ , con una altura  $d$ , está situado a una distancia  $g$  del plano shadowgram. Cuando es iluminado por una fuente de luz "puntual"  $L$  ubicada a una distancia  $h$  de ese mismo plano, el objeto Schlieren proyecta una sombra cuya altura es  $d'$ . El aumento de la sombra en comparación con el objeto Schlieren se determina de manera sencilla mediante la relación siguiente [11].

$$m = h/(h - g) \quad (2)$$

En el caso especial  $h=2g$ , el shadowgram aparece al doble de su tamaño original. El rayo de luz  $c$ , originalmente recto, se refracta en un ángulo  $\varepsilon$  en el borde del objeto Schlieren. El rayo refractado  $c'$  golpea la pantalla a una distancia  $\Delta a$  de su posición original, redistribuyendo la luz en el shadowgram [11].

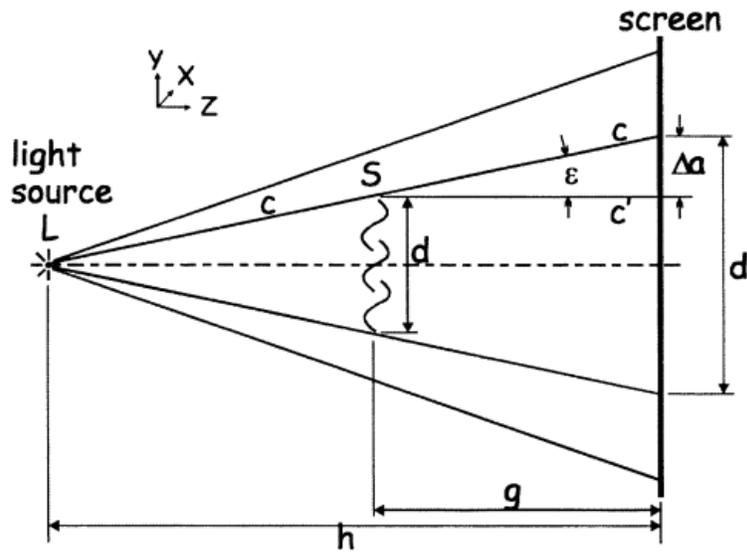


Fig. 13. Diagrama de técnica de Shadowgraph directo con luz divergente [11].

El principio por el cual se rige Shadowgraph  $\varepsilon * g = \Delta a$ . Esta refracción de la luz incidente en un ángulo  $\varepsilon$ , que causa un desplazamiento  $\Delta a$  a la distancia  $g$ , es el principio fundamental en el que se basa la técnica de Shadowgraph. Según Schardin[10] el desplazamiento del rayo con respecto al tamaño de la sombra al diferenciarlo respecto a  $g$ , se halla el máximo en  $g/h = 1/2$ . A su vez, estableció dos principios para una alta sensibilidad: 1) hacer  $h$  lo más grande posible y 2) ubicar el objeto Schlieren a medio camino entre la fuente de luz y la pantalla. Además, cuando se quiere lograr esta máxima sensibilidad, el diámetro de la fuente de luz es igual al de círculo de confusión según la óptica geométrica. El diámetro del círculo de confusión es igual a  $gD/(h - g)$  [12].

Se ha demostrado que la sensibilidad varía poco en el rango  $0.3 < g/h < 0.7$ , por lo que no es esencial colocar el objeto Schlieren exactamente en  $h/2$  para obtener alta sensibilidad. Desafortunadamente, el desenfoque por difracción también alcanza su máximo en este rango, mientras que el desenfoque geométrico aumenta linealmente con la distancia  $g$  entre el objeto Schlieren y el Shadowgraph [10].

### 3.3.2. Shadowgraph directo con luz paralela

Esta metodología dejamos que la distancia  $h$  entre la fuente de la luz la sombra se acerca al infinito como se puede observar en la **Fig. 14**. La forma práctica de lograr esto es utilizando un lente o un espejo.

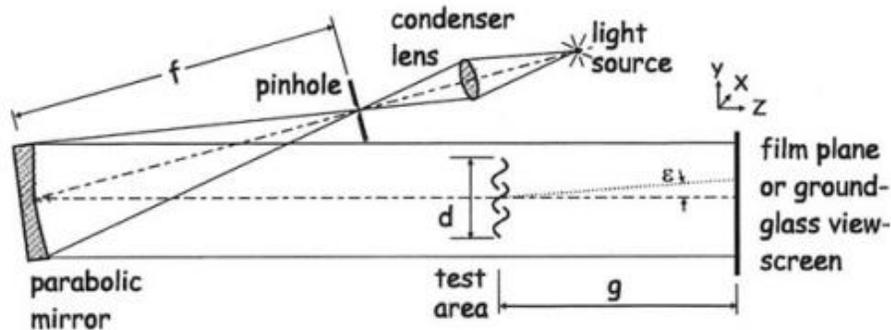


Fig. 14. Diagrama de una configuración de sombra directa de luz paralela utilizando la mitad de la óptica de un sistema Schlieren tipo z para colimar el haz de luz [11].

La fotografía de sombras con luz paralela ofrece el doble de sensibilidad a la misma distancia  $g$  que la divergente, haciéndola la técnica preferida, salvo cuando se necesitan elementos de colimación muy grandes. La luz paralela reduce la distorsión de las sombras y es más adecuada para los fenómenos 2-D frecuentemente estudiados en túneles de viento [11].

### 3.4. Descripción general del chorro diésel

El primer fenómeno que al salir el combustible de la tobera y penetra en el seno del gas ambiente es la atomización de la vena líquida, [13]. Por lo cual, después de una determinada distancia axial desde la boca de la tobera, conocido como longitud intacta o de rotura, se transforma dicha vena en gotas dando lugar a la atomización primaria. Posteriormente, estas gotas pueden seguir disgregándose y reducir su diámetro (atomización secundaria) o algunas de ellas pueden chocar entre ellas aumentando el diámetro (coalescencia). Por ende, al final se tiene una distribución de tamaño de gotas más o menos heterogénea [14].

Los regímenes de atomización en el proceso de atomización de diésel según Lefebvre [13] existen varios regímenes de atomización dependiendo de la velocidad del chorro o del número de Reynolds. Estos regímenes son los siguientes:

1. Régimen de Rayleigh, para muy bajas velocidades de inyección.
2. Primer régimen inducido por interacción aerodinámica.
3. Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.
4. Régimen de atomización, para altas velocidades de inyección.

Las anteriores fenomenologías se pueden apreciar en la **Fig. 15**.

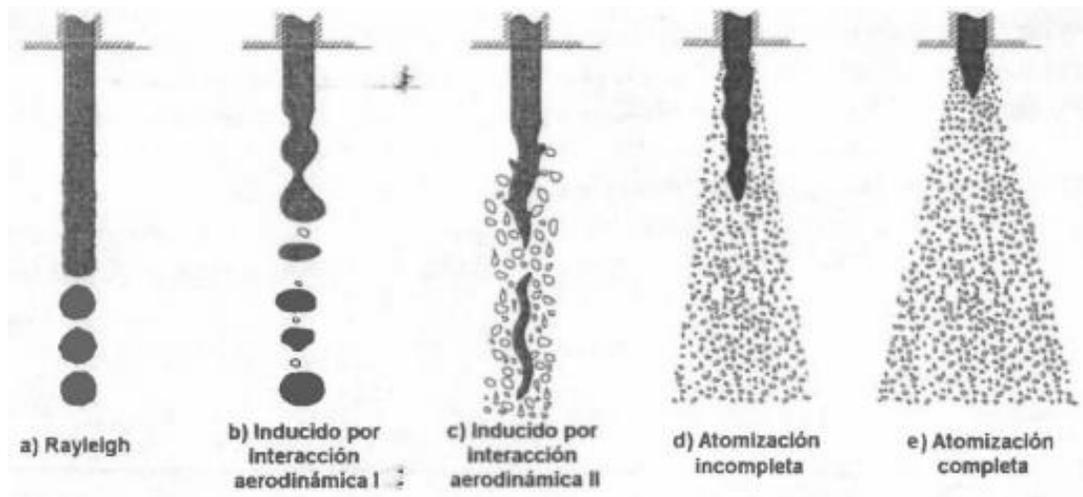


Fig. 15. Regímenes de atomización [14].

### ***Régimen de Rayleigh***

Rayleigh sugirió que la atomización de la corriente líquida se produce debido a la predominancia de las fuerzas de tensión superficial. Esto ocurre a velocidades de inyección bajas, alrededor de 10 m/s, donde las deformaciones radiales axi-simétricas se forman por la interacción entre perturbaciones iniciales en la superficie del chorro y las fuerzas de tensión superficial. Estas deformaciones aumentan hasta que la corriente líquida se rompe en gotas uniformes de aproximadamente el doble del diámetro del orificio[14].

---

### ***Primer régimen inducido por interacción aerodinámica***

A medida que la velocidad de inyección aumenta, también lo hace la velocidad relativa entre la corriente líquida y el gas circundante. Este incremento provoca que las fuerzas aerodinámicas cobren importancia en comparación con las fuerzas de tensión superficial. A velocidades bajas, las inestabilidades axi-simétricas causadas por la tensión superficial se intensifican, resultando en un chorro con bulbos notables y una atomización más rápida, produciendo gotas de tamaño similar al de la corriente líquida. En contraste, a velocidades altas, las fuerzas aerodinámicas predominan sobre las de tensión superficial, generando un chorro con una sección más uniforme que oscila alrededor de su eje de simetría, adquiriendo una forma helicoidal alargada. Esta oscilación y la reducción de la sección de la corriente líquida conducen a la atomización del combustible[14].

### ***Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica***

Si incrementamos la velocidad, observaremos cómo la superficie de la corriente líquida experimenta oscilaciones de pequeña escala, las cuales son generadas tanto por la turbulencia en la salida del inyector como, principalmente, por la interacción aerodinámica. Estas perturbaciones transversales son amplificadas por las fuerzas aerodinámicas hasta que se produzca la separación de las gotas de combustible. La distancia entre el inyector y el punto donde comienza esta separación, conocida como longitud de vena intacta, depende de la velocidad de inyección. El tamaño de estas gotas es aproximadamente igual a la longitud de onda de las perturbaciones.

### ***Régimen de atomización***

En el proceso de atomización, a medida que la velocidad de inyección aumenta, la separación de las gotas ocurre progresivamente más cerca del orificio. Cuando la velocidad alcanza un cierto punto, la atomización comienza justo en la salida del orificio. Este cambio en el comportamiento general del chorro marca el comienzo del proceso de atomización, aunque no hay una transición clara desde el régimen anterior. Sin embargo, debido a las velocidades más altas, comienzan a aparecer otros mecanismos como la turbulencia y la cavitación. En la **Fig. 15**, se observa el comportamiento de un régimen de atomización incompleto con la atomización completa que presenta mayor velocidad de descarga al ambiente. La distinción entre ambas radica en la

longitud de ruptura reducida y el ángulo del chorro más amplio en el caso de la atomización completa en comparación con la atomización incompleta.

Numerosos datos experimentales indican que los principales modos de atomización que se observan en el chorro de Diesel, no evaporativo ni reactivo, bajo condiciones normales de operación, son el segundo régimen de atomización impulsado por la interacción aerodinámica, y el régimen conocido como de atomización. Este último es cada vez más común y significativo a medida que la presión de inyección aumenta y el diámetro de la tobera disminuye[14].

### 3.5. Análisis dimensional del proceso de atomización

El estudio de los fenómenos de los últimos años tanto para simulaciones y experimentos se han hecho rio arriba (atomización primaria) [13]. Por lo cual, se hace necesario explicar la fenomenología, por lo que los parámetros que intervienen en la atomización primaria son los siguientes [14]:

- La densidad del aire:  $\rho_a = [kg/m^3]$
- La velocidad de inyección (relativa líquido-aire):  $u_{ef} = [m/s]$
- Tamaño característico (diámetro efectivo del orificio):  $\phi_{ef} = [m/s]$
- Densidad del combustible:  $\rho_f = [kg/m^3]$
- Viscosidad del combustible:  $\mu_f = [kg/ms]$
- Tensión superficial del combustible:  $\sigma_f = [kg/s^2]$

Teniendo seis parámetros que contiene tres magnitudes fundamentales según el teorema de Pi de Buckingham [15] se puede agrupar tres números adimensionales que representan el problema físico [14]. Los grupos serían los siguientes:

1. Coeficiente de densidades:  $\frac{\rho_a}{\rho_f}$
2. Número de Reynolds:  $Re = \frac{\phi_{ef} u_{ef}}{\nu_f}$ ;  $\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}$
3. Número de Weber:  $We = \frac{\rho_f \phi_{ef}^2 u_{ef}^2}{\sigma_f}$

El número de Reynolds nos indica las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el interior de la vena líquida y el número de Weber cuantifica la importancia de la inercia del fluido frente a su tensión superficial que se opondría a la rotura de esta. Conociendo el valor de la longitud de rotula ( $L_B$ ) y el ángulo del chorro  $\theta$  en función del número de Weber se puede apreciar el comportamiento del chorro en la **Fig. 16** [13].

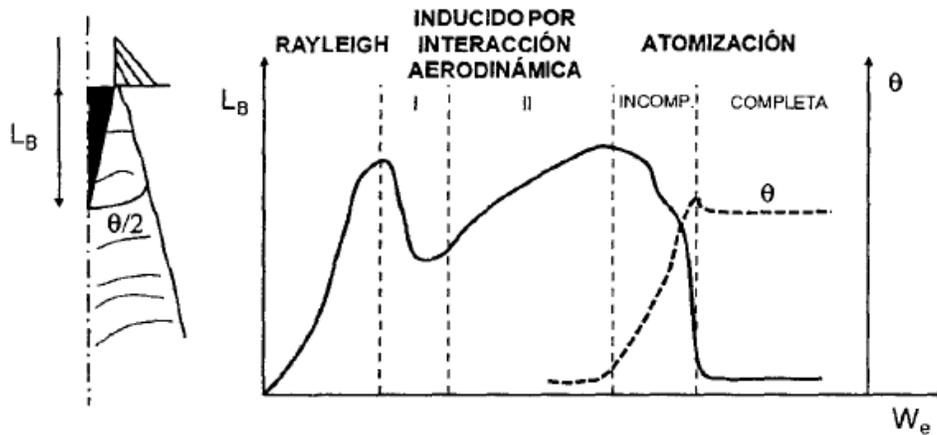


Fig. 16. Longitud de rotula y ángulo del chorro diésel en función del número de Weber [14].

### 3.6. Atomización de la vena líquida o atomización primaria

Los fenómenos asociados al proceso de atomización son desconocidos, ya que no hay teoría capaz de explicar todos los comportamientos observados. Se considera que la atomización es el resultado de la combinación de varios mecanismos individuales que pueden tener mayor o menor relevancia según las condiciones de inyección. Estos mecanismos se detallan a continuación.

#### 3.6.1. Ruptura debido a inestabilidad aerodinámica

El aumento de la velocidad relativa entre el líquido y el gas ambiente puede potenciar el desarrollo de perturbaciones inestables en la superficie del chorro. Esto puede dar lugar al segundo régimen inducido por interacción aerodinámica, donde las inestabilidades de alta frecuencia generan finos ligamentos debido a variaciones locales de presión en el gas y el líquido. Estos ligamentos se rompen debido a la tensión superficial y/o la interacción aerodinámica con el gas circundante. A medida que la velocidad de inyección aumenta, la tasa de atomización y el ángulo

de apertura del chorro disminuyen, indicando la influencia de otros factores. Además, la geometría de la tobera, que no se considera en la teoría aerodinámica, desempeña un papel crucial en la atomización del chorro diésel. Por lo tanto, las inestabilidades en la superficie de la vena líquida no pueden explicar completamente este fenómeno [14].

### *3.6.2. Turbulencia*

La turbulencia, generada principalmente en el sistema de inyección y especialmente en el orificio del inyector, es otra causa fundamental de la atomización. Las velocidades turbulentas radiales en este punto son contenidas por las paredes del inyector, pero al salir de este, la componente radial de las fluctuaciones turbulentas expulsa el combustible fuera de la corriente líquida, lo que produce la atomización. Este mecanismo permite explicar la atomización de chorros inyectados en el vacío, donde no hay interacción aerodinámica con el entorno. Además, es independiente de las variaciones significativas de comportamiento del chorro según la densidad del gas, lo que sugiere que no es el único mecanismo de atomización [16].

### *3.6.3. Cavitación*

La cavitación influye en la atomización del chorro diésel de dos maneras. Primero, la aparición de cavitación suele causar la separación del flujo de la pared del orificio, lo que aumenta la turbulencia, por ende, la atomización. Segundo, la presencia de burbujas de vapor en el combustible crea un flujo bifásico en la salida del orificio, facilitando la división del chorro en ligamentos y gotas. A altas temperaturas, la dilatación de estas burbujas también conduce a la atomización. La cavitación está fuertemente influenciada por la geometría del orificio y las condiciones operativas, lo que puede alterar significativamente las zonas de baja presión [16].

### *3.7. Atomización secundaria*

Una vez atomizada la vena líquida, las gotas interactúan con el aire (atomización secundaria) y entre sí (coalescencia), causando variaciones en su diámetro medio. La atomización de gotas está controlada por fuerzas aerodinámicas, tensión superficial y fuerzas viscosas que

amplifican las perturbaciones iniciales. El principal problema que se presenta en los chorros diésel es como determinar la velocidad relativa aire/gota local.

En numerosos modelos de chorros diésel, se calcula la probabilidad de colisión para determinar la tasa de coalescencia, basada en la velocidad relativa entre las gotas y su entorno. Una vez atomizado completamente el chorro, ocurre la evaporación de las gotas debido a la alta temperatura resultante de la compresión previa. La evaporación está controlada por el intercambio energético con el aire y la difusión térmica y másica en la interfase gota-gas. En la combustión, la evaporación es principalmente controlada por la mezcla, siendo más rápida que los procesos de difusión. Así, el desarrollo del chorro diésel y un chorro gaseoso se reducen a un problema de mezcla combustible-aire, lo cual es beneficioso para los investigadores al aplicar estudios gaseosos [16].

### 3.8. Caracterización de pulverización externa

Para el análisis de un chorro desde un punto de vista macroscópico se considera la penetración total y el ángulo de chorro. No obstante, el volumen del chorro se considera normalmente, pero este se puede obtener a partir de los anteriores [14]. La descripción se puede apreciar a continuación:

#### 3.8.1. Penetración

La penetración se puede definir como la distancia máxima que alcanza cuando se inyecta en estancamiento o en aire cruzado, esta se rige por la energía cinética del chorro del líquido inicial y la resistencia aerodinámica del gas circundante [13]. El estudio de la penetración de un chorro diésel en un entorno de aire quieto se han venido realizado. Sitkei [17], nos dice que para un entorno de aire quieto y una baja carga es satisfactoria, mientras que para cargas altas se tiene valores demasiados grandes. La ecuación que obtuvo para la longitud de penetración del chorro es la siguiente [13].

$$S = 0.2d_0 \left( \frac{U_L t}{d_0} \right)^{0.48} \left( \frac{U_L d_0}{v_L} \right)^{0.3} \left( \frac{\rho_L}{\rho_A} \right)^{0.3} \quad (3)$$

Taylor y Walsham [18] empleando la técnica Schlieren y fotografía convencional para identificar la penetración individual de gasóleo en nitrógeno inactivo a alta presión, pero sobrestimo el efecto de la relación de  $l_o/d_o$ , por esto no es recomendada para  $d_o > 0.5$  [13]. Los resultados son los siguientes:

$$S = 0.5d_0 \left[ \left( \frac{\Delta P_L t}{\rho_A} \right)^{0.5} \frac{t}{d_o} \right]^{0.64} \left( \frac{l_o}{d_o} \right)^{0.3} \quad (4)$$

Dent [19], empleando la teoría de la mezcla de flujos para desarrollar la siguiente fórmula para los datos de penetración de correlación. Se recomienda su uso en todas las condiciones, excepto en presiones de cámara  $P_A > 10 \text{ MPa}$  [13].

$$S = 3.01 \left[ \left( \frac{\Delta P_L}{\rho_A} \right)^{0.5} d_o t \right]^{0.5} \left( \frac{295}{T_A} \right)^{0.25} \quad (5)$$

### 3.8.2. Ángulo de chorro

Una complicación significativa al definir y medir el ángulo del cono radica en que este cono de pulverización presenta límites curvos, como resultado de la interacción del aire con la pulverización. Para abordar esta inconveniente, el ángulo del cono se suele definir como el ángulo formado por dos líneas rectas trazadas desde el orificio de salida para cortar los contornos de pulverización a una distancia específica de la cara del atomizador [13].

Naber y Siebers [20] , encontraron para una relación entre el ángulo del chorro y las condiciones de operación en el caso de chorros no evaporativos. En consecuencia, encontraron que para altas presiones de inyección y trabajando con un único combustible, el ángulo del chorro depende del orificio de la tobera y la relación de densidades entre el gas ambiente y el combustible. Por ende, plantearon una relación donde el exponente de la relación de densidades es de 0.19, esta se puede apreciar a continuación [14].

$$\tan(\theta/2) \propto (\rho_a/\rho_f)^{0.19} \quad (6)$$

## 4. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se desarrolla una metodología dividida en dos partes: El diseño y el montaje experimental del banco de pruebas utilizando los componentes de la técnica Schlieren.

### *4.1. Diseño*

Para el diseño del banco de prueba se requiere una cuidadosa planificación y ejecución. Por consiguiente, se debe seguir una guía para el proceso de diseño que abarque desde el estado del arte hasta la construcción del mismo banco. Varios autores nos instruyen sobre los pasos a seguir para la generación de este [21], [22]. El orden por seguir se aprecia a continuación:

#### *4.1.1. Identificación de la necesidad*

En esta parte se identifica la necesidad que se quiere cumplir con los lineamientos que permitan satisfacer el objetivo de este trabajo de grado.

#### *4.1.2. Investigación preliminar*

Se lleva a cabo una investigación para recopilar información relevante sobre las tecnologías ópticas y los métodos de análisis de combustibles líquidos. Revisando la literatura técnica y científica sobre análisis óptico de líquidos y bancos de pruebas existentes y sus características.

#### *4.1.3. Planteamiento de los objetivos*

Con base a los antecedentes se plantea el objetivo con claridad, estableciendo los objetivos específicos del diseño, que deben ser claros, medibles y alcanzables. Donde se debe formular un conjunto de especificaciones de diseño (lo que el sistema debe hacer) y no especificaciones de diseño (cómo debe hacerse).

---

#### *4.1.4. Diseño conceptual*

Se generan ideas y conceptos para el banco de prueba, incluyendo su configuración y los métodos ópticos a emplear. Esto se hace por medio de técnica como lluvia de ideas, las analogías e inversiones. Después, se procede hacer técnicas de análisis más completo para garantizar el éxito de esta fase. Por último, se pasa a seleccionar la mejor opción para el diseño a detalle. En esta última fase se optará por usar una matriz de decisión que nos permite considerar diferentes componentes de manera sistemática.

#### *4.1.5. Diseño a detalle*

Se desarrolla el diseño seleccionado con un alto nivel de detalle, incluyendo planos con herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), especificaciones técnicas y componentes necesarios.

#### *4.1.6. Ensamble*

Todos los componentes adquiridos se integran para construir el banco de prueba siguiendo las especificaciones detalladas del diseño, incorporando las posibles modificaciones realizadas durante la fabricación. Este proceso se lleva a cabo mediante el montaje y ensamblaje de los elementos, asegurando que se ajusten a los requerimientos técnicos establecidos.

#### *4.1.7. Puesta a punto*

Se realiza la puesta a punto del banco de prueba, ajustando y optimizando su funcionamiento para asegurar que cumple con los requisitos establecidos. Haciendo la validación del sistema Común riel objeto de estudio.

---

#### *4.1.8. Manual de operaciones*

Se desarrolla un manual de operaciones que proporciona instrucciones detalladas sobre cómo usar y mantener el banco de prueba. Cumpliendo las normas de seguridad y calidad para el personal que usará este.

#### *4.2. Experimentación*

La técnica Schlieren es una técnica óptica utilizada para visualizar cambios en el índice de refracción en un medio, como el aire, causados por variaciones en la densidad, temperatura, presión u otras propiedades del medio. Mientras que la técnica Shadowgraph algunos rayos se refractan, doblan y desviando de sus trayectorias originales generando una sombra. Por tanto, para llevar a cabo experimentos en el banco de prueba de combustibles líquidos y realizar un análisis óptico, es crucial seguir una metodología estructurada que garantice la precisión, repetibilidad y validez de los resultados obtenidos. A continuación, se detalla una metodología paso a paso para realizar estos experimentos:

##### *4.2.1. Definición del objeto*

Se define el objeto del experimento, enfocados en la caracterización del régimen de atomización que se quiere analizar. Clarificando los objetivos específicos de las pruebas.

##### *4.2.2. Diseño del experimento*

Se realiza el diseño teniendo en cuenta las especificaciones aplicación. Considerando la selección y disposición de los componentes ópticos, fuentes de luz, cámaras, etc.

##### *4.2.3. Configuración del banco de prueba*

Se procede a seleccionar los equipos y materiales según la disposición del laboratorio GASURE, entre estos están los lentes convergentes, cámaras de alta velocidad, fuente de luz, etc.

---

Después, se ejecuta el montaje experimental, montando los componentes según el diseño experimental. Se debe tener una alineación de los dispositivos para garantizar que los haces de luz se enfoquen y se proyecten correctamente hacia la cámara.

#### *4.2.4. Ejecución y análisis de datos experimentales*

Realizar el experimento según el plan diseñado, asegurándose de capturar imágenes de alta calidad de los fenómenos de interés. Para posteriormente, analizar imágenes obtenidas utilizando software de procesamiento de imágenes para cuantificar los fenómenos observados.

---

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1. *Diseño del banco*

#### 5.1.1. *Identificación de la necesidad*

El proyecto tiene como finalidad estudiar los fenómenos asociados con la atomización de un combustible líquido, específicamente diésel, a diversas presiones de inyección en condiciones atmosféricas. Este estudio requiere que los ensayos realizados presenten la menor cantidad de errores posibles, los cuales pueden estar vinculados a vibraciones y a un mal montaje experimental.

Para alcanzar este objetivo, el proyecto utilizará técnicas ópticas como Schlieren y Shadowgraph para la visualización del chorro de diésel. Es fundamental garantizar la seguridad del operario durante todo el proceso, mediante la implementación de un sistema de protección adecuado para el manejo de fluidos a alta presión.

Además, el espacio de trabajo disponible es limitado, con dimensiones de 2 metros de ancho por 3 metros de largo. Por lo tanto, el diseño del banco de pruebas y el montaje experimental deben adaptarse a este espacio reducido. Adicionalmente, se debe considerar la ergonomía del operario, asegurando que las actividades se realicen en una posición de pie sin generar incomodidades.

#### 5.1.2. *Investigación preliminar*

Se realiza una investigación preliminar sobre las técnicas de visualización de la atomización de combustibles líquidos con el análisis de los diferentes fenómenos asociados y el diseño de bancos de prueba donde se realizaron estos estudios, las características de diseño de cada banco dependerán del enfoque de cada experto, los cuales son puntos de partidas para nuestro trabajo. A continuación, se sintetizan los resultados de la revisión de cuatro artículos científicos relevantes en este ámbito:

1. Effect of Injection Pressure on Low-Temperature Fuel Atomization Characteristics of Diesel Engines under Cold Start Conditions: se explora las características de atomización

- 
- e impacto de esta, en la pulverización de combustible a baja temperatura a variadas presiones. Usando láser combinada LIEF-PIV, se establece un sistema experimental de atomización de combustible para arranque en frío de motores diésel. Los resultados indican que, a mayor presión de inyección, se logra una atomización más fina, reduciendo el tamaño de las gotas y mejorando la evaporación del combustible, lo que facilita el encendido y mejora la combustión bajo condiciones frías[23].
2. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer: En este estudio experimental, se investiga el rendimiento de pulverización de un atomizador de chorro de aire en diferentes condiciones operativas y geometrías internas, diseñado para que el aire salga con un movimiento giratorio mediante un agitador de paletas en la salida de combustible. Se examinan parámetros como el ángulo del remolino de aire ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ ), la relación de masa de aire a combustible y la distancia entre la salida de la boquilla de combustible y el orificio de aire (de 0 a 3 mm). Utilizando una cámara digital de velocimetría de imagen de partículas (PIV), se analiza la forma y las intensidades de las gotas de pulverización, y mediante la técnica del patrón de tubos, se mide la concentración radial de pulverización. Los resultados muestran que el ángulo del cono de pulverización aumenta con la relación de masa de aire a combustible y el ángulo del remolino de aire, pero disminuye con el aumento de la distancia entre la boquilla y el orificio de aire. La concentración de pulverización es máxima en la línea central y disminuye radialmente, mientras que el ángulo del cono de pulverización aumenta significativamente con los ángulos de turbulencia estudiados [24].
  3. Investigation of the injection pressure impact on non-monotonic two-stage ignition delay of diesel engines under cold-start: La capacidad de arranque deficiente en condiciones de arranque en frío es un obstáculo persistente para los motores de encendido por compresión, y el ajuste de la presión de inyección ( $P_i$ ) es una forma efectiva de mejorar esta capacidad. Este estudio investiga el efecto de  $P_i$  en el proceso de ignición en dos etapas del chorro de combustible en condiciones de arranque en frío, utilizando una cámara de combustión de volumen constante con métodos de Shadowgraphy y luminosidad natural de alta velocidad. Se establece un modelo analítico para el retraso de ignición en dos etapas. Los resultados

---

experimentales muestran una tendencia decreciente del tiempo de retraso de ignición a baja temperatura (LTI) de 4.5 ms a 2.5 ms y una tendencia creciente del tiempo de propagación de la llama fría de 0.4 ms a 1.6 ms a 760 K, lo que resulta en una tendencia no monotónica del retraso de ignición a alta temperatura (HTI) al aumentar  $P_i$  de 40 MPa a 160 MPa. Según el modelo, el aumento de  $P_i$  mejora la atomización y la dilución del chorro de combustible, explicando así cuantitativamente la tendencia no monotónica de HTI en condiciones de arranque en frío [25].

Para los antecedentes de diseño y construcción de un banco de prueba especializado en la caracterización de la atomización de combustibles diésel, se revisaron dos estudios relevantes y la información técnica de la página oficial de BOSCH sobre el banco de pruebas Común riel EPS 708.

1. BANCO PARA COMPROBACIÓN DE INYECTORES DIESEL: DENSO, DELPHI Y BOSCH DEL SISTEMA CRDI: como su nombre indica describe la construcción de un banco de pruebas para un sistema Común riel de los diferentes fabricantes descritos en el título. El sistema incluye el diseño y la construcción del circuito electrónico y eléctrico del módulo comprobador de inyectores formada por tres circuitos denominados: control, potencia y transferencia. Asimismo, el diseño del modelo y ensamble de los diferentes componentes del banco, en el cual se determinó el acero ASTM 36 para la construcción de la estructura, ya que brinda la resistencia, tensión, dureza, etc. Evitando la deformación de este. Se recomienda un buen centrado del volante de inercia del motor con la bomba de alta presión para evitar vibraciones y esfuerzos de torsión [26].
2. El diseño y construcción de un banco de prueba para inyectores electrónicos a diésel para un sistema Común riel: En este trabajo, se detalla el proceso de diseño y construcción de un banco de prueba para inyectores electrónicos de diésel, destacando la importancia de un montaje robusto para minimizar vibraciones y errores experimentales. Se enfatiza la necesidad de un sistema de protección adecuado para la seguridad del operario, especialmente dado el manejo de fluidos a alta presión. Además, se subraya la relevancia de un diseño ergonómico que permita la operación eficiente en espacios reducidos [27].

---

3. Características y Datos Técnicos del Banco de Pruebas Común Riel EPS 708 (BOSCH): La página oficial de BOSCH proporciona información técnica detallada sobre el banco de pruebas EPS 708, un equipo avanzado para la evaluación de inyectores Común riel. Este banco de pruebas con alta precisión y capacidad para realizar pruebas bajo condiciones controladas de alta presión, ofreciendo datos confiables sobre la eficiencia y el rendimiento de los inyectores. Las especificaciones técnicas incluyen sistemas de medición automatizados y protección de seguridad para el operario, lo que garantiza la integridad de los datos y la seguridad del proceso de prueba [28].

#### *5.1.3. Planteamiento de los objetivos*

Según las necesidades del problema a resolver se identificó como objetivo general de diseño: caracterizar la atomización de combustibles líquidos mediante técnicas ópticas a diferentes presiones de inyección descargado a la atmósfera para garantizar la precisión de los ensayos y la seguridad del operario en un espacio limitado.

Los objetivos específicos para el diseño son garantizar el diseño y construcción del banco de prueba donde se minimice las vibraciones y un montaje experimental robusto y seguro para el operario. Igualmente, adaptar un espacio de 2 metros de ancho y 3 metro de largo, asegurando la ergonomía del operario en posición de pie. También, integrar las técnicas ópticas como Schlieren y Shadowgraph para visualización precisa del chorro de combustión.

Entre los objetivos especificaciones de diseño que se tiene mayor relevancia, es en la implementación de un sistema de protección adecuado para el manejo de fluidos a alta presión, garantizando la seguridad del operario durante los ensayos.

#### *5.1.4. Diseño conceptual*

En esta parte se modelaron dos diseños usando el programa Autodesk Inventor versión 2024, los cuales satisfacen los objetivos establecidos con anterioridad. Por ende, se detallará cada uno para después determinar el diseño que será desarrollado con totalidad a través de la matriz de

decisión. Sin embargo, se hace mención que se explicará con mayor detalle el montaje experimental con posterioridad en el documento.

#### 5.1.4.1. Diseño 1

El diseño de la estructura que soporta los componentes del banco está formado por perfiles de acero ASTM 36 en forma de L ( $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2} \times \frac{3}{16}$ ) y rectangulares ( $3 \times 1 \times \frac{1}{8}$ ). En la parte inferior, se colocan 6 rodamientos y 6 estabilizadores, que funcionan como soportes anti vibratorios y permiten la movilidad dentro del laboratorio. Estos componentes están montados en una placa, como se muestra en la **Fig. 17**.

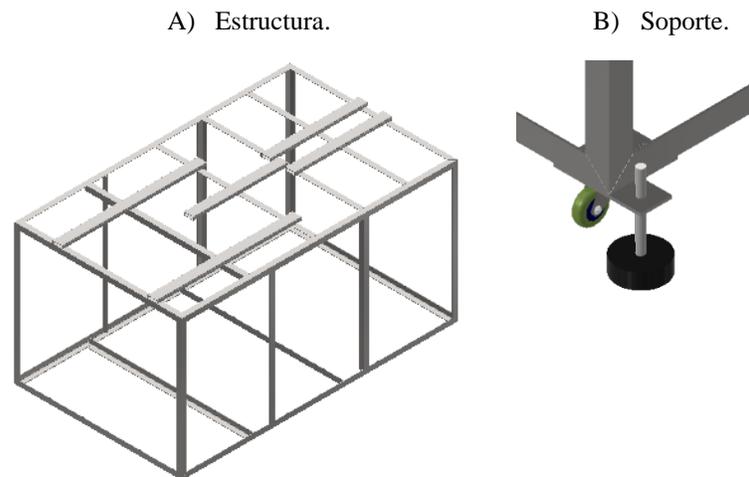


Fig. 17. Estructura base del Diseño 1.

Los sistemas colocados sobre la estructura de acero incluyen una parte del sistema de Común Riel, conformada por el Riel y el inyector, un mecanismo de protección contra fluidos de alta presión, e instrumentación para las técnicas Schlieren y Shadowgraph. Para garantizar la seguridad del operario durante los ensayos, se implementaron dos subsistemas construidos principalmente con acrílico. El primero consiste en dos láminas laterales de acero y tres tapas superiores y traseras azules, que protegen al usuario de posibles fugas de líquidos en las conexiones del inyector, el Riel y la bomba de alta presión. El segundo subsistema es un cubículo naranja que resguarda al operario del combustible líquido atomizado a distintas presiones. Finalmente, se

decidió usar el arreglo de la técnica Schlieren para el montaje experimental debido a su mayor cantidad de componentes, como se muestra en la **Fig. 18**.

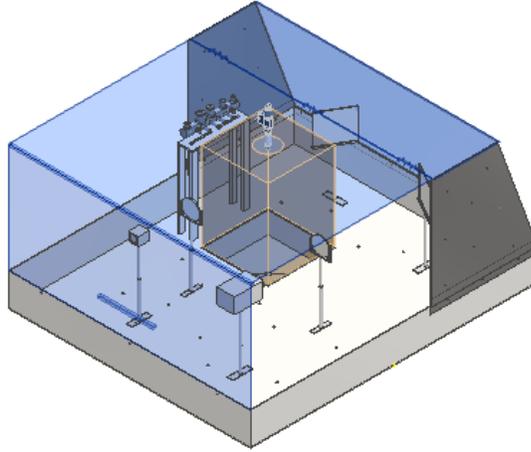


Fig. 18. Sistema experimental y protección del DISEÑO 1.

El sistema de velocidad variable, situado en la parte superior de la estructura base, se encarga de suministrar combustible a distintas presiones. El motor tiene la tarea de generar las RPM necesarias, y gracias a una bomba HP3 Denso, la presión del fluido de combustión se ajusta de manera proporcional al aumento de estas RPM, como se aprecia en la **Fig. 19**.

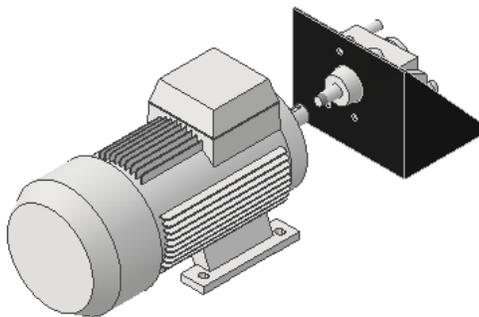


Fig. 19. Sistema de velocidad variable del DISEÑO 1.

A continuación, se aprecia los sistemas ensamblados en el diseño 1 final con las dimensiones generales en unidades de milímetros, **Fig. 20**.

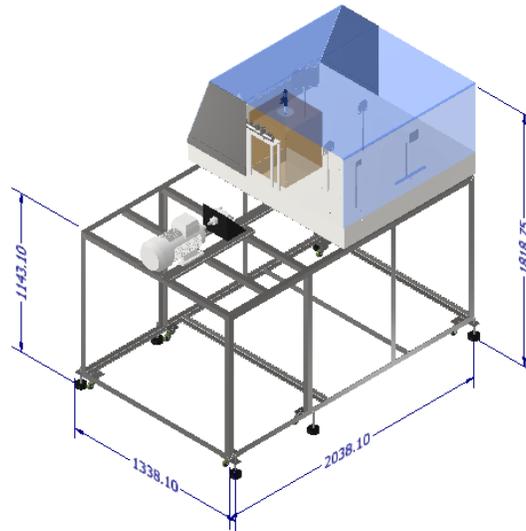
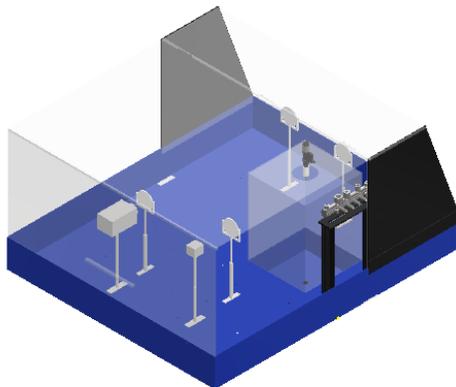


Fig. 20. Ensamble final del DISEÑO 1.

#### 5.1.4.2. Diseño 2

El segundo diseño presenta los mismos sistemas que el diseño 1: el sistema experimental y de protección, y el sistema de velocidad variable, como se muestra en la **Fig. 21**.

A) Sistema experimental y protección.



B) Sistema de velocidad variable.

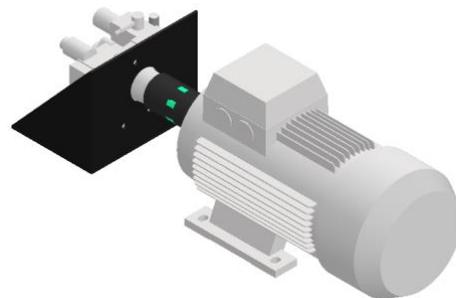


Fig. 21. Sistemas implementos del DISEÑO 1 al DISEÑO 2.

La estructura base está compuesta por dos secciones: la primera alberga el sistema experimental y de protección, mientras que la segunda aloja el sistema de velocidad variable. Estas secciones están construidas con perfiles cuadrados ( $1\frac{1}{4} \times 1\frac{1}{4} \times \frac{1}{8}$ ) y en forma de L ( $1\frac{1}{8} \times 1\frac{1}{8}$ )

x 1/8) de acero ASTM 36. A diferencia del diseño 1, se dividen para brindar mayor versatilidad en el movimiento y una organización más efectiva para futuros montajes. Esta configuración también reduce la transmisión de vibraciones del sistema de velocidad variable en comparación con el sistema experimental, lo cual es crucial para mantener condiciones óptimas en los experimentos. En la parte inferior de cada sección se han instalado rodamientos y estabilizadores en las esquinas, los cuales están agrupados en una placa, como se muestra en la Fig. 22.

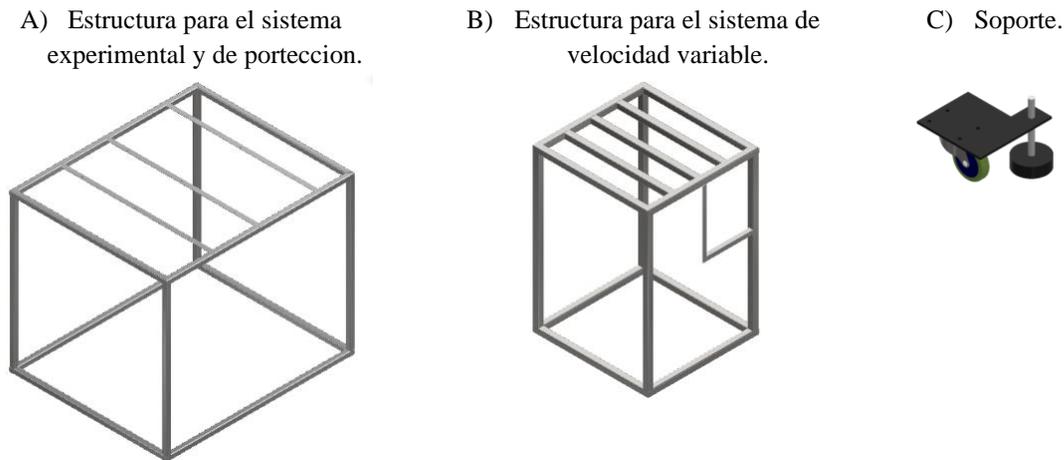


Fig. 22. Estructura base del Diseño 2.

Posteriormente, se presentan las dimensiones generales en milímetros del diseño 2, así como la conexión de los sistemas mencionados anteriormente, como se ilustra en la **Fig. 23**.

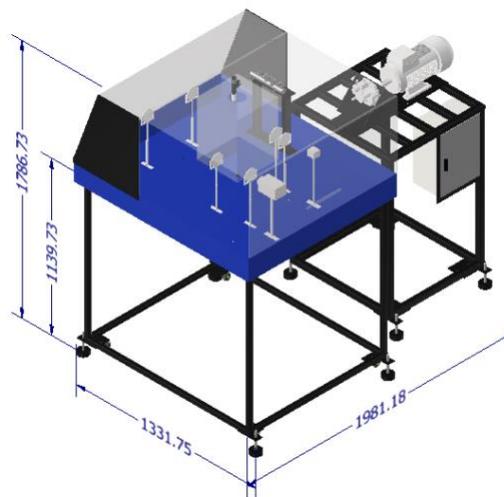


Fig. 23. Ensamble final del DISEÑO 2.

5.1.4.3. Selección

La selección de los dos diseños se fundamenta en la necesidad identificada. Los criterios para la selección del diseño son los siguientes: minimizar las vibraciones, siendo esto esencial para mantener la estabilidad del sistema y garantizar resultados precisos; un montaje robusto, el cual es crucial para soportar las condiciones de operación y ofrecer durabilidad; la seguridad del operario, siendo prioridad para evitar accidentes, especialmente en un entorno con altas presiones de inyección y líquidos inflamables; la ergonomía de pie, es vital para que los operarios trabajen cómodamente y sin fatiga, optimizando su rendimiento; e integración de técnicas ópticas para la caracterización de la atomización, imprescindible para obtener datos fiables y detallados. Estos criterios aseguran un diseño optimizado que no solo cumple con las exigencias técnicas y de seguridad, sino que también mejora la eficiencia y comodidad operativa. No obstante, se tiene que los diseños cumplen con las dimensiones según el lugar de operación, por tanto, no se considera un criterio para tener en cuenta.

Se procede hacer la matriz de decisiones, en la cual se asignó un factor de ponderación a cada criterio según su importancia en el diseño. Las puntuaciones para cada criterio varían de 1 a 10, donde 10 indica el mejor cumplimiento y 1 indica el menor. Los resultados se detallan en la **TABLA III.**

TABLA III. MATRIZ DE DECISIÓN.

	<b>Minimizar vibraciones.</b>	<b>Montaje robusto.</b>	<b>Seguridad del operario.</b>	<b>Ergonomía de pie.</b>	<b>Integración de técnicas ópticas.</b>	<b>RANGO</b>	
<b>Factor de ponderado</b>	0.20	0.10	0.35	0.15	0.20	1	
<b>DISEÑO 1</b>	5	1.00	6 0.6	7 2.45	5 0.75	7 1.40	6.2
<b>DISEÑO 2</b>	9	1.80	5 0.5	7 2.45	7 1.05	7 1.40	7.2

Como se aprecia en la tabla de la matriz de decisiones se optará por el diseño 2, puesto que este cuenta con una mayor puntuación. Por ende, se empezará con el diseño a detalle.

5.1.5. *Diseño a detalle*

En el diseño a detalle se analizarán los componentes o sistemas que se consideran relevantes para el diseño del banco, de igual forma los planos a detalles para la fabricación de las piezas y el posterior ensamble de este.

5.1.5.1. *Sistema de velocidad variable*

Se hizo un estudio orientado en dos sistemas de control de velocidad de dos bancos de pruebas comerciales, en los cuales se encontró el primero de la empresa OUS UNIVERSAL SOLUTIONS, el banco TD-7500 EXTRA X-UNIT y el segundo de la empresa CARBON ZAPP con el banco PTBRX-A (CZ-008715) [29], [30]. Los anteriores bancos con sus características principales se pueden apreciar en la **TABLA IV**.

TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL BANCO TD-7500 Y PTBRX-A.

Descripción		Unidades	TD-7500	PTBRX-A
<b>Dimensiones de la maquina</b>	Largo	mm	1635	950
	Ancho	mm	1060	1300
	Alto	mm	1708	1610
<b>Peso</b>	-	kg	740	520
<b>Fuente de alimentación principal</b>	Fases	Número	3P	3P
	Voltaje	VAC	380-220	380-480
	Frecuencia	Hz	50/60	50/60
	Corriente	Amperio	40 (Controlado por el inversor)	32
	Max consumo	kVA (380V)	15	21
<b>Presión máxima de la célula de carga</b>	-	Bar	5000	2800
<b>Presión de suministro</b>	-	Bar	0-6	0-8
<b>Depósito de aceite de prueba</b>	-	Litros	42	44

Se aprecia en la tabla que el consumo máximo de un banco promedio para una fuente de alimentación de 380 VAC es de 15-21 kVA, es decir, utilizan un motor de 20 HP – 28 HP, puesto

que estos están diseñados para diferentes tipos de sistemas de alta presión como Denso, Bosh, Delphi o Siemens con aplicaciones a varios tipos de vehículos según la carga de trabajo que están expuestos. Teniendo esto presente, se consideró implementar una fuente de 4 HP para el sistema, esto por las condiciones del sistema Común riel seleccionado y la asesoría por la empresa EXA AUTOS PARTS SAS [31]. Sin embargo, se deja claridad que el banco de prueba puede ser utilizados para sistemas que requieran una menor o igual alimentación.

El motor seleccionado es un motor trifásico – SIMOTICS 4 HP a 1800 RPM – 220V/380V/440V [32] y el variador de velocidad es SINAMICS 220VAC – 4HP [33]. En el manual del variador antes referenciado se encuentra la distribución del gabinete para el correcto funcionamiento del variador, según esto se seleccionó un gabinete con las dimensiones de 400 mm x 300 mm x 200 mm. Asimismo, los componentes faltantes para el montaje del sistema de control de velocidad se encuentran descritos como una observación en los planos. La descripción general de los componentes mencionados se muestra en la **TABLA V**.

TABLA V. COMPONENTES SELECCIONADOS DEL SISTEMA DE VELOCIDAD VARIABLE.

A) Motor trifásico – SIMOTICS 4HP a 1800 RPM – 220V/380V/440V	B) Variador de velocidad es SINAMICS 220VAC – 4HP
---	---



SIMOTICS GP tipo de motor: 0CV3105B motor de baja tensión, IEC rotor de jaula, refrigeración natural, IP55 clase de temperatura 155(F) según 130(B) caja de fundición gris 4 polos \* tam. 100L \* 60 Hz: 4 CV 220 DD / 380 YY /440 DV (60 Hz) IM B3 Sin protección Caja de conexión en la parte superior D80 = placa de características Andina, manual en español D81 = etiqueta de energía para Colombia.

SINAMICS V20 200-240 V 1 AC -15/+10% 47-63 Hz 3 kW con 150% de sobrecarga durante 60 s sin filtro E/S: 4 DI, 2 DQ, 2 AI, 1 AO bus de campo: USS/Modbus con panel de operador básico integrado protección IP20/UL sin caja tamaño: AD 136 × 176,5 × 160 (An × Al × P).

---

#### *5.1.5.2.Sistema de alta presión*

El sistema de alta presión seleccionado, también conocido como común riel, se compone de tres elementos fundamentales que trabajan de manera conjunta para optimizar la inyección de combustible en motores diésel. Para el diseño del banco se contaron con los siguientes componentes: la bomba de alta presión para motor 4HK1 Isuzu, utilizada en aplicaciones como Chevrolet NPR, NQR y FRR, se encarga de comprimir el combustible a presiones extremadamente elevadas, lo que es esencial para garantizar una combustión eficiente. Este combustible a alta presión es enviado al riel de presión Isuzu NHR, que actúa como un depósito regulador, asegurando que el suministro hacia los inyectores sea constante y mantenga la presión adecuada en todo momento. Finalmente, el inyector para motor 4HK1 Isuzu con cuatro orificios de inyección y atomización radial, diseñados también para aplicaciones NPR, NQR y FRR, estos son controlados para tener una inyección precisa del combustible en la cámara de combustión. Estos inyectores son activados de manera sincronizada para atomizar el combustible en finas partículas, promoviendo una combustión completa y eficiente. En conjunto, estos tres componentes forman el sistema de alta presión, el cual nos permitirá cumplir los objetos de este trabajo.

#### *5.1.5.3.Distribución del sistema óptico*

El espacio de trabajo cuenta con una base de dimensiones 1300 mm x 1106 mm, en la que se han dispuesto dos secciones ubicadas de manera paralela. Estas secciones están diseñadas con orificios para la correcta posición de los componentes utilizados en las dos técnicas ópticas que se aplican en las pruebas. Una de las secciones presenta un área superficial mayor, lo que permite que los componentes del sistema que no requieren manipulación constante durante las pruebas puedan estar allí, asegurando que el contacto físico con estos elementos sea mínimo. Esto favorece la estabilidad del montaje y reduce el riesgo de interferencias o movimientos que puedan afectar los resultados de las pruebas.

Por otro lado, la segunda sección está destinada a la cámara y al inyector, elementos que deben ser ajustados de manera frecuente para optimizar el enfoque y mejorar la calidad de las imágenes. Aquí, se requiere una manipulación cuidadosa para conseguir los ángulos y la nitidez

deseados. En estas áreas de trabajo se han colocado dos espejos estratégicamente en cada sección, permitiendo ajustar un ángulo entre ellos permitiendo una optimización del espacio requerido para el montaje de los elementos en las pruebas. Además, se ha instalado un soporte comercial para minimizar las vibraciones del inyector y asegurar la estabilidad del sistema. En la **Fig. 24** se muestra la distribución del espacio, incluyendo la ubicación del sistema óptico, el soporte y del inyector, mientras que los planos de los detalles específicos de las dimensiones se encuentran en el anexo C.

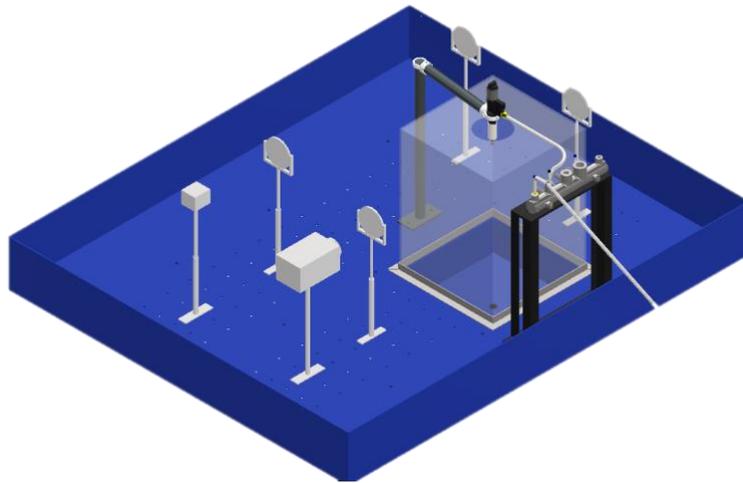


Fig. 24. Distribución del sistema óptico.

#### 5.1.5.4. Análisis estructural

Se empieza con la estructura del diseño 2, el análisis de esta se hace por medio del programa ANSYS para determinar la deflexión máxima según los criterios que se establecerán para la simulación. A continuación, se procede hacer una explicar concisa del proceso que se hizo para la obtención de los resultados.

1. Los criterios a consideración para la simulación son los siguientes:

1. Para la estructura donde estará ubicado el montaje experimental se considera el peso de la base del banco de acero galvanizado con densidad de  $7.85 \text{ g/cm}^3$  es de  $48.11 \text{ kg}$ , **Fig. 25**. Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que se debe manejar un peso de  $65 \text{ kg}$  en la

parte interna de la estructura que soporta la base, ya que el peso en esta parte está sujeto solamente al equipo experimental y otros accesorios, cubiertos por el excedente de 16.89 kg. En la parte externa se trabaja con un peso de 100 kg, puesto que en esta parte esta soportado el sistema de protección del banco de prueba y siendo el policarbonato un material con una densidad de  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , se toma como referencias la tapa de protección (**Fig. 26**) con un peso de  $8.891 \text{ kg}$  siendo esta la de mayor peso del sistema. Por lo cual, considerando los demás componentes y accesorios del sistema de protección se tiene puede concluir que se tiene un peso de seguridad aproximado de 50 kg. No obstante, se debe indicar que el programa inventor nos permitió conocer las propiedades de los componentes antes enunciados.

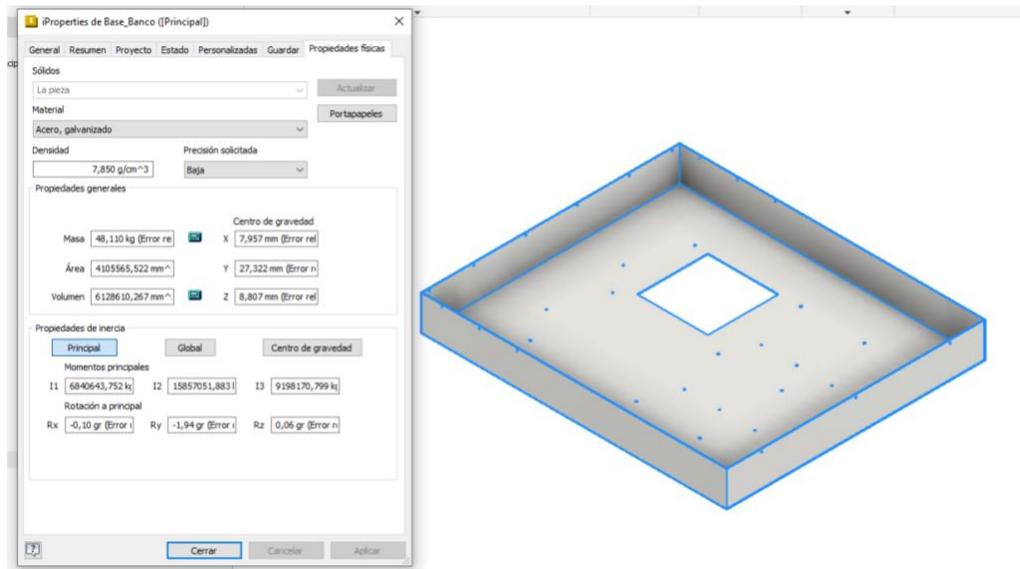


Fig. 25. Base del banco de acero galvanizado.

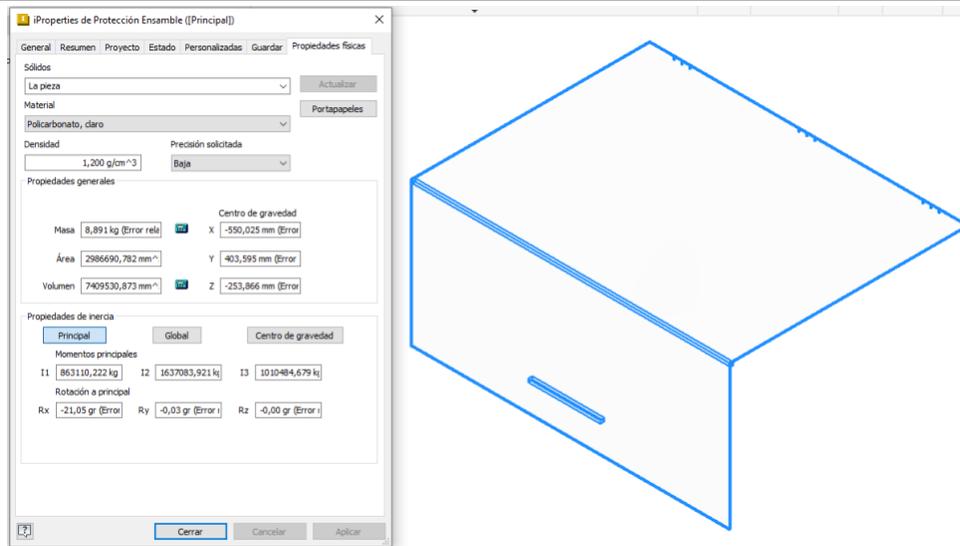


Fig. 26. Tapa de protección de polycarbonato.

2. La estructura que alberga el sistema de velocidad variable, incluyendo el motor de 4 HP, la bomba de alta presión, el gabinete de control y otros accesorios, se considera crítica. En particular, el motor de 4 HP, que pesa 33 kg [32], es un elemento clave. Considerando estos factores, se estima un peso total de 150 kg en la parte superior de la estructura, dado que esta área soporta el peso de la bomba de alta presión y otros componentes. Por lo tanto, se ha establecido un factor de seguridad de 4.5.

## 2. Simulación ANSYS

La simulación tiene la finalidad de provocar una sobrecarga del sistema y evaluar el comportamiento de los subsistemas. En este sentido, se optó por situar diversas cargas de gran magnitud en distintas áreas del sistema, a fin de evaluar su comportamiento ante dichas situaciones y prevenir posibles fallas o daños.

**Material:** El material utilizado en la simulación es una variante genérica de acero estructural, cuya selección fue realizada con anterioridad y se encuentra establecida en el programa, tal y como se puede apreciar en la **Fig. 27**.

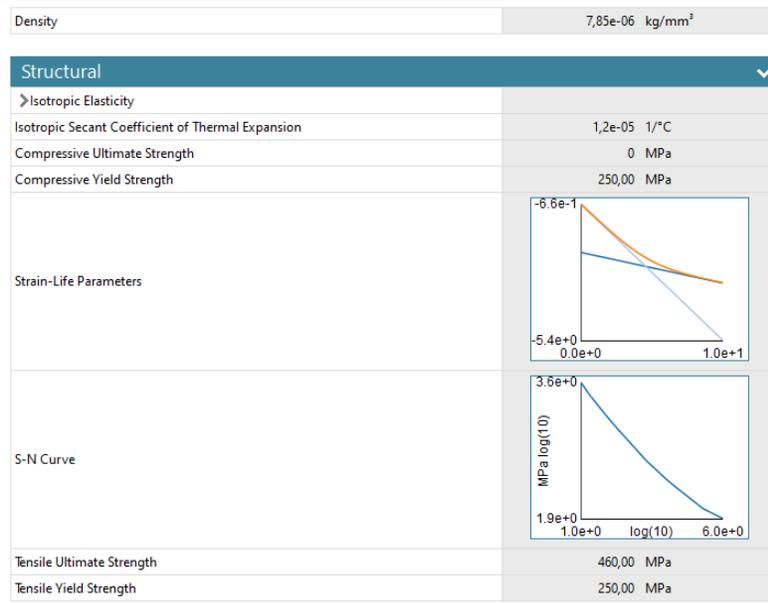


Fig. 27. Material base.

**Simplificación:** La base consiste en un ensamble diseñado de diferentes secciones de perfilera tipo L y cuadradas cumpliendo la normativa AISC, por esto se utiliza el comando “Prepare” del “SpaceClaim” para extraer la sección transversal de tubo 2D y convertirla en 1D para facilitar los cálculos (Fig. 28).

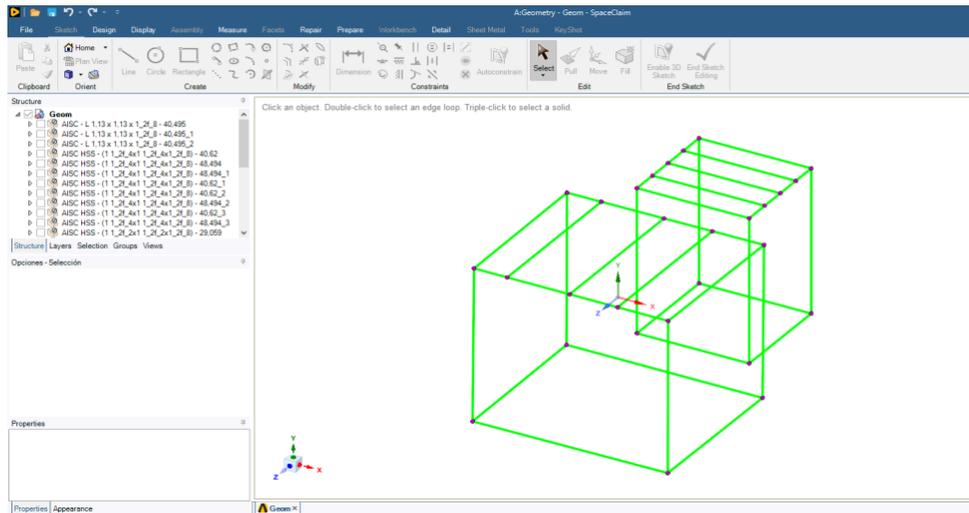


Fig. 28. Geometría de la base.

**Mallado:** Para el mallado fue seleccionado un orden elemental lineal, el cual es apropiado para este tipo de simplificaciones partiendo de un tamaño de elementos de 10 mm (Fig. 29).

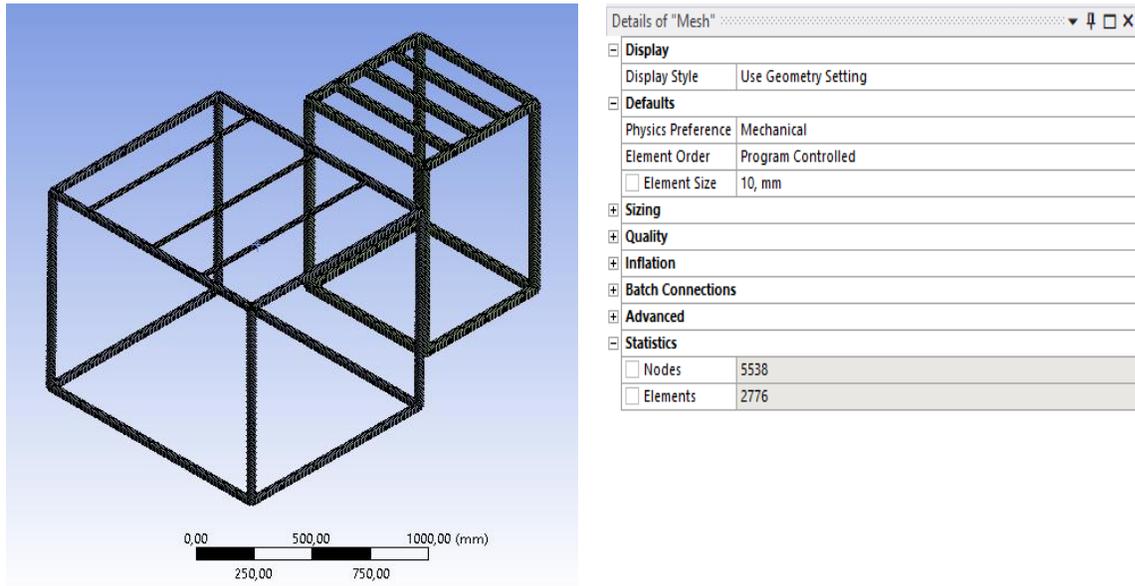


Fig. 29. Mallado de la base.

**Condiciones de borde:** En la presente sección se requiere la ubicación de las cargas correspondientes al elemento en diseño. Se decidió colocar las cargas con respecto a los factores de seguridad mencionados con anterioridad en cada sector para evaluar el comportamiento, así como también los apoyos fueron analizados como una cara fija del sistema. A continuación, se presentan los datos ingresados, **Fig. 30**.

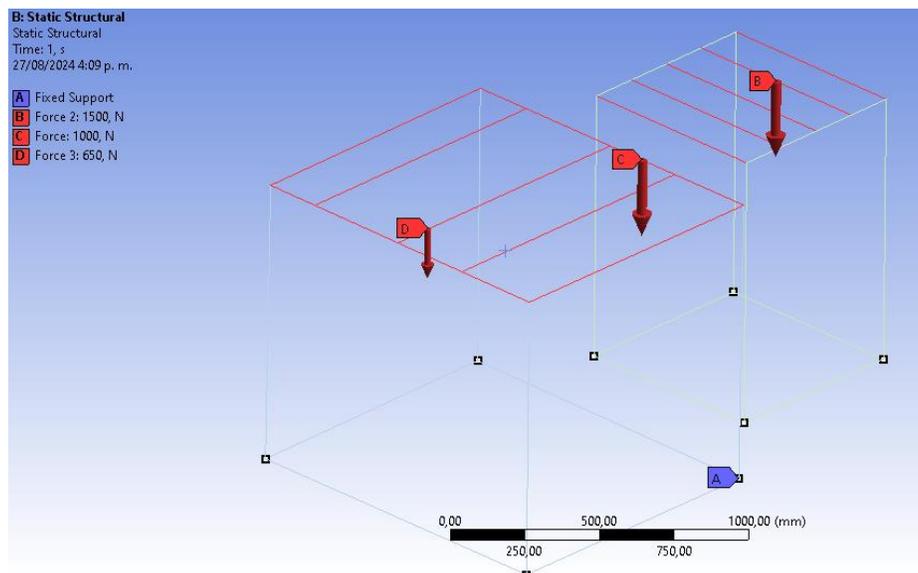


Fig. 30. Carga en la base y fijación de cargas.

**Análisis de convergencia:** Por las condiciones que presenta la simulación el programa no puede hacer el análisis de convergencia con el esfuerzo directo máxima de la simulación. Por ende, se procede a observar tres modelos diferentes según el tamaño del elemento de la malla para determinar si los resultados obtenidos son veraces, **TABLA VI**. Finalmente, se pueden apreciar en la tabla que los valores máximos del esfuerzo directo según la longitud del elemento esta fluctuando entre el 5%, cabe mencionar que para nuestro caso se hizo la parametrización 3 veces, puesto que son las mínimas necesarias.

TABLA VI. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.

Longitud del elemento (mm)	Número de Nodos	Esfuerzo directo Máxima (MPa)
10	5538	0.076815
20	2784	0.076794
30	1874	0.07676

**Resultados:** Reconociendo las configuraciones utilizadas durante el proceso de simulación, se han obtenido resultados que indican que la estructura evaluada experimenta esfuerzos alrededor de 0.071491 MPa, que son muy por debajo del límite elástico del material ( $2e+05$  MPa). Además, se ha observado que la deformación máxima es de 1.6004 mm. Por lo cual, las alteraciones geométricas de la estructura son mínimas y no representan un riesgo para su integridad y los ensayos experimentales. En conclusión, la estructura es capaz de soportar correctamente una elevada carga, evidentemente con zonas más afectadas que otras, pero no determinante para realizar un cambio al diseño **Fig. 31** y **Fig. 32**.

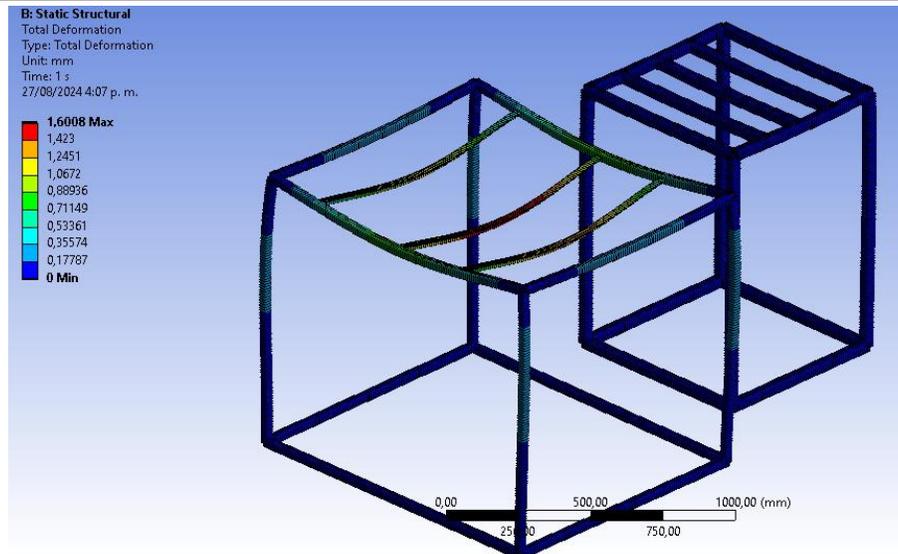


Fig. 31. Deformación de la base.

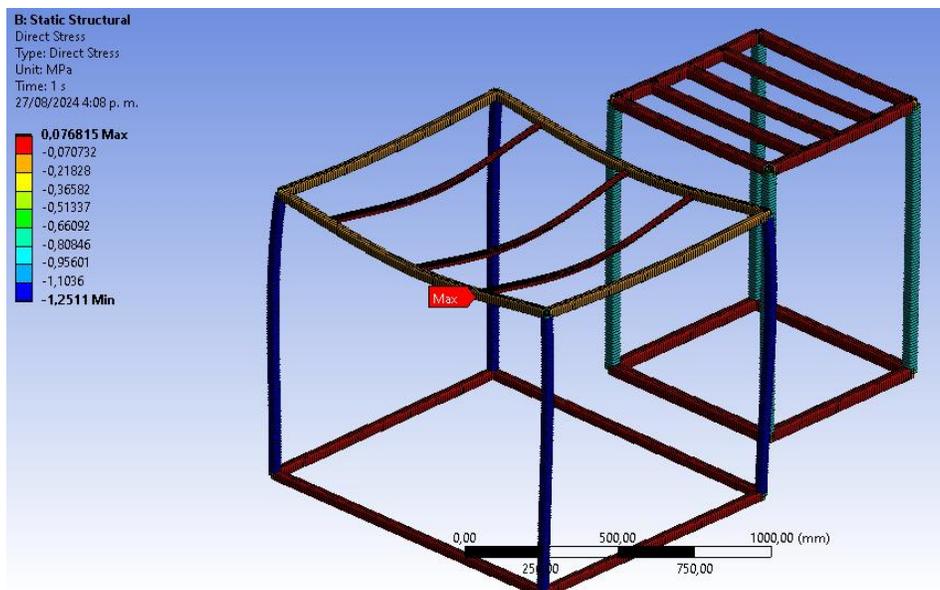


Fig. 32. Esfuerzo directo.

#### 5.1.5.5. Seguridad del operario

Se hizo un estudio preliminar para la aplicación del sistema de protección para el operario, en el cual se consideraron los materiales y mecanismos en los diferentes modelos industriales [34], [35]. Por consiguiente, se encontró que el acrílico es el material predominante como barrera de

---

protección contra fallas en los sistemas de alta presión y los mecanismos habituales son compuertas con apertura horizontal o vertical con un agarre por medio de una manija.

Basándose en los antecedentes y los requerimientos del sistema. Igualmente, la manipulación de las distintas unidades del sistema óptico, se diseñó una estructura con una tapa de acrílico con apertura vertical, la cual se puede sostener por medio de una varilla movable cuando está abierta, en mientras no sea necesaria la apertura de esta se mantiene fijada por medio de tornillería a la base. Además, los laterales poseen una parte en acrílico reforzada con una lámina metálica y un soporte de estructura metálico con sección transversal cuadrada en los bordes donde está ubicado el soporte de la tapa movable con la intención de darle firmeza a la estructura. En los laterales se dejó un espacio de apertura, el motivo de esto es la manipulación de los sistemas ópticos.

La parte superior y trasera están formadas también por acrílico. No obstante, se hace mención que el diseño de la tapa y la parte que está en contacto con esta, posee refuerzos metálicos en los bordes, esto para evitar algún tipo de fractura del material. Asimismo, se indica que el acrílico utilizado en la estructura tiene espesor de 5 milímetros, **Fig. 23**.

#### *5.1.5.6. Planos a detalle*

Se deben contar con planos detallados de los componentes y los planos de ensamble, puesto que brinda la precisión y claridad al proceso de construcción y operación del sistema. Estos planos permiten una visualización exacta de las dimensiones, posiciones y relaciones entre los diferentes elementos, lo que asegura un montaje correcto y eficiente, evitando errores que puedan afectar el desempeño del sistema. Además, facilitan el mantenimiento y posibles ajustes que se requieran durante las pruebas, al proporcionar una guía clara de cómo se interconectan y funcionan los componentes en conjunto. En el anexo C se encuentran estos planos, donde se especifican tanto las medidas exactas de cada componente como el ensamblaje general, garantizando una referencia técnica completa para la correcta implementación del sistema. La herramienta Inventor de Autodesk se utilizó para la elaboración de los planos.

### 5.1.6. Ensamble

El ensamblaje inicial del banco de prueba se realizó mediante el programa Inventor, lo que permitió obtener una visión clara de cómo debía quedar la estructura antes de proceder a su fabricación. Este modelo digital fue desarrollado con base en los criterios previamente establecidos, ofreciendo una solución eficiente a los requerimientos técnicos del proyecto. El diseño propuesto para el ensamblaje puede observarse en la **Fig. 33**. Además, en los planos incluidos se encuentran las observaciones y detalles necesarios para finalizar el montaje de los componentes de manera precisa.

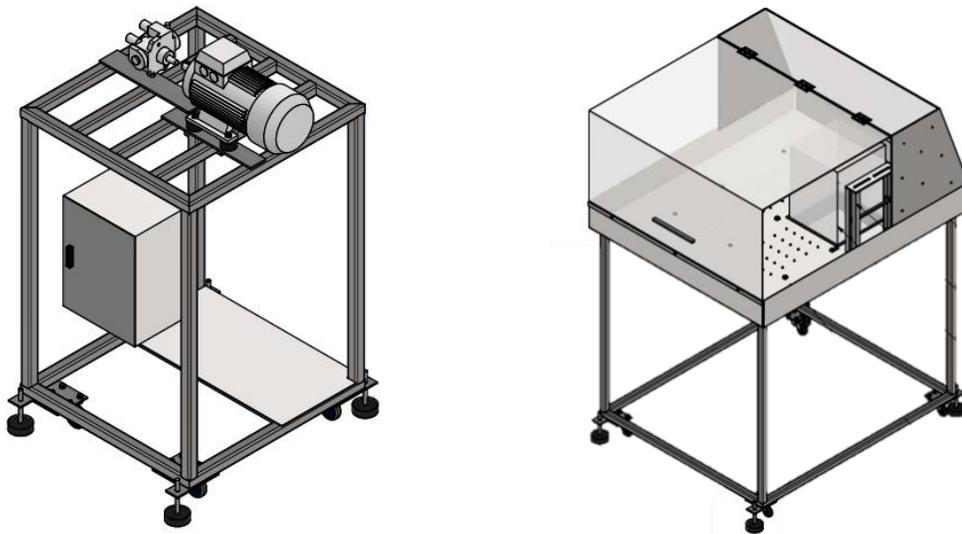


Fig. 33. Diseño del ensamble propuesto.

A partir de este CAD, se procedió con el ensamblaje final de la estructura. Durante la fabricación, se implementaron algunas modificaciones sugeridas por el equipo de metalmecánica para mejorar la funcionalidad y robustez del diseño. Una de las modificaciones más relevantes fue la inclusión de una estructura de refuerzo, diseñada para asegurar que el acrílico, que actúa como sistema de protección para el operario, permanezca estable y no se vea afectado durante el funcionamiento. Estos cambios pueden apreciarse en las **Fig. 34**, donde se observan las mejoras realizadas al diseño original. Además, se presenta el montaje final que incluye la configuración interna del gabinete, el cual cuenta con las protecciones para el sistema de velocidad variable, **Fig.**

35. Este proceso de ajustes asegura que el banco de prueba cumpla con las normativas de seguridad y funcionalidad, garantizando su operatividad y protección para el usuario.



Fig. 34. Ensamblaje final del banco de pruebas.



Fig. 35. Gabinete del sistema de velocidad variable.

#### 5.1.7. Puesta a punto

El funcionamiento del banco de prueba se controla mediante el emulador CIT800 [36], el cual tiene la función de enviar los pulsos necesarios para activar el inyector. Durante el funcionamiento del banco, se capturaron fotografías que se muestran en la **Fig. 36**, donde se puede observar el sistema en operación. Se comprobó que el banco cumple con los objetivos planteados: minimizar las vibraciones, garantizar un montaje robusto, asegurar la seguridad del operario y ofrecer una ergonomía adecuada para el trabajo de pie.

Sin embargo, aunque el banco cumplió con estos aspectos, no se logró integrar completamente las técnicas ópticas previstas, como se esperaba. Esto se debió a la falta de identificación y monitoreo de la presión en el sistema, un factor crucial para el funcionamiento óptimo del banco de pruebas. Por lo tanto, es necesario implementar un sistema adicional que permita medir y visualizar la presión del riel común, adaptándose a los diferentes tipos de inyección presentes en un motor diésel. Esta mejora es esencial para asegurar que el banco pueda cumplir con todos los requisitos técnicos y experimentales. No obstante, se evidenciará en la sección dedicada al diseño experimental que este banco de prueba es adecuado para realizar experimentos utilizando técnicas ópticas avanzadas, como Schlieren y Shadowgraph.

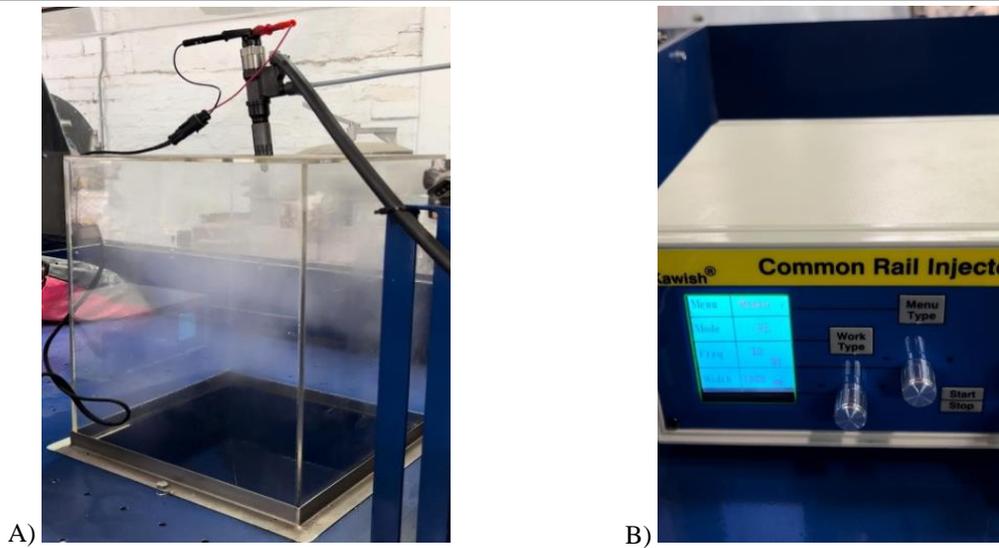


Fig. 36. Puesta a punto. A) funcionamiento del banco, B) Emulador CIT800.

#### 5.1.8. Manual de operación

Se ha desarrollado un manual de operaciones que proporciona instrucciones detalladas sobre el funcionamiento del banco de prueba, orientado a que el personal lo utilice de manera segura y eficiente. Este manual cumple con las normas de seguridad y calidad, asegurando que el equipo sea utilizado correctamente y se minimicen los riesgos asociados a su operación. Aunque su enfoque principal es el funcionamiento del banco, incluye pautas esenciales para su manejo durante las pruebas. El manual está disponible en el anexo D del trabajo, ofreciendo toda la información necesaria para que los usuarios comprendan el correcto uso del equipo y puedan seguir los procedimientos adecuados.

---

## 5.2. *Diseño experimental*

### 5.2.1. *Definición del objetivo*

El objetivo experimental es determinar cuál de las técnicas ópticas, Shadowgraph o Schlieren, es la más apropiada para el análisis de fluidos atomizados a presión atmosférica, específicamente agua tomada de EPM (Empresas Públicas de Medellín), las cuales están bajo condiciones de presión entre 0 a 5 bar. De igual manera, se trabajan con las dimensiones establecidas en el diseño del banco para el posicionamiento de los componentes de las diferentes técnicas, esto para determinar si en el banco se puede realizar estos estudios, puesto que no se pueden hacer estudios por las condiciones antes mencionadas.

La investigación se enfocará en evaluar el comportamiento del fluido al ser inyectado a través de tres diferentes tipos de inyectores, con el fin de identificar la técnica que proporcione imágenes más claras y detalladas del patrón de flujo. Al no tratarse de un proceso de combustión, el interés radica en obtener una visualización precisa de las propiedades físicas del fluido en condiciones controladas. Las imágenes generadas serán analizadas para comparar la resolución, el contraste y la capacidad de cada técnica para revelar la morfología del fluido atomizado. El análisis permitirá establecer cuál de las técnicas es más eficiente para estudios experimentales en condiciones similares, lo que proporcionará un enfoque metodológico adecuado para investigaciones futuras.

### 5.2.2. *Diseño del experimento*

Para el diseño del experimento se plantea un esquema de los componentes que se tuvieron en cuenta para cumplir con los objetivos del experimento. Se consideran como equipos medidores: un manómetro horizontal con cabeza de 2" de 10 bar con precisión de  $\pm 0.2$  y un indicador de temperatura analógico de 120 °C con precisión de  $\pm 2.0$ . Se utiliza como equipo regular una válvula de globo de ¼". Además, se desarrolló un montaje donde desde la parte de la válvula hasta el adaptador del inyector tiene una distancia lineal de 27 cm con la misma sección transversal de ¼", permitiendo que se desarrolle el fluido turbulento, puesto que la distancia es mayor a 10 veces el

diámetro de los diferentes inyectores garantizándonos una medida del fluido eficaz [37]. Igualmente, se diseñó el adaptador para los diferentes tipos de inyectores, esto se hizo teniendo presente el diseño del adaptador comercial de la marca DELAVAN [38], el plano de este se puede apreciar en el anexo A. Los inyectores utilizados corresponden a dos de la marca Monarch de la serie R con un diámetro de apertura de boquilla de 1 mm y 1.5 mm [38] y una boquilla de pulverización Danfoss, OD S, 0.50 gal/h, 1.87 kg/h, 60 °, Sólido [39]. El esquema correspondiente que describe el montaje está en la **Fig. 37**.

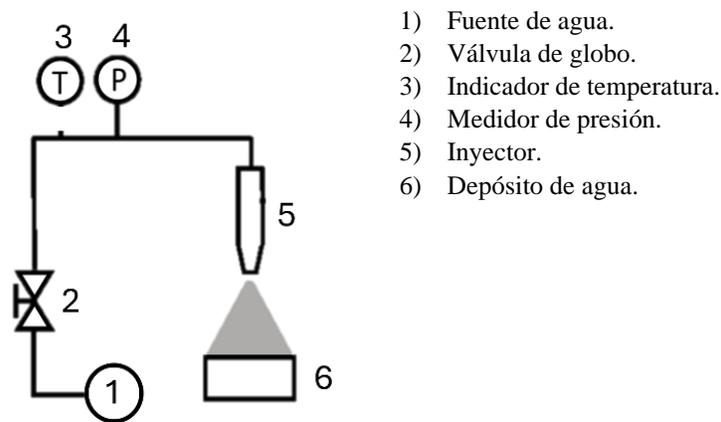
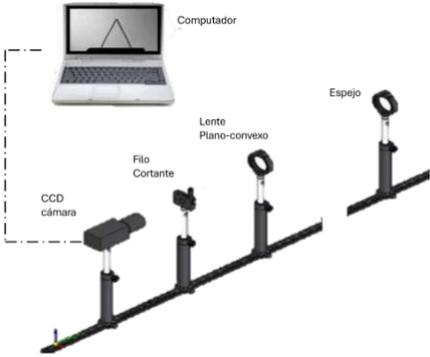
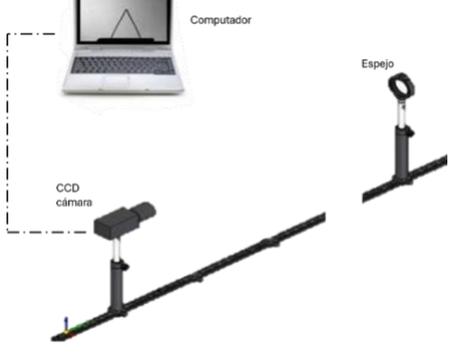
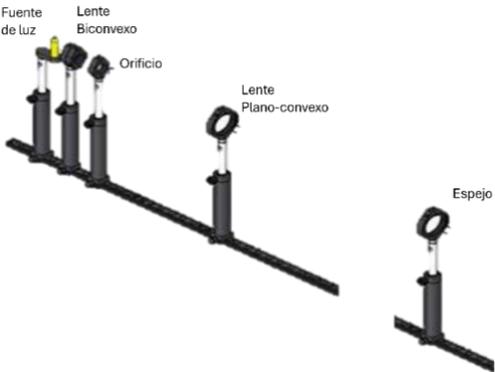


Fig. 37. Esquema del montaje de pulverización.

El montaje de los elementos del sistema para la toma de las imágenes de las técnicas Schlieren y Shadowgraph, se aprecia en la **TABLA VII**. Se debe considerar que se tiene dos subsistemas por cada técnica, los cuales se colocan paralelamente preservando las medidas estipuladas en el diseño del banco de prueba, esto es para tener la mayor fidelidad al diseño principal y corroborar que se pueden hacer pruebas ópticas en este. Adicionalmente, los elementos ópticos utilizados del grupo GASURE, los cuales son los mismos en las dos técnicas son: los espejos, lente plano convexo, el orificio, lente biconvexo y fuente de luz. Por consiguiente, solo se mencionan en la ilustración los componentes más representativos en cada técnica. Igualmente, la CCD cámara usada para ambas técnicas es una scA1400-30gm/gc [40].

TABLA VII. MONTAJES ÓPTICOS DE SHADOWGRAPH Y SCHLIEREN.

	Técnica Schlieren	Técnica Shadowgraph
<b>Derecha</b>		
<b>Componente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lente: Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II [41].</li> <li>- Lente plano convexo.</li> <li>- Filo cortante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lente: APO MACRO 150mm F2.8 EX DG OS HSM [42].</li> </ul>
<b>Izquierda</b>		

Implementando los dos sistemas se tiene que para Shadowgraph el montaje de pulverización está en el subsistema de la derecha entre la CCD cámara y el espejo, en la técnica Schlieren está en el también en el subsistema de la derecha entre el lente plano convexo y el espejo.

Para garantizar las presiones partimos sabiendo que EPM trabaja con la norma técnica colombiana NTC 1500, el cual es el código colombiano de fontanería [43], [44], este nos menciona que la presión no puede exceder los 550 kPa. Por ende, se condenó (cierra) el último tramo de tubería galvanizada del arreglo del inyector para encontrar la presión con la cual llega al laboratorio, esta oscila entre los valores de 4-5 bar. Por consiguiente, teniendo claridad sobre los

montajes y las presiones se parte al diseño para la toma de datos de los diferentes experimentos para las dos técnicas con la pertinente medición de la temperatura ambiente, esto se aprecia en la **TABLA VIII**. Por último, se realizarán 3 repeticiones de los diferentes experimentos para tener una muestra representativa.

TABLA VIII. DISEÑO MUESTRAL.

<b>Experimento</b>	<b>Tipo de inyector</b>	<b>Presión de inyección [bar]</b>	<b>Número de datos</b>
<b>1</b>	Monarch R 1 mm	1 bar	500
<b>2</b>		2 bar	500
<b>3</b>		3 bar	500
<b>4</b>	Monarch R 1.5 mm	1 bar	500
<b>5</b>		2 bar	500
<b>6</b>		3 bar	500
<b>7</b>	Danfoss	2 bar	500
<b>8</b>		3 bar	500

### 5.2.3. Configuración del banco de prueba

En el laboratorio GASURE, se hace la selección de equipo e implementos ópticos. Una vez seleccionados los materiales, se procedió a realizar la alineación y calibración de los componentes ópticos según el diseño experimental, asegurando que los haces de luz se enfocaran adecuadamente y fueran capturados por las cámaras, siendo el montaje final de cada técnica esencial para la captura de imágenes de alta calidad, las cuales permitieron observar variaciones en el flujo y en el índice de refracción del medio en condiciones controladas. En las **Fig. 38** y **Fig. 39** se presentan las configuraciones finales de las técnicas ópticas dentro del laboratorio GASURE.

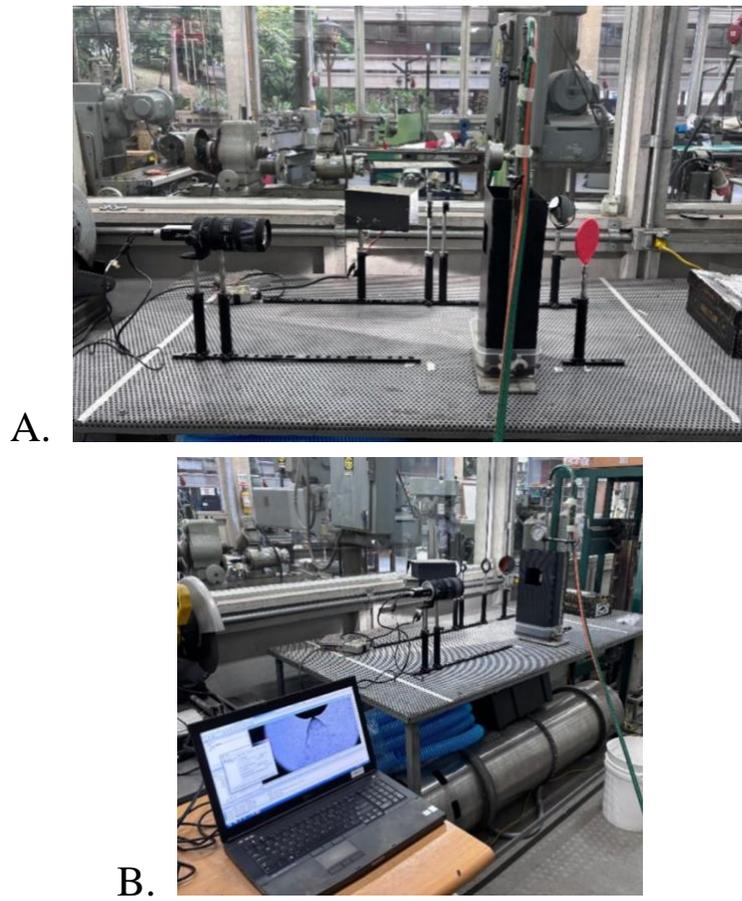


Fig. 38. Montaje del Sistema para Shadowgraph. A. Vista del sistema óptico, B. Vista total del sistema.



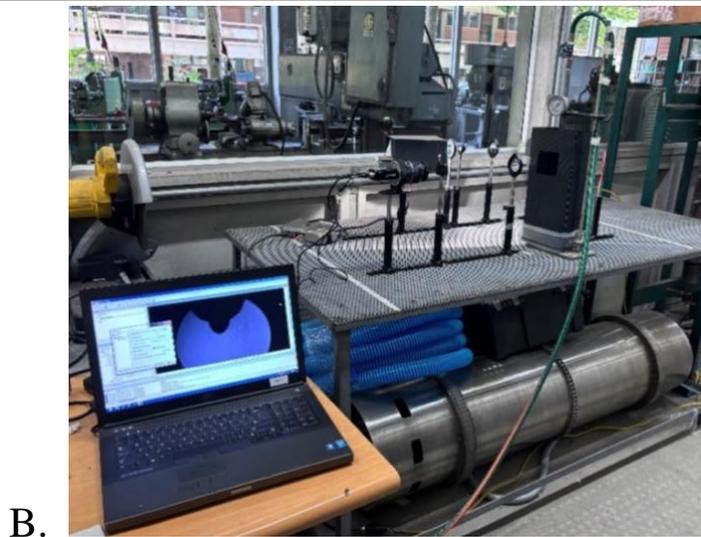


Fig. 39. Montaje del Sistema para Schlieren. A. Vista del sistema óptico, B. Vista total del sistema.

Se finaliza con el montaje del sistema de inyección, es decir, el sistema compuesto por: dos longitudes lineales de 11 cm de tubo de acero galvanizado de 1/4", manómetro de 10 bar, unión tipo T de 1/4", unión hembra-hembra 1/4", válvula de globo de 1/4", adaptador e inyector. Lo anterior, se puede apreciar en la **Fig. 40**.



Fig. 40. Montaje del sistema de inyección.

---

El tratamiento de los datos se hace por medio del programa Python que superponen 500 imágenes tomadas a 30 fps para después por medio del programa ImageJ identificar el ángulo promedio según los experimentos.

#### *5.2.4. Ejecución y análisis de datos experimentales.*

Para cumplir con los objetivos del diseño experimental, se comienza procesando las imágenes obtenidas, teniendo en cuenta que las presiones presentaron un margen de error de  $\pm 0.2$  bar. Este error puede haberse originado debido a la interacción entre la geometría interna del inyector y la presión del fluido suministrado por EPM. El código empleado en Python para el procesamiento de las imágenes se encuentra disponible en el anexo B, proporcionando detalles sobre los algoritmos y parámetros utilizados. Además, la temperatura ambiente durante la realización de todos los experimentos fue de 26 °C y a la presión local de la ciudad de Medellín a 1500 m sobre el nivel del mar que refleja 845 mbar.

En la **Fig. 41** se muestran las imágenes obtenidas mediante la técnica óptica Schlieren, las cuales representan la imagen promedio resultante de la superposición de 500 fotografías, de acuerdo con los criterios establecidos en la tabla de diseño muestral. Además, en la **Fig. 42** se pueden observar las imágenes generadas utilizando la técnica Shadowgraph, que permite visualizar detalles específicos de la dinámica del fluido. En las imágenes obtenidos por la técnica Schlieren se aprecia que no cuenta con el mismo formato que en Shadowgraph, esto es por el tipo lente que se usaron al momento de realizar las pruebas y por la misma fenomenología de cada técnica. Sin embargo, esto no afecta la discusión para solventar el objetivo experimental.

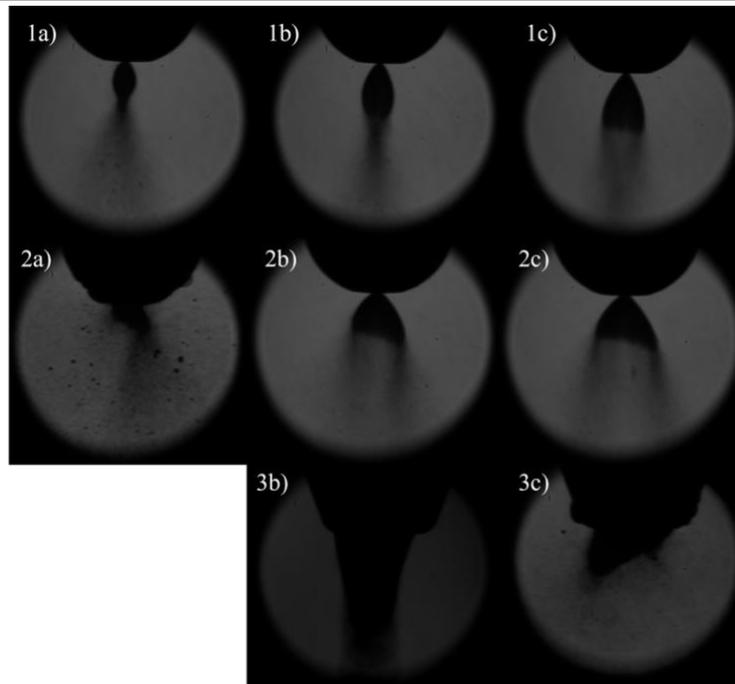


Fig. 41. Imágenes Schlieren para inyectores: (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm, (3) Danfoss y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.

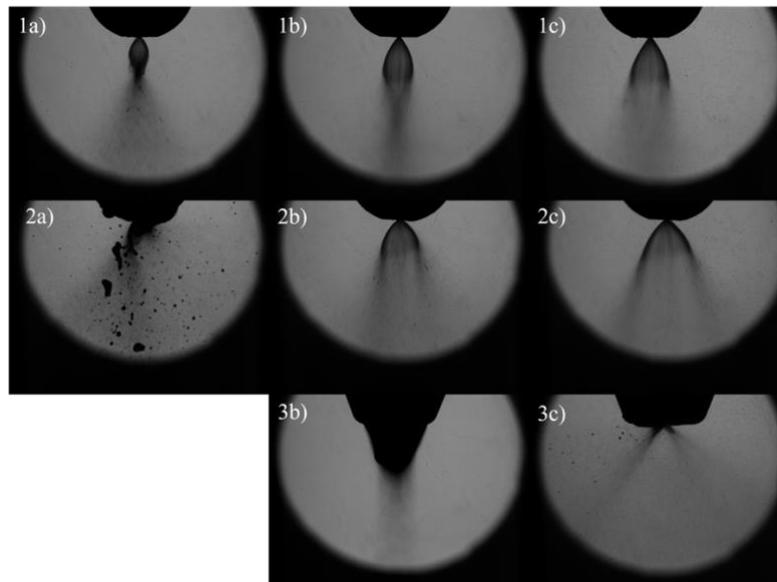


Fig. 42. Imágenes Shadowgraph para inyectores: (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm, (3) Danfoss y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.

En las figuras presentadas, se observa que la técnica de visualización Shadowgraph ofrece una mejor representación de los fenómenos de flujo dinámico. Esto se evidencia claramente en los tres inyectores analizados, donde se pueden distinguir trazas del fluido durante el primer régimen

de atomización, así como la presencia de diversas gotas en el segundo régimen, influenciadas por el efecto de rebote generado por las paredes del recipiente en el que se deposita el fluido. En contraste, las imágenes obtenidas mediante la técnica Schlieren presentan menor claridad, con una opacidad y resolución limitada, lo que dificulta su análisis.

De estos resultados, se concluye que la técnica Shadowgraph es más adecuada para la visualización de flujos en los que no se presentan cambios bruscos en el índice de refracción. Esto contrasta con la técnica Schlieren, que se ve más afectada en estos escenarios. Por ello, Shadowgraph resulta más útil en estudios donde las sustancias no están reaccionando de forma significativa [45], [46], como es el caso en este trabajo. Por consiguiente, para identificar el ángulo en los experimentos donde se alcanza a desarrollar, se procede con el análisis de las imágenes promedio obtenidas por medio del programa ImageJ, pero se visualiza utilizando como referencia una imagen base de los diferentes experimentos para una representación más clara, **Fig. 43**. A partir de las imágenes, se realizará un estudio enfocado en comprender la relación entre los inyectores, el ángulo del chorro y la presión aplicada. Este análisis permitirá resaltar la importancia de investigar fenómenos de dinámica de fluidos en el contexto del diseño experimental.

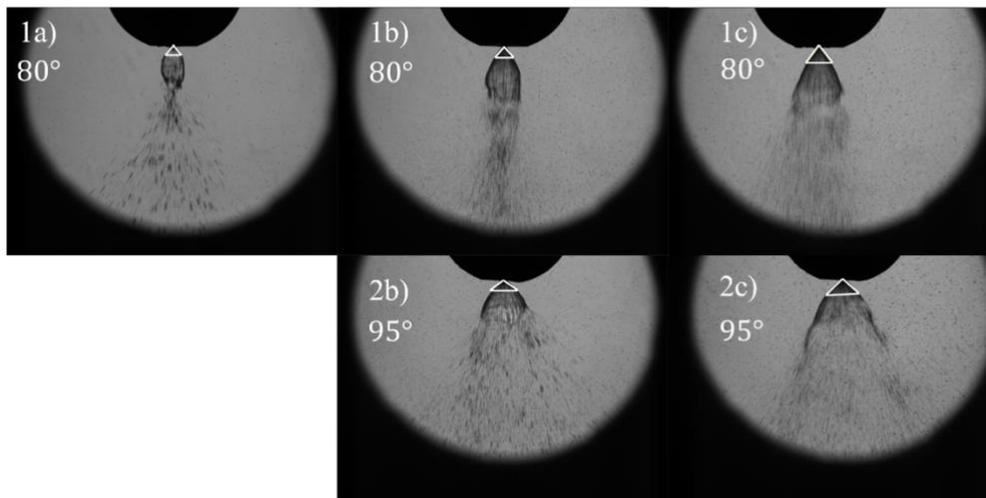


Fig. 43. Ángulo de atomización. (1) Monarch R 1 mm, (2) Monarch R 1.5 mm y presiones de: (a) 1 bar, (b) 2 bar, (c) 3 bar.

En la **Fig. 43** se puede ver en la primera zona de atomización del Monarch 1 permanece el ángulo de  $80^\circ$  independiente de la presión de salida del inyector, si bien las líneas de referencia aumentan longitudinalmente con la presión, traduciendo esto a un mejor sistema de dispersión del

fluido, puesto que se tiene un área de mayor aspersión. De igual forma, el Monarch 1.5 mm presenta un comportamiento semejante conservando un ángulo de  $95^\circ$ . Partiendo que los inyectores Monarch presentan la misma configuración geométrica interna con la única diferencia en el orificio de salida. Entonces, teniendo el inyector con menor diámetro tendrá una velocidad de inyección mucho mayor, es decir, se tendrá un número de weber alto. Por ende, se desarrolla con mayor facilidad la atomización incompleta siendo la distancia entre el inyector y el punto de separación, conocida como longitud de vena intacta, forma una estructura cónica en la salida inyector, por esto se puede ver en la imagen que el Monarch 1 mm en las tres presiones del experimento se identifica el ángulo, caso contrario que en el Monarch 1.5 mm con presión de 1 bar se origina un régimen de atomización inducido por interacción aerodinámica no se logra identificar el ángulo. Asimismo, el ángulo de estos depende de la misma configuración del inyector.

En la **Fig. 42** las imágenes 2a y 3c, se observa un segundo régimen inducido por la interacción aerodinámica, más evidente en 2a. La superficie del chorro líquido comienza a oscilar a pequeña escala, generadas por la turbulencia en la salida del inyector y, principalmente, por la interacción aerodinámica. Estas perturbaciones se amplifican hasta que las fuerzas aerodinámicas provocan la separación de las gotas. Aquí, la longitud de la vena intacta restante es arrastrada por el proceso de atomización que se desarrolla simultáneamente durante la inyección. Siendo la distancia entre el inyector y el punto donde comienza esta separación (longitud de vena intacta) muy corto, o sea que la velocidad de inyección es suficientemente para originar este fenómeno. De igual forma, en la imagen 3a se observa un primer régimen inducido por interacción aerodinámica, donde la velocidad relativa entre la corriente líquida y el gas circundante es baja. En este escenario, las fuerzas aerodinámicas comienzan a ganar importancia, pero las fuerzas de tensión superficial aún predominan. Estas inestabilidades axi-simétricas intensificadas por la tensión superficial generan un chorro con bulbos visibles y una atomización incipiente. Como resultado, la atomización es más lenta, y las gotas formadas tienen un tamaño similar al de la corriente líquida, las cuales se acumulaban en la boquilla para después desprenderse, esto se apreció también al momento de tomar los datos experimentales en los cambios muy abruptos de presión por lo general de 3 a 2 bar por la misma formación de gotas. Este régimen se caracteriza por una atomización menos eficiente en comparación con regímenes a mayor velocidad, donde las fuerzas aerodinámicas dominan y la fragmentación del chorro es más fina y rápida.

---

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el desarrollo de este trabajo se logró alcanzar los objetivos propuestos, relacionados con el diseño, construcción y montaje de un banco de pruebas para la caracterización de la atomización de fluidos líquidos mediante técnicas ópticas. El experimento se realizó con agua como fluido de prueba, en lugar de diésel, debido a que no se contaba con un sistema de visualización ni de medición de presión en el banco de pruebas de alta presión. Este cambio en el fluido de trabajo permitió evaluar cuál de las técnicas ópticas propuestas, Schlieren o Shadowgraph, era más adecuada para el análisis de líquidos, sin afectar la configuración espacial del banco de pruebas.

En primer lugar, se diseñó un banco de pruebas robusto y funcional que permite realizar ensayos experimentales de atomización bajo condiciones controladas. Se diseñó con un enfoque en minimizar las vibraciones que pudieran afectar la calidad de los datos obtenidos durante las pruebas. Se logró cumplir este objetivo utilizando materiales estructurales adecuados, como el acero ASTM 36, y mediante la implementación de rodamientos y estabilizadores que reducen la transmisión de vibraciones al sistema de medición. Esto asegura que los resultados obtenidos durante los experimentos sean lo más precisos posibles, reduciendo los márgenes de error causados por inestabilidades estructurales.

Además, se incorporaron elementos de seguridad y ergonomía que permiten un uso seguro y cómodo del banco de pruebas. El banco fue diseñado considerando un entorno de trabajo de dimensiones limitadas (2 metros de ancho por 3 metros de largo) y asegurando que las tareas experimentales puedan realizarse de manera eficiente y sin incomodidades para el operador. Se instalaron sistemas de protección adecuados para el manejo de fluidos a alta presión, lo cual minimiza los riesgos asociados con la manipulación de combustibles inflamables y presiones elevadas. La seguridad del operario fue un criterio prioritario en el diseño, dado el manejo de componentes peligrosos, como inyectores de alta presión y rieles de combustible, lo que asegura la integridad física durante los ensayos.

En términos de las técnicas ópticas empleadas, se concluyó que la técnica Shadowgraph es más adecuada para la visualización de flujos, como el flujo de agua utilizado en este experimento.

---

A pesar de que la técnica Schlieren también fue implementada, se encontraron limitaciones debido a la baja densidad de gradientes en el agua, lo que dificultó la obtención de imágenes de alta resolución. Shadowgraph, por su parte, permitió una visualización más clara de los fenómenos de atomización y se demostró como una técnica eficiente para el análisis de líquidos bajo condiciones no reactivas, ofreciendo imágenes detalladas sobre la penetración del chorro, la distribución angular del fluido inyectado y la demás fenomenología asociada a estos estudios.

Sin embargo, uno de los principales desafíos identificados en este trabajo fue la medición de presión en el banco de pruebas. Aunque, este fue diseñado para trabajar en un rango de presiones elevado, la medición de esto limitó la capacidad de realizar experimentos. Este factor deberá ser corregido en futuros estudios para tener datos precisos y reproducibles, y facilitar la experimentación con combustibles como el diésel.

En conclusión, aunque el trabajo se realizó con agua en lugar de diésel, se logró identificar cuál de las técnicas ópticas estudiadas es más adecuada para el análisis de líquidos. El banco de pruebas diseñado constituye una herramienta valiosa para la caracterización de la atomización en condiciones controladas, pero es necesario incorporar la medición de la presión y sistema de visualización avanzada para mejorar la precisión de los ensayos en futuras investigaciones. La técnica de Shadowgraph fue confirmada como la más efectiva para analizar la atomización de líquidos, proporcionando una base sólida para el desarrollo de estudios más avanzados en la atomización de líquidos, como en aplicaciones tanto en motores de combustión interna como en otros sistemas que requieren el análisis de fluidos inyectados a alta presión.

---

REFERENCIAS

- [1] E. De and M. Diésel, “Documentación Límites Exposición Profesional Documentación Límites Exposición Profesional PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS,” 2023.
- [2] S. N. Soid and Z. A. Zainal, “Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques – A review,” *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 724–741, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.ENERGY.2010.11.022.
- [3] H. S. Sim, N. Maes, L. Weiss, L. M. Pickett, and S. A. Skeen, “Detailed measurements of transient two-stage ignition and combustion processes in high-pressure spray flames using simultaneous high-speed formaldehyde PLIF and schlieren imaging,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 5713–5721, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCI.2020.09.026.
- [4] Z. Chen *et al.*, “An optical study on the cross-spray characteristics and combustion flames of automobile engine fueled with diesel/methanol under various injection timings,” *Energy*, vol. 290, p. 130286, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.130286.
- [5] A. Castillejo Calle, “Sistema De Inyección en Motores Diesel,” 2014.
- [6] K. Mollenhauer and H. Tschöke, Eds., *Handbook of Diesel Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-540-89083-6.
- [7] DENSO CORPORATION, “Manual de servicio - funcionamiento Common Rail System,” 2004.
- [8] T. P. Davies, “Schlieren photography—short bibliography and review,” *Opt Laser Technol*, vol. 13, no. 1, pp. 37–42, Feb. 1981, doi: 10.1016/0030-3992(81)90089-X.
- [9] W. Merzkirch, “VISUALIZATION OF FLOW,” in *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*, Begellhouse. doi: 10.1615/AtoZ.v.visualization\_of\_flow.
- [10] H. Schardin, “Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen,” *Ergebnisse der exakten naturwissenschaften*, pp. 303–439, Dec. 1942, doi: 10.1007/BFB0111981.
- [11] G. S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-642-56640-0.

- 
- [12] R. Long, “Optics of flames Including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics: F. J. Weinberg. London: Butterworths, 1963.” *Combust Flame*, vol. 7, Jan. 1963, doi: 10.1016/0010-2180(63)90181-0.
- [13] A. H. Lefebvre and V. G. McDonnell, “Atomization and Sprays Second Edition Atomization and Sprays.”
- [14] Francisco. Payri González and J. M. Desantes Fernández, *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [15] “TEOREMA DE VASCHY-BUCKINGHAM (T. de PI).” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/66499>
- [16] U. DE Jaén, Á. Valera Albacete Tutor, and D. Fernando Antonio Cruz Peragón Dpto, “Escuela Politécnica Superior de Jaén MODELADO MULTIDIMENSIONAL DE CHORRO DIESEL,” 2015.
- [17] G. Sitkei, “Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren,” *Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren*, 1964, doi: 10.1007/978-3-662-12198-6.
- [18] D. H. C. Taylor and B. E. Walsham, “Combustion Processes in a Medium-Speed Diesel Engine,” [http://dx.doi.org/10.1243/PIME\\_CONF\\_1969\\_184\\_321\\_02](http://dx.doi.org/10.1243/PIME_CONF_1969_184_321_02), vol. 184, no. 10, pp. 67–76, Sep. 1969, doi: 10.1243/PIME\_CONF\_1969\_184\_321\_02.
- [19] J. C. Dent, “A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration,” Feb. 1971. doi: 10.4271/710571.
- [20] J. D. Naber and D. L. Siebers, “Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays,” *SAE Technical Papers*, Feb. 1996, doi: 10.4271/960034.
- [21] R. L. Norton, *DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. 2009.
- [22] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY*, vol. Octava edición. 2008.
- [23] X. Wang *et al.*, “Effect of injection pressure on low-temperature fuel atomization characteristics of diesel engines under cold start conditions,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 172, p. 104712, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2023.104712.

- 
- [24] H. M. Gad, I. A. Ibrahim, M. E. Abdel-baky, A. K. Abd El-samed, and T. M. Farag, “Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 99, pp. 211–218, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2018.07.006.
- [25] H. Chen, Z. Shi, Y. Wu, Y. Li, and D. Wang, “Investigation of the injection pressure impact on non-monotonic two-stage ignition delay of diesel engines under cold-start,” *Appl Therm Eng*, vol. 235, p. 121408, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121408.
- [26] A. Jácome, D. López, D. Salinas, J. Villavicencio, L. Mena, and S. Mena, “BANCO PARA COMPROBACIÓN DE INYECTORES DIESEL : DENSO , DELPHI Y BOSCH DEL SISTEMA CRDI”.
- [27] W. X. BARCO VARGAS and J. A. PAVAY GUINGLA, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para inyectores electrónicos a diésel para sistema common rail,,” Guayaquil, Feb. 2010.
- [28] “EPS 708.” Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://am.boschaftermarket.com/pa/es/equipos/equipo-de-prueba/bancos-de-pruebas-y-herramientas/eps-708/>
- [29] “(TD-7500-UNIT) EXTRA X-UNIT - OUS.” Accessed: Jun. 18, 2024. [Online]. Available: <https://ous-tech.com/es/producto/td-7500-unit-extra-x-unit/>
- [30] Carbon Zapp, “The Comprehensive Diesel Specialists Solutions for Testing Diesel Common Rail and Gasoline GDi Pumps.”
- [31] EXA AUTO PARTS SAS, “Asesoría para la selección del sistema de velocidad variable,” Medellín, Jul. 2023.
- [32] Siemens S.A., “Catalogo Motores Siemens 1LE0.”
- [33] S. R. Dt, “Convertidor SINAMICS V20,” 2012.
- [34] “BANCO DE PRUEBAS UNIVERSAL PARA SISTEMAS COMMON RA - TECNOTALLERES.” Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: [https://www.tecnotalleres.com/product-BANCO\\_DE\\_PRUEBAS\\_UNIVERSAL\\_PARA\\_SISTEMAS\\_COMMON\\_RA#](https://www.tecnotalleres.com/product-BANCO_DE_PRUEBAS_UNIVERSAL_PARA_SISTEMAS_COMMON_RA#)
- [35] “DCI 700.” Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: <https://am.boschaftermarket.com/pa/es/equipos/equipo-de-prueba/bancos-de-pruebas-y-herramientas/dci-700/>

- 
- [36] “common rail injector tester ,深圳市卡惟思科技有限公司.” Accessed: Sep. 19, 2024. [Online]. Available: <http://www.szkwish.com/common-rail-injector-tester-PG5164630>
- [37] Y. A. CENGEL and A. J. GHAJAR, “Transferencia de Calor y Masa - Cengel 4Ed”.
- [38] “Oil Burner Nozzles - MONARCH NOZZLES | Oilburner-, Industrial- and Agricultural Nozzles.” Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.monarchnozzles.com/index.php/en/applications/oilburnernozzles>
- [39] “Boquillas de pulverización, OD S, 0.50 gal/h, 1.87 kg/h, 60 °, Sólido | Boquillas de pulverización | Componentes para quemador | Climate Solutions - heating | Danfoss Spain Product Store.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://store.danfoss.com/es/es/Climate-Solutions---heating/Componentes-para-quemador/Boquillas-de-pulverizaci%C3%B3n/Boquillas-de-pulverizaci%C3%B3n%2C-OD-S%2C-0-50-gal-h%2C-1-87-kg-h%2C-60-%C2%B0%2C-S%C3%B3lido/p/030F6908#documentWrapper>
- [40] Basler AG, “Basler scout USER’S MANUAL FOR GigE VISION CAMERAS.” [Online]. Available: [www.baslerweb.com](http://www.baslerweb.com)
- [41] “Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS II - Lenses - Camera & Photo lenses - Canon Spain.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.canon.es/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>
- [42] “APO MACRO 150mm F2.8 EX DG OS HSM | Lenses | SIGMA Corporation.” Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: [https://www.sigma-global.com/en/lenses/150\\_28\\_os/](https://www.sigma-global.com/en/lenses/150_28_os/)
- [43] Unidad Vinculación y Desarrollo Urbanístico Aguas, “Criterios para definir el diámetro de la acometida y el medidor para urbanizaciones y edificios,” Apr. 2017.
- [44] ICONTEC, “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 1500 CÓDIGO COLOMBIANO DE FONTANERÍA,” 2004.
- [45] V. Danh, L. Jiang, and O. S. Akinyemi, “Investigation of water spray characteristics in the near field of a novel swirl burst injector,” 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.12.014.
- [46] J. Breerwood, L. Jiang, and S. Ahmed, “Near-field spray characteristics and steadiness of a novel twin-fluid injector with enhanced primary atomization,” *J Aerosol Sci*, vol. 180, p. 106402, 2024, doi: 10.1016/j.jaerosci.2024.106402.

ANEXOS

Anexo A. Plano adaptador

Technical drawing of an adapter. The drawing includes a side view, a top view, and a 3D perspective view. Dimensions are as follows: total length 2", diameter of the main body 1/4", diameter of the hexagonal base 3/4" Hex, and thread specification 9/16" - 24 UNEF TDH x 1/4". The material is specified as  $\text{Ø}11.46 \text{ } \nabla 10.80$ . The top view shows a hexagonal base with a diameter of 3/4" Hex and a 1/4" - 18 NPT thread.

Observaciones:

- Unidades en milímetros con excepción de las medidas establecidas en pulgadas.
- Se debe garantizar un espacio de 1,5 - 2 mm entre el inyector y el adaptador, se deja en el plano una distancia de penetración sugerida según el catálogo del fabricante.
- Suavizar aristas.

N/D	ADAPTADOR	1	N/D	LATÓN	N/D	MECANIZADO
Ref.	Descripción	Cantidad	Plano Ref.	Materia	Especificaciones	Observaciones
<b>UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA</b>						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA						
<b>ADAPTADOR</b>					ARCHIVO:	ESC: 2:1
DIS: JESUS PINEDA				DIB: JESUS PINEDA		FCH: 28/08/2024
APRB:				REV:		O.T.
						MOD:
						PL. No: A3-01

---

Anexo B. Código Python

```
from PIL import Image
import os

# Ruta donde están almacenadas las imágenes
ruta_imagenes = 'C:/Users/user/Documents/Experimentos/Shadowgraph/Inyector 3/Replica 1_3 bar'

# Listar los nombres de las imágenes en la carpeta
imagenes_nombres = [f for f in os.listdir(ruta_imagenes) if f.endswith('.tiff') or f.endswith('.tif')]

# Mostrar cuántas imágenes se van a procesar
numero_imagenes = len(imagenes_nombres)
print(f"Procesando {numero_imagenes} imágenes...")

# Dimensiones deseadas
dimensiones = (1392, 1040)

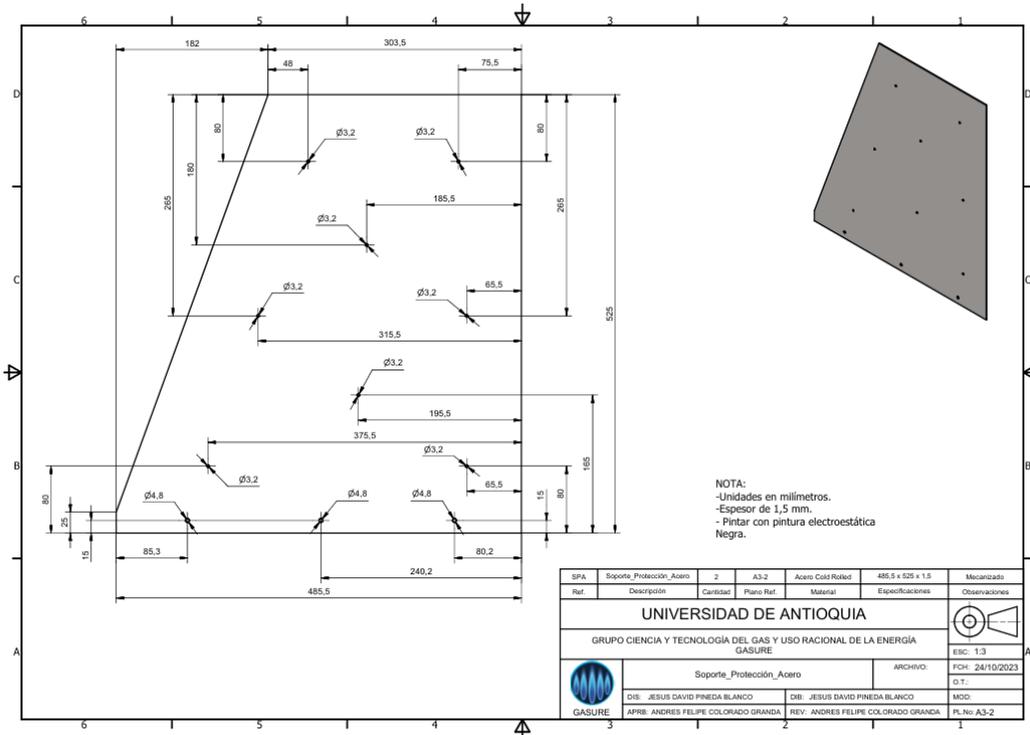
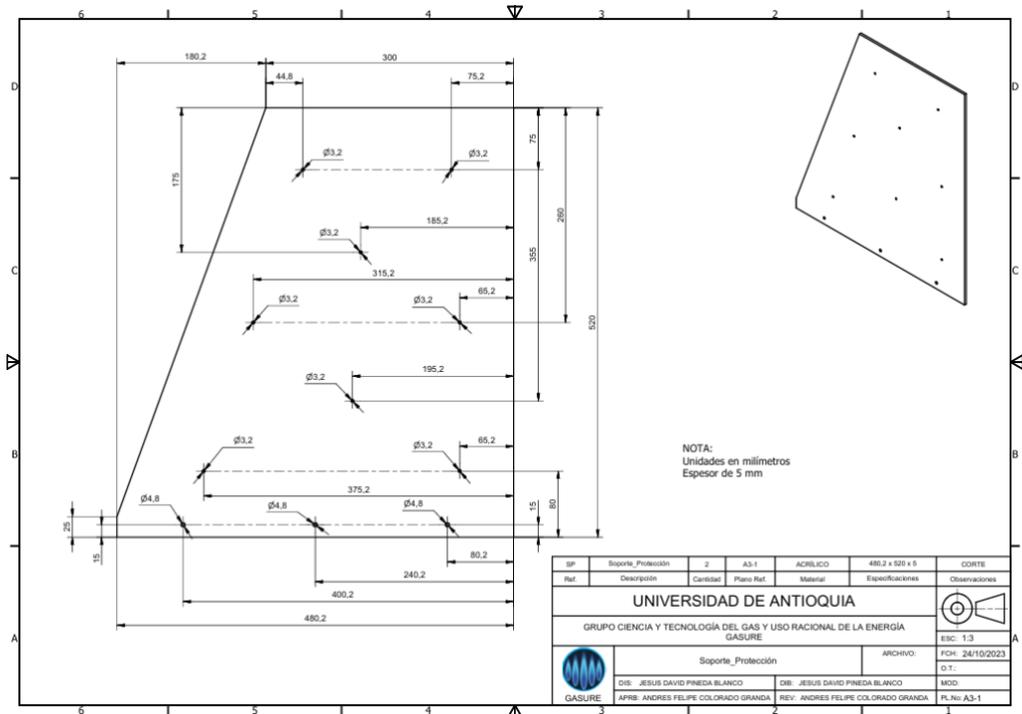
# Inicializar la imagen acumulativa con la primera imagen redimensionada
imagen_acumulada = Image.open(os.path.join(ruta_imagenes, imagenes_nombres[0])).convert("RGBA")
imagen_acumulada = imagen_acumulada.resize(dimensiones, Image.Resampling.LANCZOS)

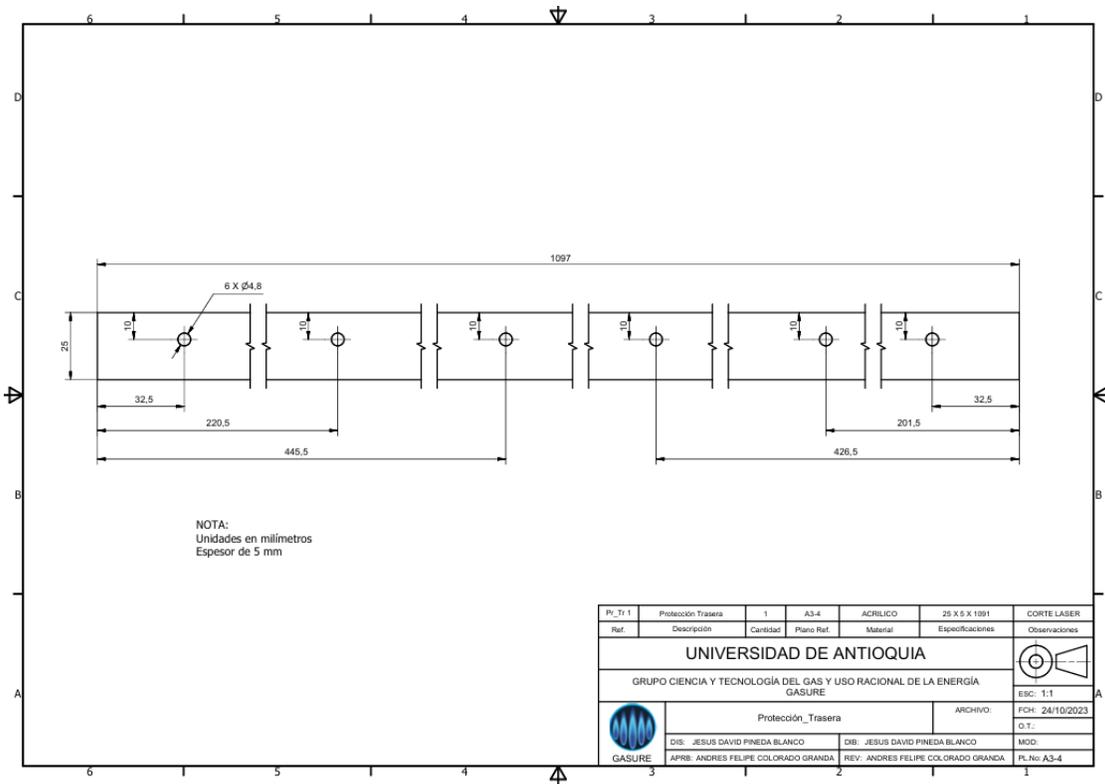
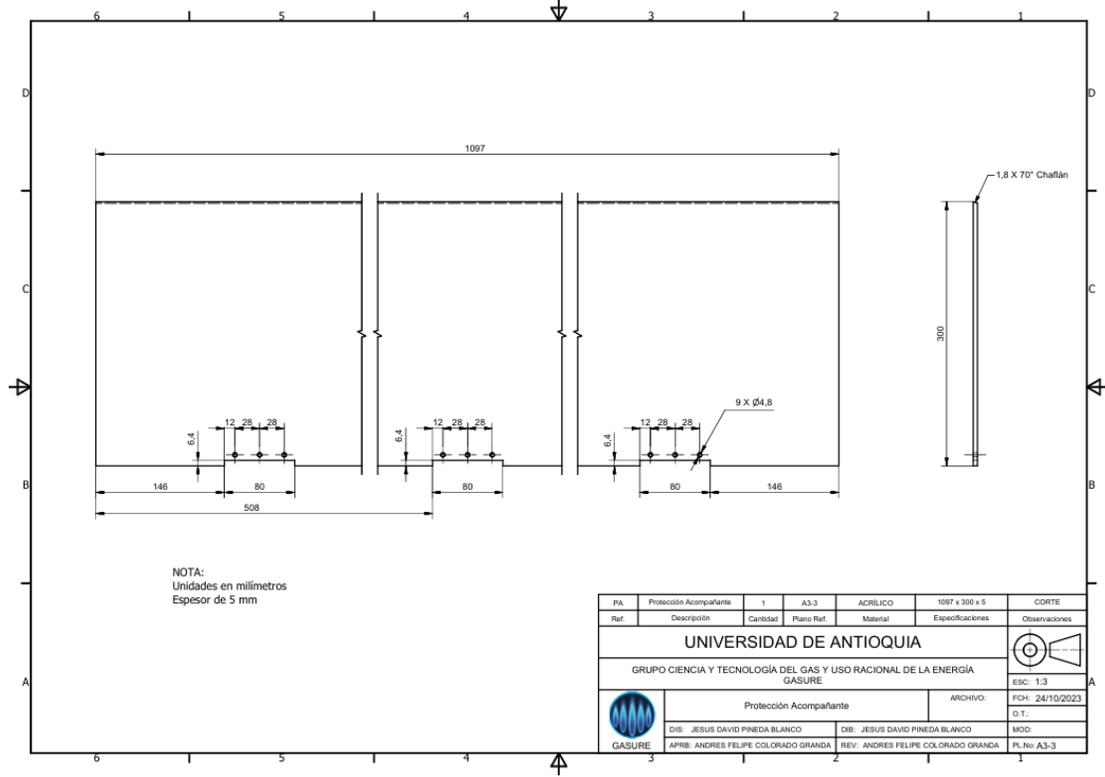
# Superponer las imágenes
for imagen_nombre in imagenes_nombres[1:]:
    imagen = Image.open(os.path.join(ruta_imagenes, imagen_nombre)).convert("RGBA")
    imagen = imagen.resize(dimensiones, Image.Resampling.LANCZOS)
    imagen_acumulada = Image.blend(imagen_acumulada, imagen, alpha=1.0/numero_imagenes)

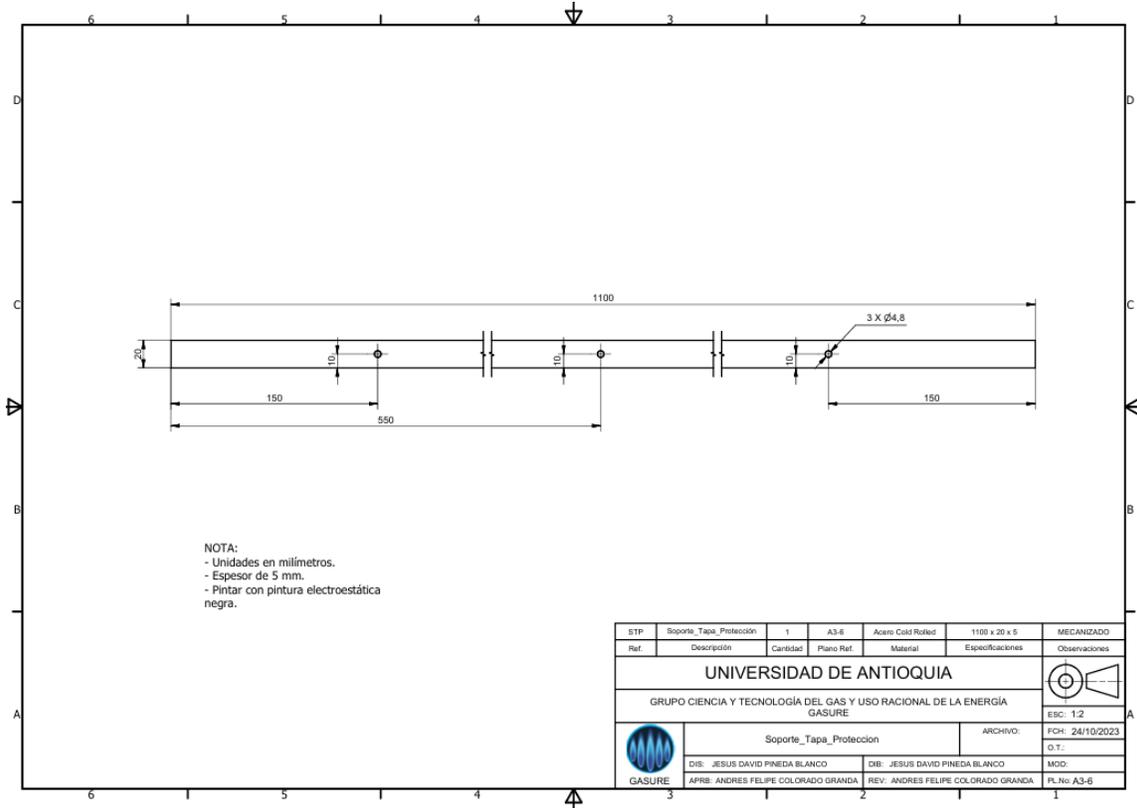
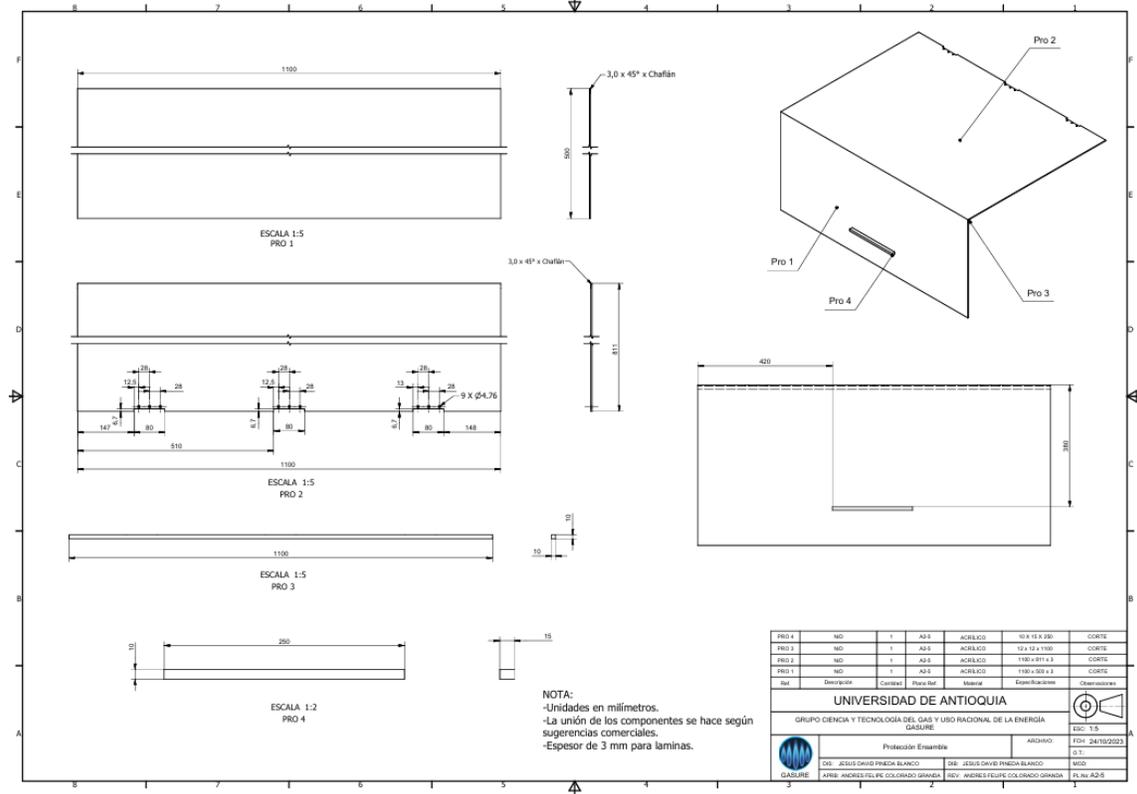
# Guardar la imagen final
imagen_acumulada.save('imagen_superpuesta.tiff')

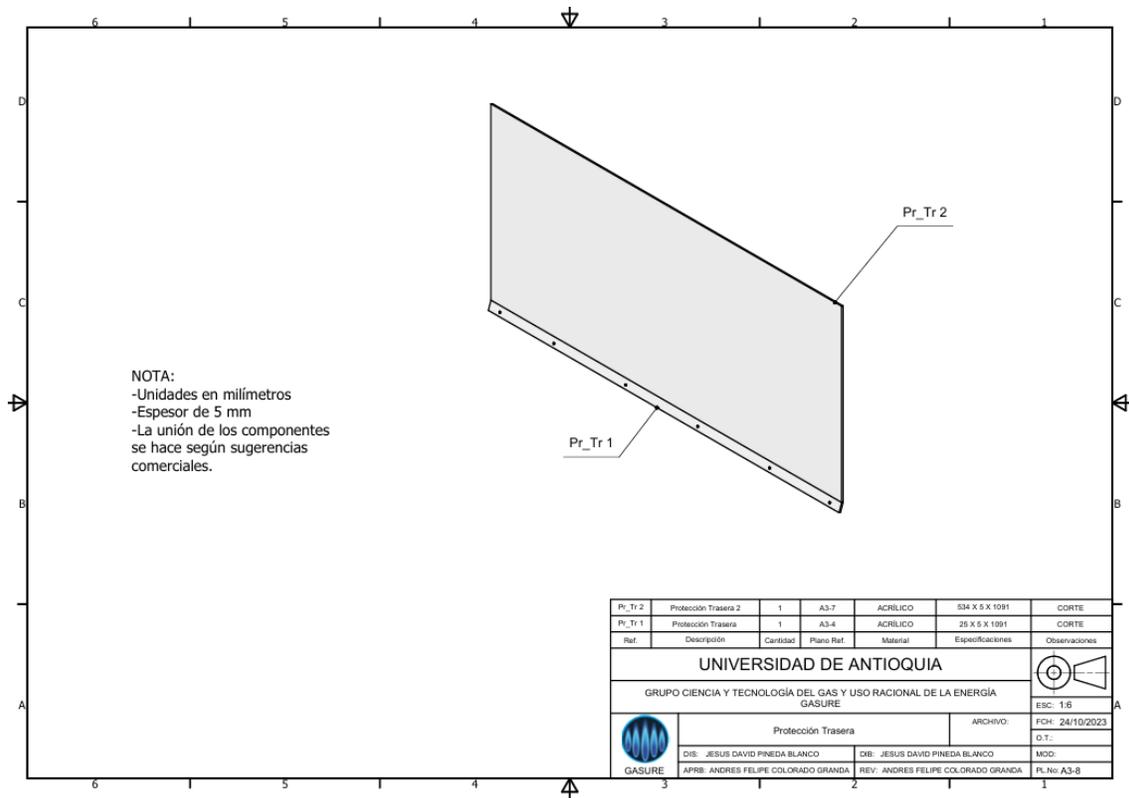
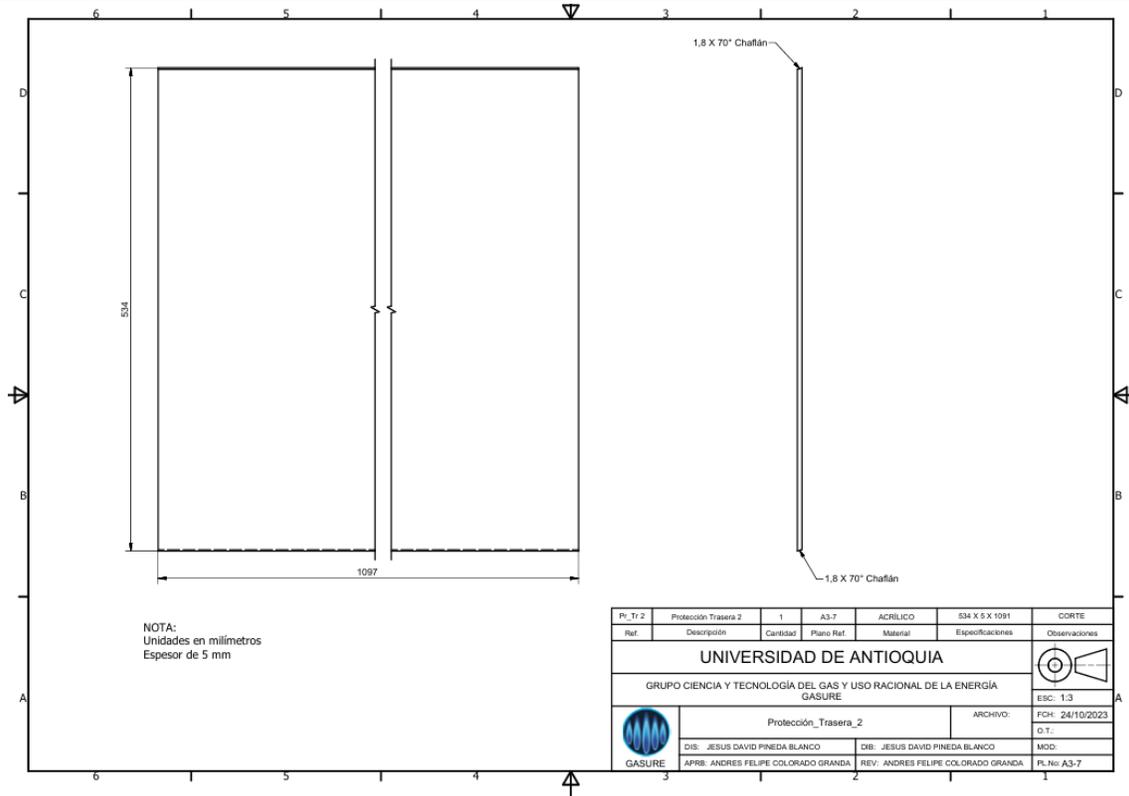
# Mostrar la imagen superpuesta
imagen_acumulada.show()
```

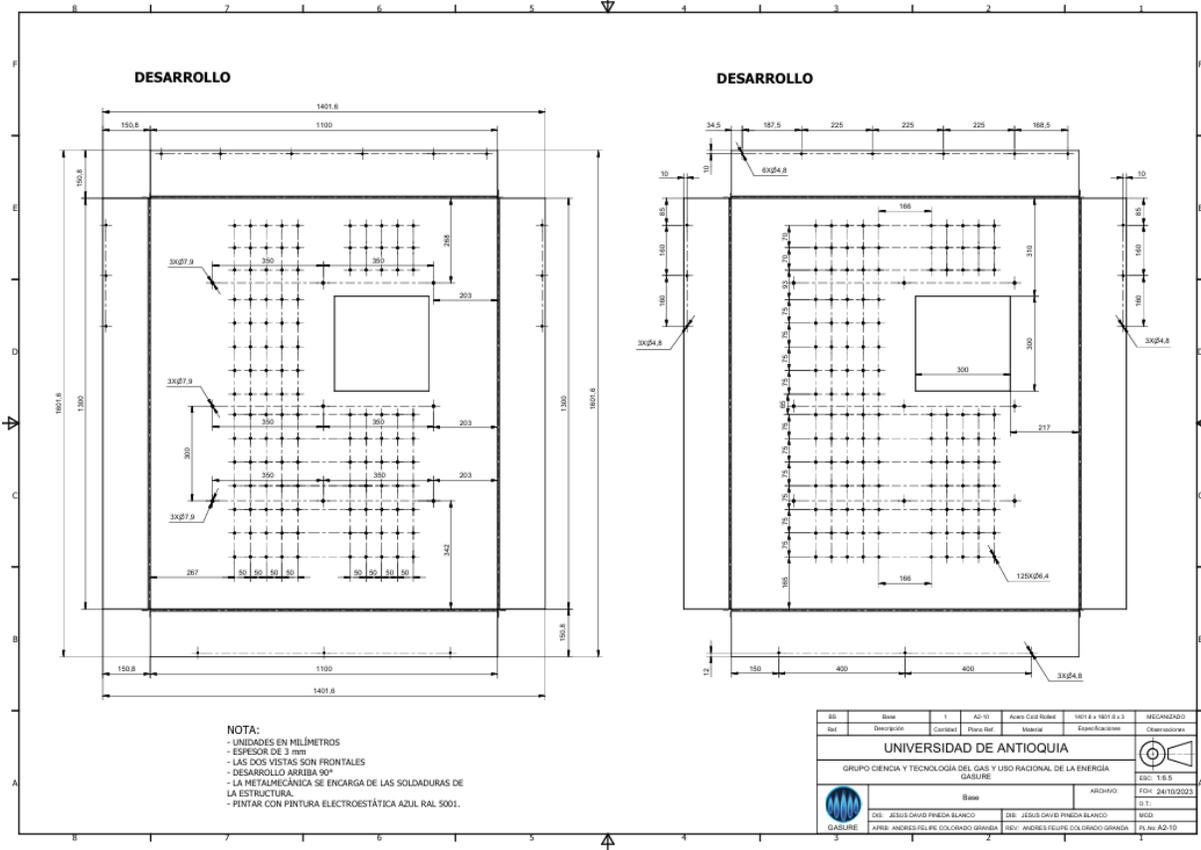
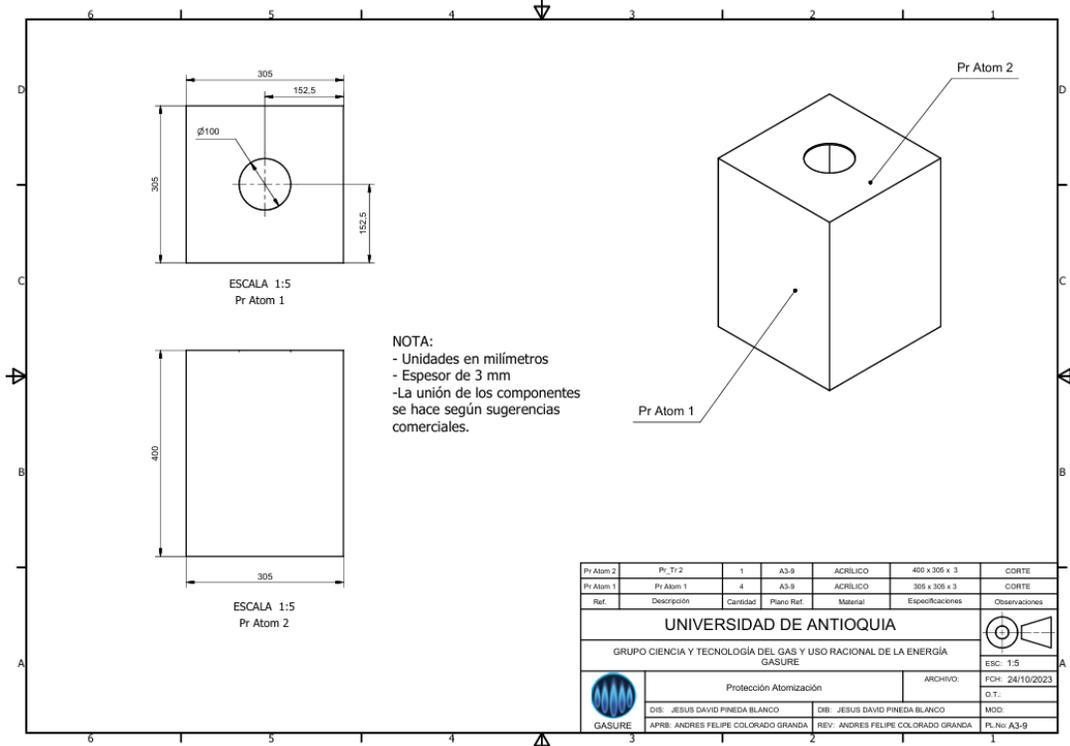
Anexo C. Planos banco de pruebas



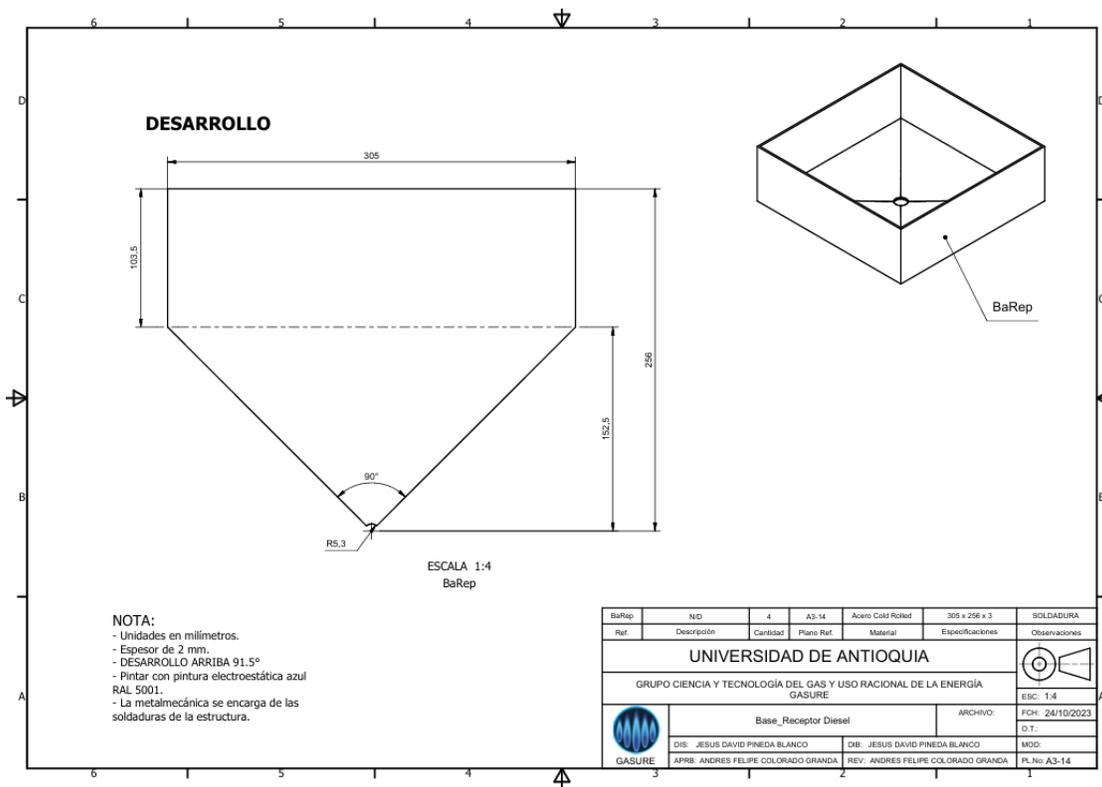
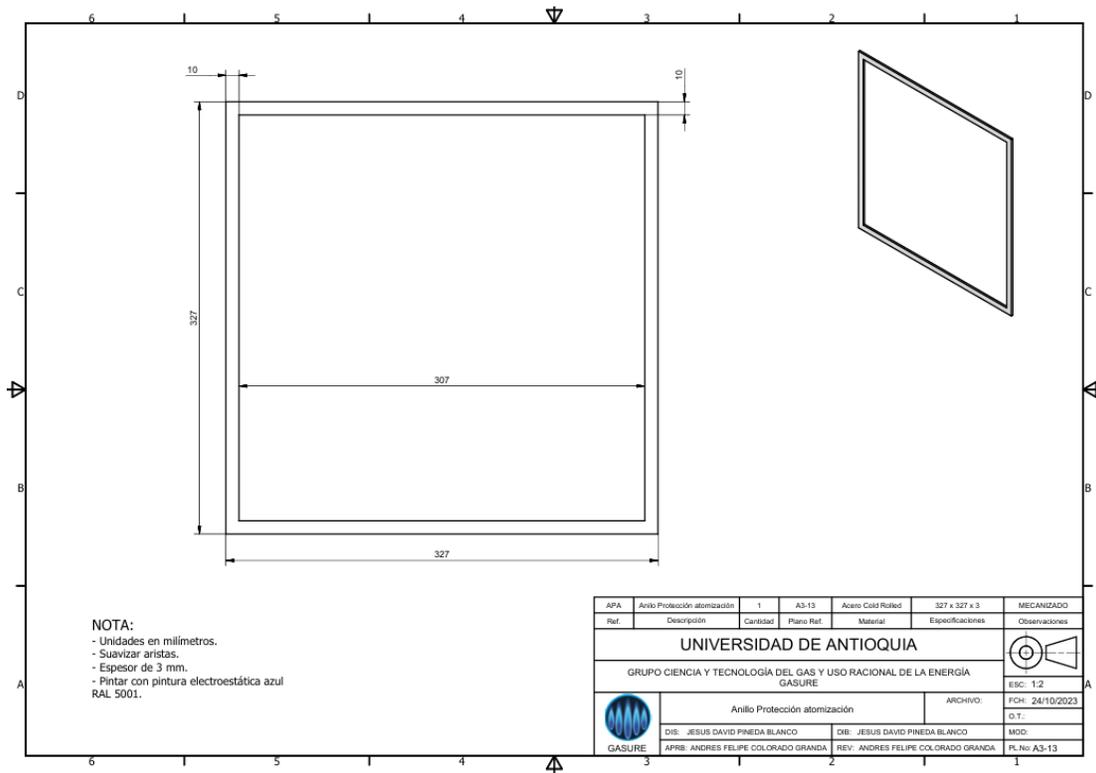


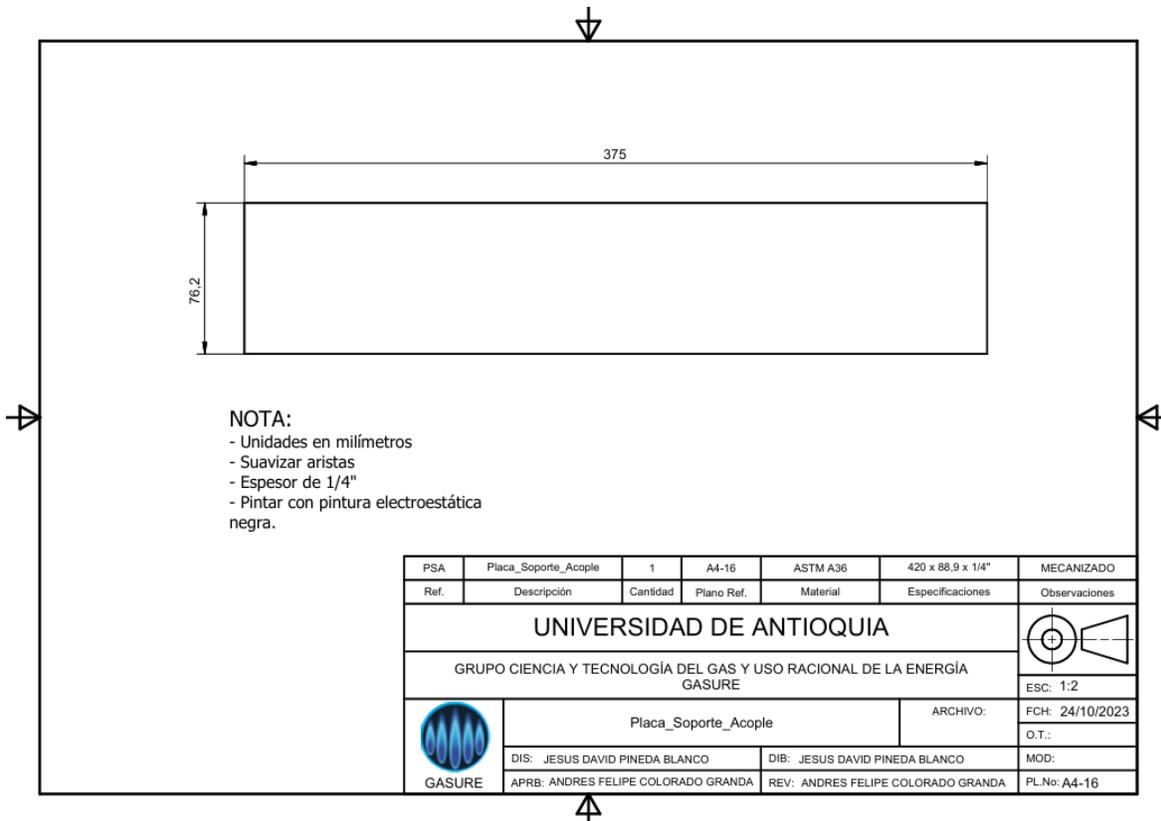
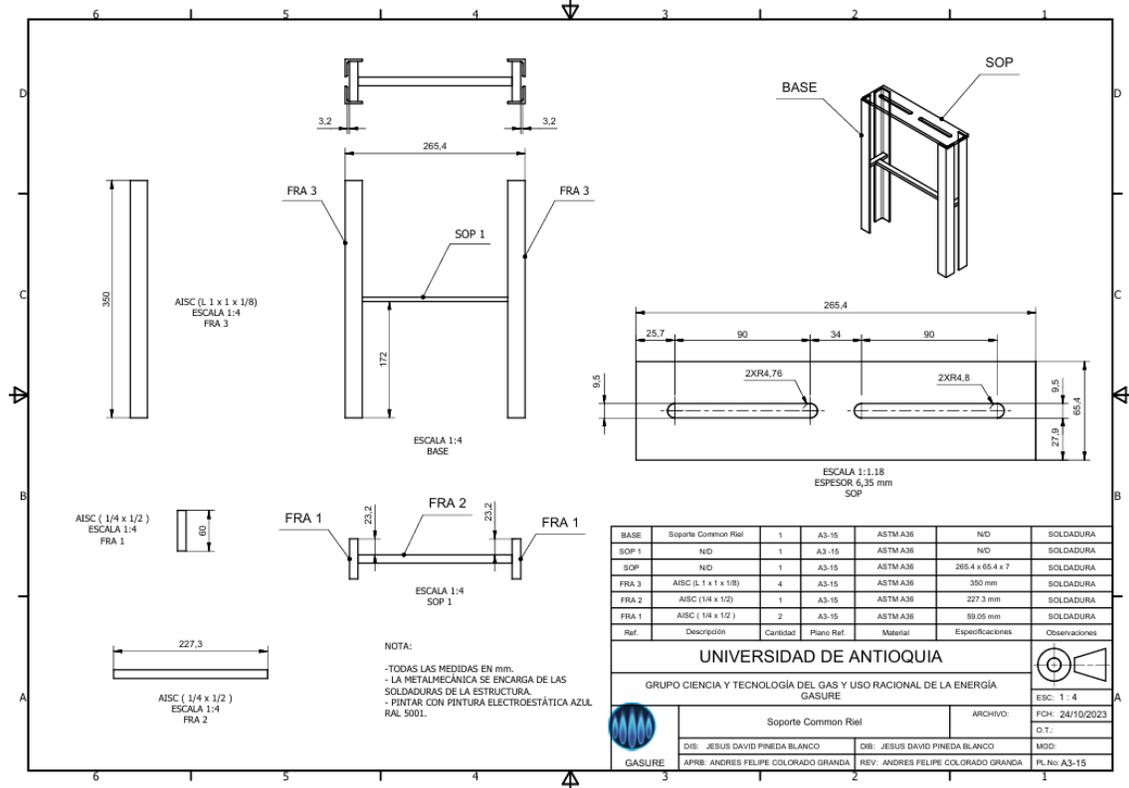


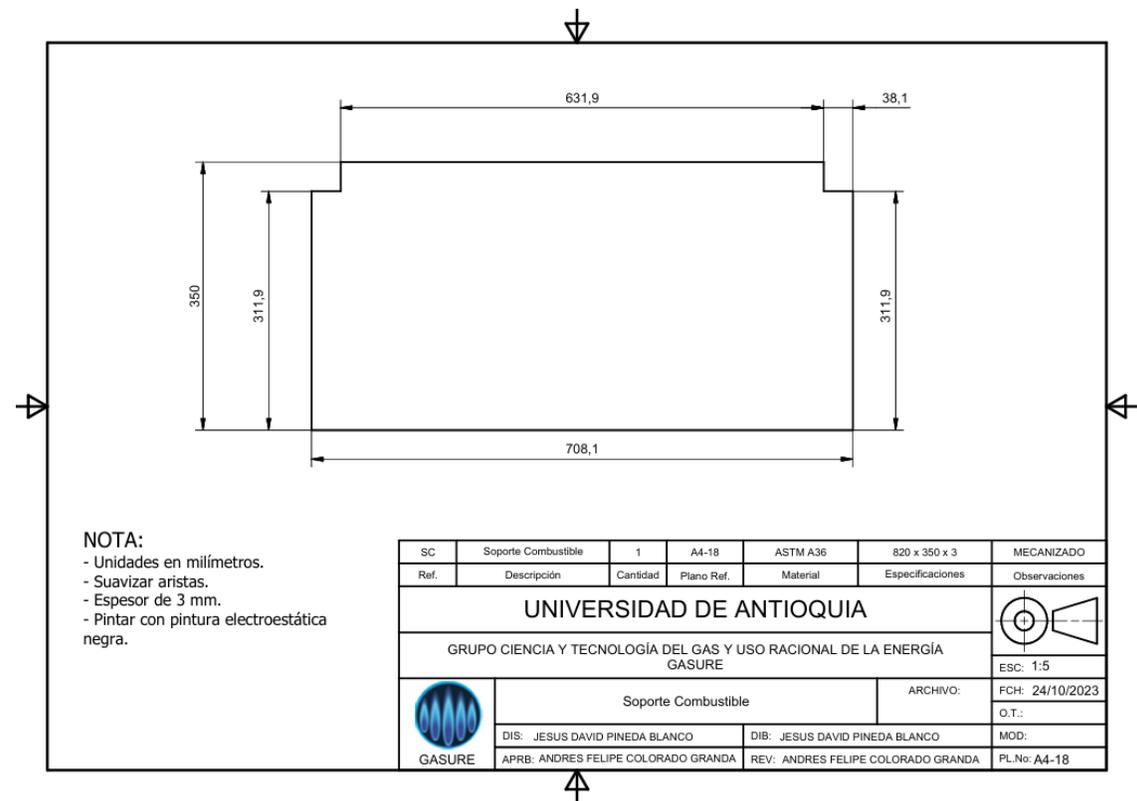
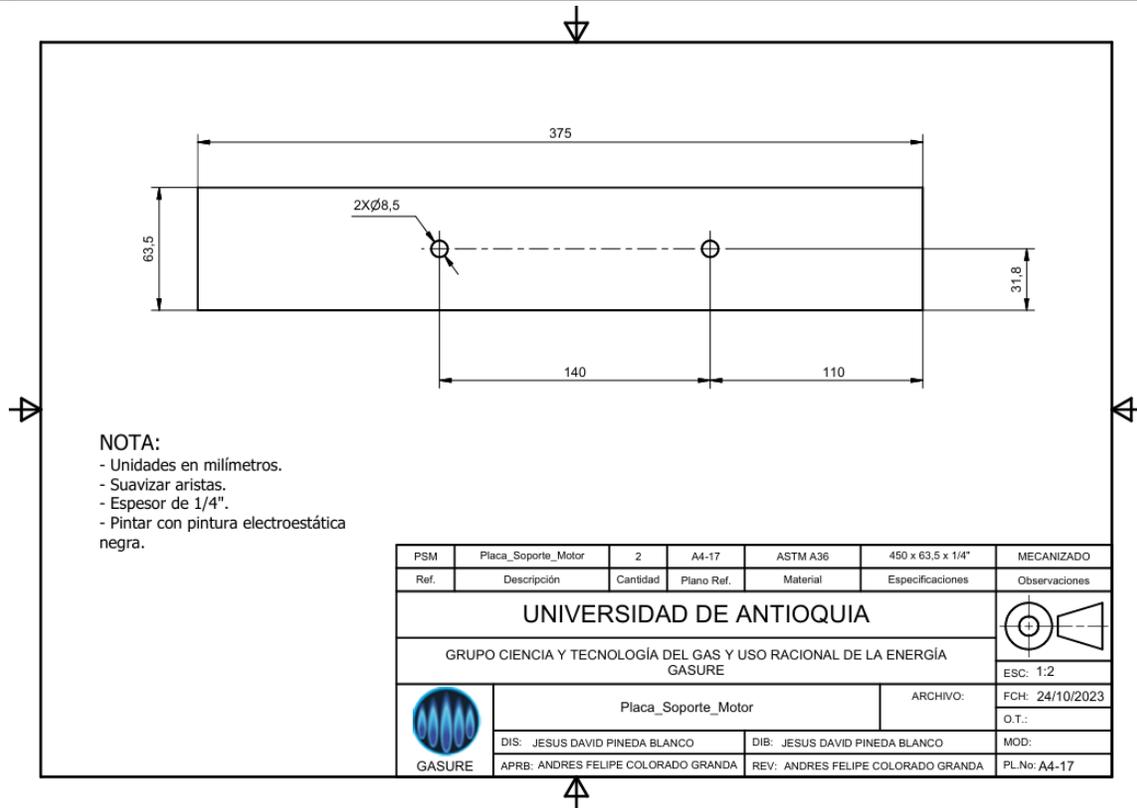














---

*Anexo D. Manual de operación*

**PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR DE SEGURIDAD Y OPERARIO PARA EL BANCO DE PRUEBA DE ATOMIZACIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS**

Se deben identificar los riesgos asociados y establecer las respectivas medidas preventivas. A continuación, se detalla este procedimiento:

**POTENCIALES RIESGOS IDENTIFICADOS**

- **Presión Alta:** La operación a 1800 bar presenta un riesgo significativo de fallos en el equipo, lo que podría provocar la liberación súbita de combustible a alta presión, causando lesiones graves.
- **Material Inflamable (Diésel):** Aunque no hay combustión, el diésel es un material inflamable, y su manejo y almacenamiento inadecuados pueden presentar un riesgo de incendio.
- **Exposición a Vapores:** Los vapores de diésel, aunque no inflamados, pueden ser tóxicos si se inhalan en concentraciones elevadas.
- **Proyección de Líquidos:** El riesgo de proyección de líquidos a alta velocidad podría causar lesiones físicas en los operadores o dañar el equipo.
- **Ruido:** La atomización de combustibles a alta presión puede generar niveles elevados de ruido que pueden ser dañinos para los oídos.
- **Fallos en los Componentes:** Partes del equipo pueden fallar bajo presión, causando daños materiales o personales.
- **Electrocución:** Si se utiliza equipo eléctrico en el banco de pruebas, existe riesgo de electrocución si no se toman las precauciones adecuadas.

**MEDIDAS PREVENTIVAS**

**Inspección y Mantenimiento del Equipo:**

Realizar inspecciones regulares del equipo para detectar signos de desgaste o daños, manteniendo un programa de mantenimiento preventivo para asegurar la integridad del sistema bajo presión.

**Capacitación del Personal:**

Asegurarse de que todos los operadores estén debidamente capacitados en el manejo del equipo a alta presión. Además, proporcionar formación en procedimientos de emergencia y uso de equipos de protección personal (EPP).

**Protección Personal:**

Usar equipo de protección personal (EPP) adecuado, incluyendo protección para los ojos, guantes resistentes a químicos, mascarilla, y ropa protectora. Adicionalmente, utilizar protección auditiva para mitigar los efectos del ruido elevado.

### **Control de Derrames:**

Ubicarse detrás de las barreras diseñadas (compuerta de acrílico) para evitar líquidos en caso de fuga. Además, colocarse detrás de la zona segura alrededor del banco de prueba. Tener un kit de emergencia para derrames accesibles en todo momento. Asimismo, mantener monitoreado continuamente la presión para detectar y prevenir cualquier anomalía.

### **Ventilación:**

Asegurar una ventilación adecuada para evitar la acumulación de vapores de diésel en el área de prueba. Considerar la instalación de sistemas de extracción localizados en las áreas de mayor concentración de vapores.

### **Pruebas Iniciales en Bajo Volumen:**

Realizar pruebas iniciales con volúmenes pequeños de combustible para verificar la integridad del sistema y ajustar las condiciones operativas.

## **PROCEDIMIENTO OPERATIVO**

### **Preparación:**

Inspeccionar el equipo y verificar que todos los componentes estén en buenas condiciones. Revisar que los EPP estén disponibles y en buen estado.

### **Inicio del Proceso:**

Cargar el combustible de manera segura, evitando derrames. Posteriormente, iniciar el sistema según instructivo y aumentar la presión de forma gradual, monitoreando constantemente.

### **Inicio de sistema**

1. Conectar el sistema de velocidad variable y el emulador a la toma correspondiente dentro del laboratorio.



2. Se debe encender primero el emulador (Common Rail injector Tester CIT800) antes que el sistema de velocidad variable. Por tanto, se deben seguir los paso a paso de los dos sistemas que están ubicado en los anexos.



### Monitoreo y Control:

Observar los parámetros de operación y registrar datos relevantes, estando preparado para detener la operación si se detecta algún comportamiento anómalo.



### Finalización:

Reducir la presión gradualmente antes de apagar el sistema según anexos. Por último, realizar una inspección post-operativa para asegurar que no haya fugas ni daños en el equipo.

## ANEXOS

### CIT800 Quick Use Guide

#### Function Introduction



Note : Led Menu [Bosch] [Denso] [Delphi] these three menus for Electromagnetic common rail injector  
Led Menu [Piezo] for piezo common rail injector

#### Method of use

1. Take out the CIT800 common rail injector tester from the carton and plug in the power supply



2. Turn on the power switch



3. Select the type of injector to test



4. Take out the injector to be tested and a multimeter



5. Use multimeter to measure the resistance of the injector

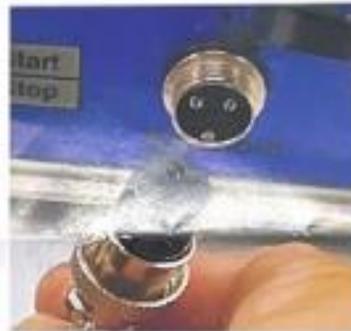


6. Measuring the plug connections of fuel injectors



7. If the measured impedance value is very small, 1 ohm or less, then this injector is an electromagnetic injector. you can select the menu of BOSCH, DENSO, DENSO2, DELPHI these menu for test electromagnetic injector.(Depending on the injector brand)

For electromagnetic injector use two pin CABLE ,and 2pin connector on CTT300



8. If the measured impedance value is large ,over 150K ohm ,this injector is an piezo injector, you only use piezo injector menu and 3pin piezo injector cable for test



Note: when using the piezoelectric menu to measure an injector, it is important to determine whether the injector is a piezoelectric injector. When connecting the wrong injector, it will **burn out** the tester !!!

### Contact Us:

Address: B7003,shanghai Building,Miazhil street,Longhua Distract,Shenzhen city, Guangdong,china

Tel: +8618312509733

Whatsapp:+8618312509733 Skypes:sale\_lumeltech Email : info@szkawish.com Website: www.szkawish.com

## SISTEMA DE VELOCIDAD VARIABLE

### COMPONENTES DEL SISTEMA



### METODO DE USO

1. Encender el variador de velocidad SINAMICS V20 mediante la Clavija trifilar de 50 A Gabinete.



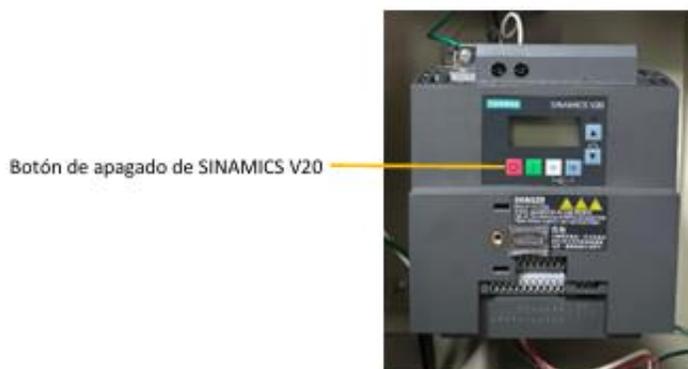
2. Encender el variador con la ayuda del botón de encendido mostrado en la imagen.



3. El sistema muestra la frecuencia con la cual es dispositivo había quedado al momento de ser apagada. Por ende, para modificar esta se debe hacer con los botones que se evidencian en la siguiente imagen, siendo la flecha superior para aumentar y la inferior para disminuir.



4. Para apagar el variador se debe presionar el botón evidenciado en la ilustración, esperando aproximadamente de 1 min.



5. Por último, para apagar el variador de velocidad SINAMICS V20 mediante la Clavija trifilar de 50 A Gabinete.