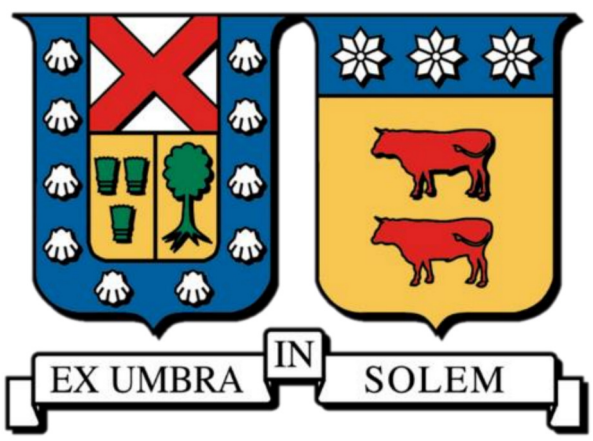


Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Mecánica
Valparaíso – Chile

Implementación y Ensayos de Puesta en Marcha de Quemador de Flujos Opuestos para el Estudio de Llamas Difusivas

Gabriel Omar Nahuelhual Flores

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía: Dr. Ing. Mario Toledo
Profesor Correferente: Dr. Ing. Germán Amador

Agosto de 2023

Resumen

En el marco del proyecto FONDEF-VIU denominado “Innovador quemador de hidrógeno verde para la industria minera”, el objetivo general del presente trabajo es implementar y desarrollar ensayos de puesta en marcha de un quemador de flujos opuestos de combustible y oxidante, que permita la obtención de una llama plana para su investigación y análisis.

En base a un quemador de flujos opuestos previamente desarrollado y en desuso, se diseña y construye una base-soporte que permite el movimiento vertical de sus componentes. Se implementan sistemas de control y medición de combustible y oxidante, y de refrigeración por agua.

Se llevan a cabo ensayos experimentales que varían las distancias entre las boquillas y ajustan varias tasas de deformación, para examinar la morfología de la llama resultante. Los resultados confirmaron el buen funcionamiento del quemador, generando llamas laminares con una predominante zona amarilla, y una fina capa azul, coincidiendo con investigaciones en el área. Además, a tasas de deformación altas se logra la característica de unidimensionalidad, confirmando que el quemador cumple su función para fines de investigación, quedando disponible para futuros estudios, como por ejemplo la combustión de hidrógeno verde.

Abstract

Within the framework of the FONDEF-VIU project called "Innovative green hydrogen burner for the mining industry", the general objective of this work is to implement and develop start-up tests of a burner with opposed fuel and oxidant flows, which allows the Obtaining a flat flame for investigation and analysis.

Based on a previously developed and disused counterflow burner, a base-support is designed and built that allows the vertical movement of its components. Control and measurement systems for fuel and oxidizer, and water cooling are implemented.

Experimental tests varying the distances between the nozzles and adjusting various deformation rates were carried out to examine the resulting flame morphology. The results confirmed the good performance of the burner, generating laminar flames with a predominant yellow zone, and a thin blue layer, coinciding with research in the area. In addition, at high deformation rates the characteristic of one-dimensionality is achieved, confirming that the burner fulfills its function for research purposes, being available for future studies, such as the combustion of green hydrogen.

Índice

Resumen ii

Abstract iii

Índice iv

I. Introducción 1

1.1. Importancia de estudiar las llamas difusivas en diferentes aplicaciones industriales 4

1.2. Objetivos 5

1.3. Quemadores de contraflujo 6

1.4. Tasa de deformación o “strain rate” 8

1.5. Estado del arte ..... **¡Error! Marcador no definido.**

II. Metodología 12

2.1. Equipo experimental 12

2.2. Estado de las Piezas Recuperadas del Quemador: Análisis y Evaluación 15

2.3. Diseño de sistema de movimiento vertical 19

2.4. Diseño de líneas de suministro 20

2.4.1. Suministro de gases 20

2.4.2. Características técnicas 21

2.4.3. Conexiones 22

2.4.4. Sistema de refrigeración 26

2.4.5. Sistema de gases de escape 26

2.4.6. Esquema de líneas 26

2.5. Configuración y montaje del quemador de flujos opuestos 27

2.5.1. Estructura base-soporte 27

2.5.2. Sistema de movimiento vertical 27

2.5.3. Conjunto inferior 27

2.5.4. Conjunto superior 28

2.5.5. Conjunto conector 29

2.5.6. Colector de gases 29

Su función principal es la recepción y expulsión de los gases de escape. 29

2.5.7. Montaje 30

2.5.8. Ajustes necesarios para lograr una correcta alineación y simetría de los flujos 53

III. Ensayos de puesta en marcha 53

3.1. Adquisición de datos 54

3.2. Protocolo de seguridad 54

3.3. Ensayo 1 59

3.4. Ensayo 2 63

3.5. Ensayo 3 66

3.6. Ensayo 4 67

3.7. Ensayo 5 69

3.8. Ensayo 6 72

3.9. Ensayo 7 74

3.10. Ensayo 8 76

3.11. Ensayo 9 78

3.12. Ensayo 10 80

3.13. Ensayo 11 82

3.14. Ensayo 12 84

3.15. Ensayo 13 86

3.16. Ensayo 14 88

3.17. Ensayo 15 91

IV. Análisis y resultados 95

V. Conclusiones 103

5.1. Limitaciones y recomendaciones para investigaciones futuras 104

VI. Referencias 105

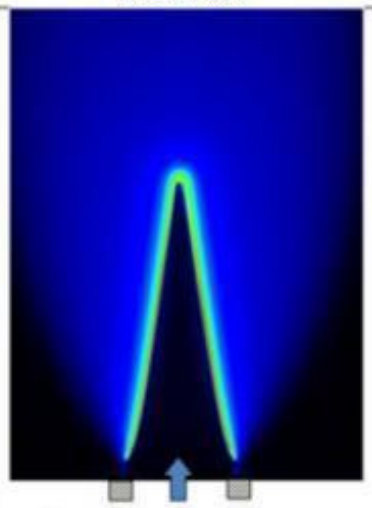
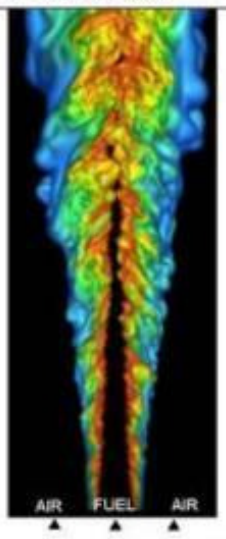
VII. Anexos 107

I. Introducción

Para que exista combustión se necesita combustible, oxidante y una temperatura de ignición. Al reaccionar se desprende una gran cantidad de energía en forma de calor, la expresión física de esta energía se le denomina llama.

Las llamas generadas a partir de gases combustibles se dividen generalmente en dos clases: las premezcladas y las no premezcladas. Ambos tipos se pueden caracterizar en llamas laminares y turbulentas [1]. La **Tabla 1** presenta una primera separación de las llamas en cuatro categorías.

Tabla 1. Ilustraciones de los diferentes tipos de llama [1].

	Laminar	Turbulento
Premezclado	 Llama Bunsen	 Llama estabilizada por descarga
No premezclado	 Encendedor	 Llama de chorro

Las llamas no premezcladas también se les conoce como llamas difusivas, ya que la mezcla de los reactivos ocurre principalmente a través del transporte difusivo a nivel molecular. Sin embargo, es importante reconocer que, en sistemas premezclados, la difusión sigue siendo necesaria para

transportar la premezcla hacia la región de reacción [2]. Por lo que el término “llamas difusivas” está en proceso de desuso. No obstante, por conveniencia en este trabajo se seguirá usando este término.

En las llamas premezcladas, combustible y oxidante son mezclados antes de entrar a la zona de reacción. Estas llamas solo dependen de la velocidad de reacción [3]. En las llamas difusivas, el oxidante y el combustible están inicialmente separados y se mezclan en el mismo lugar donde ocurre la reacción. Por lo tanto, la combustión se desarrolla en la interfaz donde se encuentran el combustible y el oxidante, y en contraste con las llamas premezcladas, el proceso de combustión depende más de la velocidad a la que los reactivos se mezclan entre sí, que por la velocidad intrínseca de la reacción. Por esta razón, las características de las llamas difusivas dependen considerablemente de las condiciones particulares aerodinámicas de los flujos reactivos [3].

En las llamas difusivas, la velocidad de reacción química es mucho más rápida que la velocidad de difusión del gas. En consecuencia,

(1) la reacción química ocurre en una zona estrecha entre el combustible y el oxidante;

(2) las concentraciones de oxidante y combustible son muy bajas en la zona de reacción;

(3) la rapidez a la que se produce la combustión está controlada por la velocidad en la cual el combustible y el oxidante fluyen hacia la zona de reacción a través de los productos de combustión.

Entonces, en el caso límite donde la velocidad de reacción es infinitamente rápida,

(1) la zona de reacción se vuelve infinitamente delgada, es decir, que la zona de combustión se vuelve una “lámina de llama”;

(2) las concentraciones de combustible y oxidante se vuelven cero en la superficie de la llama, no hay presencia de oxidante en la zona del combustible ni combustible en la zona del oxidante. La lámina de reacción actúa entonces como sumidero de los reactivos y fuente de calor y productos de combustión. La situación se muestra en la **Figura 1**(c);

(3) las velocidades de difusión del combustible y del oxidante deben estar en proporciones estequiométricas y estas proporciones definen el lugar de superficie de la llama [3].

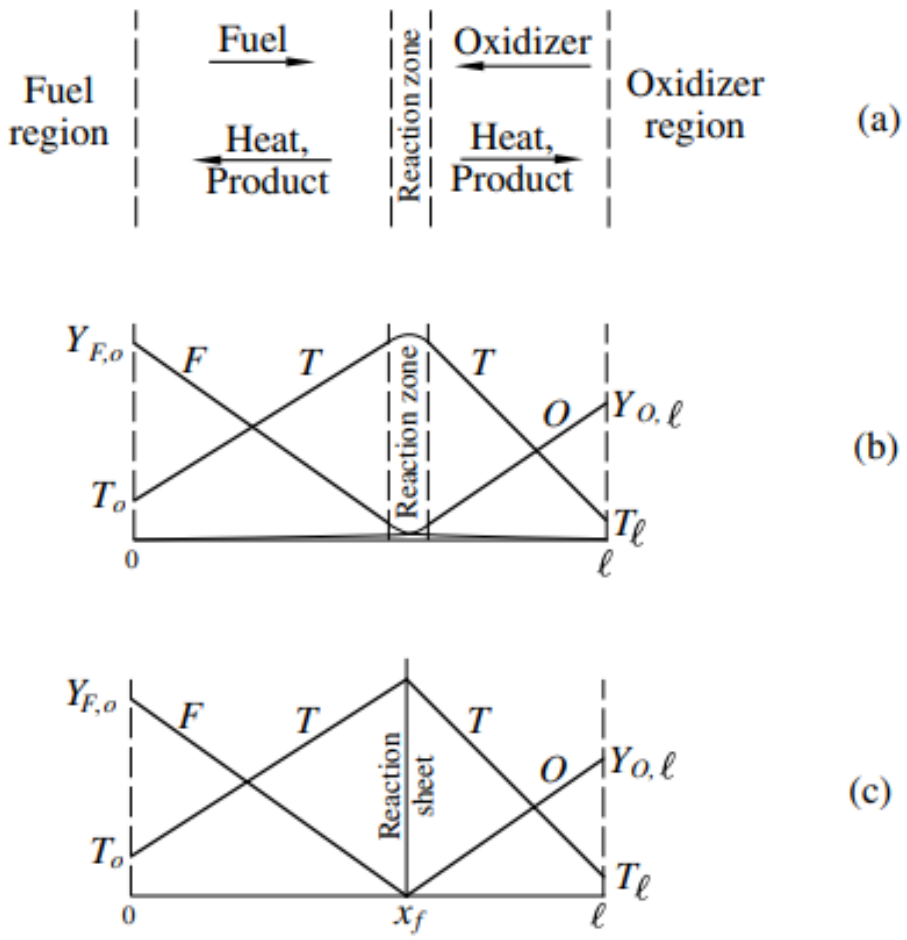


Figura 1. Estructura de una llama no premezclada: (a) configuración física de una dimensión, sistema puramente difusivo; (b) perfiles de temperatura y concentración con llama de espesor finita y fuga de reactante; (c) perfiles de temperatura y concentración con suposición de lámina de reacción [2].

En presencia de un transporte cinético de velocidad finita, la lámina de reacción se ensancha, los reactantes se filtran a través de ella y la velocidad de combustión se reduce, situación mostrada en la **Figura 1**(b). Cuando las fugas y la reducción de la temperatura de la llama se vuelven relativamente importantes, se produce la extinción. Por lo tanto, mientras la llama arda de forma constante, las características de la combustión en general pueden aproximarse satisfactoriamente mediante la solución de lámina de reacción [2].

Las estructuras representadas en la **Figura 1** son estables solo cuando se aplica tensión a la llama. Una llama difusiva “pura” puede establecerse en la zona de choque de dos flujos gaseosos opuestos de combustible y oxidante. Esta llama de difusión de contraflujo se ha observado con gran

interés porque proporciona un método adecuado para estudiar en detalle la estructura de la llama de difusión pura, un método experimental novedoso para estimar la velocidad de reacción global para combinaciones de combustible y oxidante [3].

1.1. Importancia de estudiar las llamas difusivas en diferentes aplicaciones industriales

Las llamas premezcladas y difusivas tienen propiedades diferentes: las premezcladas son más intensas y contaminan menos. Pero también son más peligrosas porque cualquier punto de alta temperatura en un gas premezclado puede provocar la ignición y una combustión no deseada. En cambio, las llamas de difusión tienen una velocidad de combustión menor y temperaturas máximas locales más elevadas, lo que provoca niveles de contaminación más altos. Sin embargo, son más seguras porque los reactivos se almacenan por separado y se mezclan sólo dentro de la cámara de combustión. Otra diferencia son los límites de inflamabilidad: las llamas no premezcladas pueden arder para cualquier caudal de combustible y oxidante, son más sencillas de diseñar y construir: no requieren premezclado con una relación de equivalencia determinada, mientras que las premezcladas están limitadas en cuanto a las características de mezcla: si son demasiado pobres o ricas no pueden propagarse [1].

El estudio de las llamas difusivas y la comprensión de su comportamiento son de gran importancia en diversas aplicaciones industriales, especialmente en sectores como la petroquímica, la metalurgia y la energía.

1. En la *industria petroquímica*, las llamas difusivas son comunes en procesos de combustión utilizados para la producción de productos químicos a partir de materias primas derivadas del petróleo.
2. En la *industria metalúrgica*, las llamas difusivas se utilizan en procesos de fusión, tratamiento térmico y soldadura.

3. En la *industria de la energía*, las llamas difusivas son relevantes en aplicaciones como la generación de energía térmica y la combustión en turbinas.

Las llamas difusivas representan un aspecto fundamental en el campo de la combustión, desempeñando un papel crucial en una variedad de aplicaciones industriales y tecnológicas. Su estudio contribuye significativamente a la comprensión de los procesos de reacción y transferencia de calor en sistemas de combustión, lo que tiene implicaciones directas en el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles.

1.2. Objetivos

En el marco del proyecto FONDEF-VIU denominado “Innovador quemador de hidrógeno verde para la industria minera”, se propone la implementación de un quemador de flujos opuestos de manera de permitir el estudio de llamas de diversos combustibles (metano, hidrógeno, entre otros). En este contexto, el objetivo general del presente trabajo es implementar y desarrollar ensayos de puesta en marcha de un quemador de flujos opuestos de combustible y oxidante, que permita la obtención de una llama plana para su investigación y análisis. Los objetivos específicos son:

1. Diseñar y construir una base-soporte que permita el movimiento vertical de las componentes del quemador.
2. Instalar el quemador de flujos opuestos en la base-soporte construida.
3. Implementar el quemador con sistemas de control y medición de combustible y oxidante, y de un sistema de refrigeración por agua.
4. Desarrollar ensayos de puesta en marcha con variación de parámetros operacionales, principalmente distancia de suministro de combustible y oxidante, verificando la morfología de la llama resultante.

1.3. Quemadores de contraflujo

La “llama de difusión estable unidimensional tensionada” [1] es el principal prototipo para estudiar llamas difusivas en un laboratorio (**Figura 2**). Hasta la fecha, se han utilizado dos tipos de quemadores de contraflujo para la investigación de esta combustión:

a. Quemador Tsuji: establece una llama no premezclada entre la corriente de combustible que sale del medio poroso de la superficie cilíndrica o esférica, y una corriente uniforme de aire que fluye hacia la superficie. Una configuración de este quemador se visualiza en la **Figura 3**(a).

b. Quemador de Flujos Opuestos: consta de dos conductos dispuestos vertical y coaxialmente: la llama en contracorriente se establece entre los dos conductos. En este tipo de quemador, los conductos internos generalmente tienen conductos externos desde los cuales inyectan un fluido de cortina ambiental como el nitrógeno para mejorar la estabilidad de la llama. La configuración de este quemador se visualiza en la **Figura 3**(b). Para que el perfil de velocidad de salida de las boquillas sea uniforme y ordenado, se colocan perlas de vidrio y mallas dentro de los conductos del sistema del quemador.

De los dos tipos de quemadores, el “quemador de flujos opuestos” se ha utilizado más ampliamente en la investigación de la combustión en los últimos años [4]. El diámetro interior de la boquilla del quemador se determina de acuerdo con cada situación de investigación. Se sabe implícitamente que un tamaño lateral de llama que es 10 veces su espesor es suficiente para asegurar la unidimensionalidad de la llama [4].

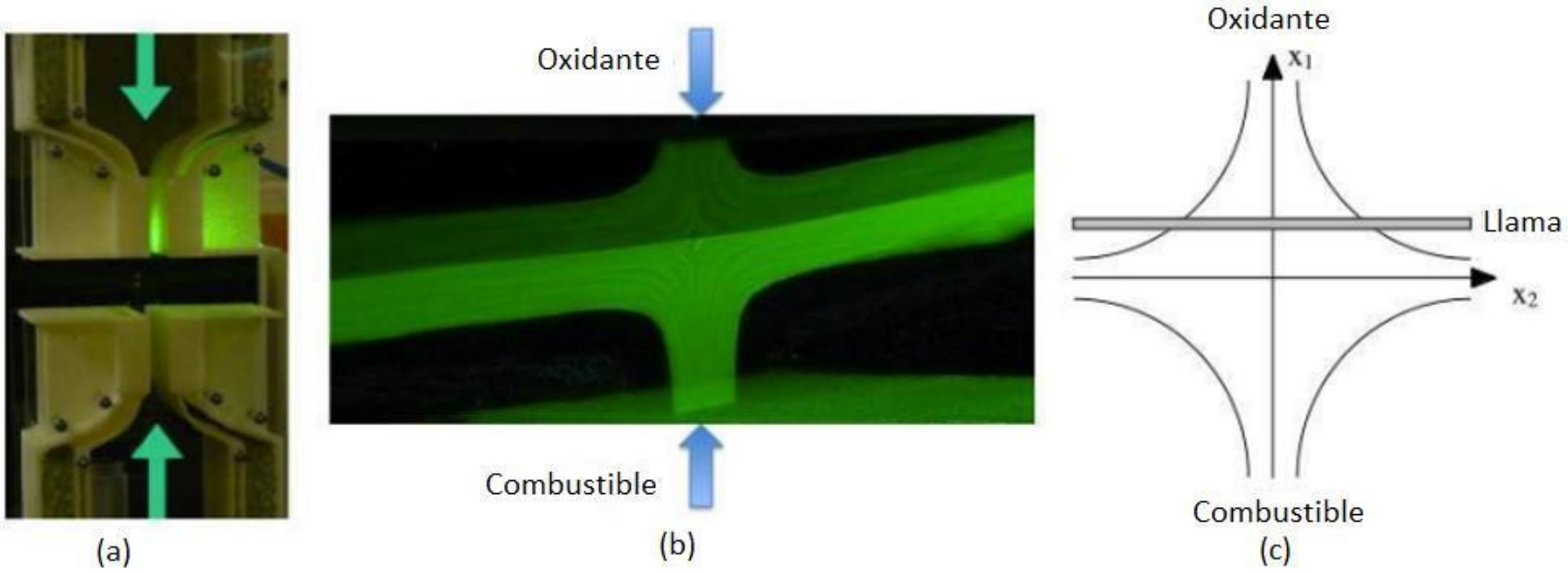


Figura 2. Llama difusiva estable unidimensional tensionada: (a) configuración de laboratorio; (b) visualización de flujos; (c) ejes y modelo unidimensional [1].

En las llamas de hidrocarburo/aire, el aire puede ser considerado 21% oxígeno y 79% nitrógeno en concentraciones molares, esto implica que por cada mol de oxígeno hay 3.76 moles de nitrógeno. Por lo tanto,

$$Aire = 0.21O_2 + 0.79N_2 \quad \text{o} \quad 4.76Aire = O_2 + 3.76N_2$$

Para la mayoría de los dispositivos de combustión que generan calor y energía, el oxidante es simplemente el oxígeno en el aire. Dado que la mayor parte del aire es nitrógeno, que es inerte en lo que respecta a la liberación de calor químico, la temperatura de combustión y, por lo tanto, la intensidad, se reducen debido al gasto de energía térmica utilizada para calentarlo durante el curso de la combustión. Por lo tanto, para aplicaciones que requieren una combustión intensa, se utiliza aire enriquecido con oxígeno o incluso oxígeno puro [2].

Para $\phi < 1$, la llama se localiza en el lado del combustible del plano de estancamiento, lugar donde colisionan los gases. Para $\phi > 1$, y la llama se localiza en el lado del oxidante del punto de estancamiento. El frente de llama siempre se localiza en el lado del reactante deficiente y yace en el plano de estancamiento solo cuando $\phi = 1$, es decir, cuando los reactantes están en proporciones estequiométricas [1].

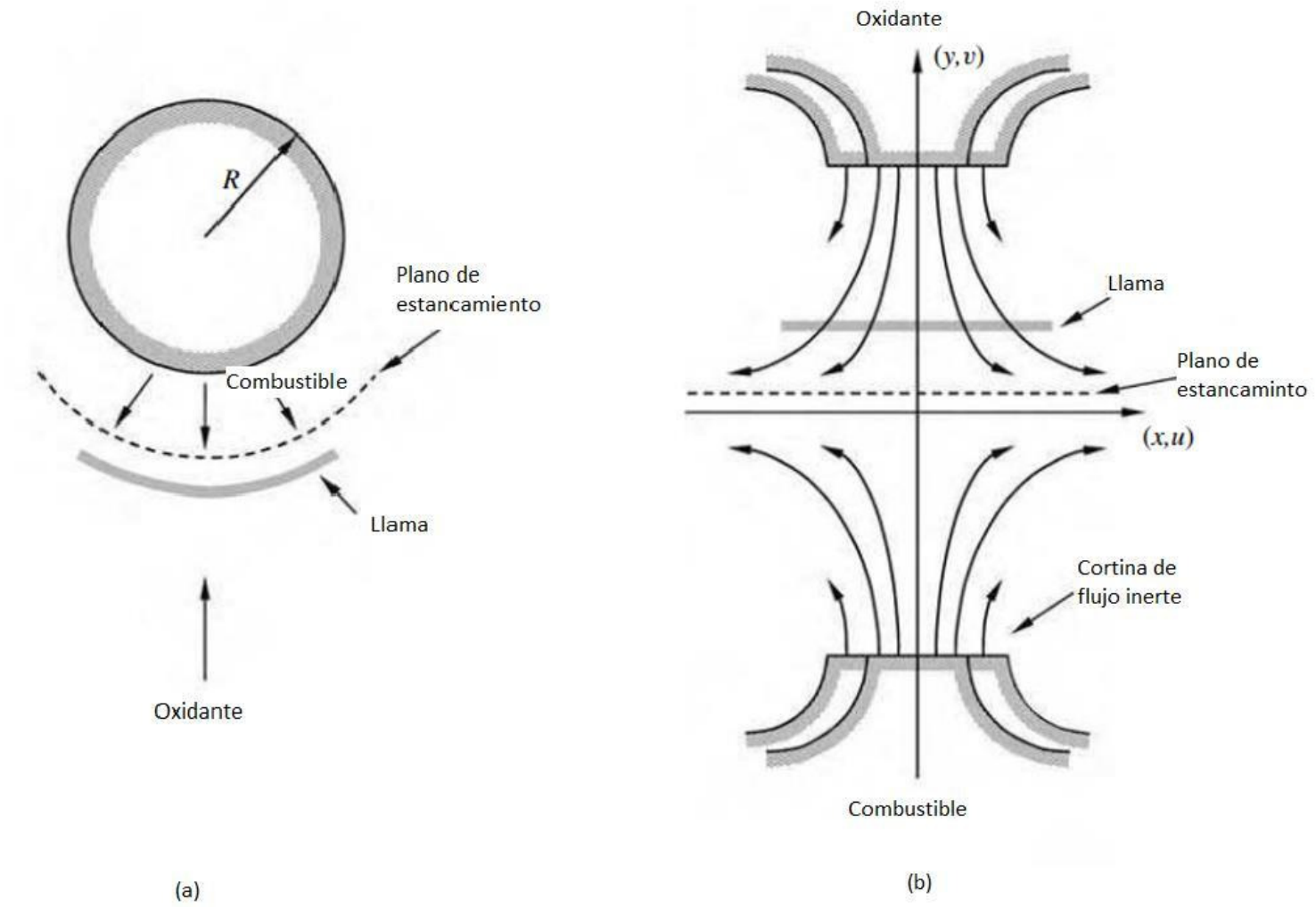


Figura 3. Esquemas que muestran la llama de contraflujo generada por: (a) quemador Tsuji; (b) quemador de flujos opuestos [2].

1.4. Tasa de deformación o “strain rate”

En una llama difusiva, si los flujos de combustible y oxidante en la zona de reacción aumentan hasta superar un valor crítico, la reacción química no podrá seguir el ritmo de suministro del combustible y oxidante, y la extinción de la llama se produce inevitablemente [3]. Esto indica que el flujo puede caracterizarse por un único parámetro para controlar el comportamiento de la llama, su tasa de deformación o “strain rate” [4]. Para un quemador de flujos opuestos, el strain rate a_g, cambia variando la distancia de separación entre los conductos del quemador o las velocidades del aire y del combustible entrantes, ver Ecuación (1).

$$a_g = \frac{2V_O}{L}\left(1 + \frac{V_F\sqrt{\rho_F}}{V_O\sqrt{\rho_O}}\right) \tag{1}$$

Donde:

- a_g: Strain rate $\left[\frac{1}{s}\right]$
- V_O: Velocidad del oxidante $\left[\frac{cm}{s}\right]$
- V_F: Velocidad del combustible $\left[\frac{cm}{s}\right]$
- L: Distancia entre las boquillas $[cm]$
- ρ_F: Densidad del combustible $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
- ρ_O: Densidad del oxidante $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

El aumento de la tasa de deformación hace que la llama de contraflujo se extienda radialmente y su espesor disminuya. Por lo que el tamaño de la llama lateral se vuelve entonces suficientemente grande en comparación con su espesor, logrando la unidimensionalidad.

1.5. Aplicaciones y casos de estudio previos de quemadores de flujos opuestos en la investigación de llamas difusivas.

Se han realizado estudios computacionales y experimentales sistemáticos de las llamas no premezcladas a contracorriente. Investigaciones recientes han favorecido el uso de quemadores de flujos opuestos debido a la simetría de la configuración y a la capacidad de introducir partículas en ambos flujos para la cartografía LDV (Velocimetría Láser Doppler) o PIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas) del campo de flujo. También se han empleado otras técnicas de diagnóstico láser para determinar los perfiles de temperatura y concentración [5]. Además, hoy en día es habitual simular computacionalmente llamas de contraflujo de densidad variable casi unidimensionales [2].

En la **Figura 5** se comparan los perfiles de temperatura y de especies principales calculados y medidos para la llama de la **Figura 4**, con las mediciones experimentales realizadas mediante espectroscopia Raman espontánea.

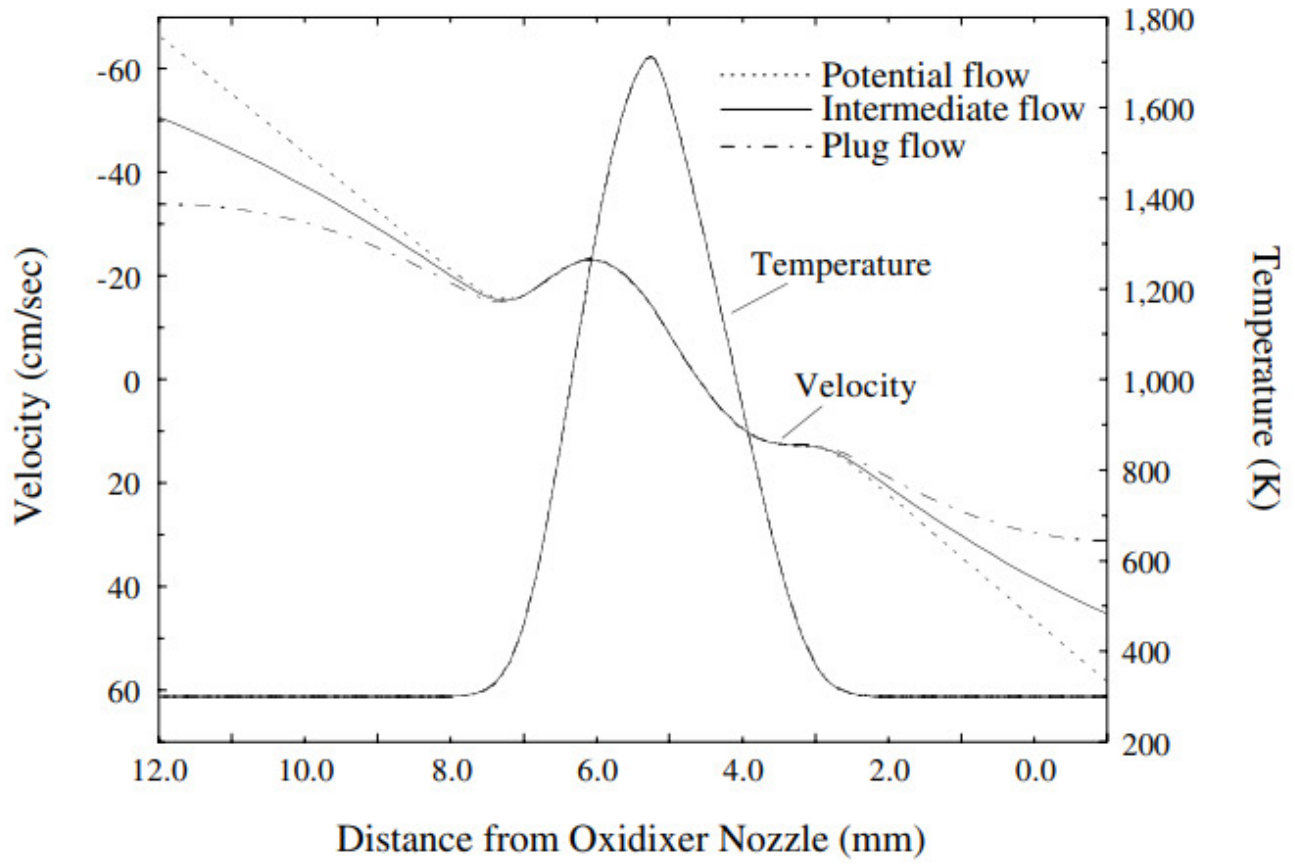


Figura 4. Perfiles calculados de velocidad y temperatura para una llama de contraflujo simétrica generada por un flujo de 23% de metano en nitrógeno contra un flujo de 23% de oxígeno en nitrógeno, para diferentes descripciones del flujo [5].

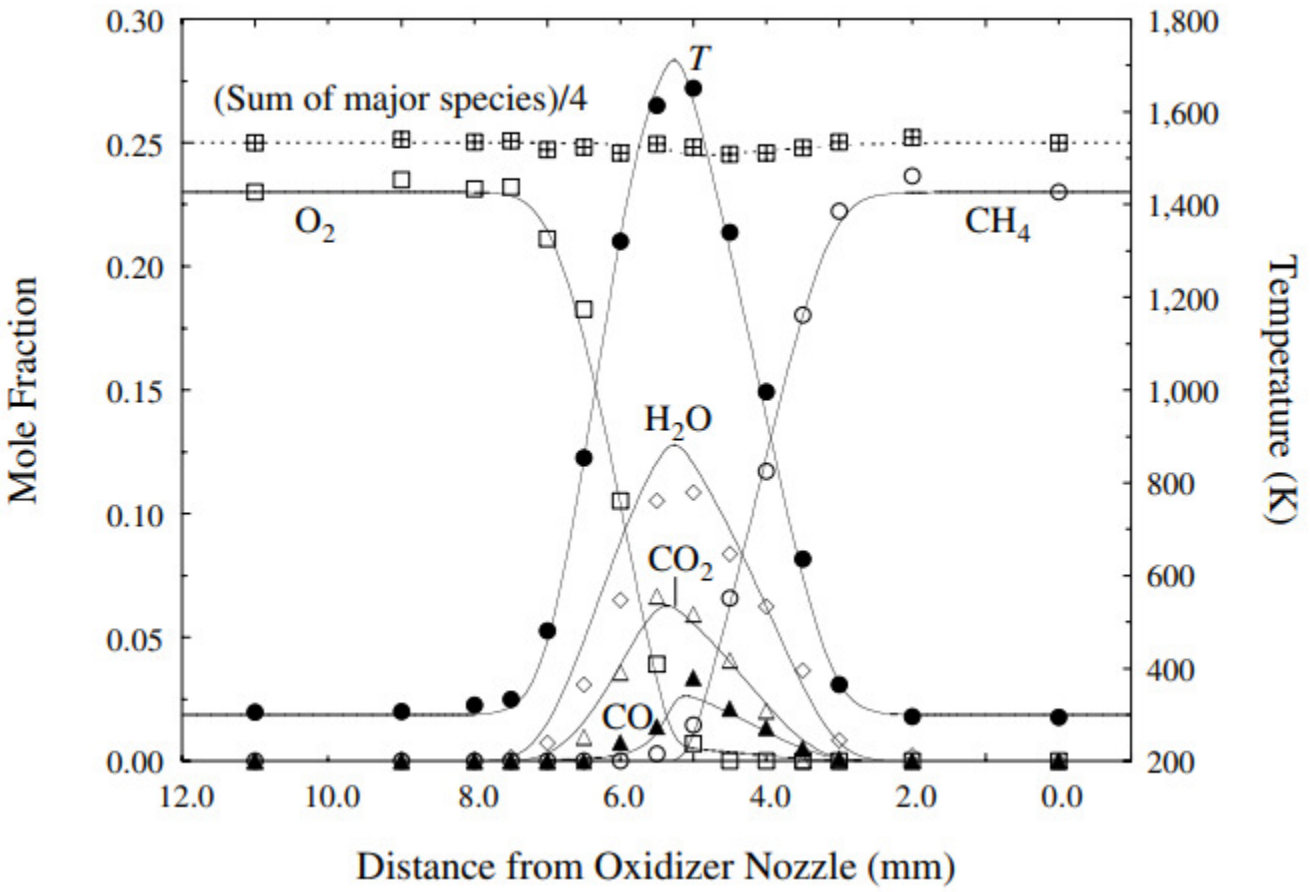


Figura 5. Perfiles de temperatura y especies principales calculados y experimentales para la llama de la **Figura 4**, con un a_g = 56 [s^{-1}] [5].

La **Figura 6** muestra los perfiles de temperatura calculados y medidos para distintos strain rates. Se observa que la llama se vuelve más fina con el aumento de strain rate. Esto es razonable debido a la reducción del tiempo de residencia del flujo.

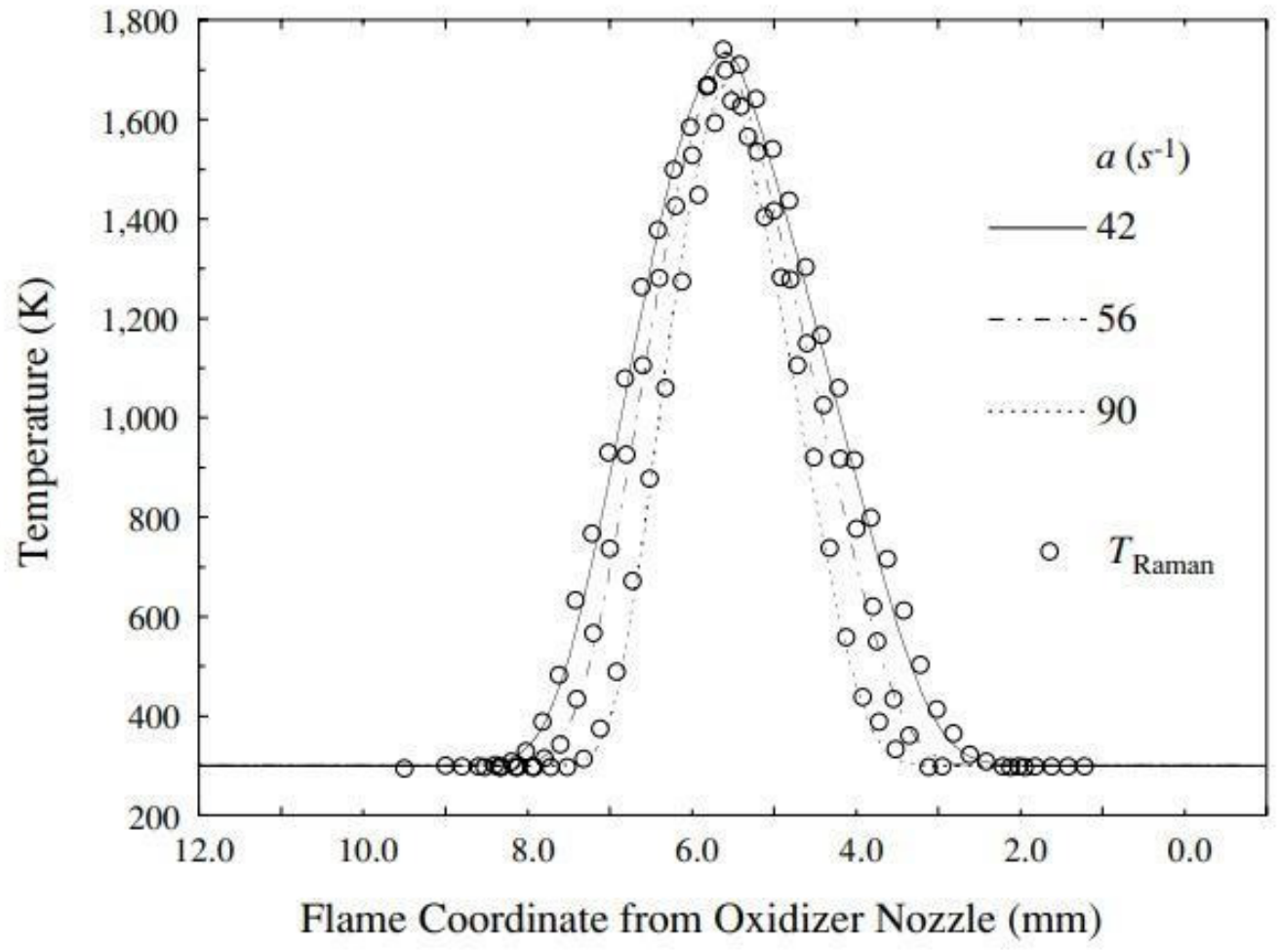


Figura 6. Perfiles de temperatura calculados y experimentales de la **Figura 5**, con varios strain rates [5].

Para una llama de un quemador de diámetro pequeño, d = 23.4 [mm], se demostraron diferencias en el grosor de la llama, de la temperatura máxima y de la tasa máxima de liberación de calor en comparación con un quemador de diámetro grande, d = 50 [mm], a un strain rate a_g = 17 [s^{-1}]. Sin embargo, para strain rates altos, a_g = 70 [s^{-1}], la diferencia es casi nula para efectos prácticos [4].

Tabla 2. Parámetros calculados para distintos valores de diámetro de boquillas y de strain rate [4].

Strain rate global		**17 s^{-1}**		**70 s^{-1}**	
Diámetro de la boquilla del quemador		**23.4 [mm]**	**50 [mm]**	**23.4 [mm]**	**50 [mm]**
Máxima tasa energía de liberación	[J/cm^3-s]	146.2	111.8	235.6	243.1
Máxima temperatura	[K]	1831	1748	1740	1746
Espesor de llama	[mm]	7.9	9.4	5.0	5.0

II. Metodología

2.1. Equipo experimental

El diseño original del quemador fue desarrollado originalmente para estudios de llamas parcialmente premezcladas de metano/aire en contracorriente por Yang y Puri [6] (**Figura 7**), se modificó para el funcionamiento con oxicombustible a bajo strain rate [7]. Las boquillas de combustible y oxidante tienen diámetros interiores de 52 [mm]. El nitrógeno cofluyente se introduce a través de un conducto anular cilíndrico alrededor del borde exterior de 60 [mm] y 108 [mm], respectivamente. Los flujos de combustible, oxidante y nitrógeno se introducen en las secciones superior e inferior del quemador, respectivamente. Las bolas de vidrio se utilizan para distribuir los flujos de manera uniforme. Por último, se utilizan mallas o rejillas de acero inoxidable para estabilizar los flujos de combustible y oxidante directamente en las salidas de las toberas, mientras que las mallas exteriores por donde sale el nitrógeno sirven para estabilizar el flujo de este.

El combustible y el oxidante chocan entre sí para formar un plano de estancamiento estable, con una llama de difusión establecida desde el lado del oxidante. A strain rates bajos, el plano de estancamiento se desplaza hacia arriba desde la posición media entre 1 a 3 [mm] debido a la succión de escape [7]. Este efecto se elimina colocando un disco anular en la tobera del combustible, evitando así la succión directa de la corriente de combustible. El flujo de nitrógeno no influye en la posición del plano de estancamiento [7]. En la **Figura 8** se muestra un esquema del quemador modificado. Y en la **Figura 9** se muestra un esquema del quemador actual.

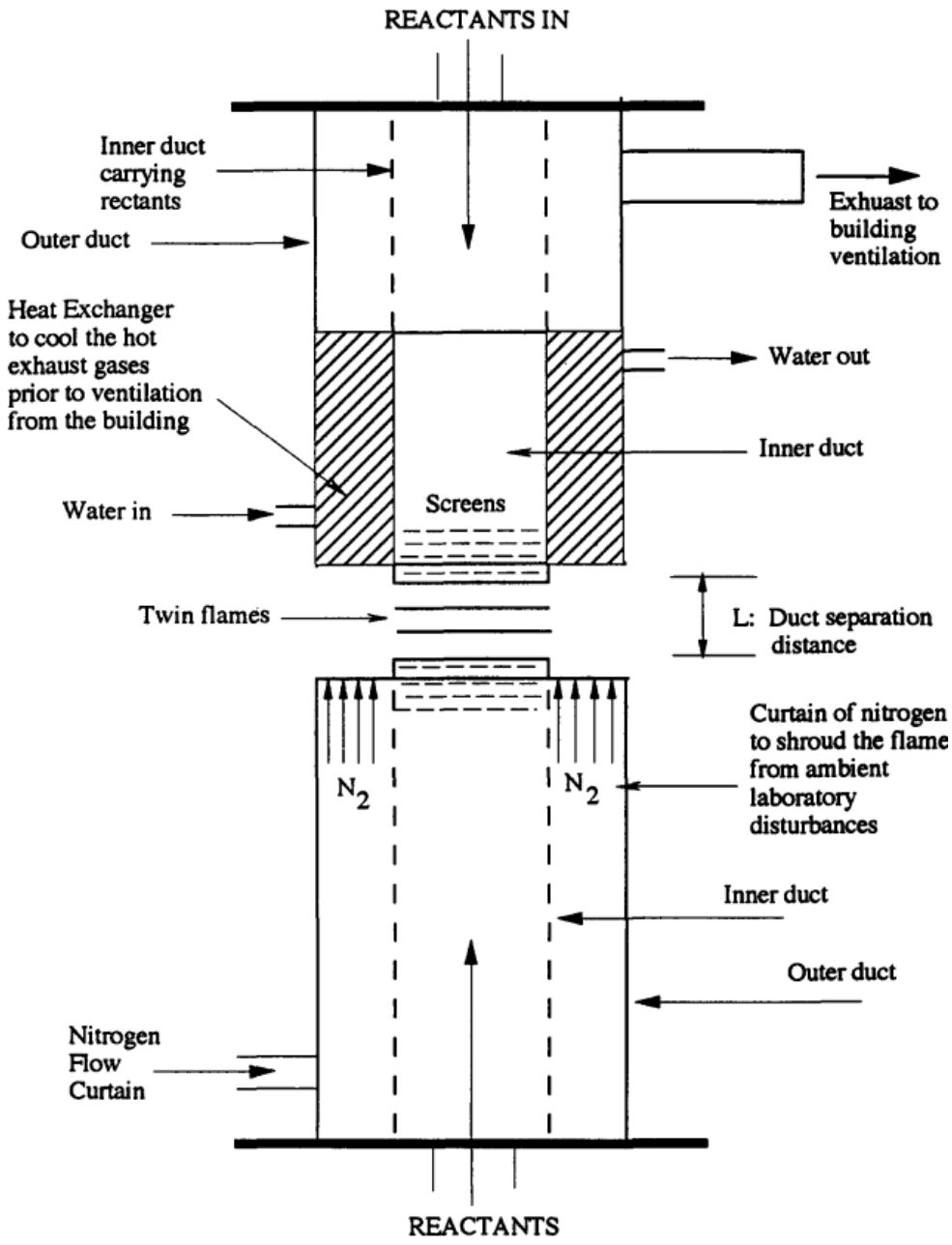


Figura 7. Esquema del quemador de flujos opuestos de Yang y Puri [6].

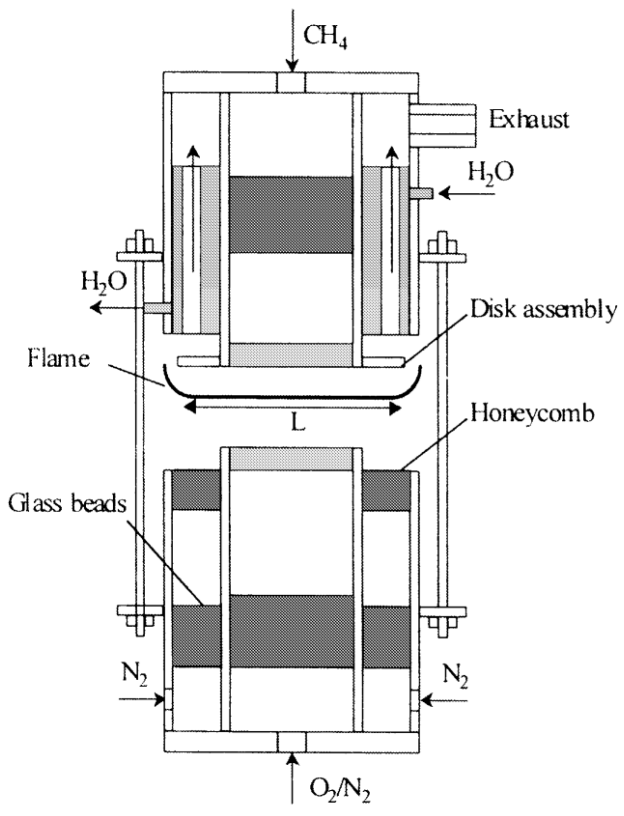


Figura 8. Esquema del quemador de flujos opuestos modificado con disco [7].

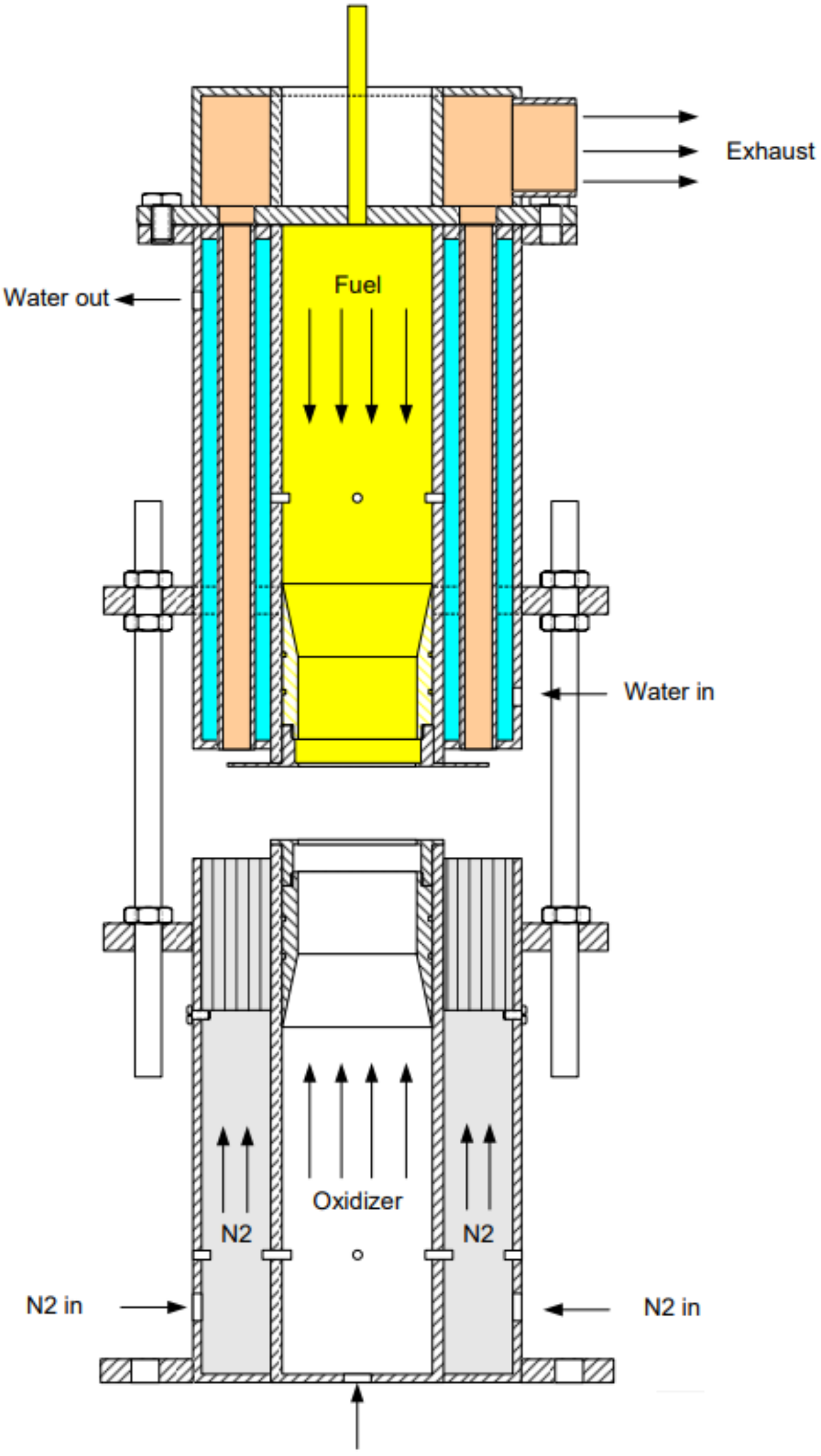


Figura 9. Esquema del quemador de flujo actual.

2.2. Estado de las Piezas Recuperadas del Quemador: Análisis y Evaluación

El quemador está hecho en toda su estructura de acero inoxidable. El uso de acero inoxidable como material para el quemador se debe a varias ventajas que ofrece en entornos de combustión. Entre estas ventajas se encuentran:

- Resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia mecánica y estructural, lo que garantiza la durabilidad y seguridad del quemador durante su funcionamiento.
- Estabilidad a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para soportar las condiciones térmicas del proceso de combustión.

El quemador data del año 2009, por lo que al año 2022 se extraviaron piezas y no se encuentra en su totalidad. En primera instancia, se hace un listado y análisis de las piezas recuperadas del quemador:

- **Cuerpo superior con soporte de boquilla empotrado.** Está de un tono oscuro en su zona inferior debido a la combustión en ensayos anteriores. Al soporte de la boquilla le falta la boquilla del combustible.
- **Cuerpo inferior con soporte de boquilla empotrado.** Está en buen estado. Similar al cuerpo superior, al soporte de la boquilla le falta la boquilla del oxidante.
- **Colector de gases.** En estado óptimo, sin presentar daños.
- **Base.** Presenta corrosión en sus apoyos, no obstante, se encuentra en condiciones adecuadas para su uso.

Para saber el estado de los cuerpos inferior y superior, se llevó a Metalmecánica Lourdes para que llevara un procedimiento de desarme y tener una mejor visibilidad de sus interiores. Se encontró una leve corrosión en el cuerpo inferior y un soporte de boquilla con hilos desgastados y torcidos.

Por lo tanto, las boquillas fueron encargadas para su fabricación a Metalmecánica Lourdes. Por otro lado, la empaquetadura de grafito fue confeccionada en las instalaciones del Laboratorio de Termofluidos. Se procede a la elaboración de los planos principales del quemador, los cuales se encuentran disponibles en **Anexo A** - **Anexo L**.



Figura 10. Cuerpo inferior: (a) vista superior; (b) vista frontal; (c) vista inferior.



Figura 11. Cuerpo inferior: (a) vista frontal; (b) vista superior; (c) vista inferior.



Figura 12. Colector de gases: (a) vista superior; (b) vista inferior; (c) vista frontal.



Figura 13. Base: (a) Vista inferior; (b) vista superior; (c) vista lateral.



Figura 14. Cuerpo inferior desarmado.

2.3. Diseño de sistema de movimiento vertical

Propuesta: En el Laboratorio de Termofluidos hay un armazón desechado con un sistema de levantamiento para cargas pesadas. Se propone reutilizar esta estructura y adaptarla para instalar el quemador y usar su sistema de levantamiento para el movimiento vertical.

Se considera el diseño del sistema de movimiento que tenía originalmente [8], se realiza un análisis y una comparación de ventajas y desventajas de ambos sistemas, ver **Tabla 3**.

Sistema de movimiento vertical original: El movimiento del sistema original se produce debido al ajuste de varias tuercas. El sistema original tiene un atril de acero con perfil C en el cual va sujeto por la superficie de arriba el cuerpo superior, y por la superficie de abajo el cuerpo inferior. El cuerpo inferior es estático mientras que el superior es móvil. Los espárragos conectores van enroscados en el hilo interior de cada agujero de la aleta inferior, mientras que en la aleta superior se afirma cada perno con una tuerca cada uno para sostener todo el conjunto superior. Además, cada soporte del cuerpo superior lleva una tuerca por encima de los espárragos superiores para que, cuando esté a una altura definida, se aplique fuerza para darle estabilidad al cuerpo superior.

Sistema de movimiento vertical nuevo: El movimiento del sistema nuevo se produce por un volante que regula la altura. El sistema nuevo tiene, al igual que el original, el cuerpo inferior estático y el superior móvil. Los espárragos conectores están modificados, tienen a lo largo una sección central sin hilos que ha sido desbastada para ser sólida y cilíndrica. No se usan los hilos de la aleta inferior, en cambio, los agujeros actúan como pasantes. A diferencia del sistema original, los espárragos conectores están fijamente atornillados en la aleta superior, lo mismo con los espárragos superiores y los soportes del cuerpo superior, esto con la finalidad de dar rigidez a todo el conjunto superior. Los espárragos conectores no están sujetos a la aleta inferior, sin embargo, es la parte importante del nuevo sistema. Los espárragos tienen en su zona inferior roscada resortes, los cuales van ajustados por tuercas para darles presión. Al haber tres espárragos y de estos, tres resortes a los cuales se ejerce presión crean tres

fuerzas equidistantes que dan concentricidad y alineación al quemador. Mientras más presión ejerzan los resortes, más rígido y concéntrico será el sistema. Por lo tanto, solo se necesita girar el volante para que suba o baje el eje, en el cual, de manera rígida está unido todo el conjunto superior.

Tabla 3. Comparación de ventajas y desventajas entre el sistema de movimiento original y nuevo

Original	Nuevo
Toma más tiempo (se ajustan siete tuercas)	Toma menos tiempo (solo se gira el volante)
Se requiere de dos usuarios para usarlo	Se requiere de un solo usuario
El quemador se debe apagar para usarlo (es invasivo)	Se puede usar con el quemador encendido (no es invasivo)
La altura se mide manualmente	Tiene indicador de altura sin necesidad de medirla manualmente
Tiene mejor alineación	La alineación depende de las fuerzas variables que apliquen los resortes
Tiene una mantención más sencilla (usa menos piezas)	Tiene una mantención más compleja (usa más piezas)

Nota. Las ventajas están escritas con letras azules y las desventajas escritas con letra roja.

Resolución: Se decide que el sistema nuevo es la opción más favorable debido a su innovación y eficiencia.

2.4. Diseño de líneas de suministro

2.4.1. Suministro de gases

2.4.1.1. Combustible

La línea de combustible se utiliza para suministrar gas natural, principalmente metano, al quemador y que ocurra la combustión. El gas natural es suministrado por la empresa GasValpo mediante una línea directa de 1 [bar]. Especificaciones técnicas del gas natural, ver **Anexo M**.

2.4.1.2. Oxidante

La línea de oxidante se utiliza para suministrar aire al quemador y que ocurra la combustión. El aire es suministrado por un compresor marca SCHULZ modelo MSV 6/30 1 hp – 750 W sin aceite (**Figura 15**), a 1 [bar]. Especificaciones técnicas del compresor, ver **Anexo N**.



Figura 15. Compresor marca SCHULZ modelo MSV 6/30 1 hp – 750 W.

2.4.1.3. Gas inerte

La línea de gas inerte se utiliza para suministrar nitrógeno al quemador y encerrar la combustión mediante una cortina de nitrógeno. Al ser un gas inerte, no reacciona en la combustión y proporciona una atmósfera no reactiva. El suministro del nitrógeno se consiguió por un cilindro de gas 99.999% de pureza de la empresa LINDE, y un cilindro de gas grado alimento de la empresa INDURA, especificaciones técnicas ver **Anexo O** y **Anexo P**. El nitrógeno al igual que los demás gases es suministrado a 1 [bar] de presión.

2.4.2. Características técnicas

2.4.2.1. Líneas de combustible y gas inerte

El material de construcción es de acero inoxidable. Tubería de 3/8 [in] con una presión máxima de trabajo de 3200 [PSI] (> 220 [bar]). Veáse **Anexo Q**.

2.4.2.2. Línea de oxidante

El material de construcción de la línea de oxidante es de nylon. Tubería de diámetro 12 [mm] con una presión máxima de 210 [PSI] (> 14 [bar]). Ver **Anexo R**.

2.4.3. Conexiones

2.4.3.1. Combustible

La línea del combustible parte desde su suministro hacia una válvula de paso que es la entrada hacia la sala de ensayo. Luego, pasa por un controlador de flujo marca AALBORG modelo GFC17, **Figura 16** y **Anexo T**, y pasa por una válvula de seguridad. El combustible se inyecta al reactor mediante un codo de acero inoxidable que va hacia un tubo 3/8 [in] que está soldado a una conexión hidráulica hembra giratoria BSP de acero inoxidable (**Anexo S**), roscada al colector de gases, ver **Figura 17**.



Figura 16. Controlador de flujo. Imagen ilustrativa.



Figura 17. Conexión del combustible hacia el quemador.

2.4.3.2. Gas inerte

La línea de nitrógeno inicia en el cilindro de nitrógeno junto con su válvula reguladora. A continuación, ingresa a la sala de ensayos a través de una válvula de regulación de flujo y pasa a un controlador de flujo marca AALBORG modelo GFC37, **Figura 16** y

Anexo T, para llegar a una válvula de seguridad. El nitrógeno está conectado al reactor mediante dos codos de acero inoxidable, cada uno hacia un tubo 3/8 [in] que está soldado a una conexión hidráulica hembra giratoria BSP de acero inoxidable. Estas conexiones se encuentran enroscadas en la superficie lateral del cuerpo inferior, ver **Figura 18** y **Figura 19**.



Figura 18. Primera conexión del nitrógeno hacia el quemador.

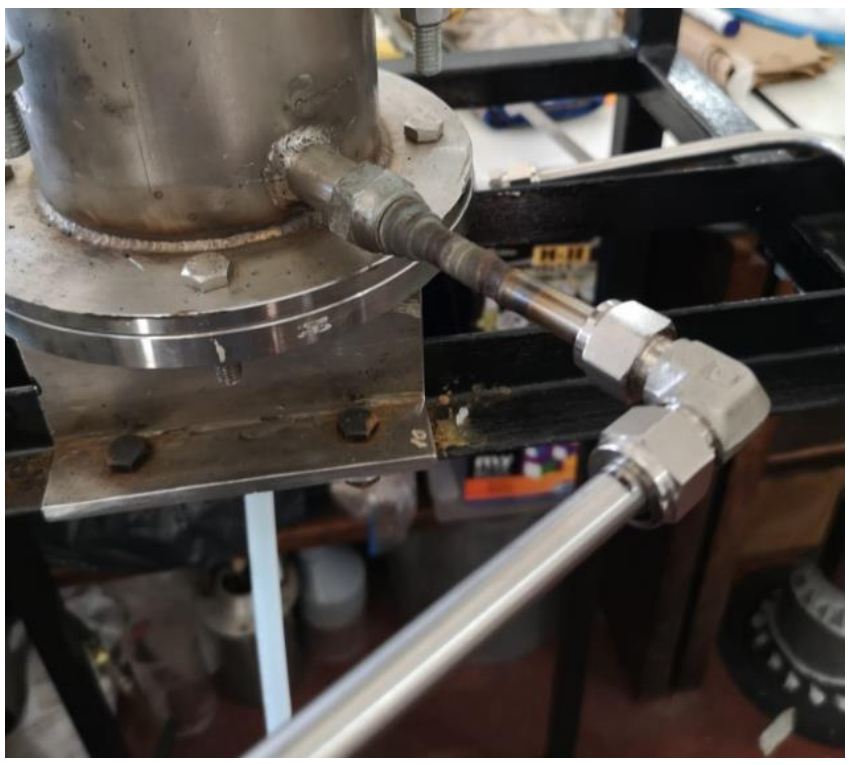


Figura 19. Segunda conexión del nitrógeno hacia el quemador.

2.4.3.3. Oxidante

La línea de oxidante comienza en el compresor de aire, recorre una unidad de mantenimiento hidráulico (FRL), marca EMC modelo HEL-4000-035-T (**Figura 20**), y llega a una válvula de seguridad, para

así pasar a un controlador de flujo marca AALBORG modelo GFC17. El oxidante se inyecta al quemador mediante la conexión de una manguera de nylon con una conexión hidráulica hembra giratoria BSP de acero inoxidable roscada en la superficie inferior del cuerpo inferior, como muestra la **Figura 21**.



Figura 20. Filtro-Regulador Lubricador.



Figura 21. Imagen ilustrativa de conexión del oxidante hacia el quemador [8].

2.4.4. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración se utiliza para regular la temperatura del cuerpo superior cuando ocurra la combustión. El suministro inicia desde una llave de agua potable hacia el quemador y luego desde el quemador hacia el drenaje, por medio de una manguera de goma.

2.4.5. Sistema de gases de escape

El sistema de gases de escape se utiliza para guiar a los gases producto de la combustión hacia el extractor de aire. Mediante una manguera corrugada de aluminio se conecta desde el colector de gases y se dirige hacia el extractor de gases.

2.4.6. Esquema de líneas

La **Figura 22** muestra un esquema de las líneas de suministro y líneas de salida, junto con los dispositivos principales que se usan para el correcto funcionamiento del quemador.

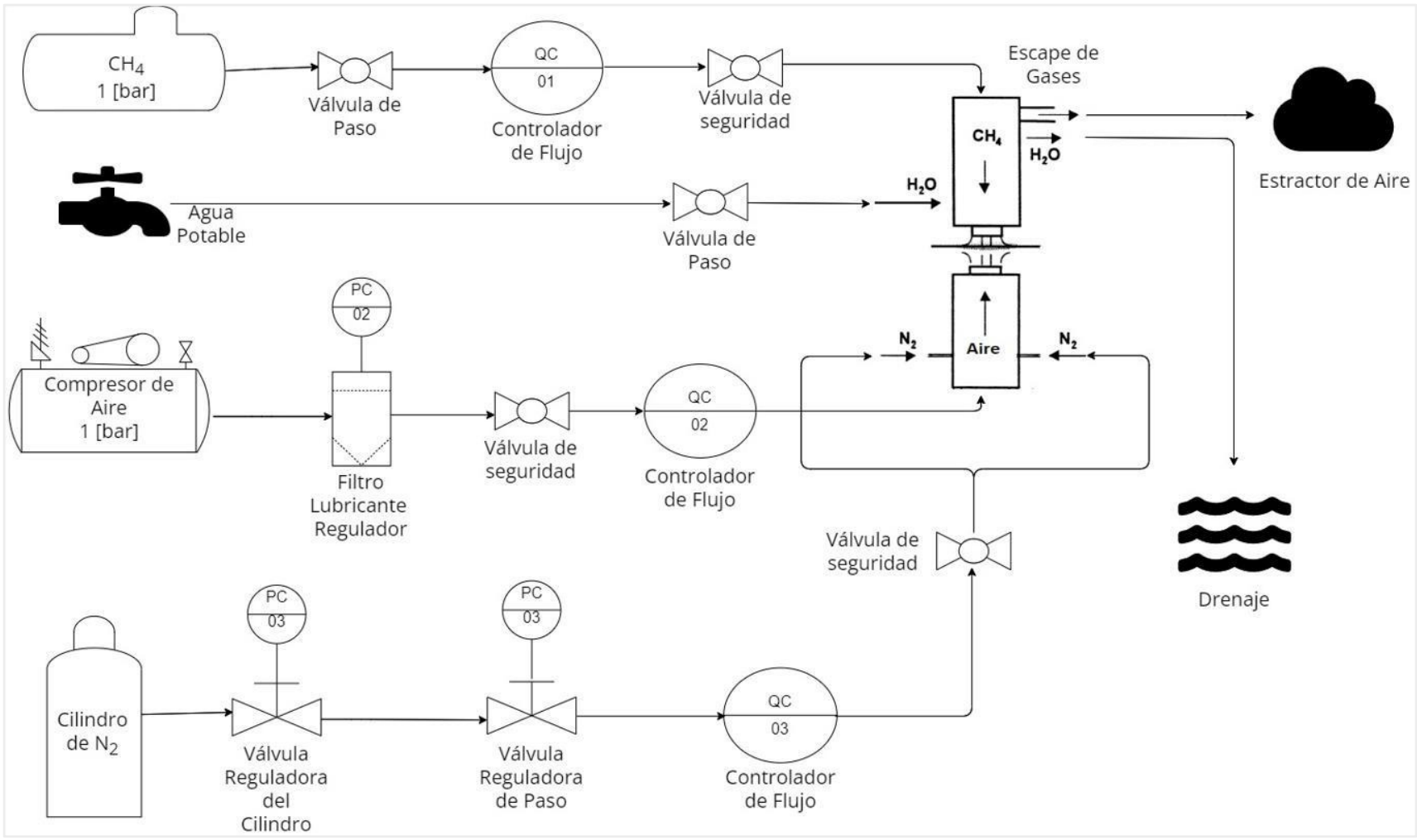


Figura 22. Esquema de las líneas de suministro y líneas de salida.

2.5. Configuración y montaje del quemador de flujos opuestos

La configuración del quemador se divide en seis partes: (1) Estructura base-soporte; (2) Sistema de movimiento vertical; (3) Conjunto inferior; (4) Conjunto superior; (5) Conjunto conector; (6) Colector de gases.

2.5.1. Estructura base-soporte

En esta pieza va sostenida toda la configuración del quemador, es una estructura inutilizada que previamente sostenía cargas de aproximadamente 70 [kg]. La estructura base-soporte consta de un armazón de acero con forma de paralelepípedo recto con perfiles cuadrados de 30 x 30 [mm], ver **Figura 23**. Para facilitar su traslación y rotación tiene instaladas cuatro ruedas en las aristas de la cara inferior. En el medio de su altura cuenta con dos perfiles L 30 x 30 x 2 [mm] transversales para colocar la base del cuerpo inferior. En el centro de la cara superior tiene un rodamiento artesanal, en el cual va unido el eje del sistema de movimiento vertical. Además, cuenta con una regla para la nivelación de altura del cuerpo superior.

2.5.2. Sistema de movimiento vertical

El sistema de movimiento vertical tiene un eje principal que consta de un espárrago de 3/4 [in] de acero aleado, AISI 4140/4142 templado y bonificado, unido por soldadura a un espárrago 7/16 [in] de acero galvanizado (**Figura 24**). Tiene un volante roscado al espárrago de 3/4 [in] para regular la altura del cuerpo superior (**Figura 24**). Una placa de acero con dos alas que actúan como una guía (**Figura 25**(a)), y sirven como línea de referencia para la medición de altura en milímetros al interactuar con la regla de la estructura base (**Figura 29**). Una placa soporte de acero rectangular que conecta (**Figura 25**(b)), con cuatro espárragos de 3/8 [in] (**Figura 26**(a)), el eje principal del sistema con los soportes del cuerpo superior (**Figura 26**(b), **Figura 27**, **Figura 28**).

2.5.3. Conjunto inferior

El conjunto inferior consta de:

Base del cuerpo inferior: Se une a la estructura base-soporte en sus caras inferiores y va fijado el cuerpo principal inferior en su cara superior, (**Figura 31**).

Cuerpo inferior: Donde entra el oxidante y el gas inerte, y donde va empotrado el Subconjunto 1, **Figura 36**.

Subconjunto 1: Un soporte para la unión de boquilla del oxidante (**Figura 33**). Este soporte con forma de cilindro va empotrado al centro del cuerpo inferior, por lo que en su cara lateral tiene ranuras para la sujeción con gomas o-rings. La boquilla del oxidante, donde se expulsa el oxidante, por debajo de la boquilla y por encima del soporte debe haber mallas de acero inoxidable de circunferencia igual a la del tubo por donde pasa el oxidante, es decir, de 52 [mm] (**Figura 34**, **Figura 35**). La función que cumplen estas mallas es de suma importancia para que el flujo salga de manera laminar.

2.5.4. Conjunto superior

El conjunto superior consta de:

Tubos de escape: La función de estos tubos es la captación y el transporte de los productos de la combustión, arrastrados por el nitrógeno desde el cuerpo inferior. Esta pieza va unida por soldadura al cuerpo superior (**Figura 41**).

Cuerpo superior: Cuando esta pieza está unida a los tubos de escape, cumple dos funciones; la primera, es llevar los gases producto al colector de gases de escape, y la segunda, circular el agua del sistema de refrigeración. Además, a través del cuerpo superior el gas combustible llega a la zona de reacción (**Figura 42**).

Subconjunto 2: Ídem al del Subconjunto 1, tiene un soporte para la unión de boquilla del oxidante. Este soporte con forma de cilindro va empotrado al centro del cuerpo superior, por lo que tiene ranuras para la sujeción con gomas o-rings. La boquilla del combustible, en donde se expulsa el combustible, por debajo de la boquilla y por encima del soporte, debe haber mallas de acero inoxidable de circunferencia igual a la del tubo por donde pasa el combustible, es decir, de 52 [mm] (**Figura 43**,

Figura 44). La función que cumplen estas mallas es de suma importancia para que el flujo salga de manera laminar.

2.5.5. Conjunto conector

Espárragos conectores: Estos espárragos conectan el ensamblaje inferior con el superior (**Figura 47**), son los que dan la concentricidad al cuerpo superior e inferior, a través de las fuerzas concéntricas que ejercen al levantar el cuerpo superior. Estas fuerzas concéntricas se obtienen como resultado de resortes que van montados en la zona inferior de los espárragos por debajo del cuerpo inferior (**Figura 49**, **Figura 50**).

2.5.6. Colector de gases

Su función principal es la recepción y expulsión de los gases de escape. Este colector tiene una empaquetadura de grafito que debe ir coincidente con su cara inferior y con los ejes de sus agujeros exteriores, para que no se filtren los gases y tengan una correcta salida (**Figura 51**, **Figura 52**).

2.5.7. Montaje

2.5.7.1. Paso 1: Ubicar la estructura base-soporte en el lugar deseado para el ensayo.

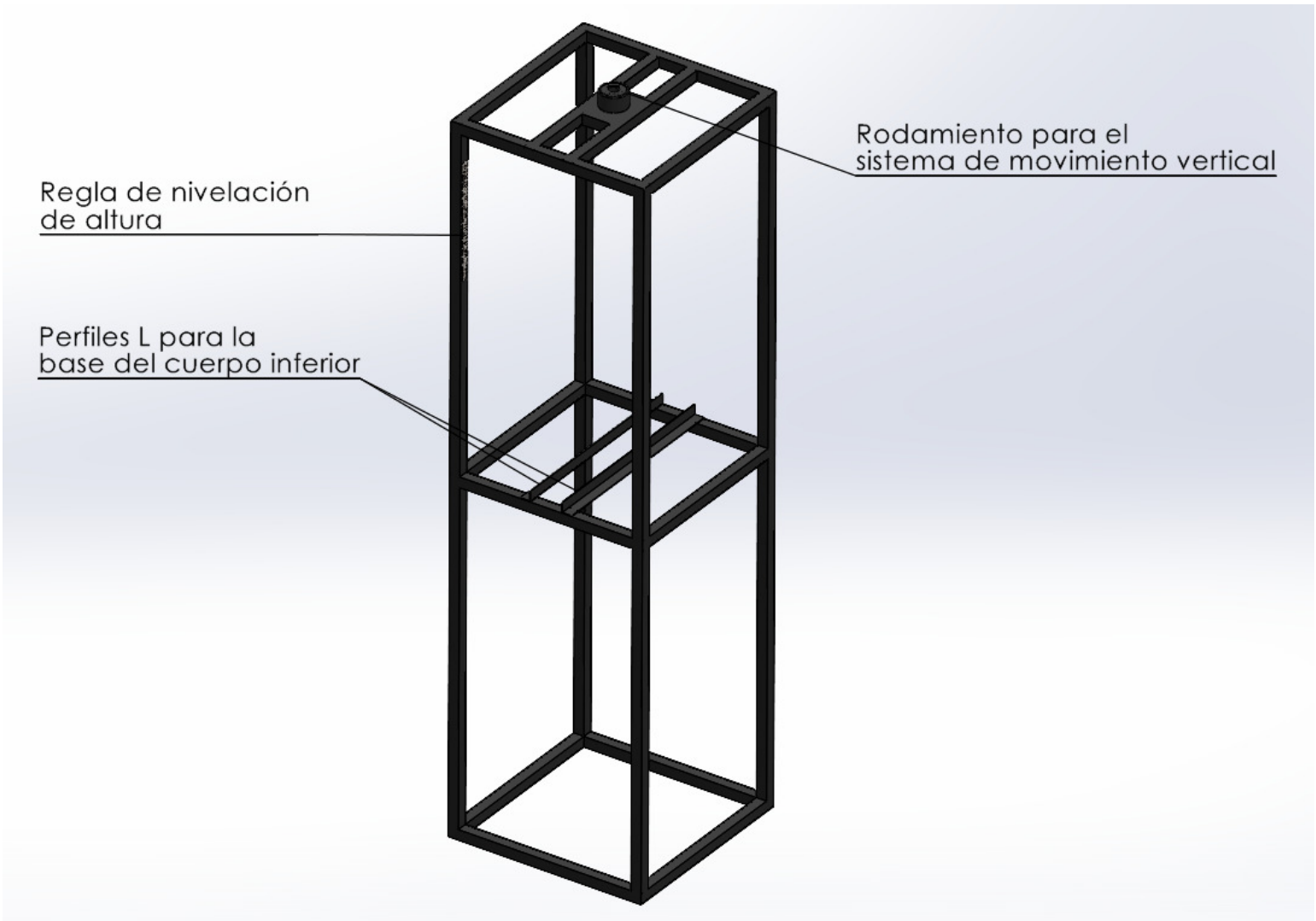


Figura 23. Estructura base-soporte.

2.5.7.2. Paso 2: Ensamblar el sistema de movimiento vertical

Paso 2.1: Asegurar que el eje principal esté roscado al volante. Insertar el eje en el agujero pasante del rodamiento en la estructura base-soporte, como muestra la **Figura 28** la unión eje-rodamiento.

Paso 2.2: Orientar la placa de acero alada, **Figura 25**(a), de manera diagonal a la cara frontal de la estructura base-soporte. Alinear una guía de la placa con el perfil donde se encuentra la regla como se muestra en la **Figura 28** y **Figura 29**.

Paso 2.3: Orientar y sujetar la placa soporte, **Figura 25**(b), al eje del sistema. Debe posicionarse por debajo y transversalmente a 90° de la alada. Fijarla utilizando una arandela plana 7/16 [in], una arandela de presión 7/16 [in] y una tuerca gruesa 7/16 [in].

Paso 2.4: Colocar los espárragos 3/8 [in], **Figura 26**(a), en los agujeros exteriores de la placa soporte. Asegurarlos con una arandela plana 3/8 [in], una arandela de presión 3/8 [in] y una tuerca 3/8 [in] en ambos lados de la placa como muestra la **Figura 30**. Los soportes del cuerpo superior, **Figura 26**(b), se instalarán en un proceso posterior.

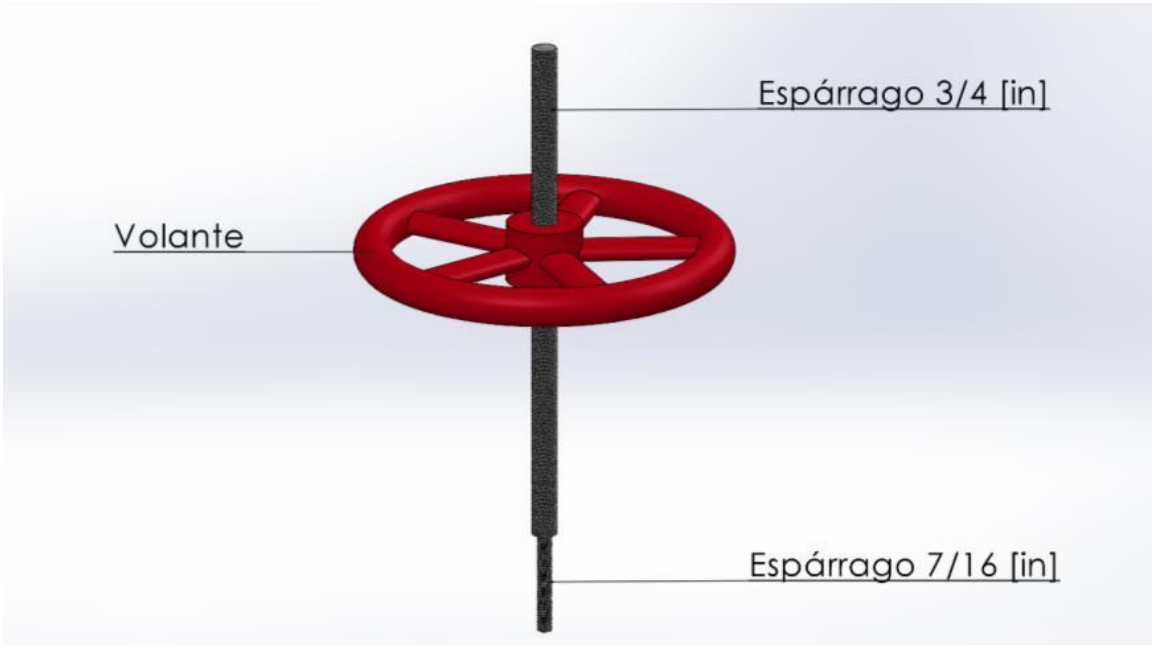


Figura 24. Sistema de movimiento vertical: eje principal y volante.

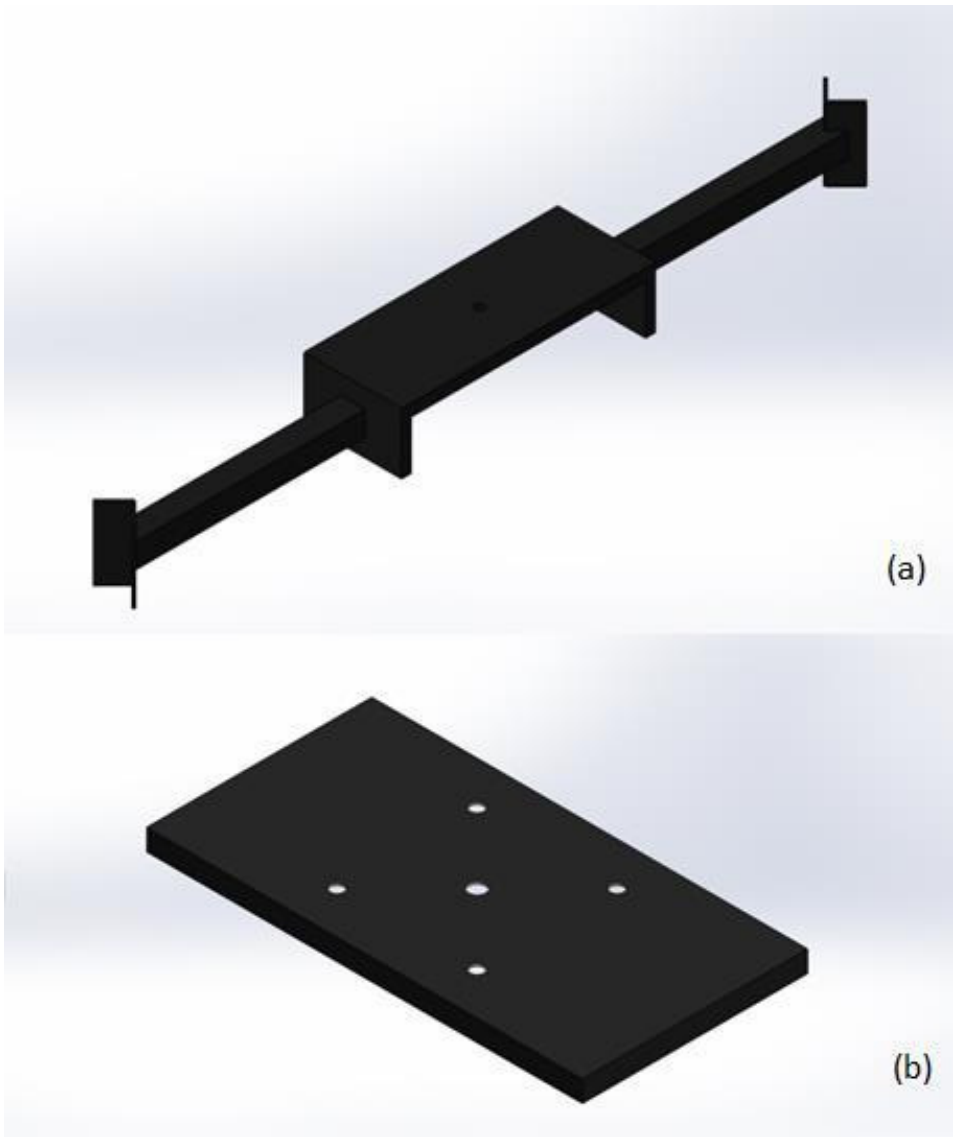


Figura 25. Sistema de movimiento vertical: (a) guía; (b) placa soporte.

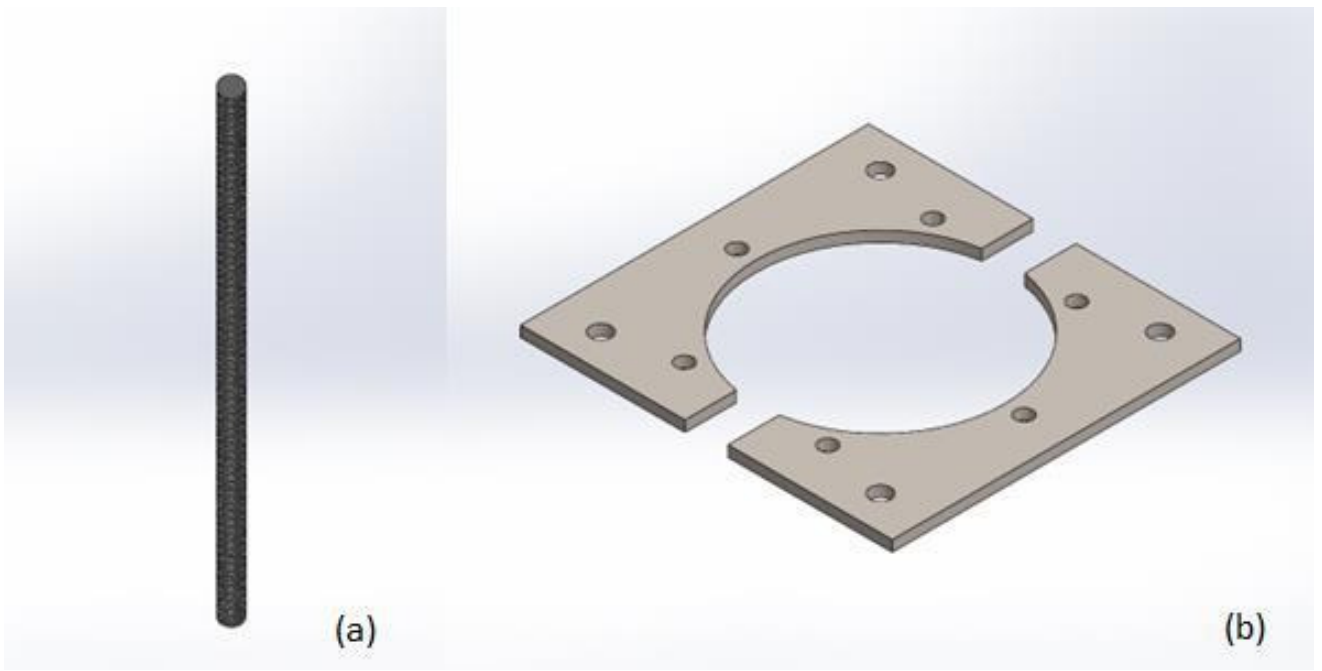


Figura 26. Sistema de movimiento vertical: (a) espárrago; (b) soportes del cuerpo superior.

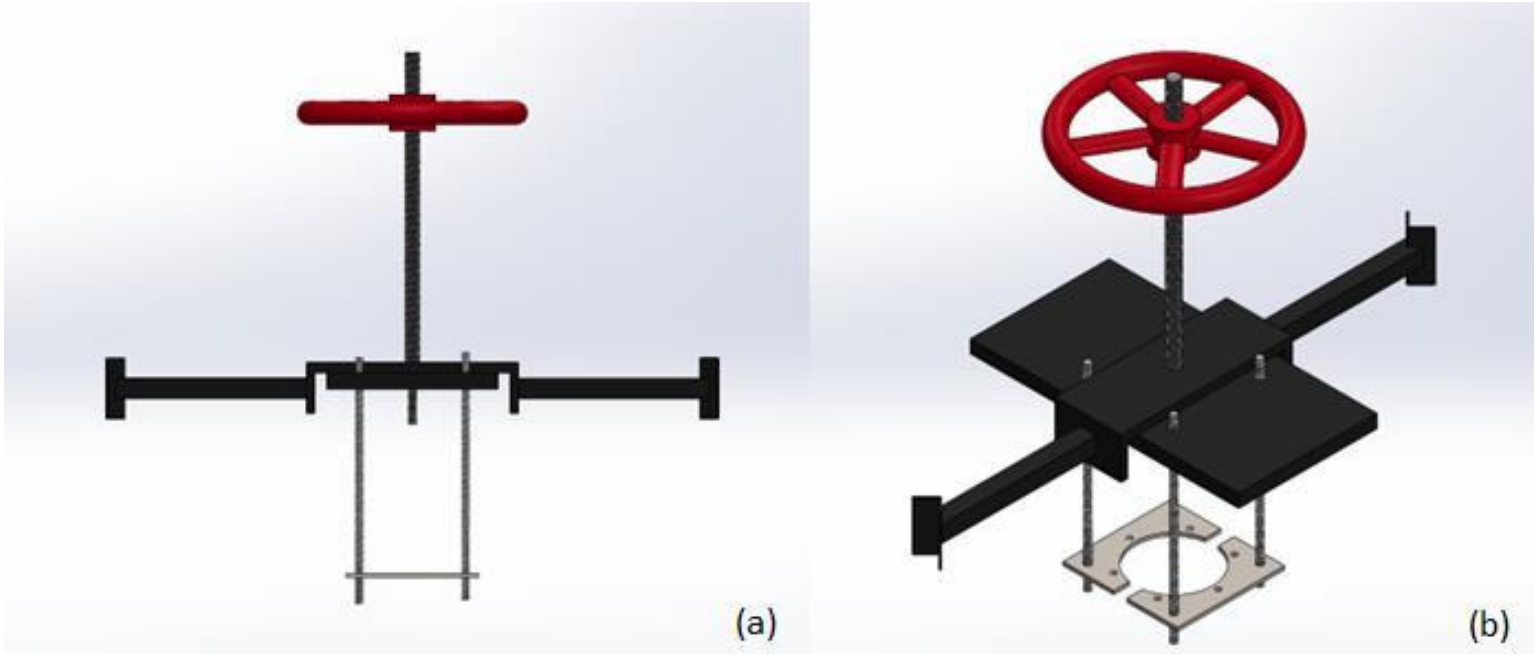


Figura 27. Sistema de movimiento vertical: (a) vista lateral, (b) vista isométrica.

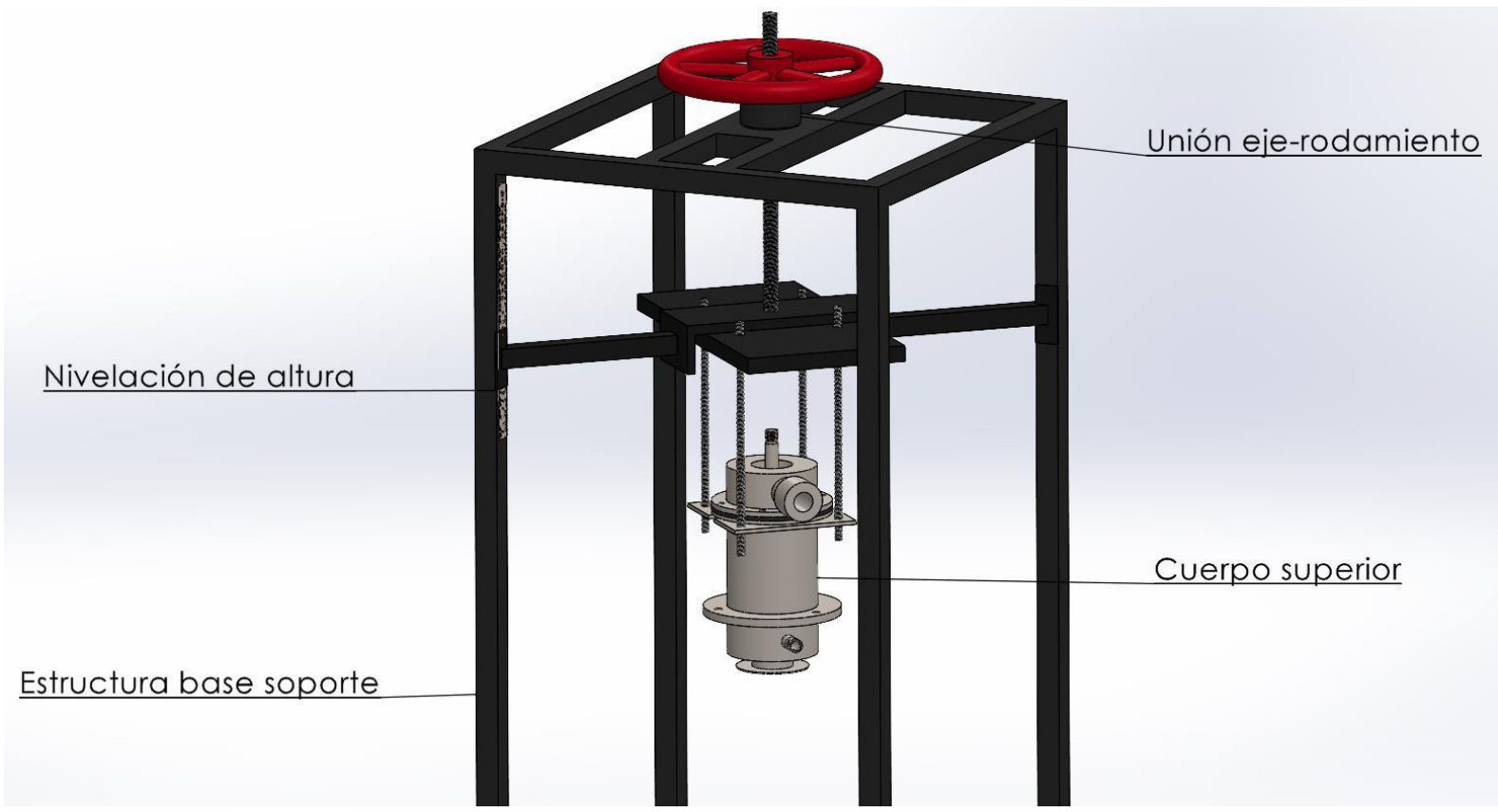


Figura 28. Disposición del sistema de movimiento vertical.

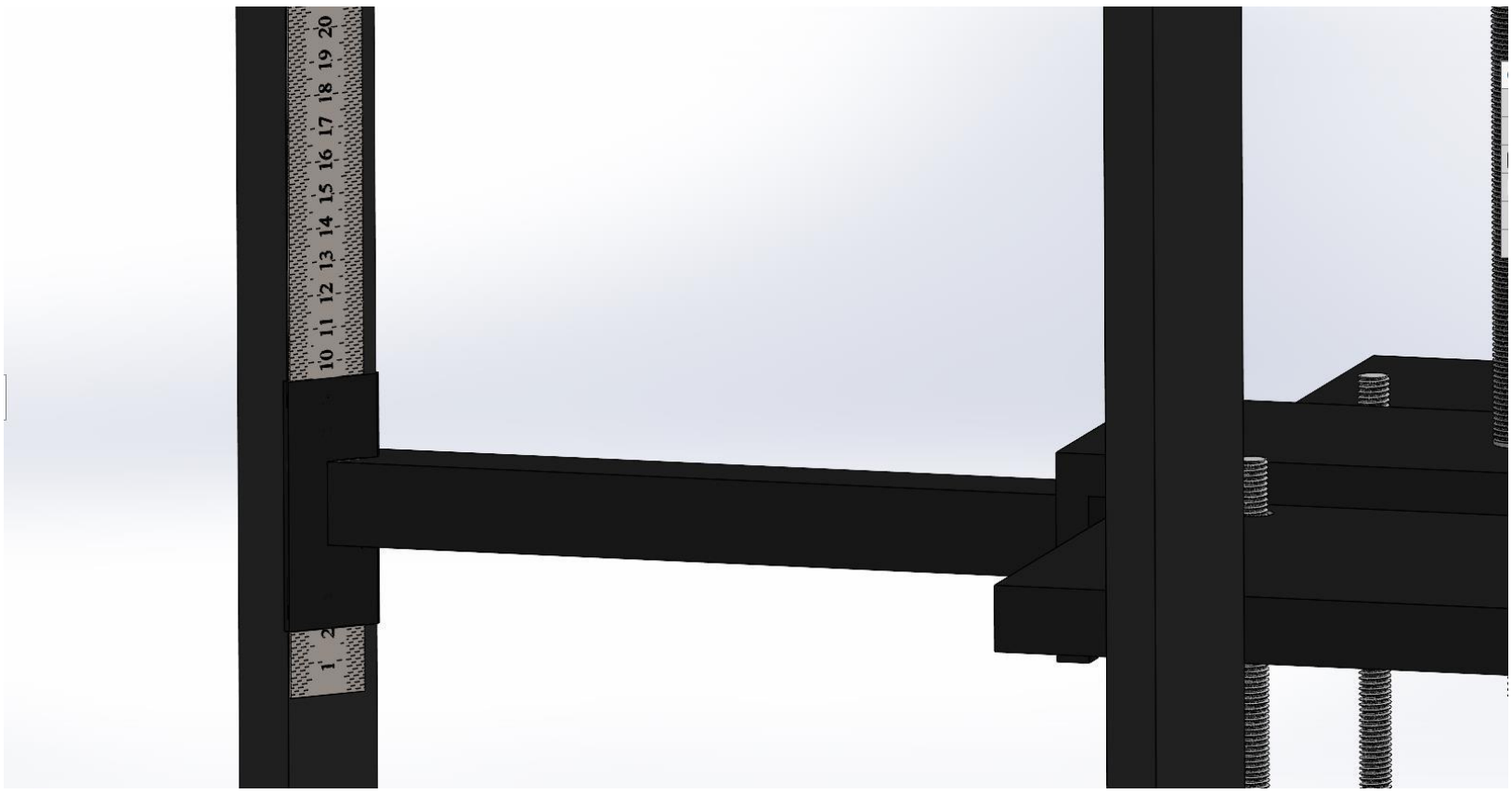


Figura 29. Sistema de referencia de altura.

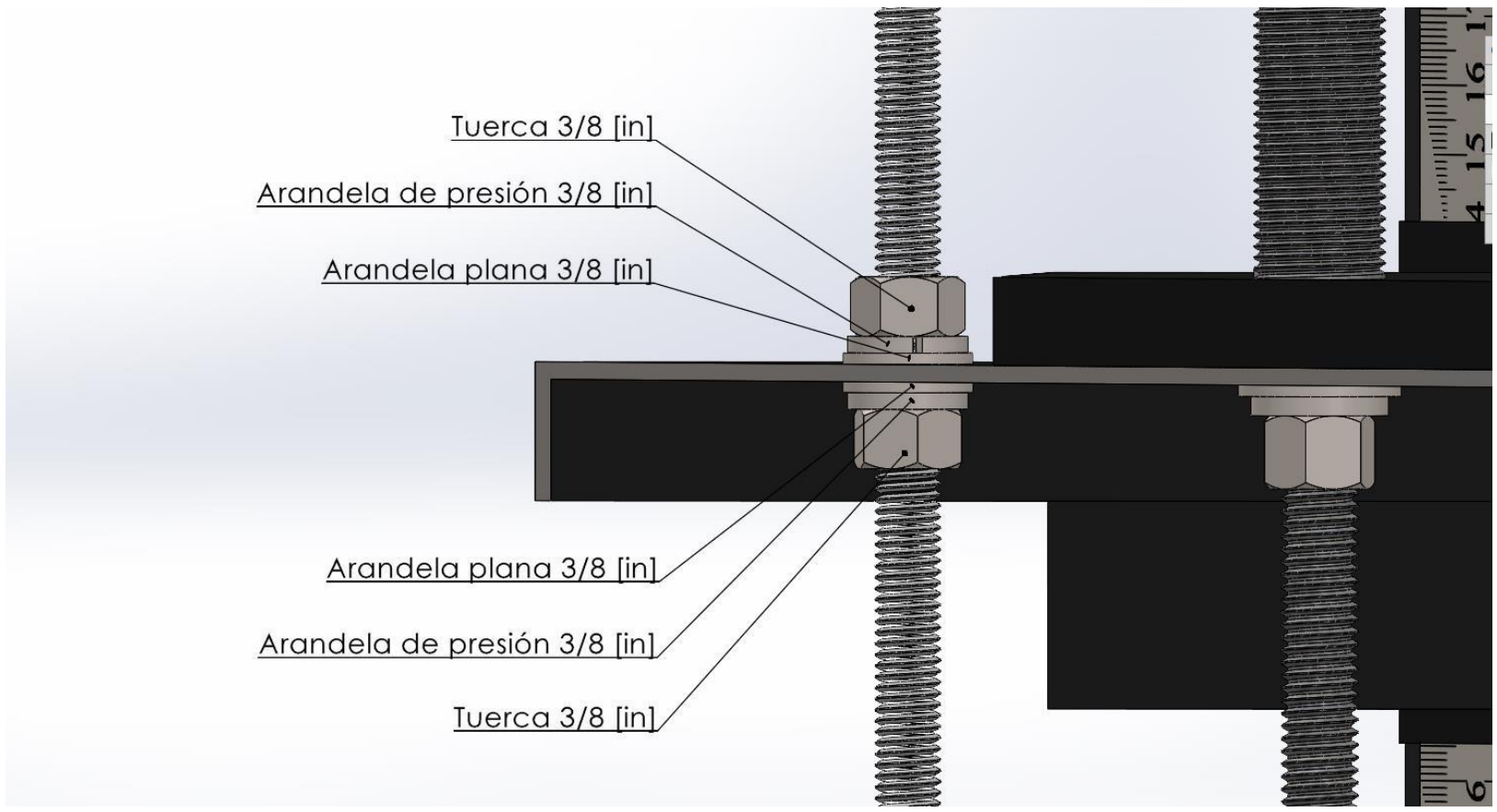


Figura 30. Sujeción de espárragos con placa soporte.

2.5.7.3. Paso 3: Ensamblar el conjunto inferior.

Paso 3.1: Montar y fijar la base del cuerpo inferior, según la **Figura 31** y **Figura 32**.

Paso 3.2: Montaje del Subconjunto 1.

Paso 3.2.1: Colocar los anillos o-rings en las ranuras que tiene el soporte de boquillas.

Paso 3.2.2: Alinear las mallas de acero inoxidable con el diámetro interior de la boquilla del oxidante, orientándolas hacia la cara superior de la boquilla, ver **Figura 34**.

Paso 3.2.3: Enroscar la boquilla con el soporte, asegurando que las mallas de acero inoxidable queden en su interior, ver **Figura 35**.

Paso 3.3: Empotrar el Subconjunto 1 en el centro del cuerpo inferior, dejando aproximadamente 5 [mm] sobresalir desde la cara superior del cuerpo inferior, ver **Figura 40**.

Paso 3.4: Colocar el cuerpo inferior en la base, asegurando que los agujeros coincidan, ver **Figura 37**. Sujetar según **Figura 38**.

Paso 3.5: Colocar el filtro de gas inerte, ver **Figura 37**, **Figura 39**, **Figura 40**.

Paso 3.6: Colocar bolas de alúmina o de vidrio para la estabilización del flujo, ver **Figura 39**.

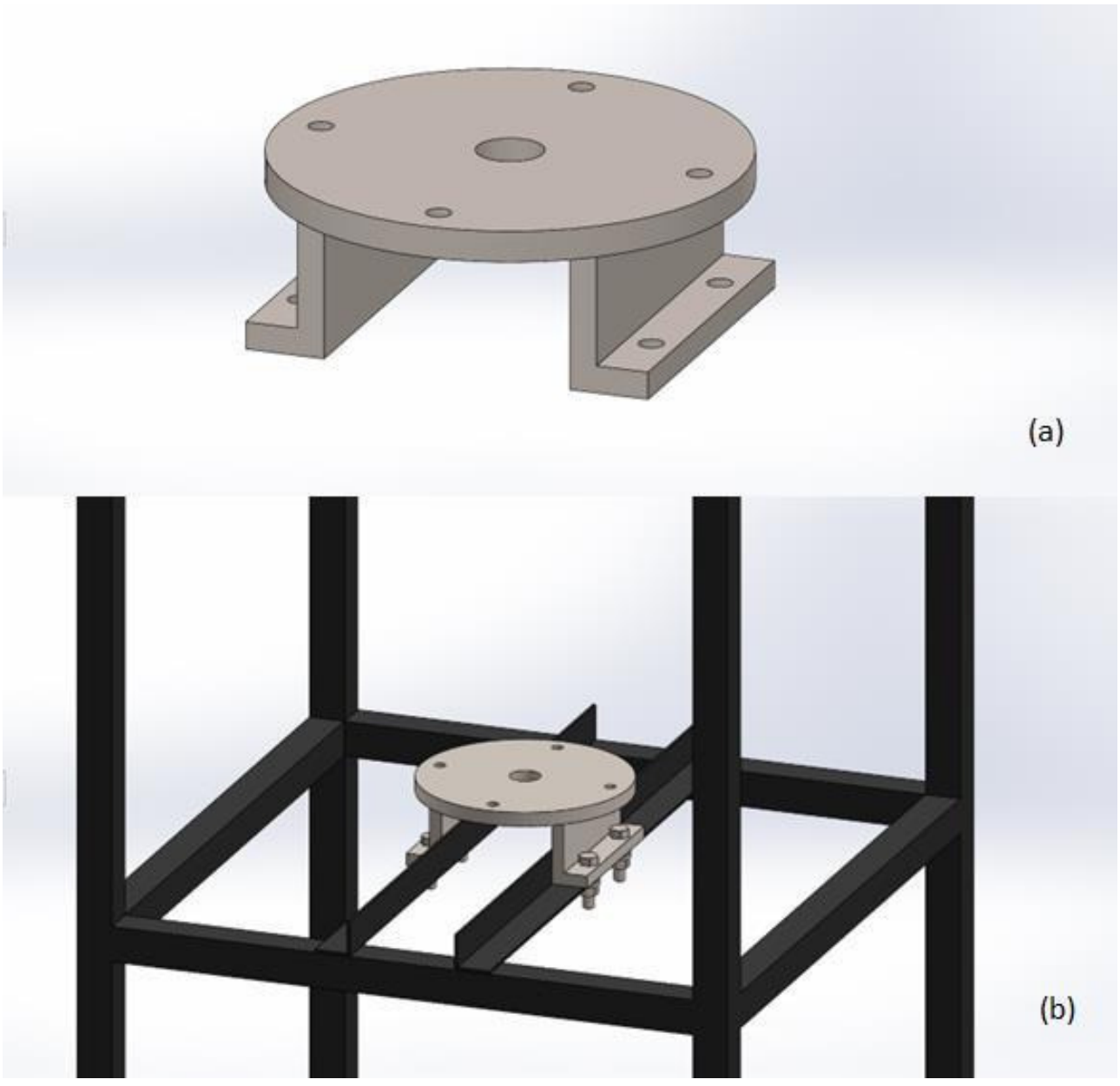


Figura 31. (a) base del cuerpo inferior; (b) disposición del cuerpo inferior en la estructura base.

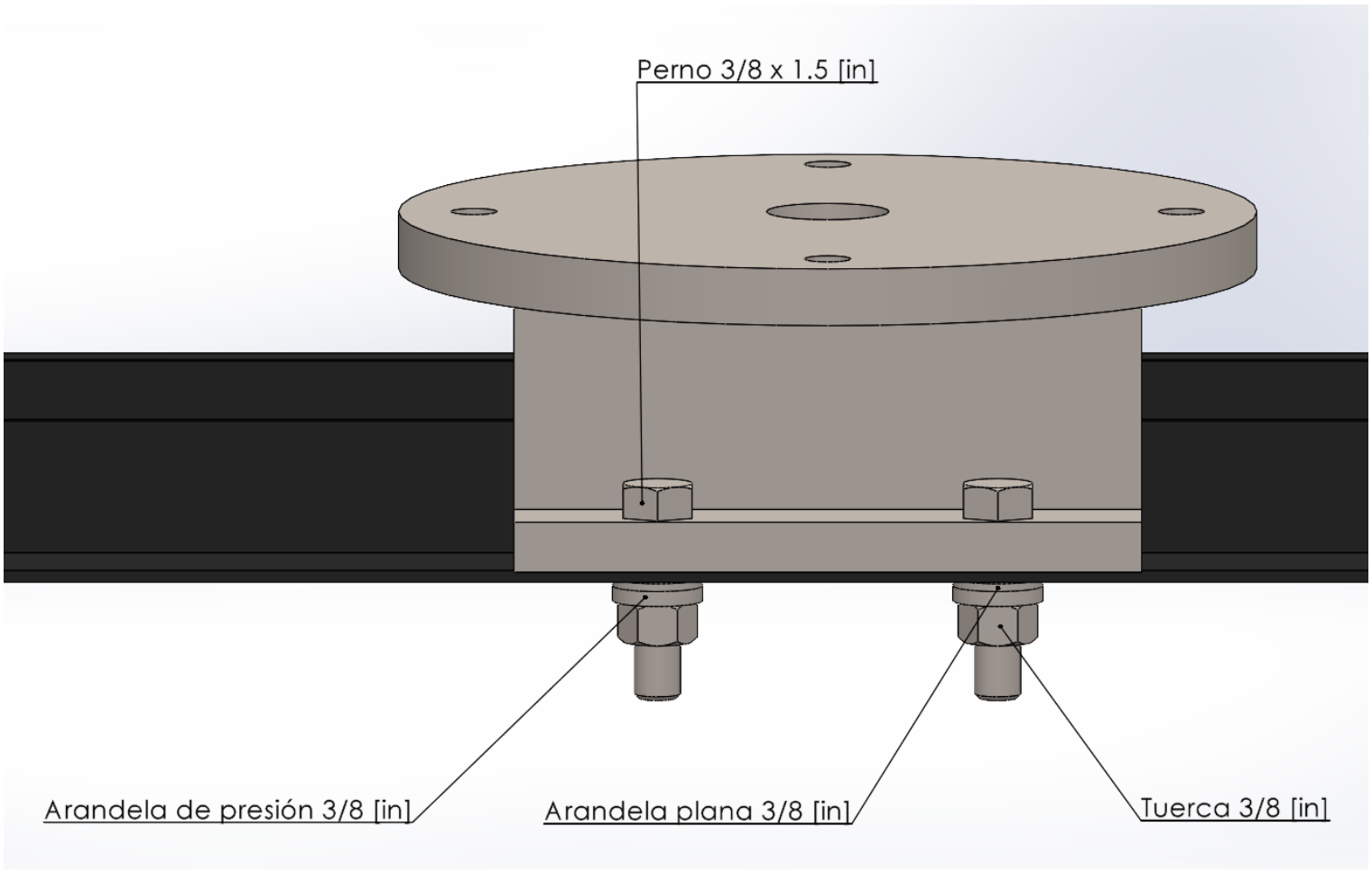


Figura 32. Sujeción de la base del cuerpo inferior en la estructura base.

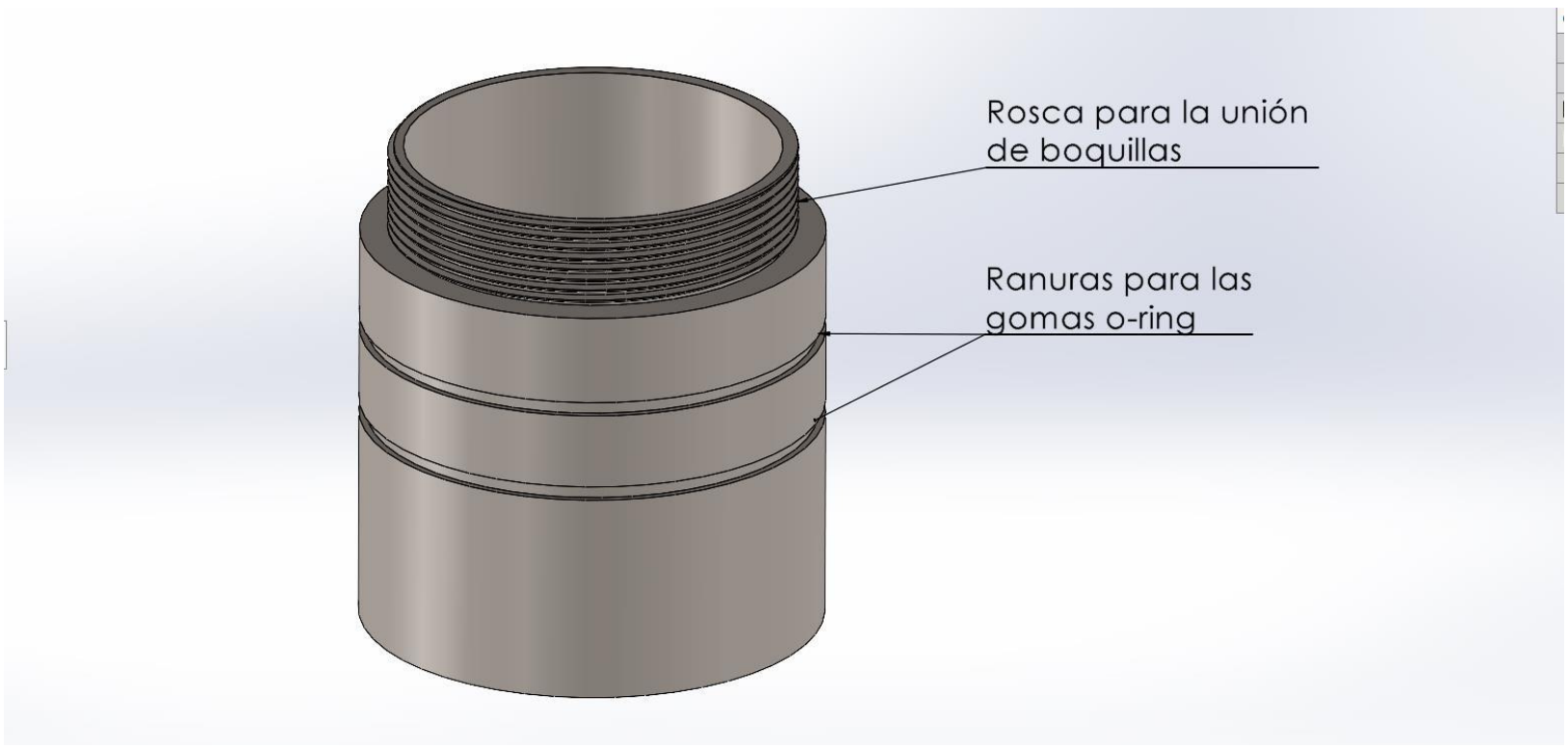


Figura 33. Soporte para la unión de boquilla del oxidante.

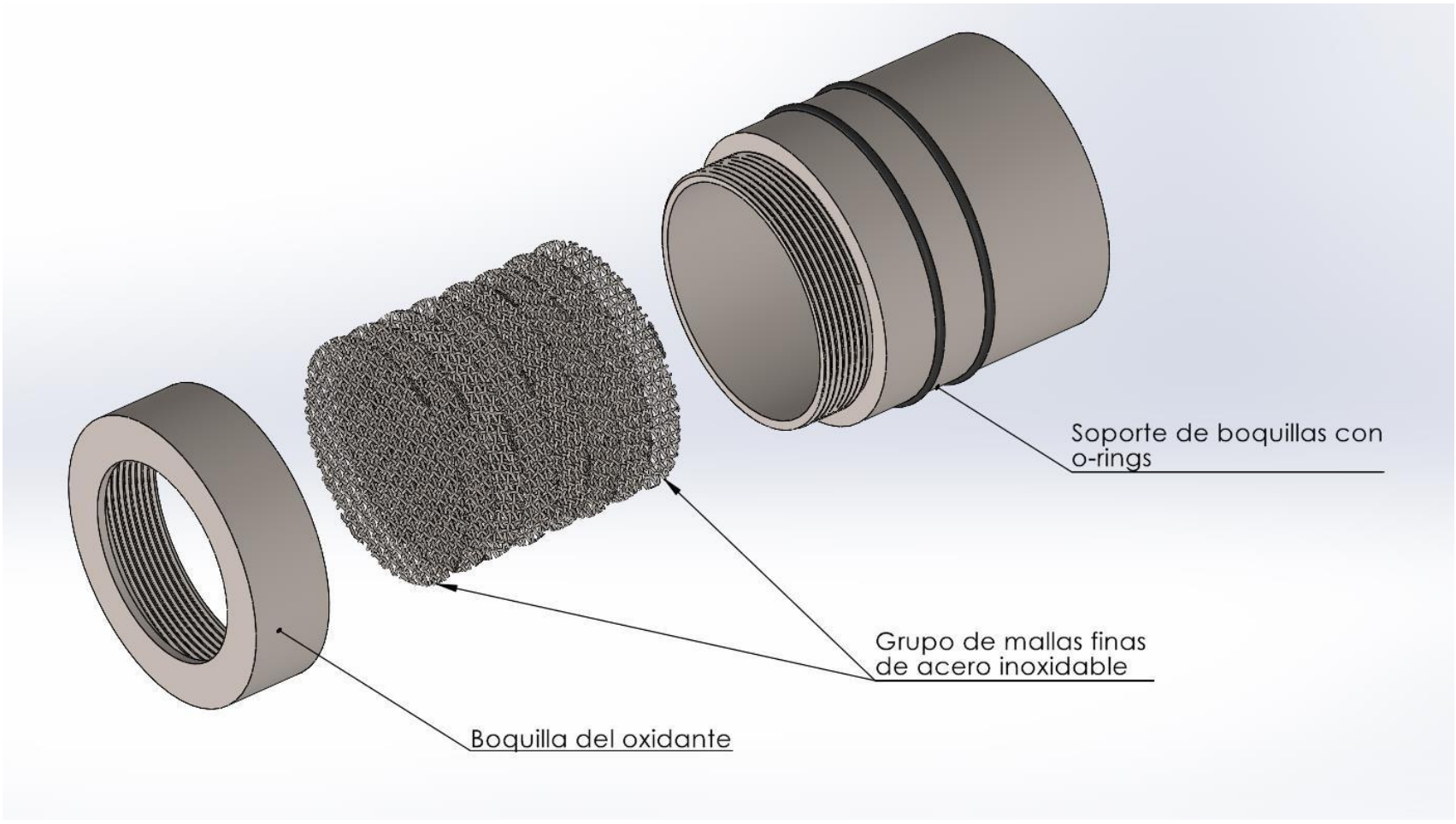


Figura 34. Vista explosionada del Subconjunto 1.

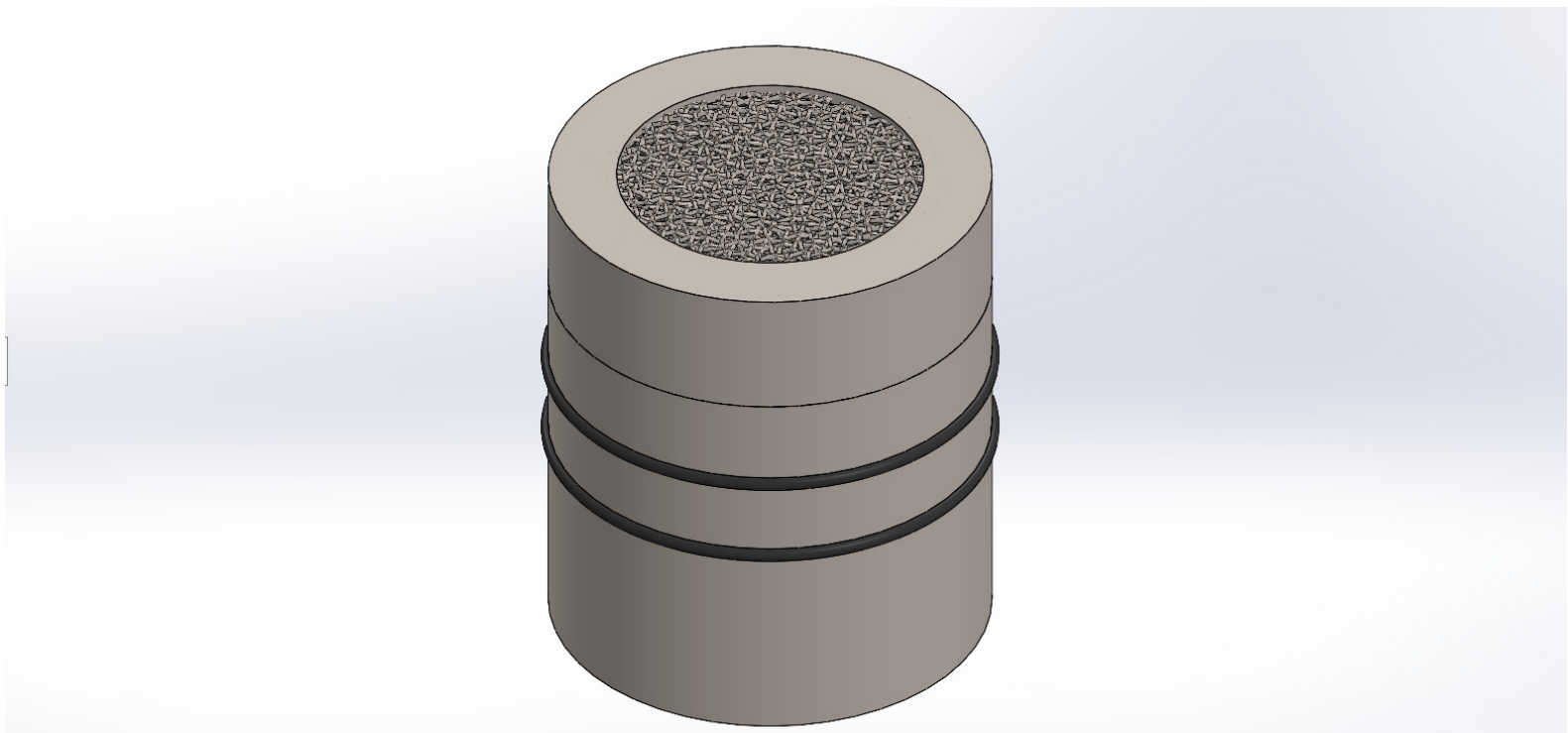


Figura 35. Vista isométrica del Subconjunto 1 terminado.

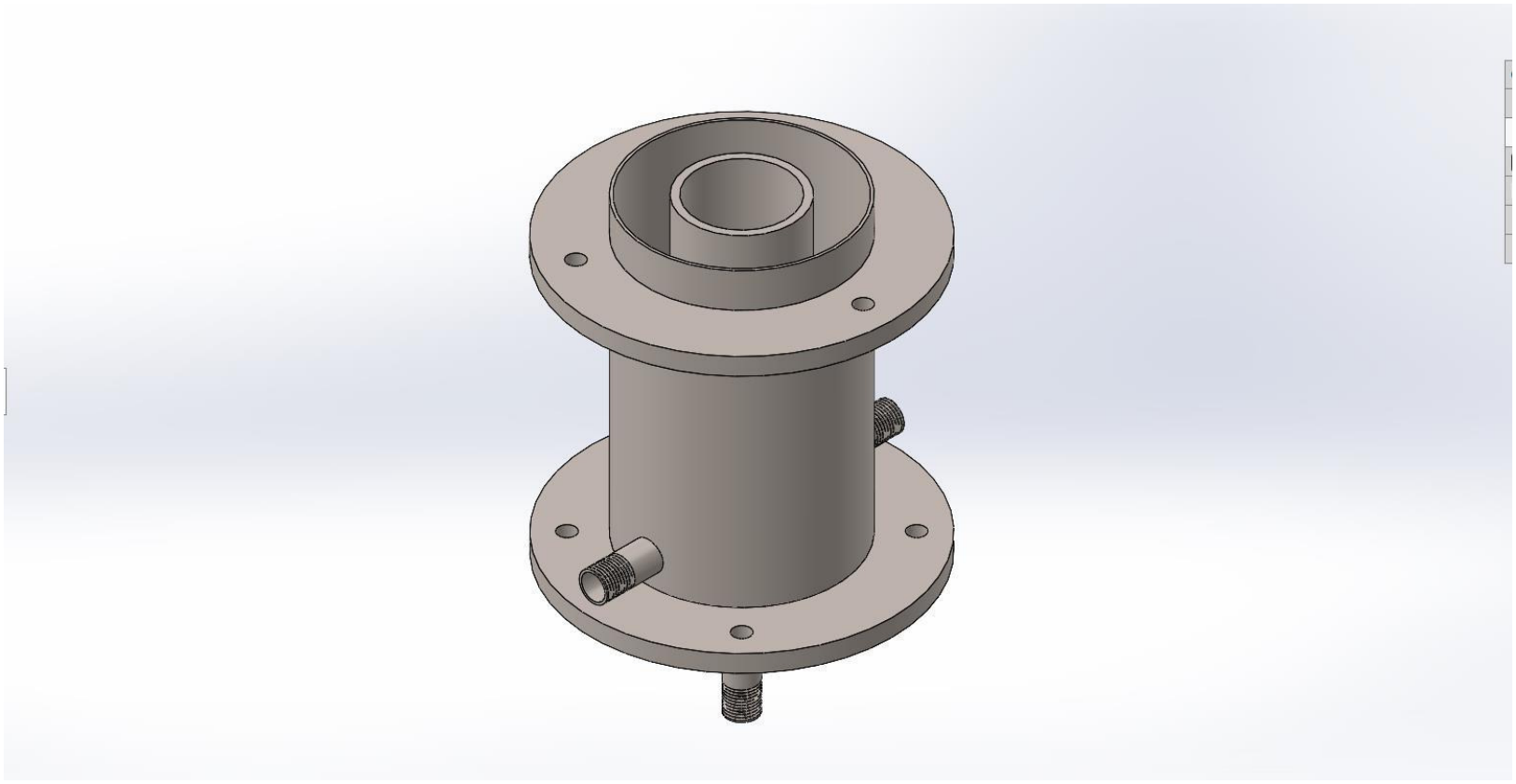


Figura 36. Cuerpo inferior.

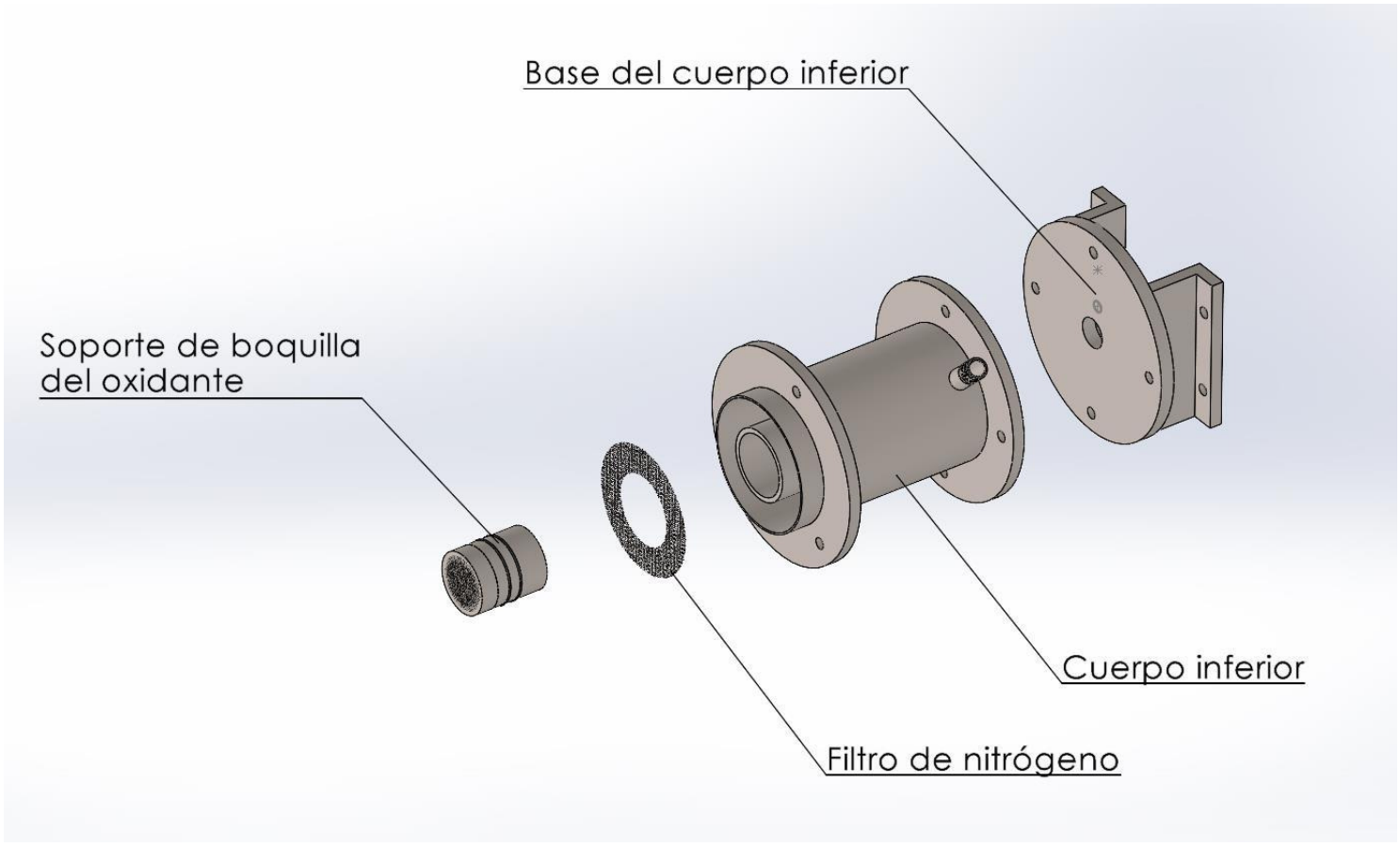


Figura 37. Vista explosionada del conjunto inferior.

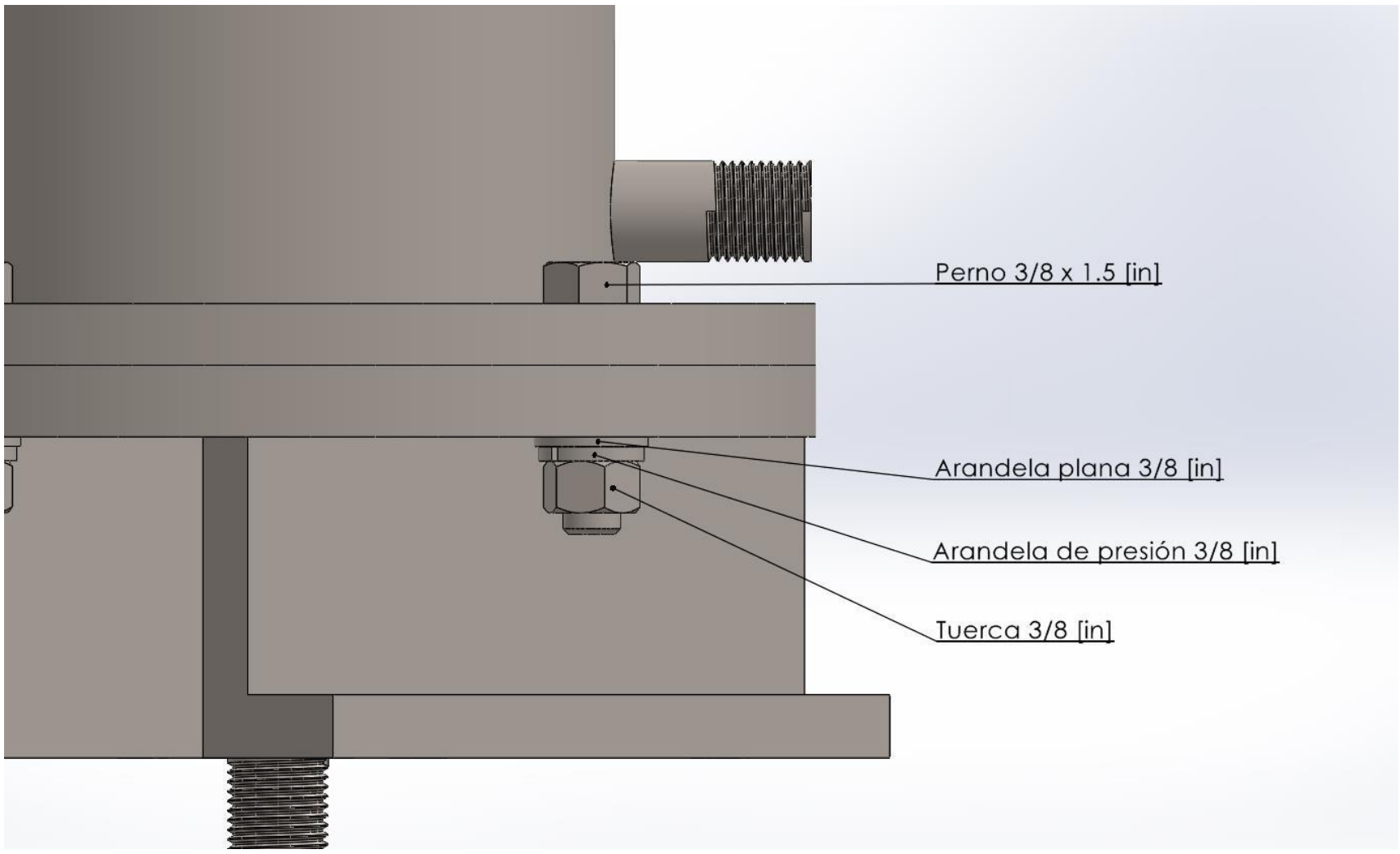


Figura 38. Sujeción de la base con el cuerpo inferior.



Figura 39. Bolas de alúmina ingresadas dentro del ducto.

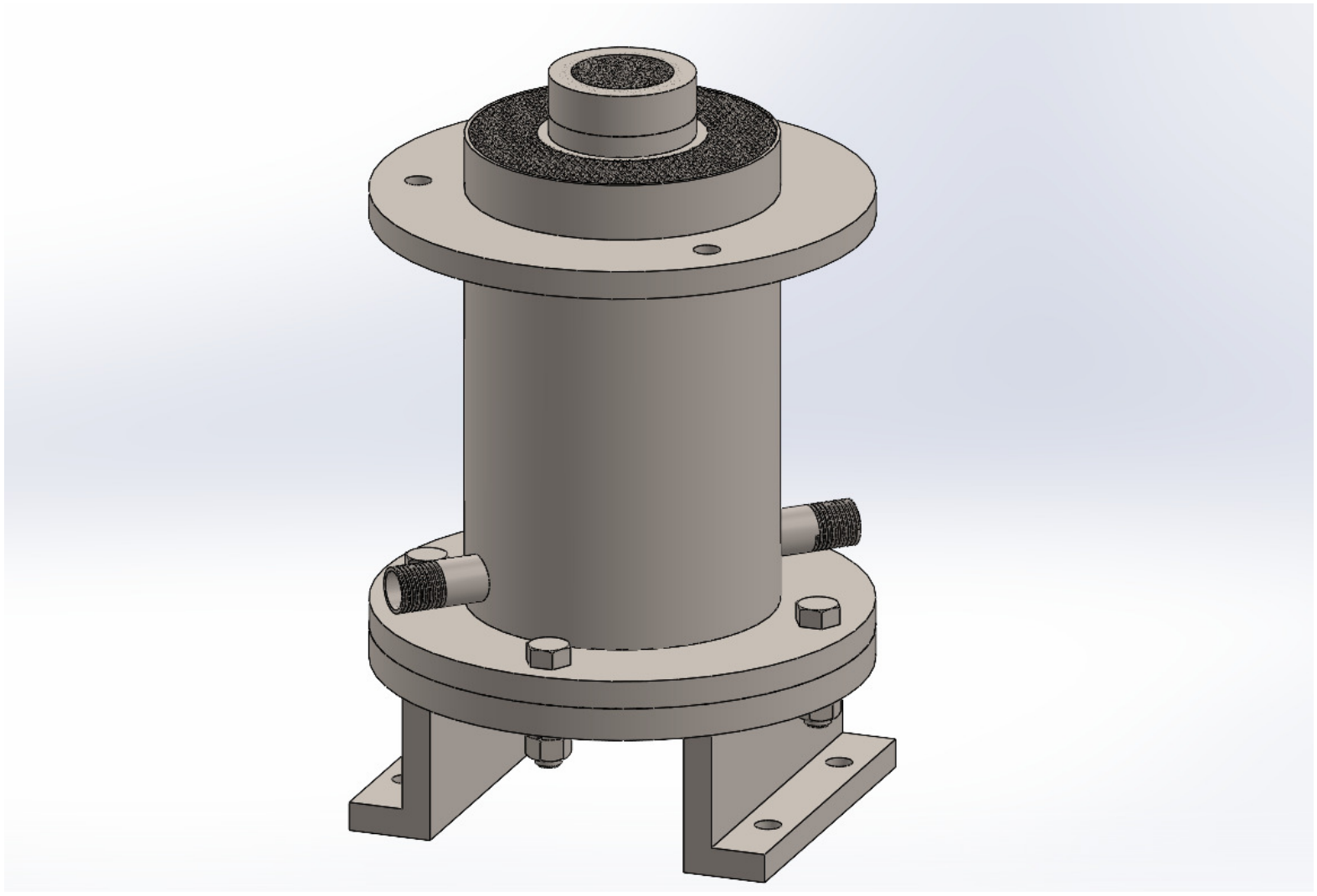


Figura 40. Conjunto inferior terminado.

2.5.7.4. Paso 4: Ensamblar el conjunto superior.

Paso 4.1: Unir mediante soldadura la pieza *tubos de escape* con el cuerpo superior. Los agujeros inferiores del cuerpo superior deben coincidir con los tubos de la otra pieza, ver **Figura 41**.

Paso 4.2: Montaje del Subconjunto 2.

Paso 4.2.1: Colocar los anillos o-rings en las ranuras que tiene el soporte de boquillas, ver **Figura 43**.

Paso 4.2.2: Alinear las mallas de acero inoxidable con el diámetro interior de la boquilla del combustible, orientándolas hacia la cara superior de la boquilla, ver **Figura 43**.

Paso 4.2.3: Enroscar la boquilla del combustible en el soporte, asegurando que las mallas de acero inoxidable queden en su interior, ver **Figura 44**.

Paso 4.3: Empotrar el Subconjunto 2 en el centro del cuerpo superior, dejando aproximadamente 5 [mm] sobresalir desde la cara inferior del cuerpo superior, ver **Figura 45** y **Figura 46**.

Paso 4.4: Colocar bolas de alúmina o de vidrio para la estabilización del flujo.

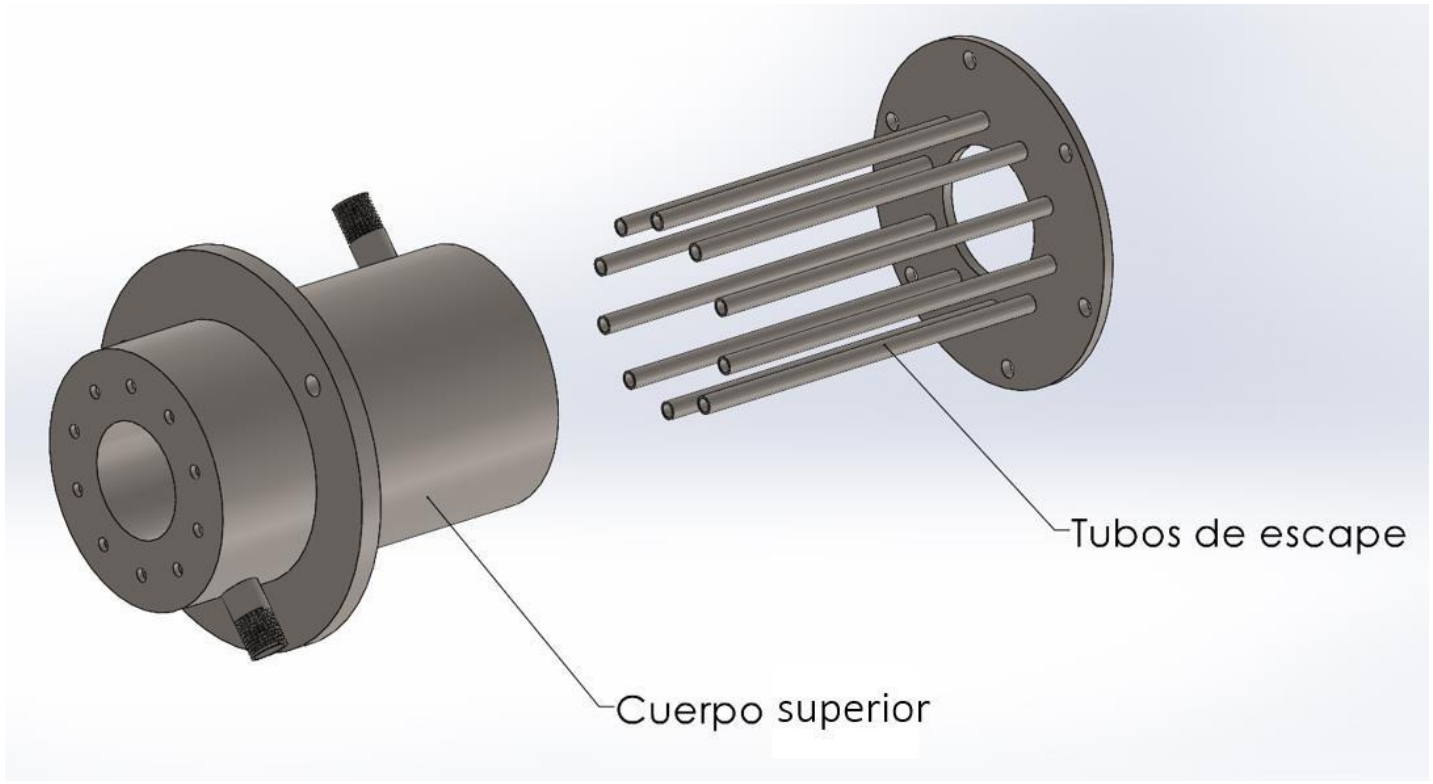


Figura 41. Vista explosionada de la disposición de los tubos de escape junto con el cuerpo superior.

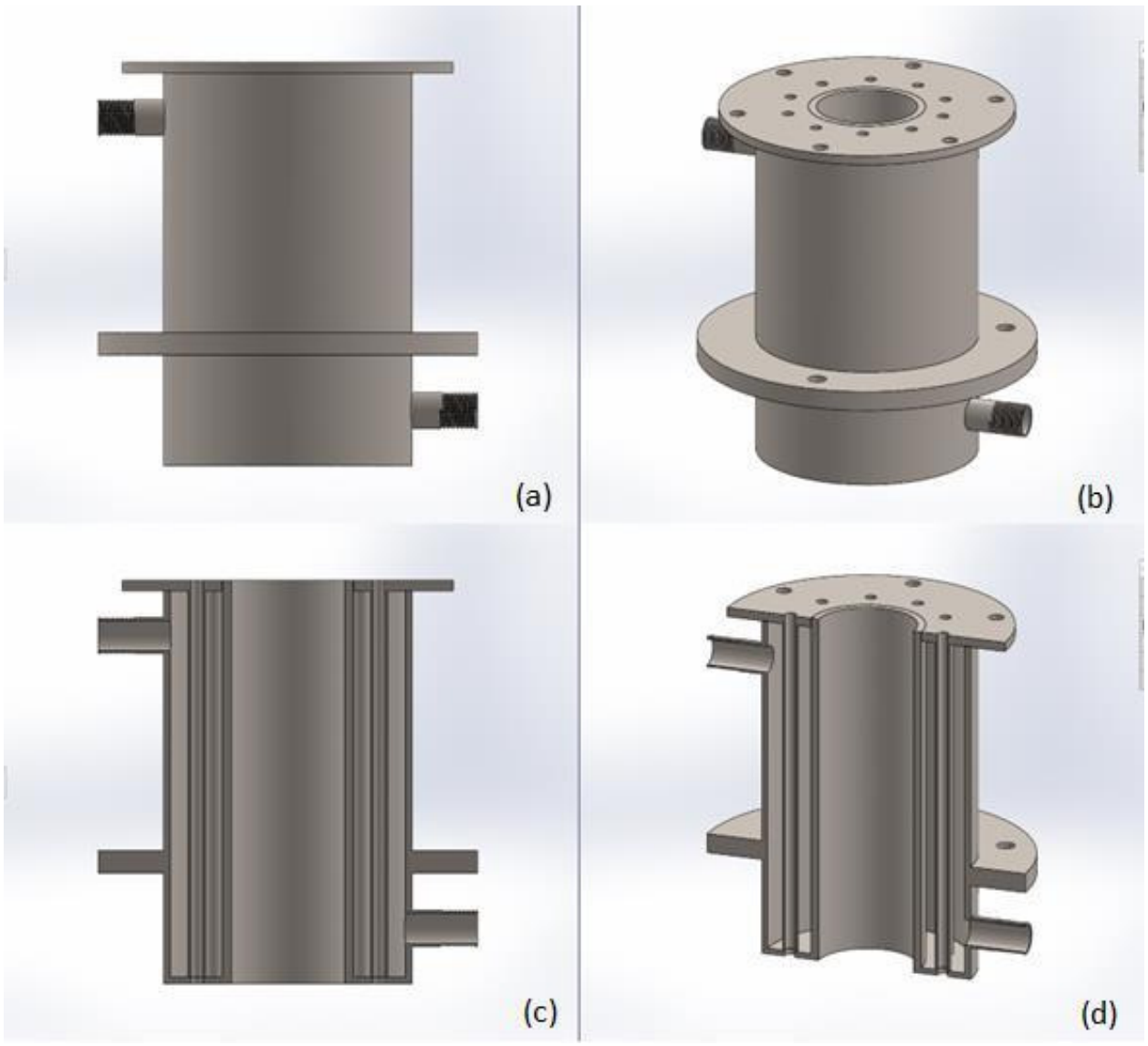


Figura 42. Cuerpo superior: (a) vista lateral; (b) vista isométrica; (c) vista seccionada lateral; (d) vista seccionada isométrica.

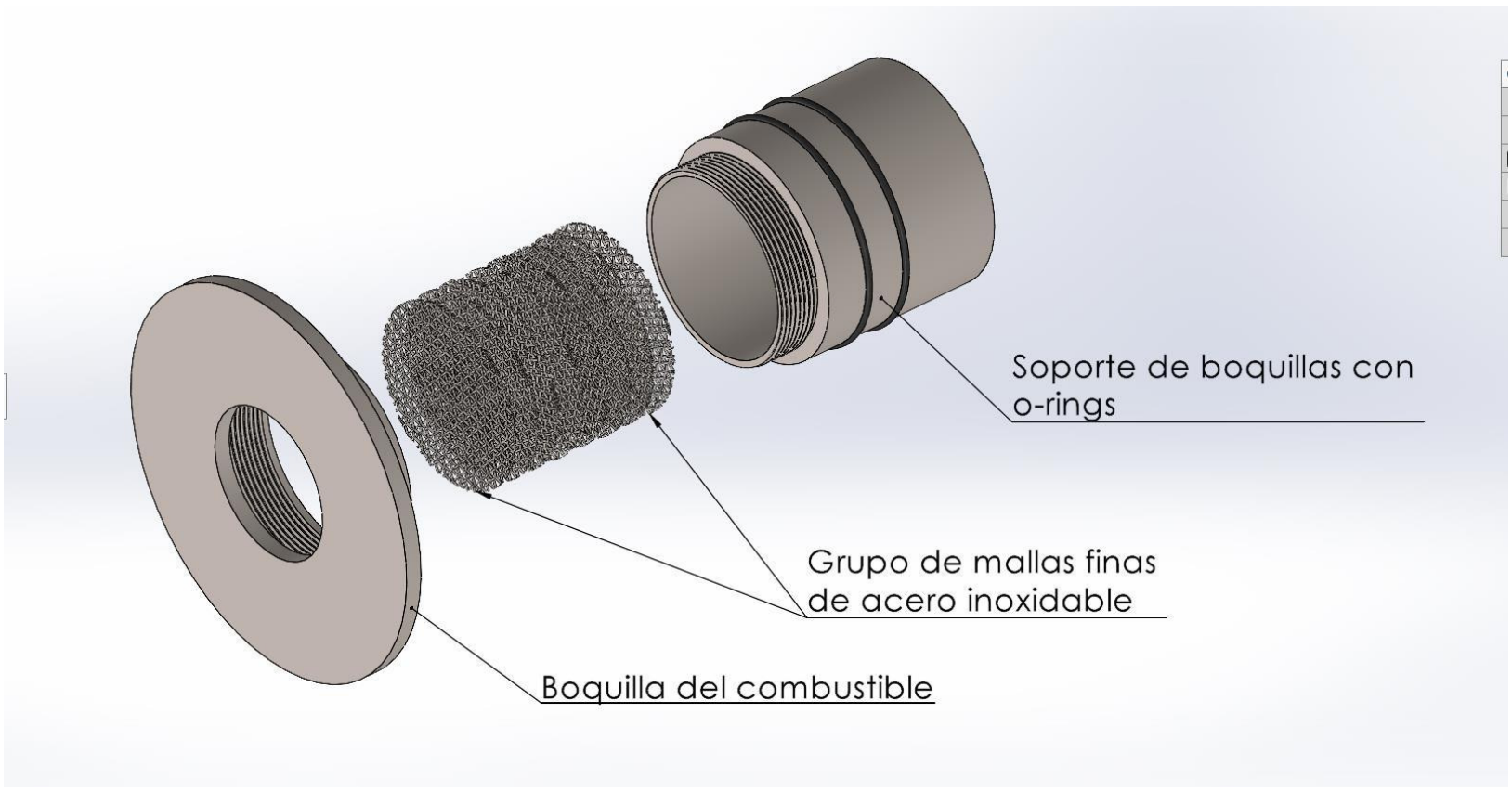


Figura 43. Vista explosionada del Subconjunto 2.

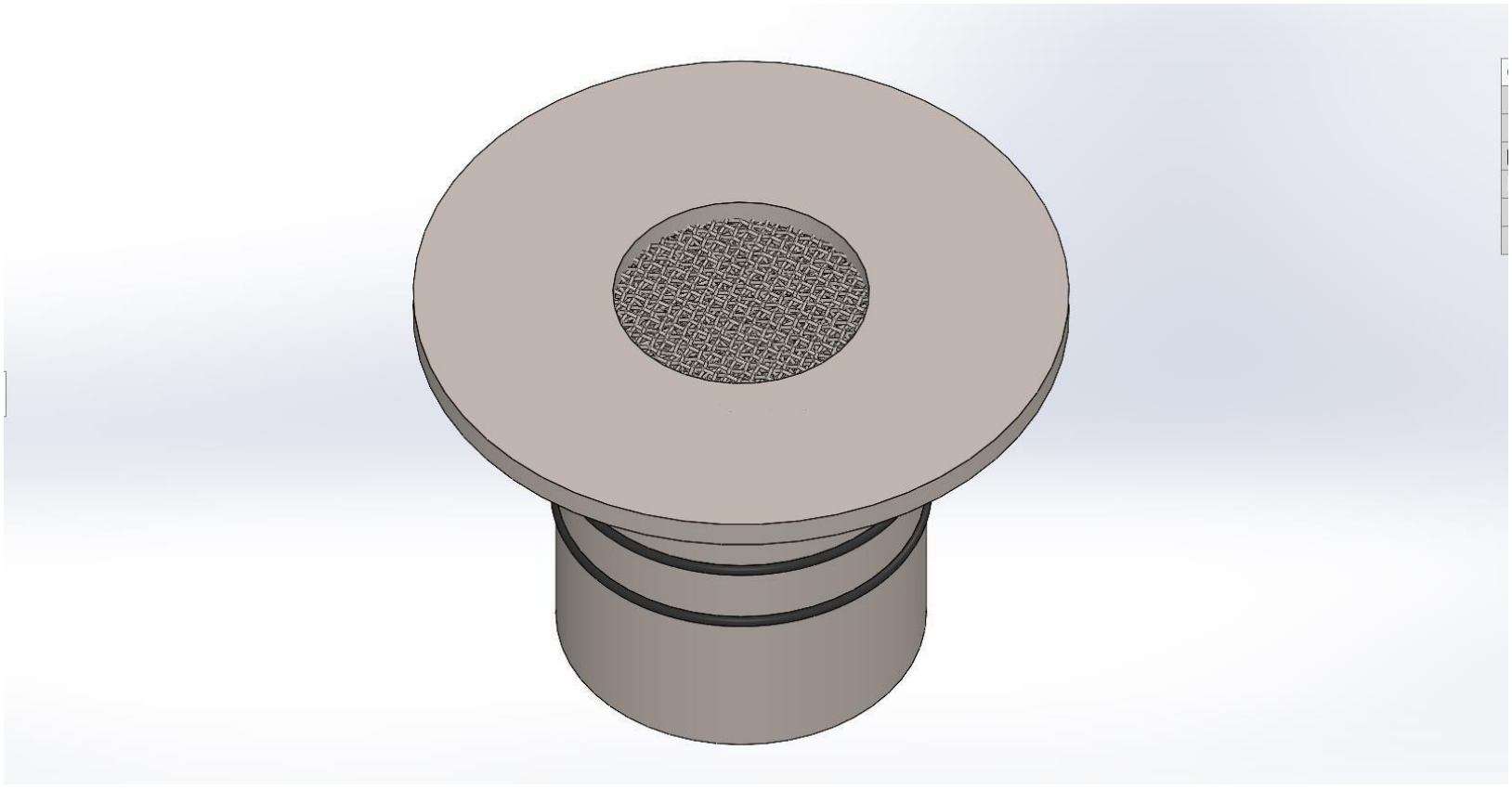


Figura 44. Subconjunto 2 terminado.

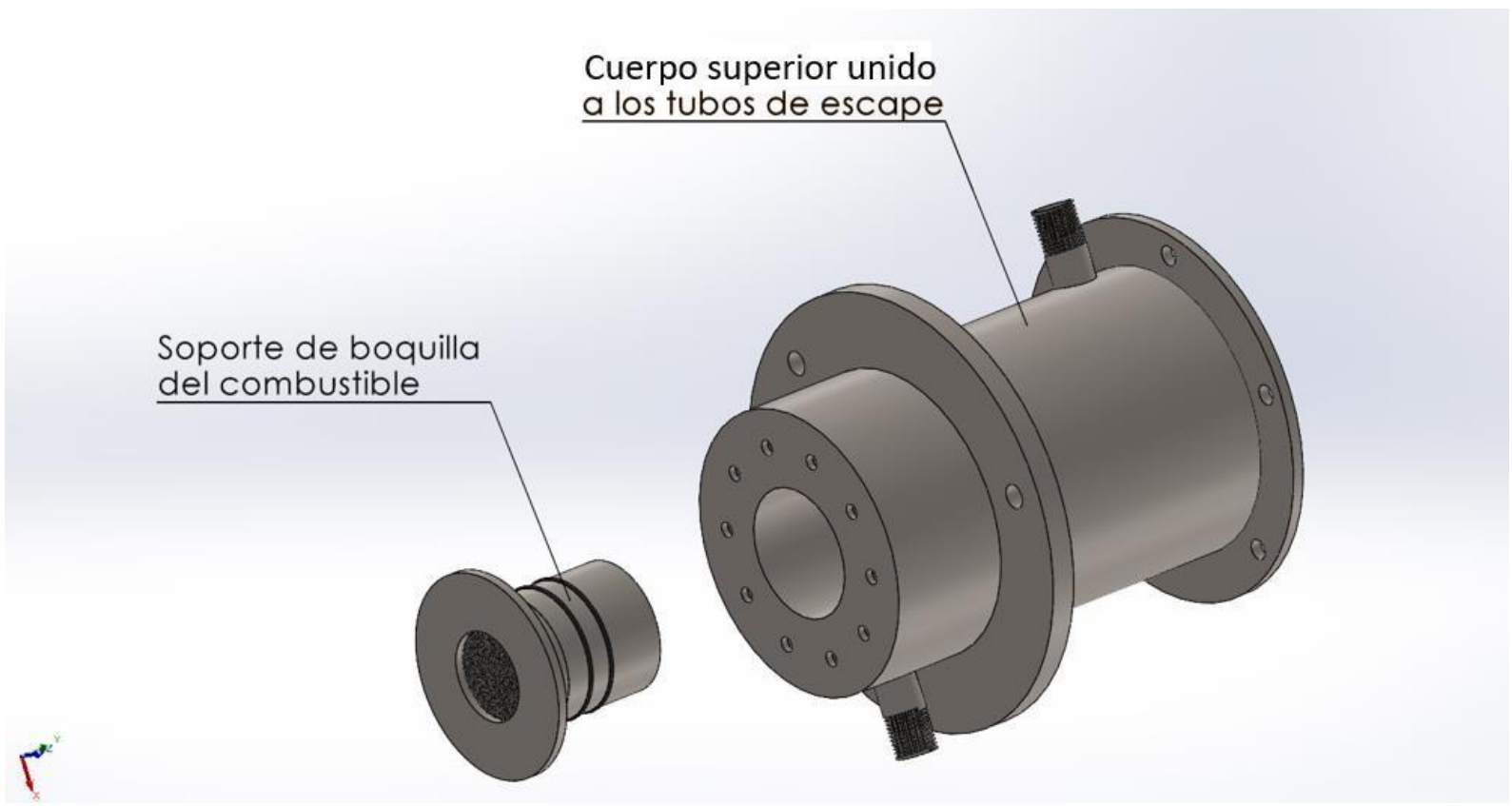


Figura 45. Vista explosionada del conjunto superior.

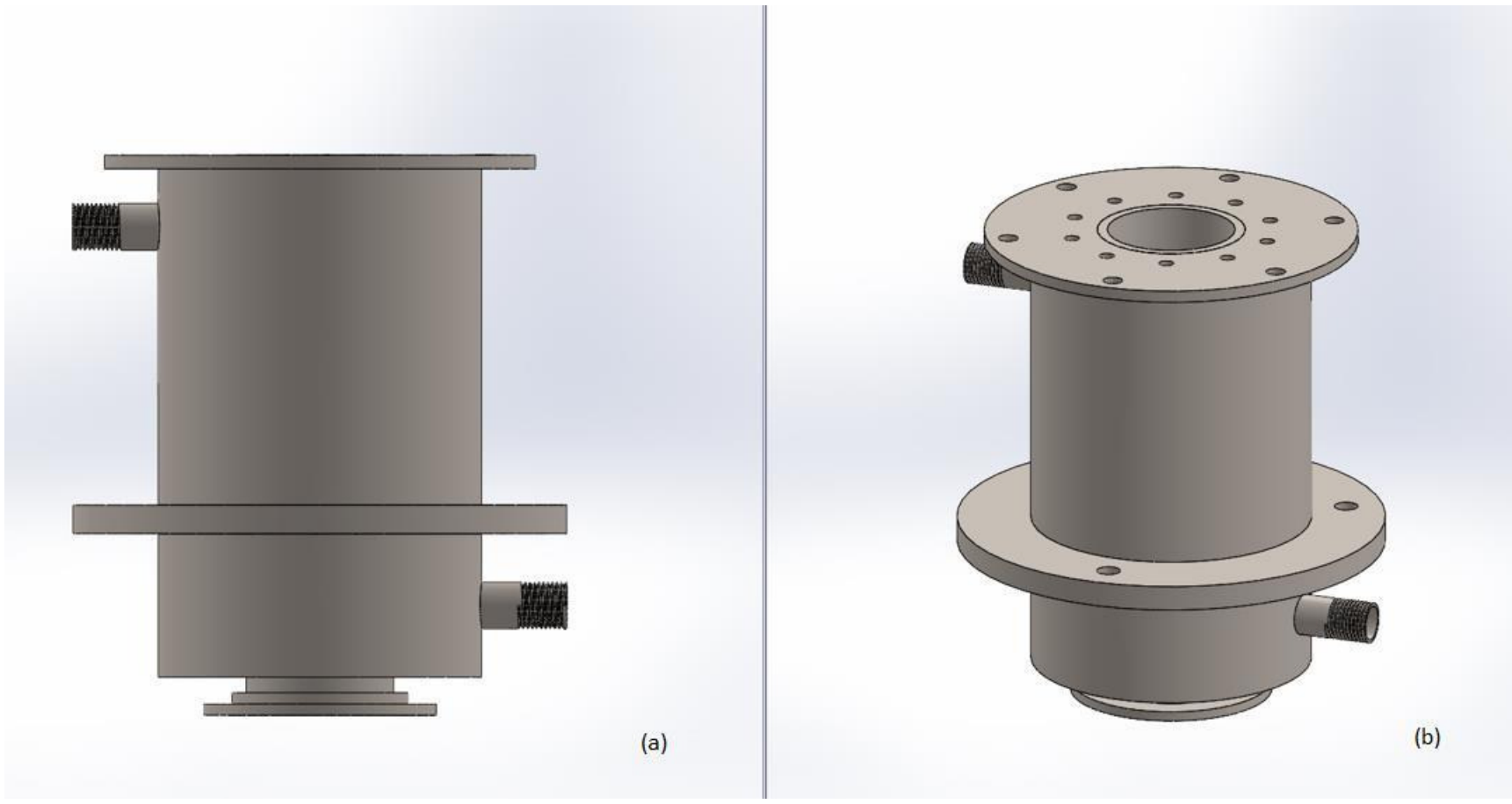


Figura 46. Conjunto superior armado: (a) vista lateral; (b) vista isométrica.

2.5.7.5. Paso 5: Ensamblar el sistema conector.

Paso 5.1: Descansar el cuerpo superior en el cuerpo inferior, asegurando que las boquillas queden alineadas. Alinear los ejes de los agujeros. Ver **Figura 47**(b).

Paso 5.2: Colocar los espárragos conectores en los agujeros exteriores de las aletas de los cuerpos. Los espárragos deben ir con una superficie roscada completamente por debajo de la aleta superior del cuerpo inferior, con una sección sin hilos para el flujo de movimiento al subir, ver **Figura 47**(b) y **Figura 47**(c). Enroscar los espárragos en el cuerpo superior utilizando dos arandelas planas 3/8 [in], dos arandelas de presión 3/8 [in] y dos tuercas 3/8 [in], ver **Figura 48**.

Paso 5.3: Colocar en el siguiente orden en cada uno de los espárragos: una arandela plana 3/8 [in], un resorte 3/8 [in], una arandela plana 3/8 [in] y una tuerca 3/8 [in], ver **Figura 49**.

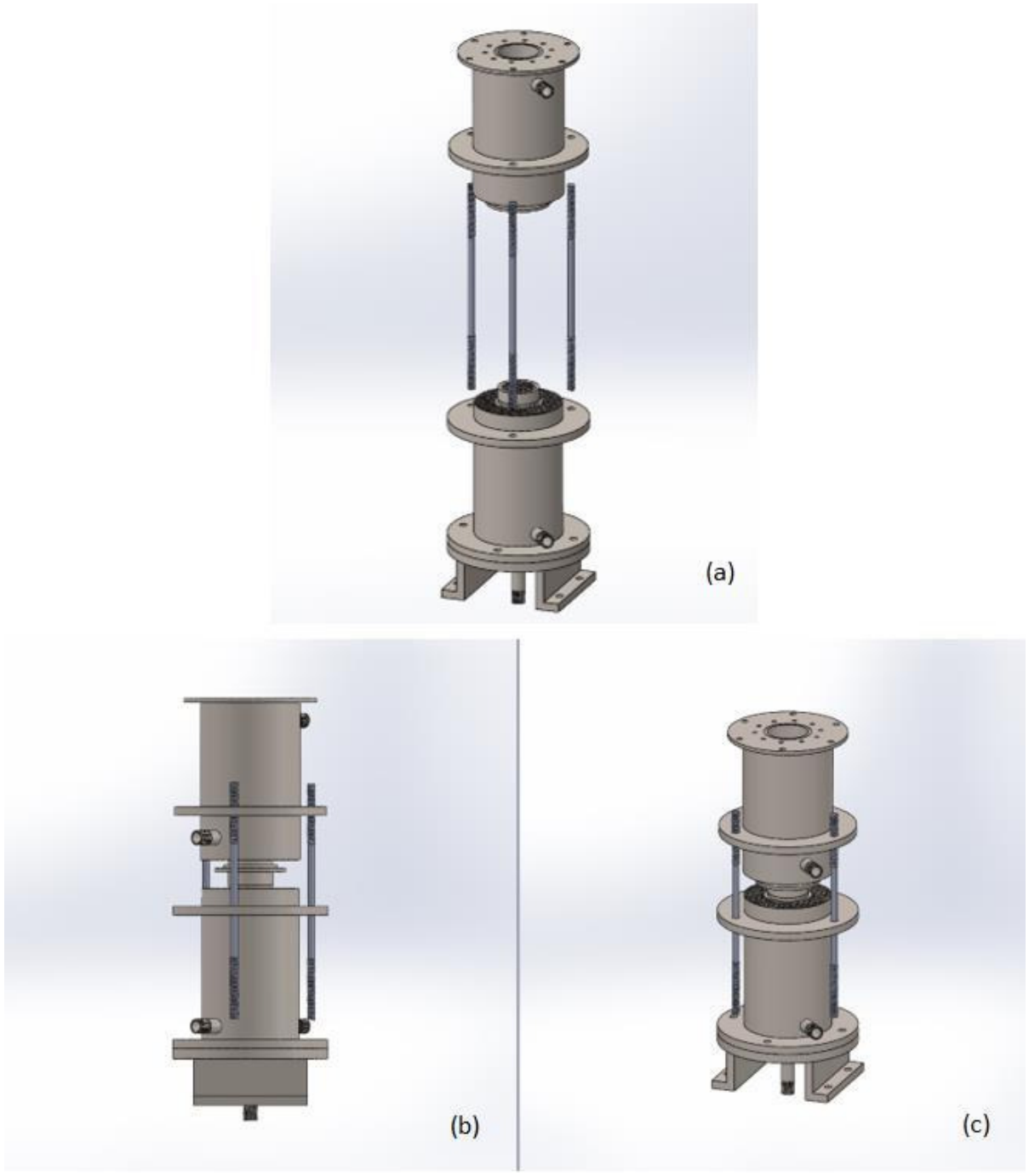


Figura 47. Disposición del conjunto conector: (a) vista explosionada; (b) vista lateral; (c) vista isométrica.



Figura 48. Sujeción conjunto conector con cuerpo superior: (a) vista lateral; (b) elementos de sujeción.

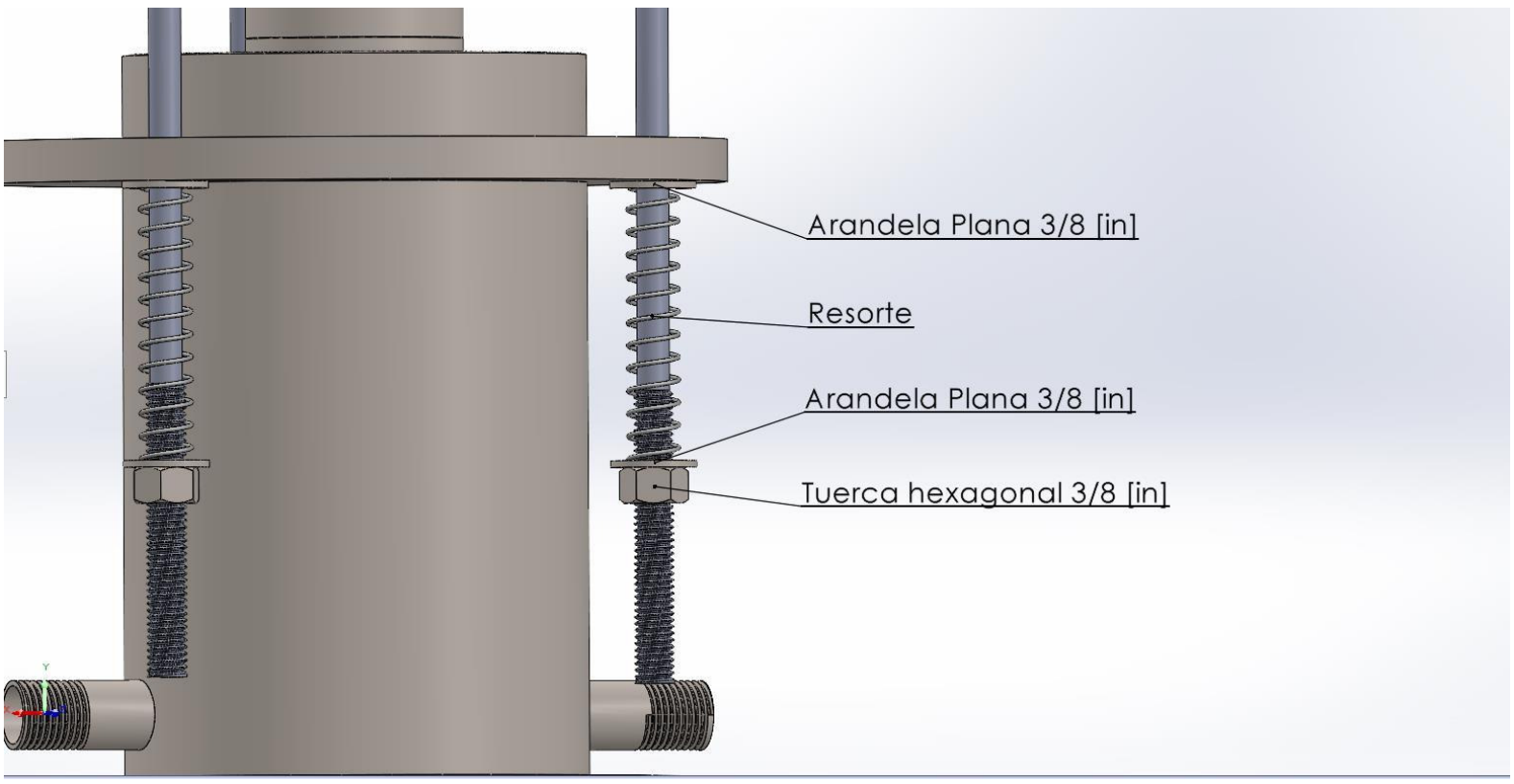


Figura 49. Sujeción conjunto conector con el cuerpo inferior.

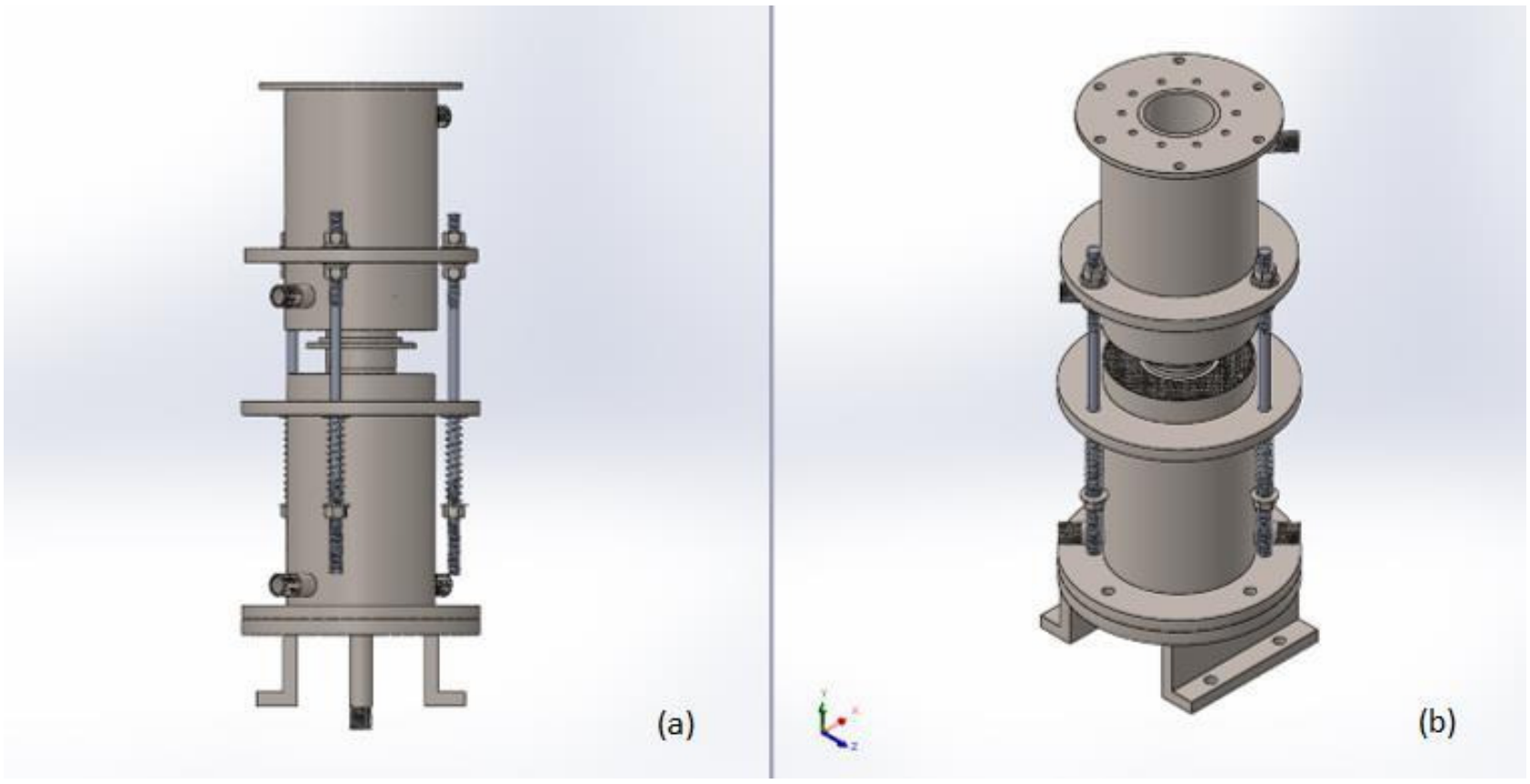


Figura 50. Conjunto conector terminado: (a) vista lateral; (b) vista isométrica.

2.5.7.6. Paso 6: Ensamblar el colector de gases.

Paso 6.1: Coincidir la empaquetadura de grafito con la cara superior del cuerpo superior, ver **Figura 51**.

Paso 6.2: Coincidir y colocar el colector de gases en su posición correspondiente, ver **Figura 52**.

Paso 6.3: Coincidir los soportes del cuerpo superior pertenecientes al sistema de movimiento vertical con los espárragos superiores de este y con los del colector de gases, ver **Figura 53**.

Paso 6.4: Apernar el sistema utilizando un perno 3/8 x 1.5 [in], una arandela plana 3/8 [in], una arandela de presión 3/8 [in] y una tuerca 3/8 [in], en los 6 agujeros correspondientes, ver **Figura 54**.

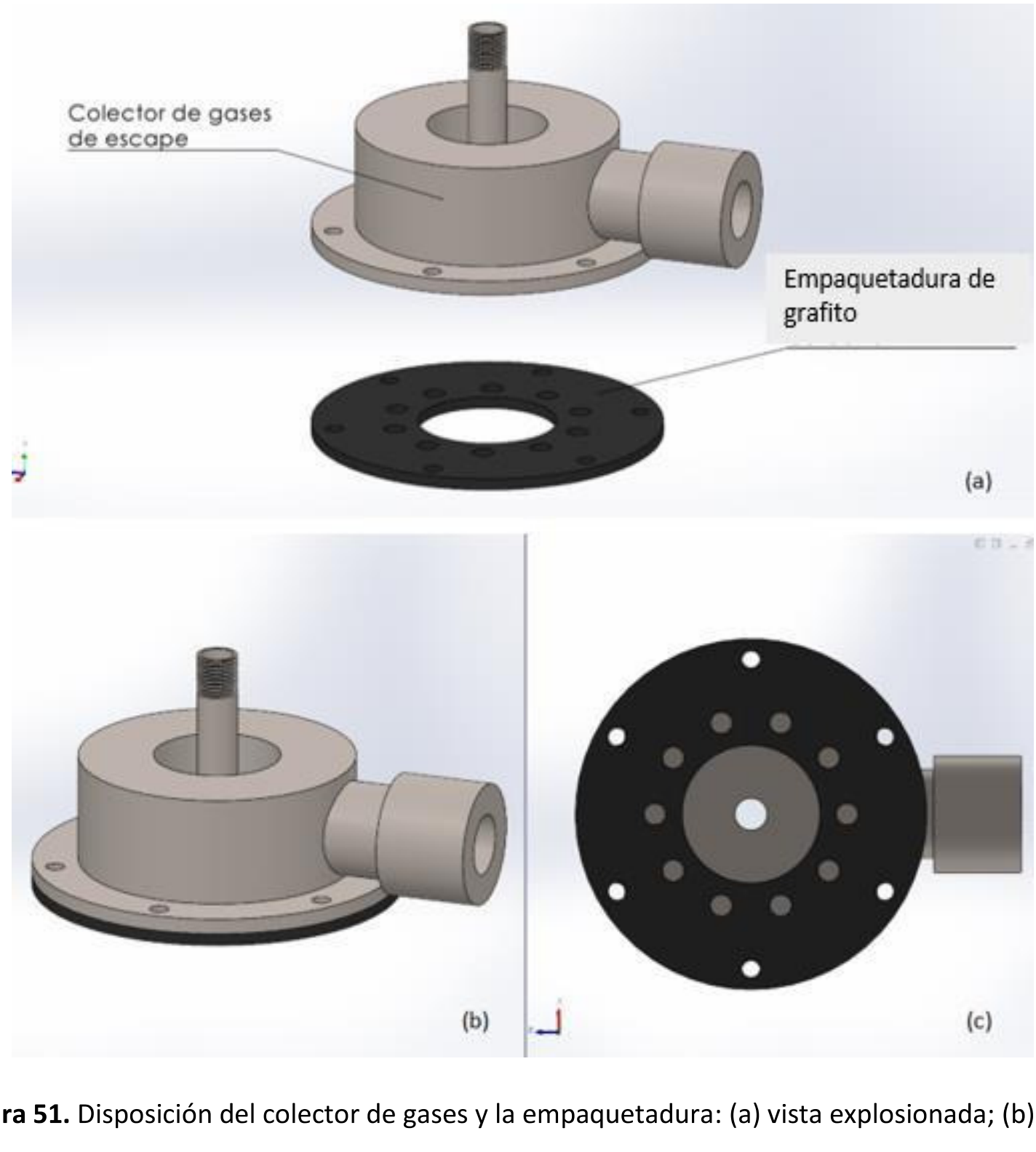


Figura 51. Disposición del colector de gases y la empaquetadura: (a) vista explosionada; (b) vista isométrica; (c) vista inferior.

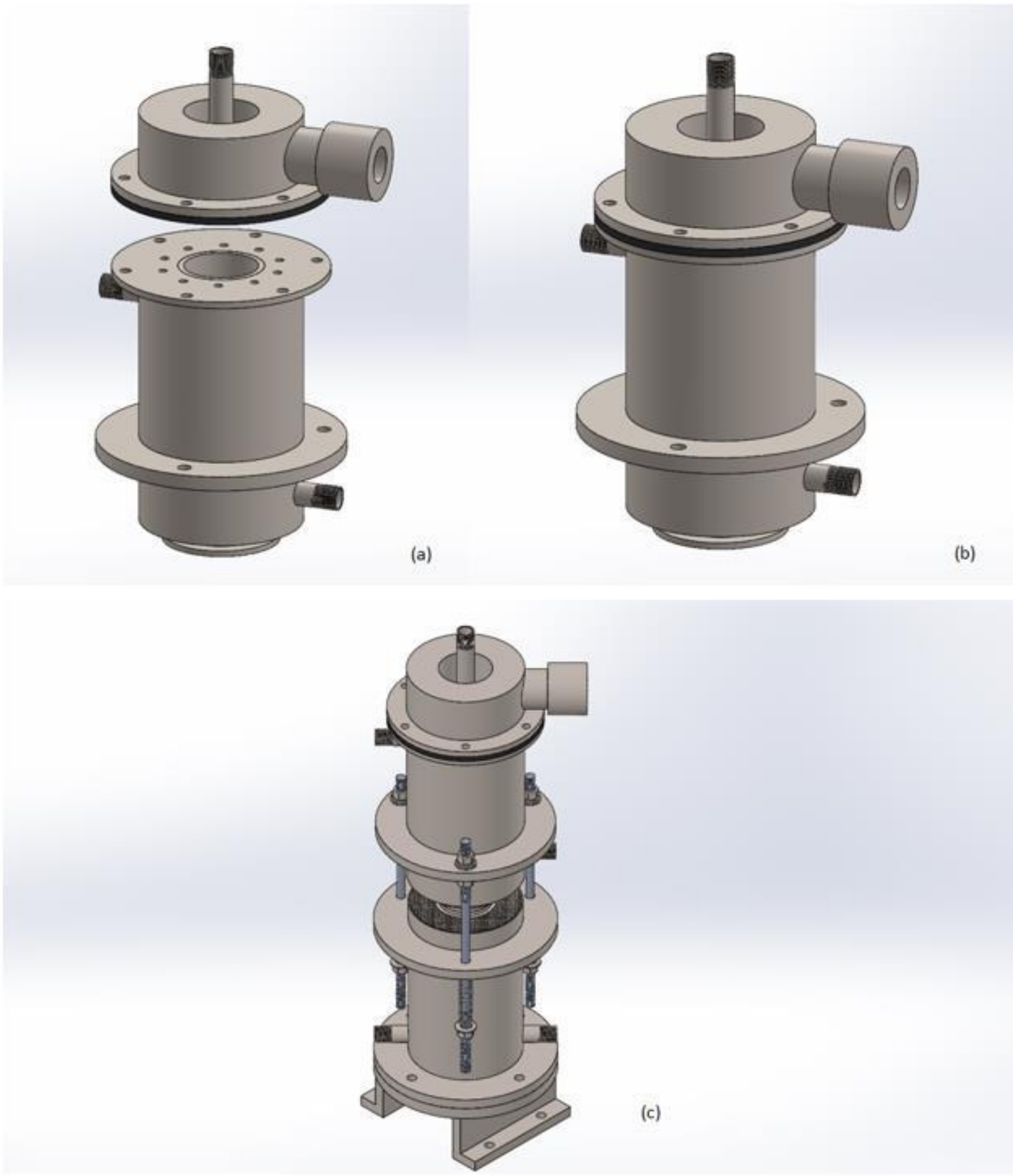


Figura 52. Disposición del colector de gases y el conjunto superior: (a) vista explosionada; (b) vista isométrica; (c) resultado final.

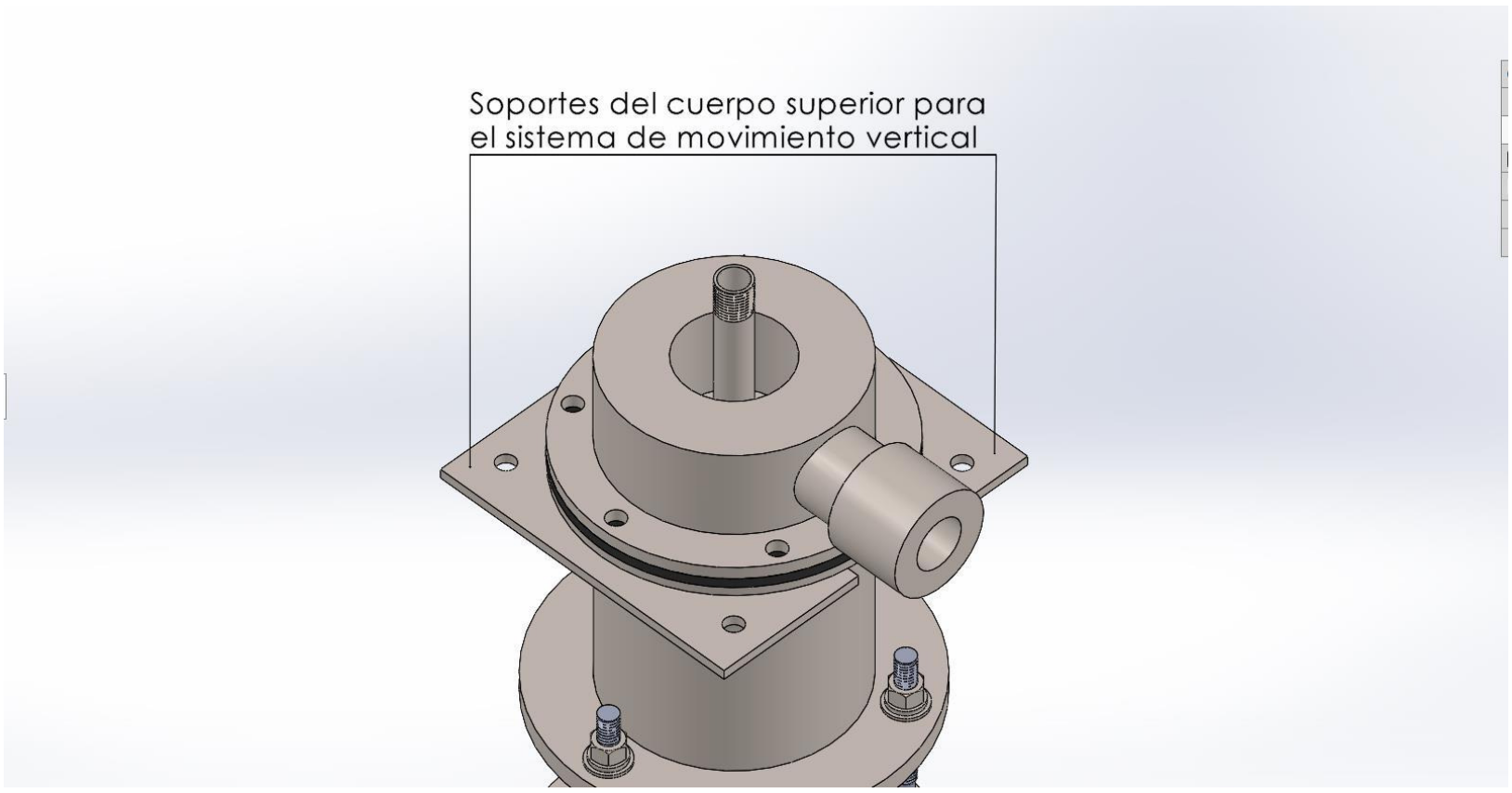


Figura 53. Disposición de soportes del cuerpo superior para el sistema de movimiento vertical.

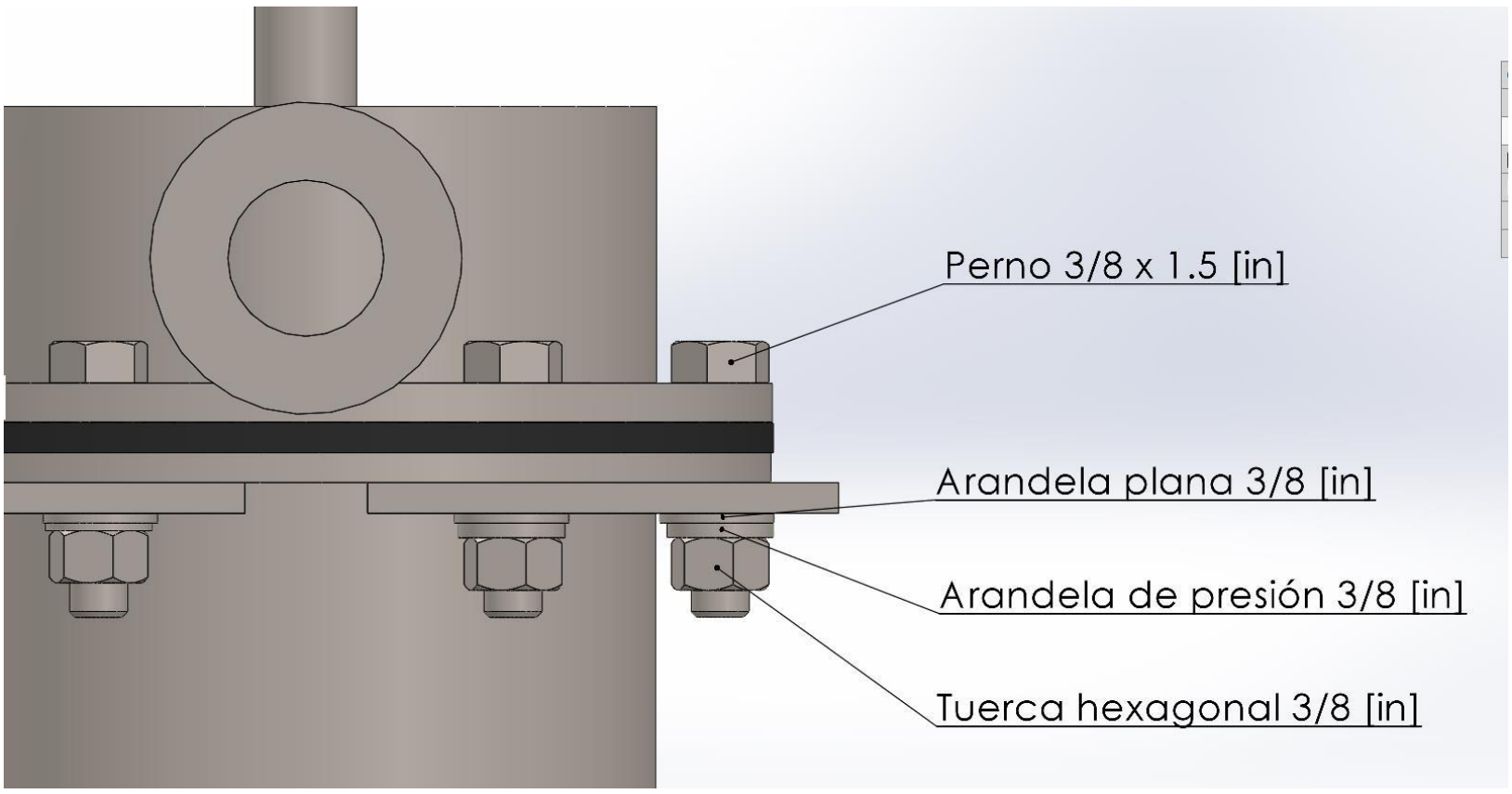


Figura 54. Sujeción para los soportes del cuerpo superior del colector para el sistema de movimiento vertical.

Paso 7: Sujetar los soportes del cuerpo superior con los espárragos superiores. Utilizar dos arandelas planas 3/8 [in], dos arandelas de presión 3/8 [in] y dos tuercas 3/8 [in], ver **Figura 55**.

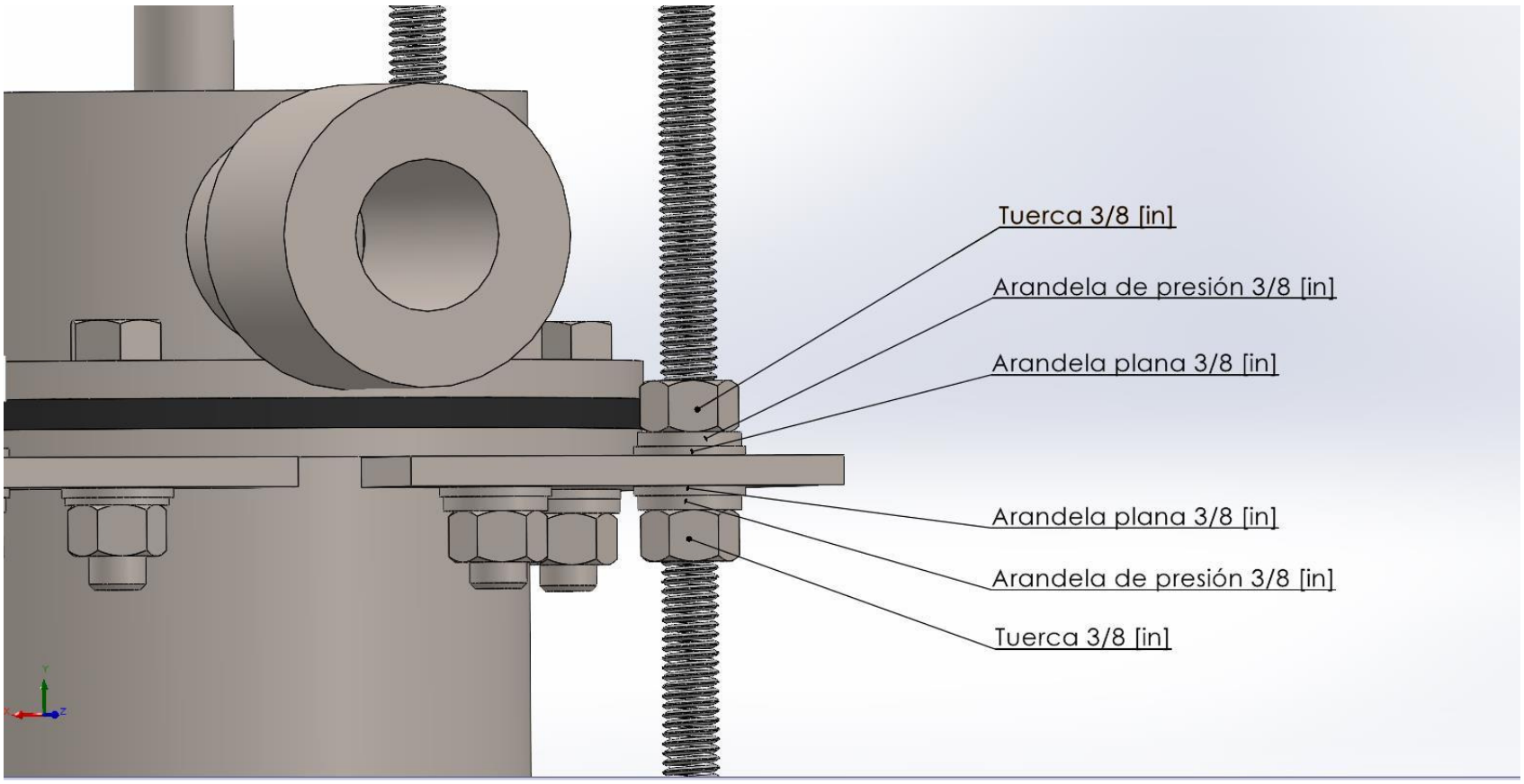


Figura 55. Sujeción para la unión de los soportes del cuerpo superior con el sistema de movimiento vertical.

Paso 8: Enroscar los conectores hidráulicos hembras giratorias BSP en la entrada y salida de agua del sistema de refrigeración del cuerpo superior, y en la entrada del oxidante del cuerpo inferior.

Paso 9: Enroscar los conectores hidráulicos hembras giratorias BSP modificados en la entrada del combustible del colector de gases, y en las dos entradas de nitrógeno del cuerpo inferior.

Paso 10: Armar el sistema de refrigeración.

Paso 10.1: Colocar la manguera de goma 1/2 [in] utilizando abrazaderas, conectándola desde la cañería de agua residencial a la entrada de agua del cuerpo superior.

Paso 10.2: Colocar la manguera de goma 1/2 [in] utilizando abrazaderas, conectándola desde la salida de agua hacia el drenaje de agua más cercano.

Paso 11: Colocar la manguera de aluminio para la extracción de gases utilizando su respectiva abrazadera. Conectar un extremo desde el colector y el otro hacia el extractor de gases.

Paso 12: Calibrar la regla. Con el cuerpo superior descansando sobre el cuerpo inferior, asegurarse de que el cero “0” de la regla coincida con la arista inferior de la guía. Si es necesario, realizar ajustes a la regla, pero no en la guía ni el cuerpo superior.

Finalmente, el ensamble final del quemador sin conexiones se ilustra en la **Figura 56**. Y la presentación final con conexiones del quemador se muestra en la **Figura 57**.

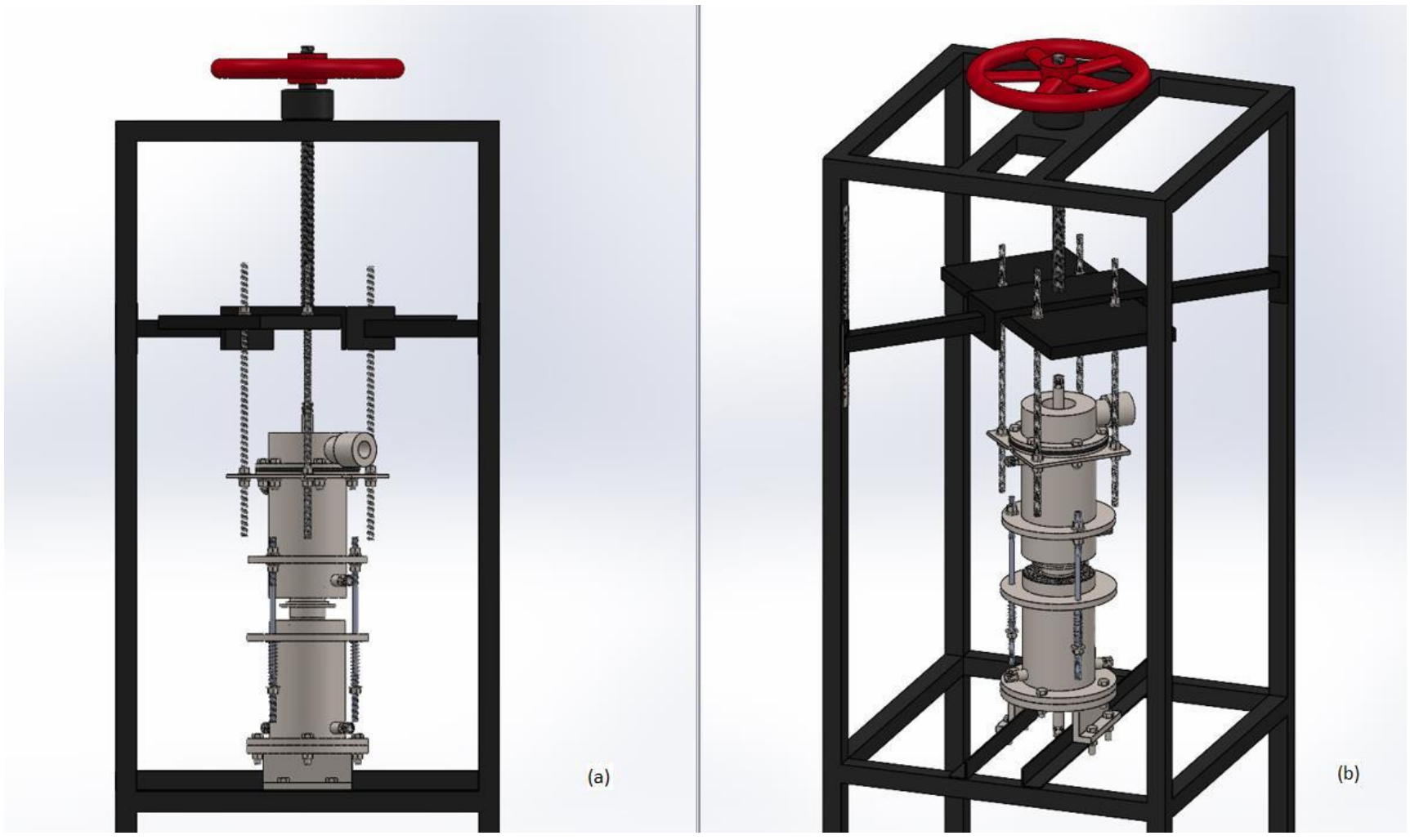


Figura 56. Ensamble del quemador completado sin conexiones: (a) vista lateral; (b) vista isométrica.



Figura 57. Presentación final del quemador de contraflujo.

2.5.8. Ajustes necesarios para lograr una correcta alineación y simetría de los flujos

Para lograr una correcta alineación y simetría de flujos es necesario que, cuando se tenga la altura cero “0”, es decir, cuando el cuerpo superior repose en el inferior, se compriman los resortes aproximadamente un cuarto o la mitad de su longitud. Esta medida contribuirá a crear una distribución equilibrada de fuerzas, las cuales estabilizará la alineación entre el cuerpo inferior y el superior. Esto debido a que los espárragos conectores, que están fabricados artesanalmente, tienen una ligera holgura que podría causar desviaciones de alineación. Sin embargo, es importante destacar que esta ligera holgura en los espárragos no genera desviaciones significativas que afecten negativamente a los resultados.

III. Ensayos de puesta en marcha

Tabla 4. Parámetros y variables de control.

Tipo	Descripción	Presión [bar]	Rango controlador [l/min]
Combustible	Metano	1	0 - 5.00
Oxidante	Aire	1	0 - 5.00
Gas inerte	Nitrógeno	1	0 - 30.0

Tabla 5. Ensayos que realizar.

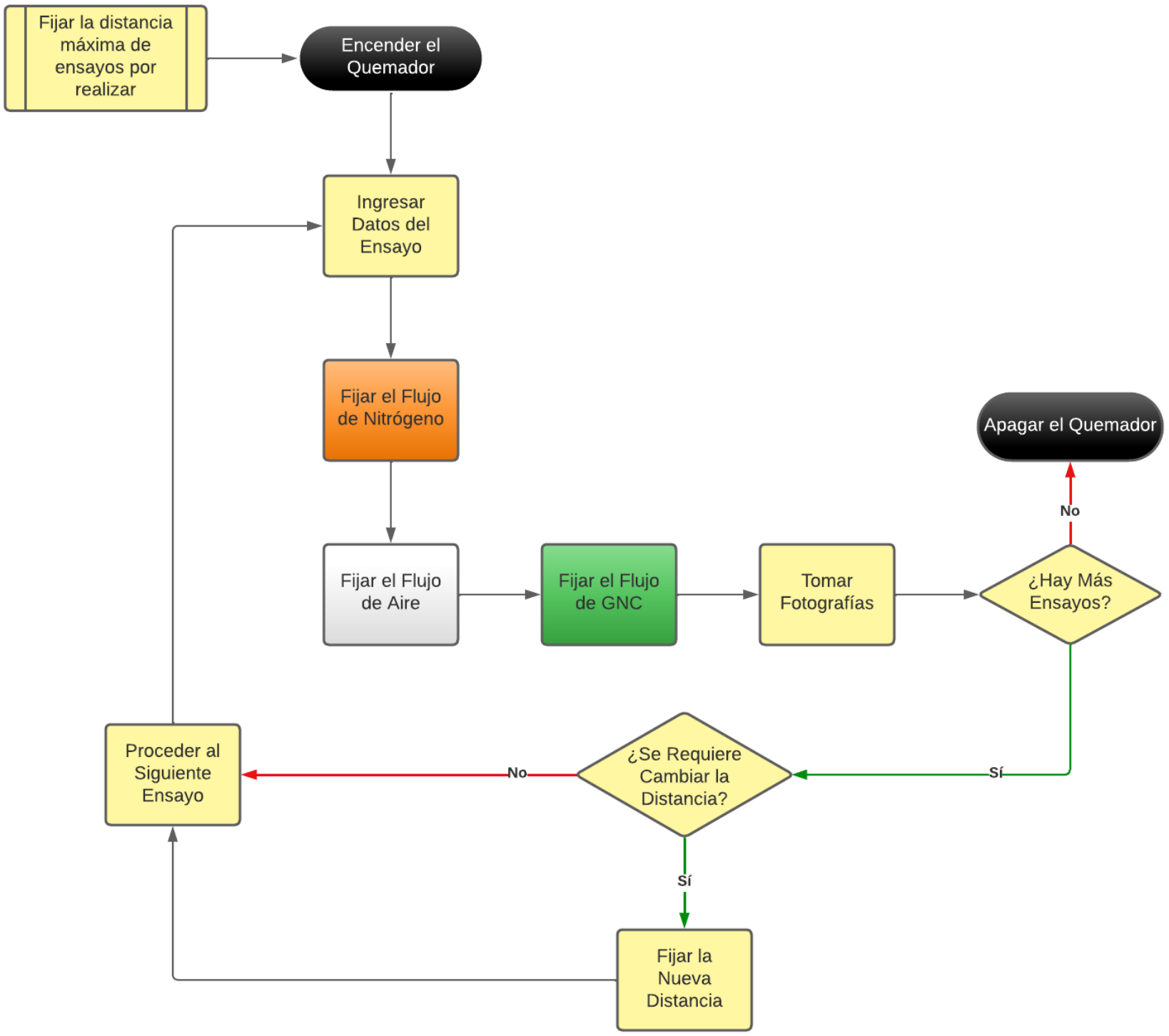
Ensayo	L [cm]	a_g [s^{-1}]	Metano [l/min]	Aire [l/min]	Nitrógeno [l/min]
1	2.5	5	2.11	2.11	13.9
2	2.5	5	2.11	2.11	26.9
3	2.5	9	3.80	3.80	24.9
4	2.0	5	1.68	1.68	10.9
5	2.0	10	3.33	3.33	21.8
6	2.0	15	4.99	4.99	32.7
7	1.5	5	1.25	1.25	8.50
8	1.5	10	2.49	2.49	16.4
9	1.5	15	3.74	3.74	24.5
10	1.5	20	4.99	4.99	32.7
11	1.0	10	1.66	1.66	10.9
12	1.0	15	2.49	2.49	16.4
13	1.0	20	3.33	3.33	21.8

14	1	25	4,16	4.16	27.3
15	1	30	4.99	4.99	32.7

3.1. Adquisición de datos

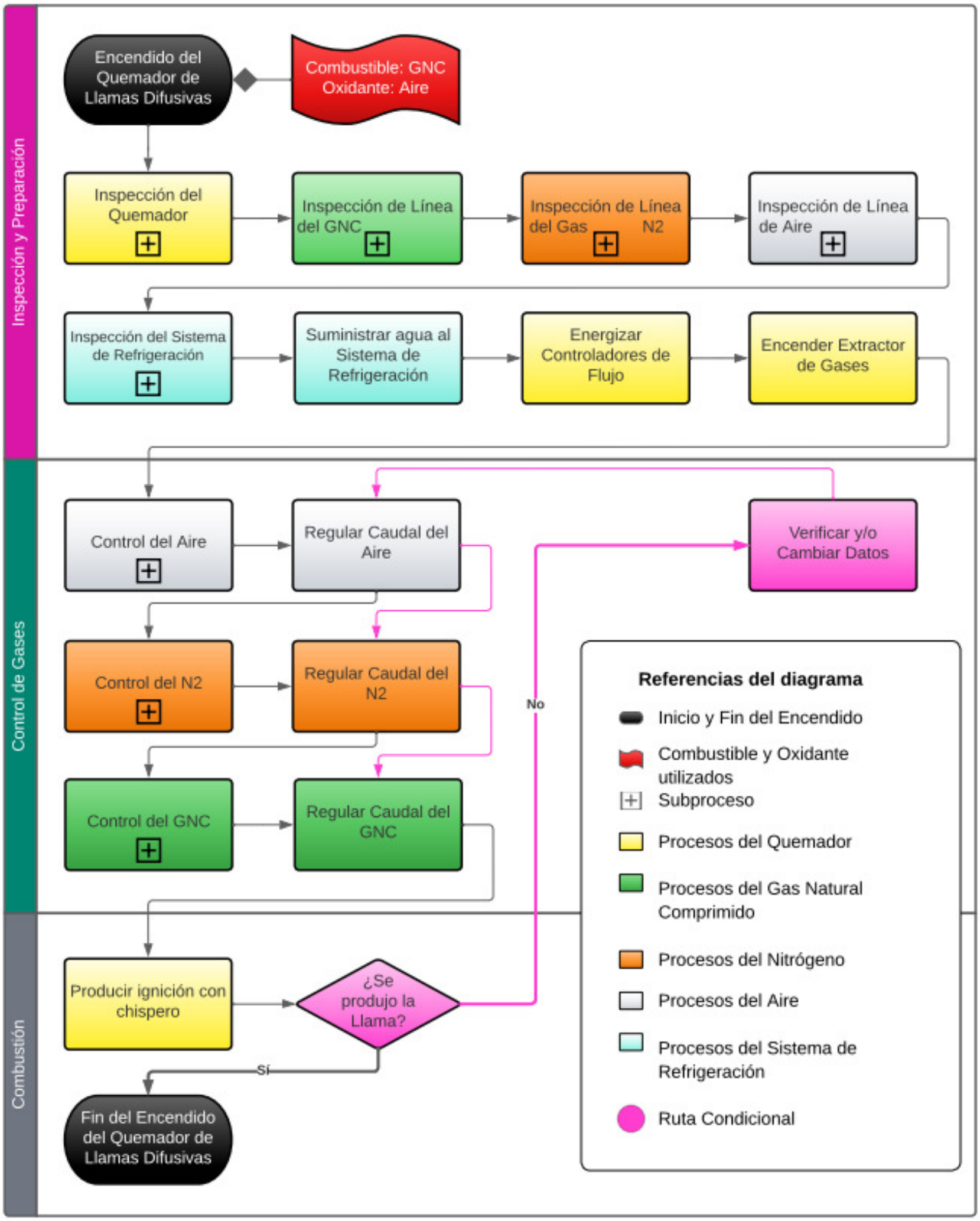
Los cálculos de los flujos para los ensayos están realizados en un archivo Excel, ver en **Anexo V**. El procedimiento para la adquisición de datos se muestra en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Diagrama de flujo para la adquisición de datos.



3.2. Protocolo de seguridad

Cuadro 2. Protocolo de seguridad - Parte 1.


Inspección y Preparación
Encendido del Quemador de Llamas Difusivas
Combustible: GNC
Oxidante: Aire
Inspección del Quemador
Inspección de Línea del GNC
Inspección de Línea del Gas N2
Inspección de Línea de Aire
Inspección del Sistema de Refrigeración
Suministrar agua al Sistema de Refrigeración
Energizar Controladores de Flujo
Encender Extractor de Gases
Control de Gases
Control del Aire
Regular Caudal del Aire
Verificar y/o Cambiar Datos
Control del N2
Regular Caudal del N2
Control del GNC
Regular Caudal del GNC
No
Referencias del diagrama
Inicio y Fin del Encendido
Combustible y Oxidante utilizados
Subproceso
Procesos del Quemador
Procesos del Gas Natural Comprimido
Procesos del Nitrógeno
Procesos del Aire
Procesos del Sistema de Refrigeración
Ruta Condicional
Combustión
Producir ignición con chispero
¿Se produjo la Llama?
Sí
Fin del Encendido del Quemador de Llamas Difusivas

Cuadro 3. Protocolo de seguridad - Parte 2.

Subprocesos

Inspección y Preparación

N°	Inspección del Quemador	Check
1	Chequear visualmente buenas condiciones	☐
2	Chequear que la distancia entre los cuerpos superior e inferior sea nula (0 [mm])	☐
3	Chequear que las válvulas de paso estén cerradas	☐
4	Chequear que los controladores de flujo no estén energizados	☐
5	Chequear que los controladores de flujo estén firmes en su posición	☐
6	Chequear que la línea de gases de escape esté en pocisión	☐
7	Chequear manualmente que los elementos de sujeción y conexión estén firmes	☐

N°	Inspección de Línea del GNC	Check
1	Chequear visualmente buenas condiciones	☐
2	Chequear que todas las válvulas de la línea estén cerradas	☐
3	Comprobar irregularidades en los manómetros	☐
4	Chequear manualmente que los elementos de conexión estén firmes	☐

N°	Inspección de Línea del Gas N2	Check
1	Chequear visualmente buenas condiciones	☐
2	Chequear que todas las válvulas de la línea estén cerradas	☐
3	Comprobar irregularidades en los manómetros	☐
4	Chequear manualmente que los elementos de conexión estén firmes	☐

N°	Inspección de Línea de Aire	Check
1	Chequear que el Compresor de Aire no esté energizado	☐
2	Chequear visualmente buenas condiciones	☐
3	Chequear que todas las válvulas de la línea estén cerradas	☐
4	Chequear manualmente que los elementos de conexión estén firmes	☐

N°	Inspección del Sistema de Refrigeración	Check
1	Chequear buenas condiciones de conexión	☐
2	Chequear que la válvula de suministro de agua esté cerrada	☐
3	Chequear que no haya fugas de agua en la línea de agua	☐

Cuadro 4. Protocolo de seguridad - Parte 3.

Subprocesos

Control de Gases

N°	Control de Aire	Check
1	Energizar el Compresor de Aire	☐
2	Regular la Presión de Salida del Compresor de Aire	☐
3	Regular la presión de Salida del Filtro Regulador – Lubricador del Aire	☐
4	Detectar fugas en toda la línea	☐

N°	Control del N2	Check
1	Abrir y regular válvulas de paso del Estanque de Nitrógeno	☐
2	Detectar fugas en la línea del estanque	☐
3	Abrir válvula de paso del Nitrógeno	☐
4	Regular la Presión de Salida del Nitrógeno	☐
5	Detectar fugas en toda la línea	☐

N°	Control del GNC	Check
1	Abrir válvula de paso del Gas Natural Comprimido	☐
2	Regular la Presión de Salida del Gas Natural Comprimido	☐
3	Detectar fugas en toda la línea	☐

Cuadro 5. Protocolo de seguridad - Parte 4.



En la **Figura 58** se visualiza la disposición del quemador para la adquisición de datos.



Figura 58. Vista frontal del quemador para los ensayos.

3.3. Ensayo 1

- Distancia entre reactivos : $L = 2.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 5\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 2.11\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 13.9\left[\frac{L}{min}\right]$

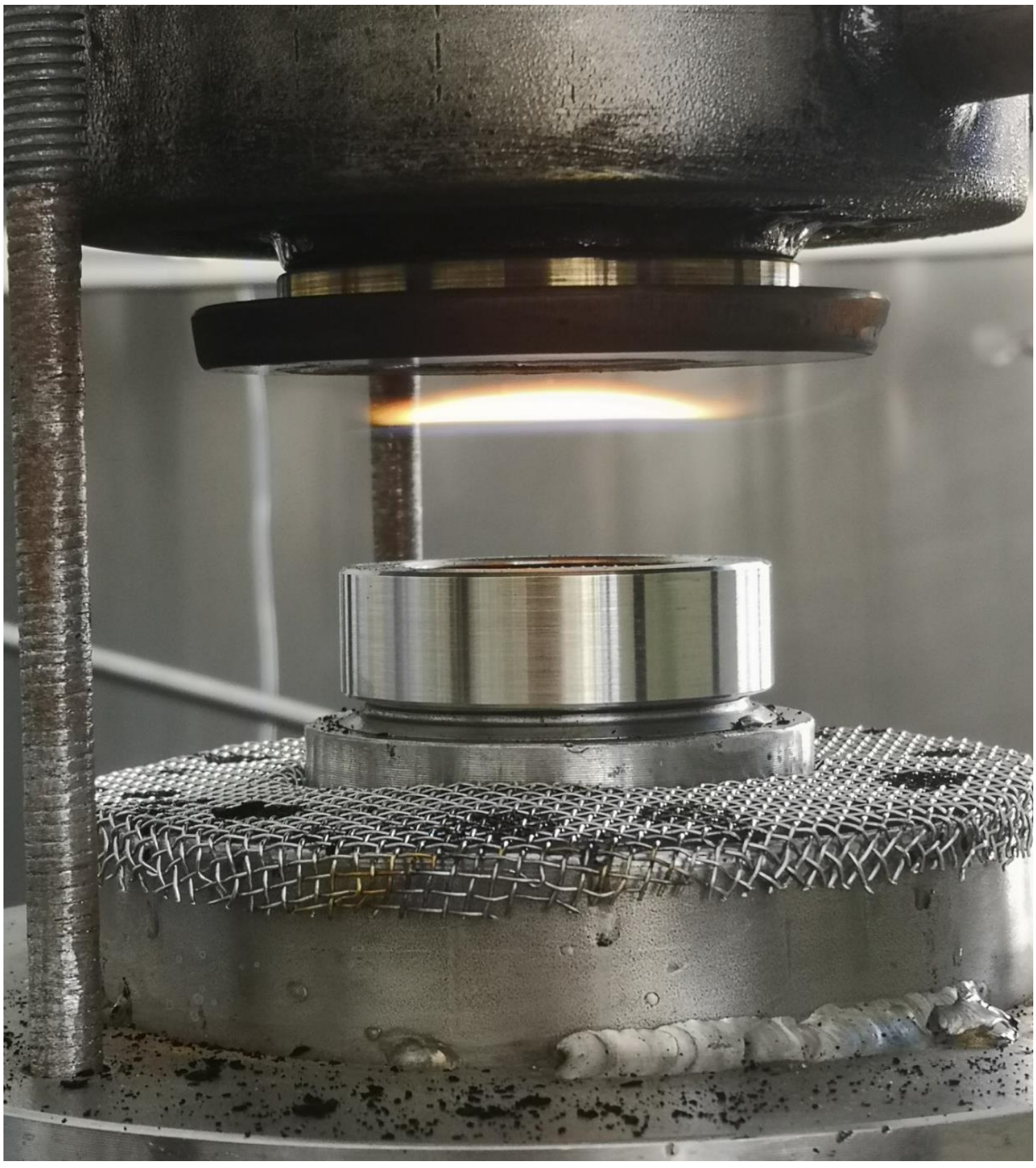


Figura 59. Vista general llama de contraflujo metano-aire: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

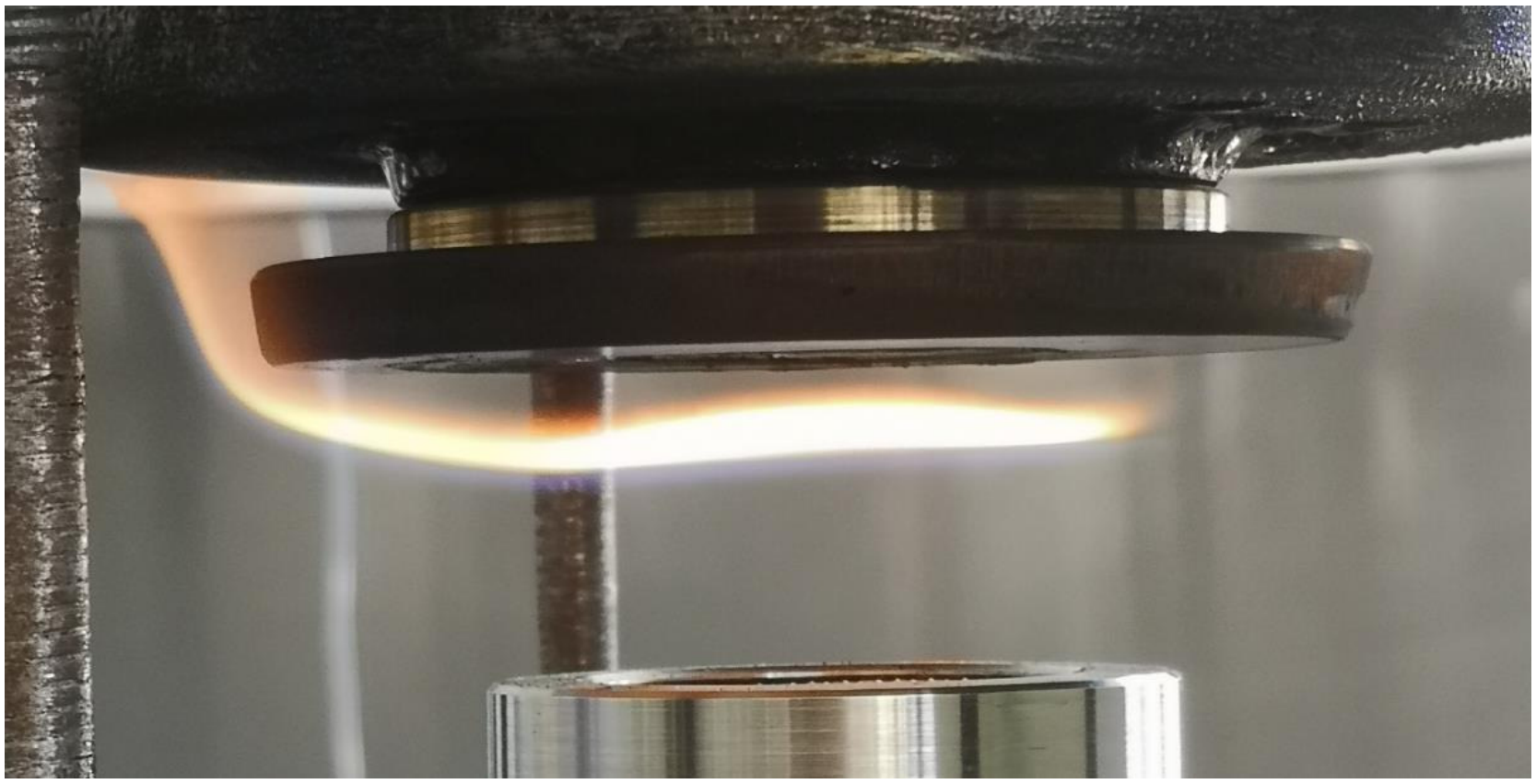


Figura 60. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].



Figura 61. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire desestabilizada: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

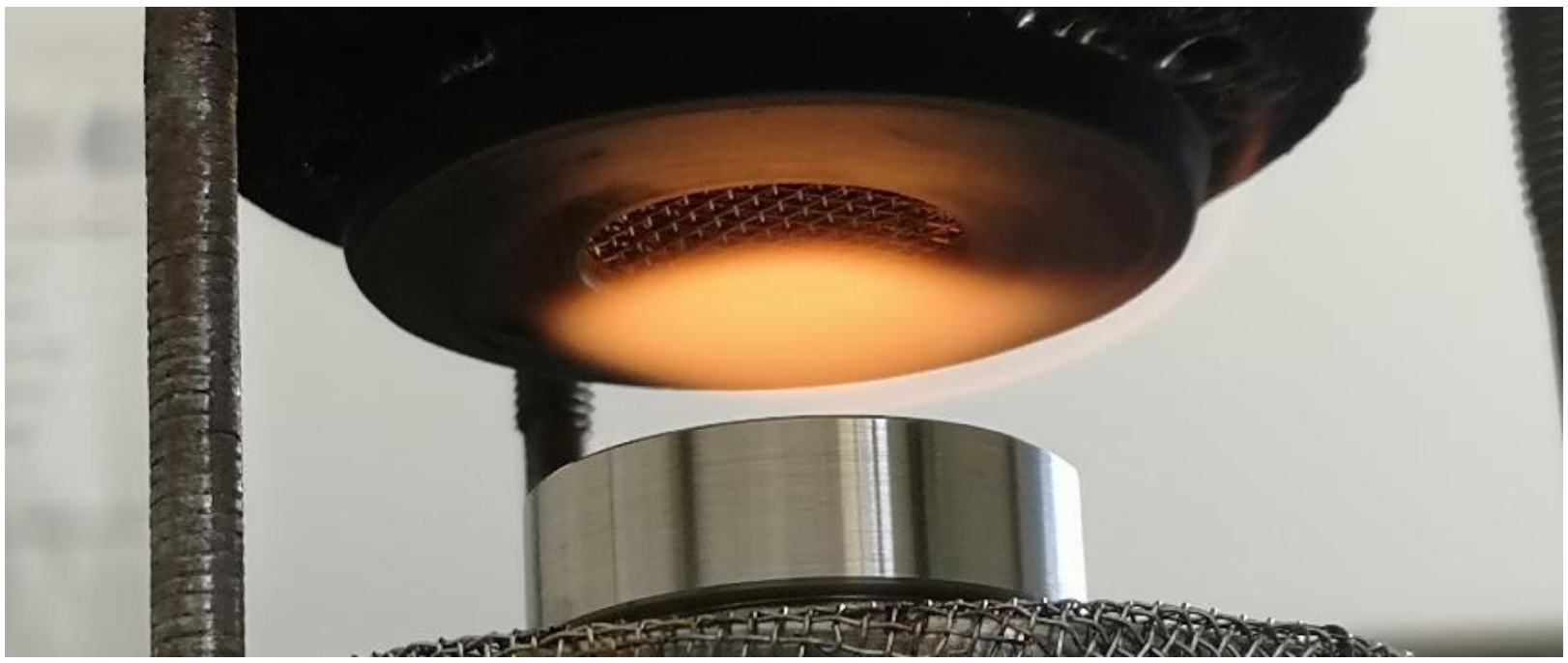


Figura 62. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 2.5 [cm], $a_g = 5\ [s^{-1}]$.

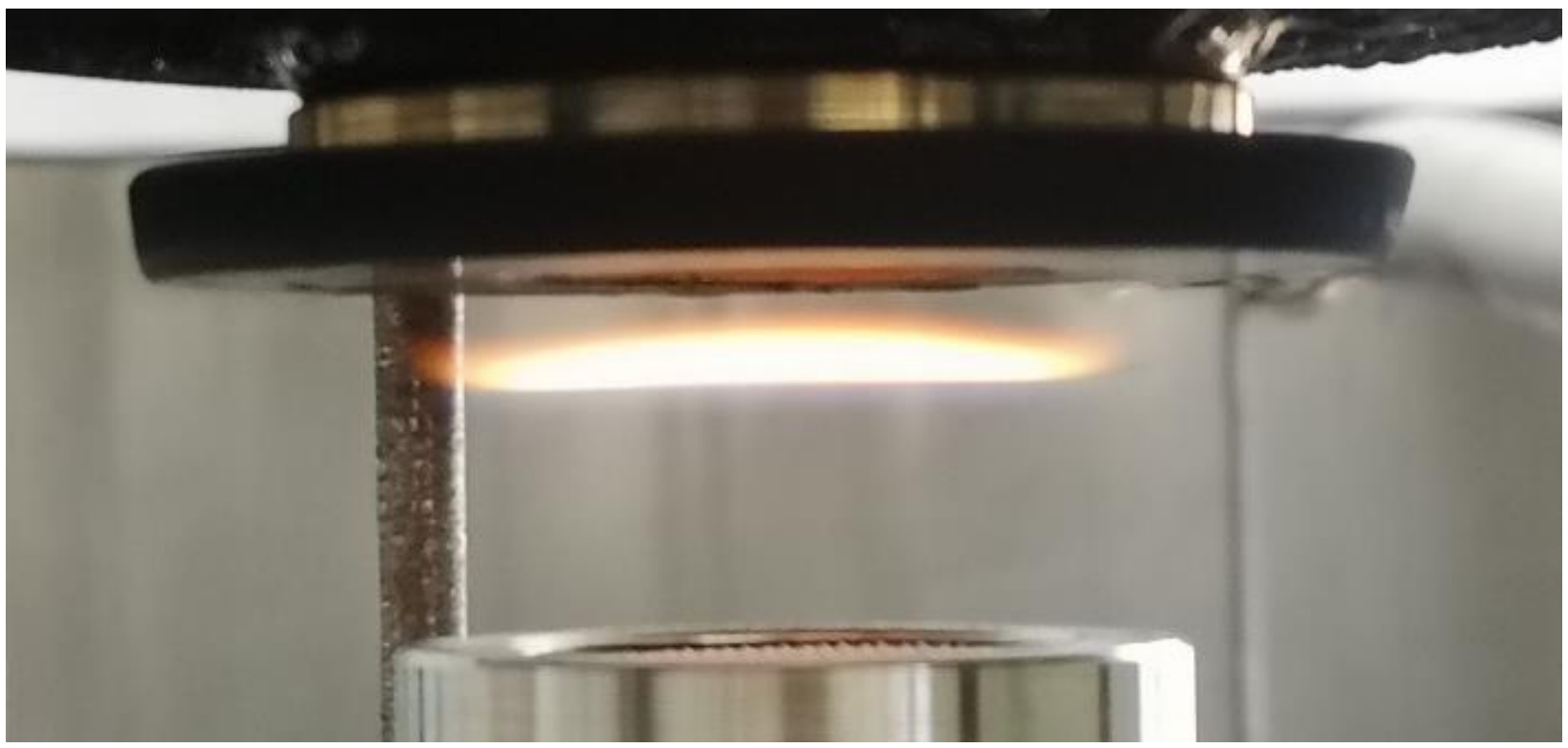


Figura 63. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], $a_g = 5\ [s^{-1}]$.



Figura 64. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

3.4. Ensayo 2

- Distancia entre reactivos : $L = 2.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 5\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 2.11\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 26.9\left[\frac{L}{min}\right]$

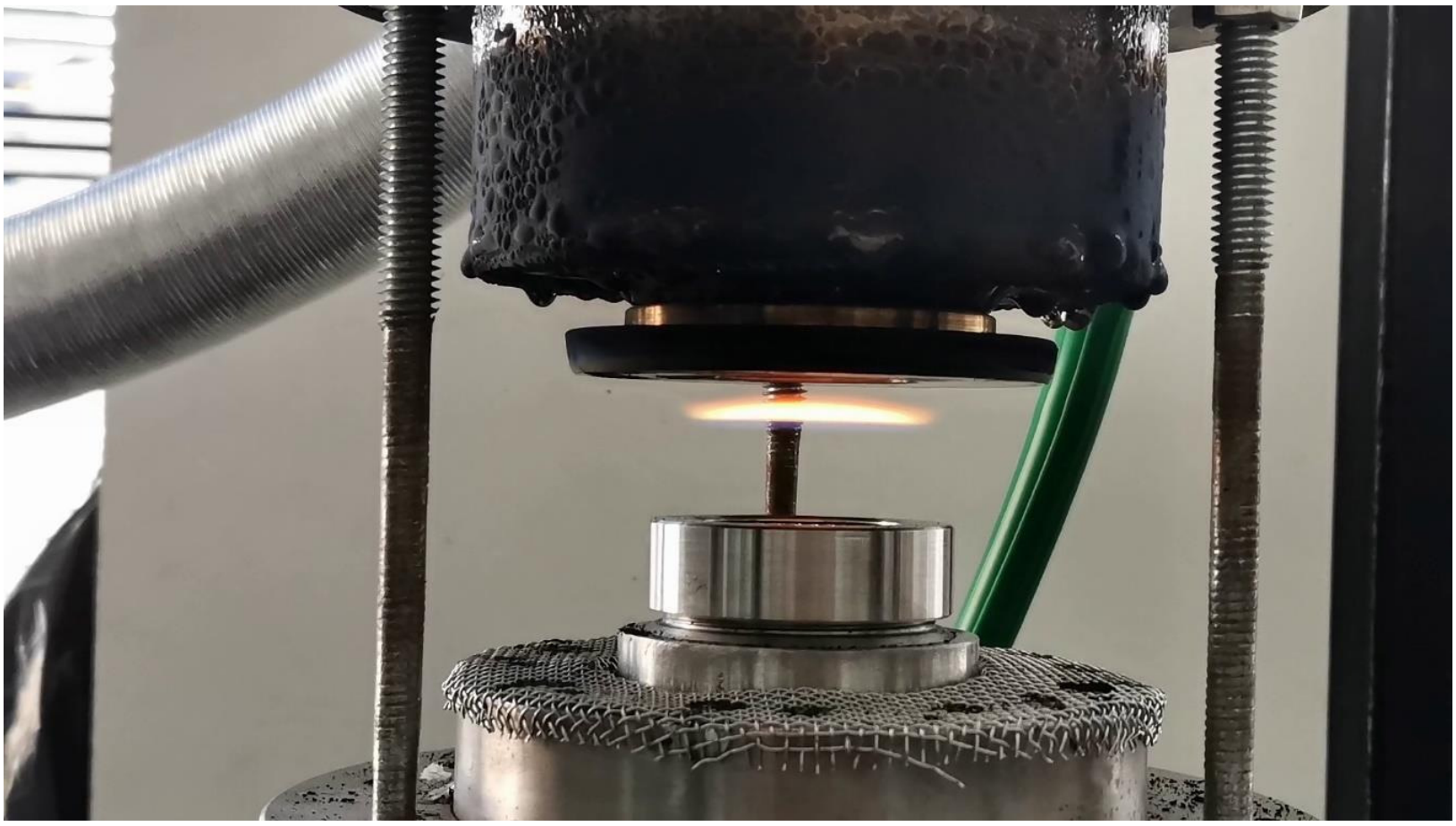


Figura 65. Vista general de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}], V_{N2} = 26.9 [l/min].

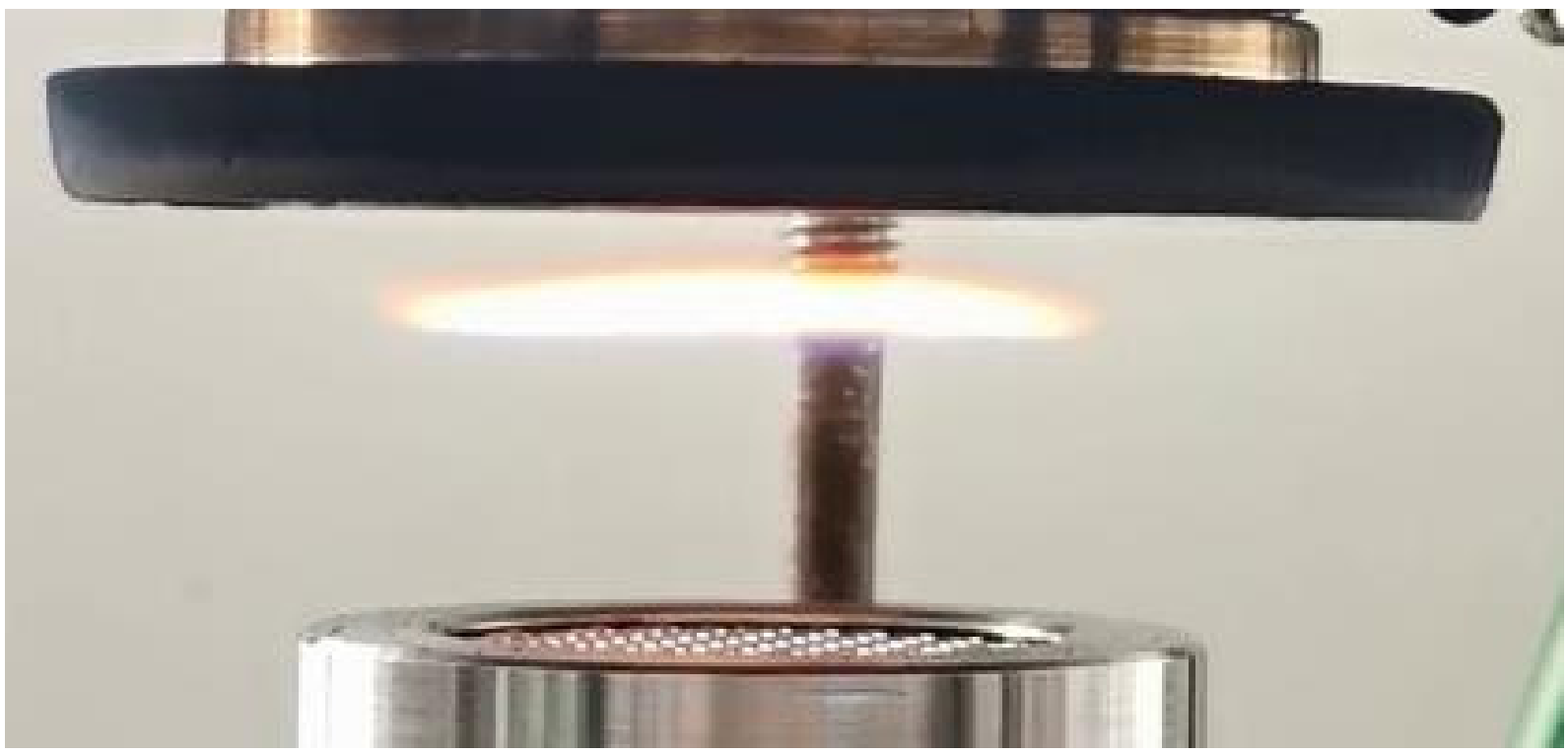


Figura 66. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}], V_{N2} = 26.9 [l/min].

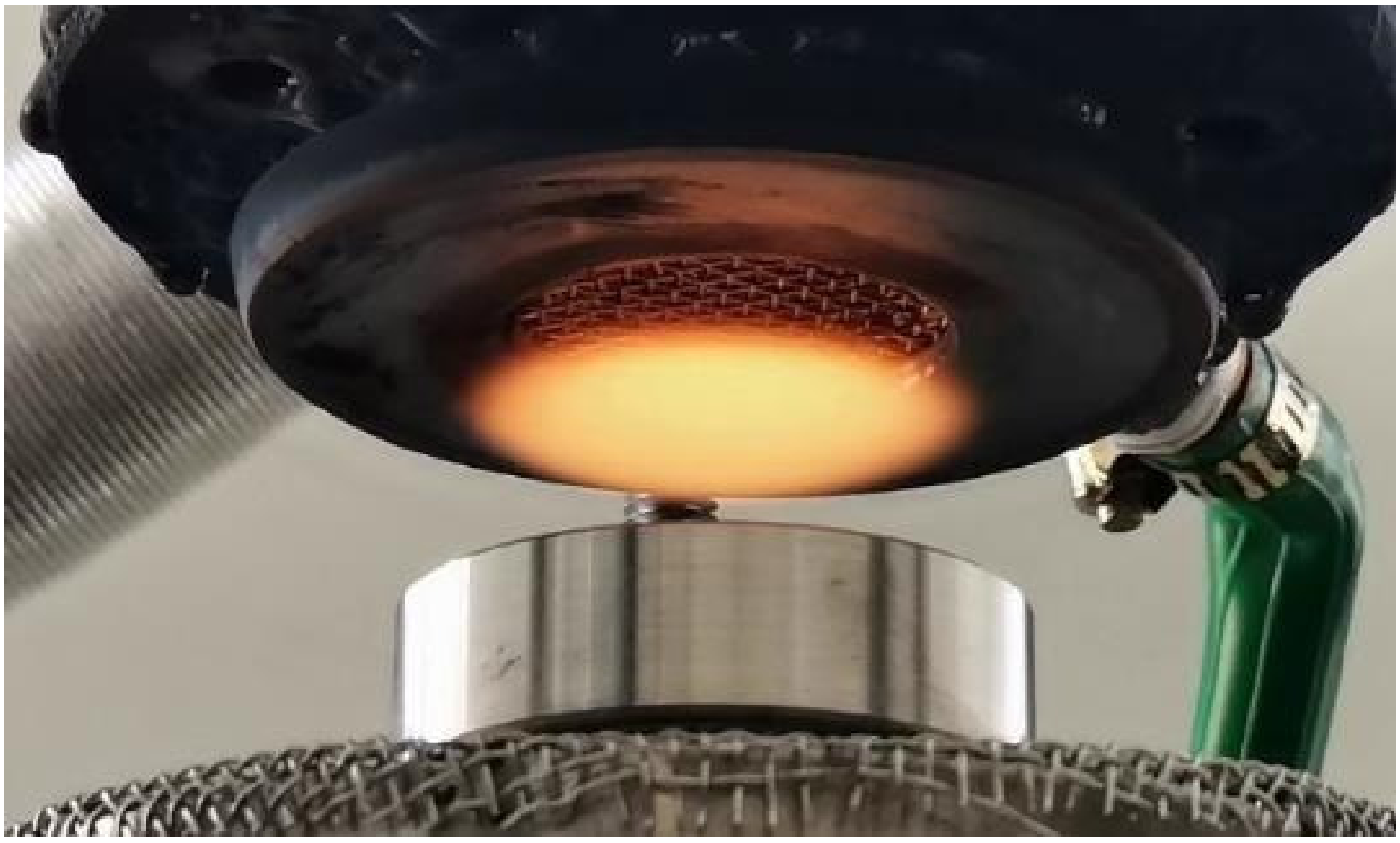


Figura 67. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}], V_{N2} = 26.9 [l/min].



Figura 68. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}], V_{N2} = 26.9 [l/min].

3.5. Ensayo 3

- Distancia entre reactivos : $L = 2.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 9\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 3.80\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 26.9\ (24.9)\left[\frac{L}{min}\right]$

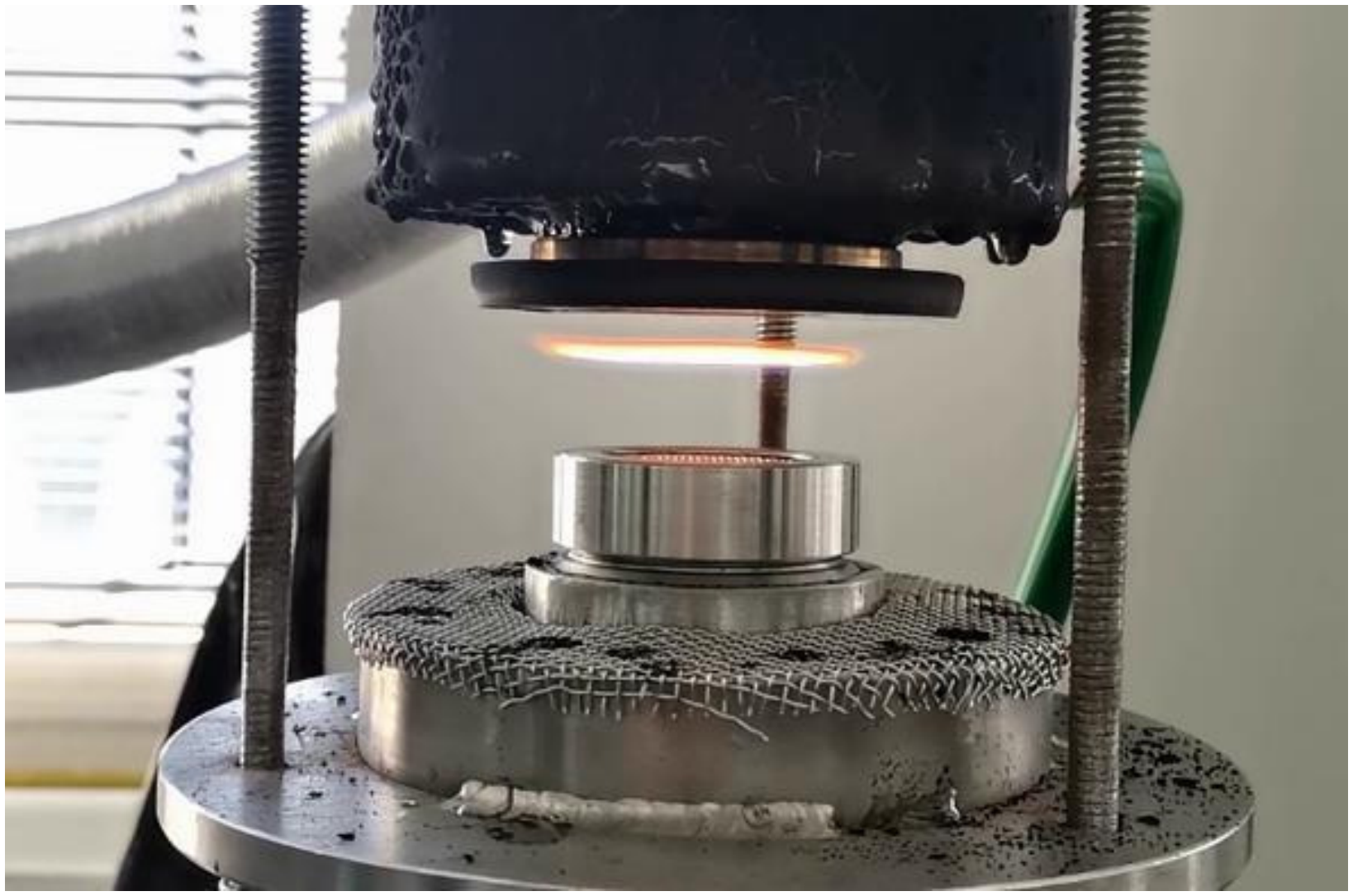


Figura 69. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.5 [cm], a_g = 9 [s^{-1}].

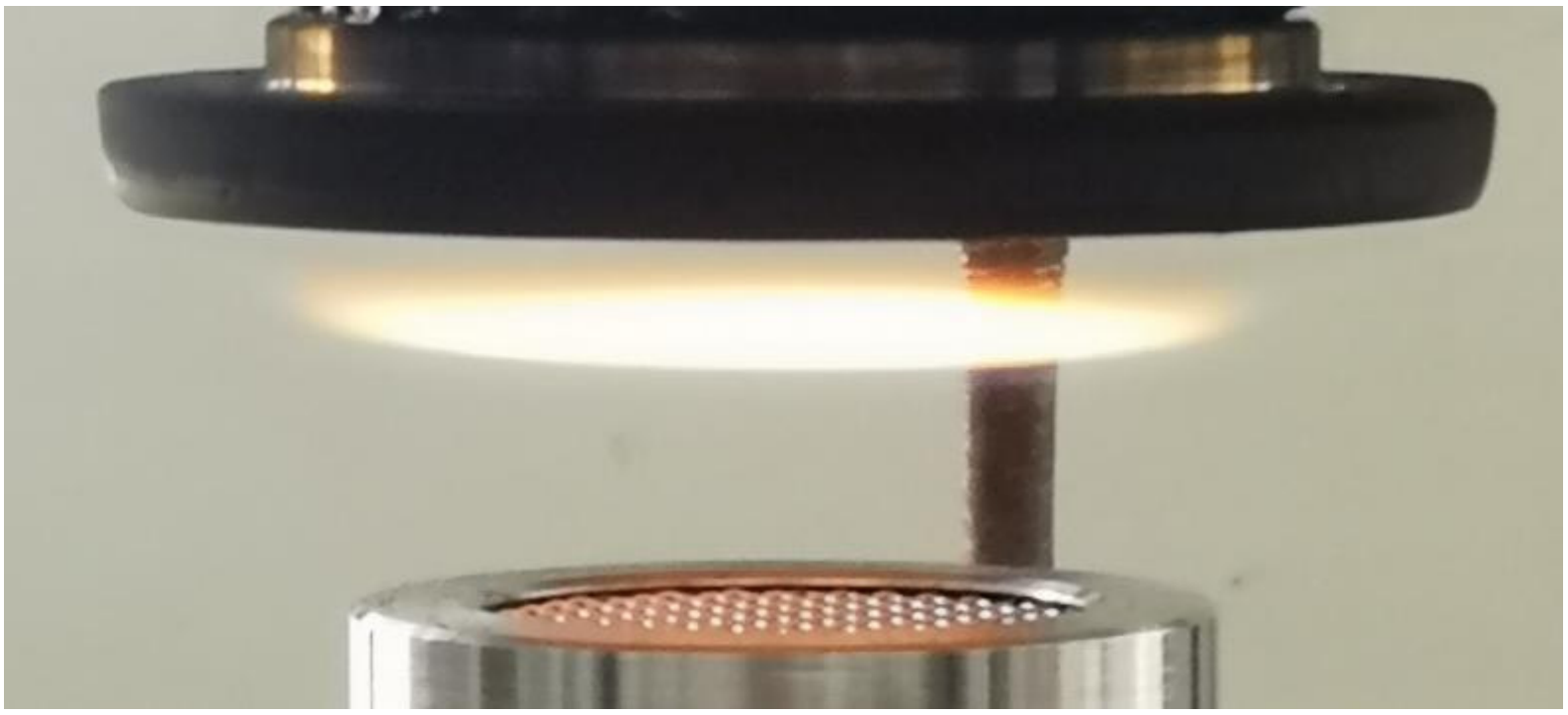


Figura 70. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 9 [s^{-1}].



Figura 71. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.5 [cm], a_g = 9 [s^{-1}],

3.6. Ensayo 4

- Distancia entre reactivos : $L = 2.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 5\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 1.67\ (1.68)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 10.9\left[\frac{L}{min}\right]$

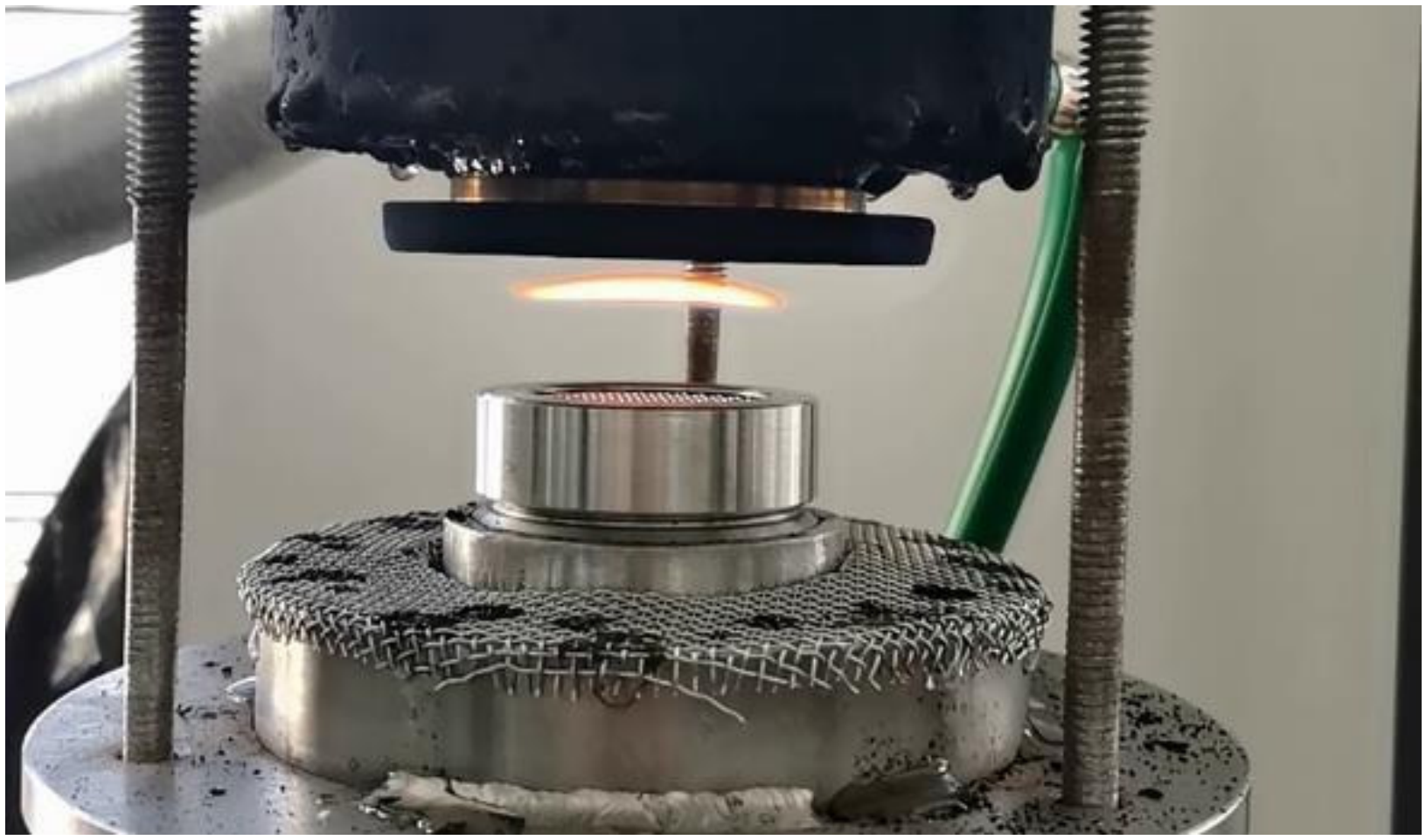


Figura 72. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.0 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].



Figura 73. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.0 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

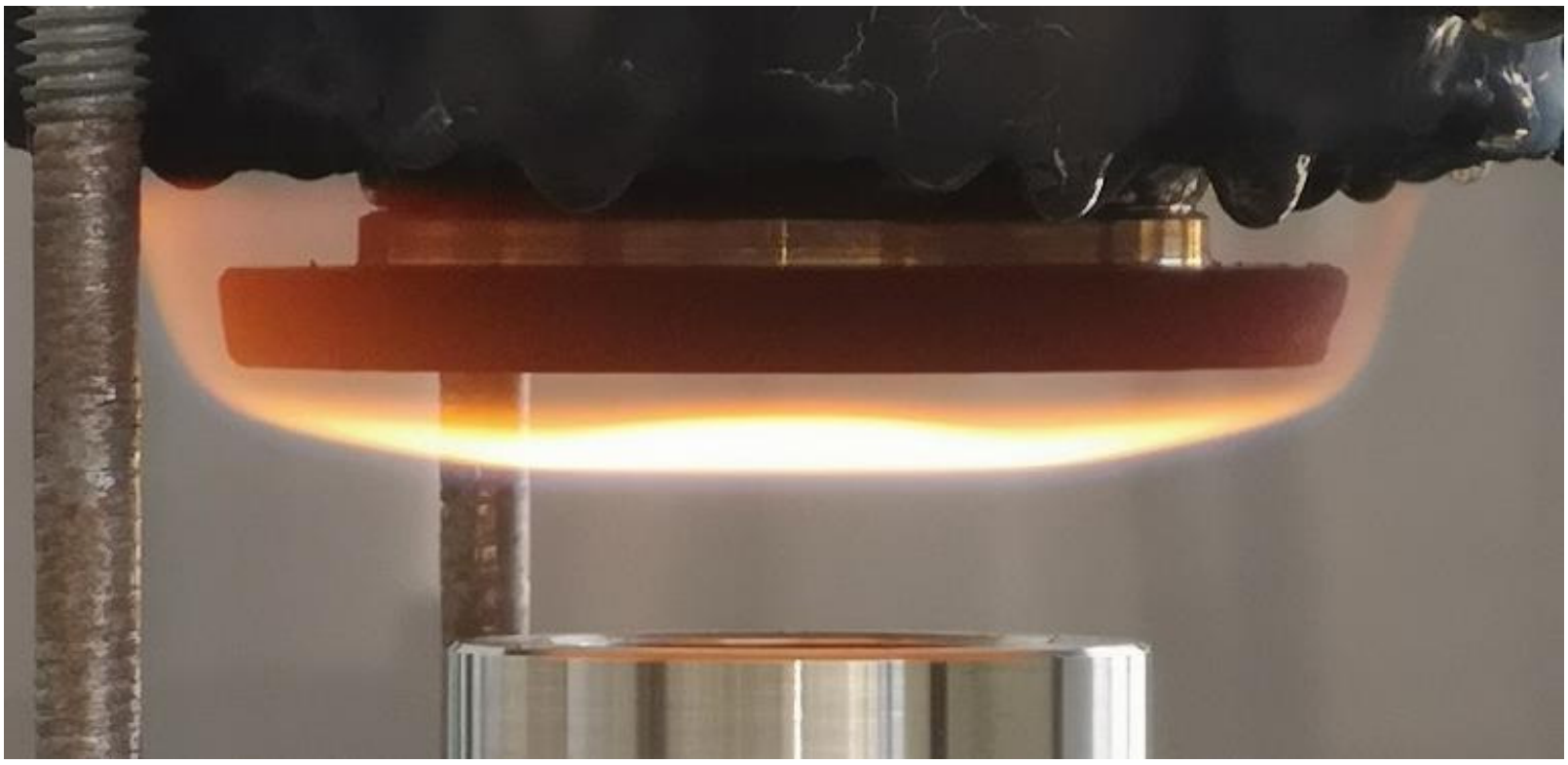


Figura 74. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 2.0 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

3.7. Ensayo 5

- Distancia entre reactivos : $L = 2.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 10\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 3.33\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 21.8\left[\frac{L}{min}\right]$

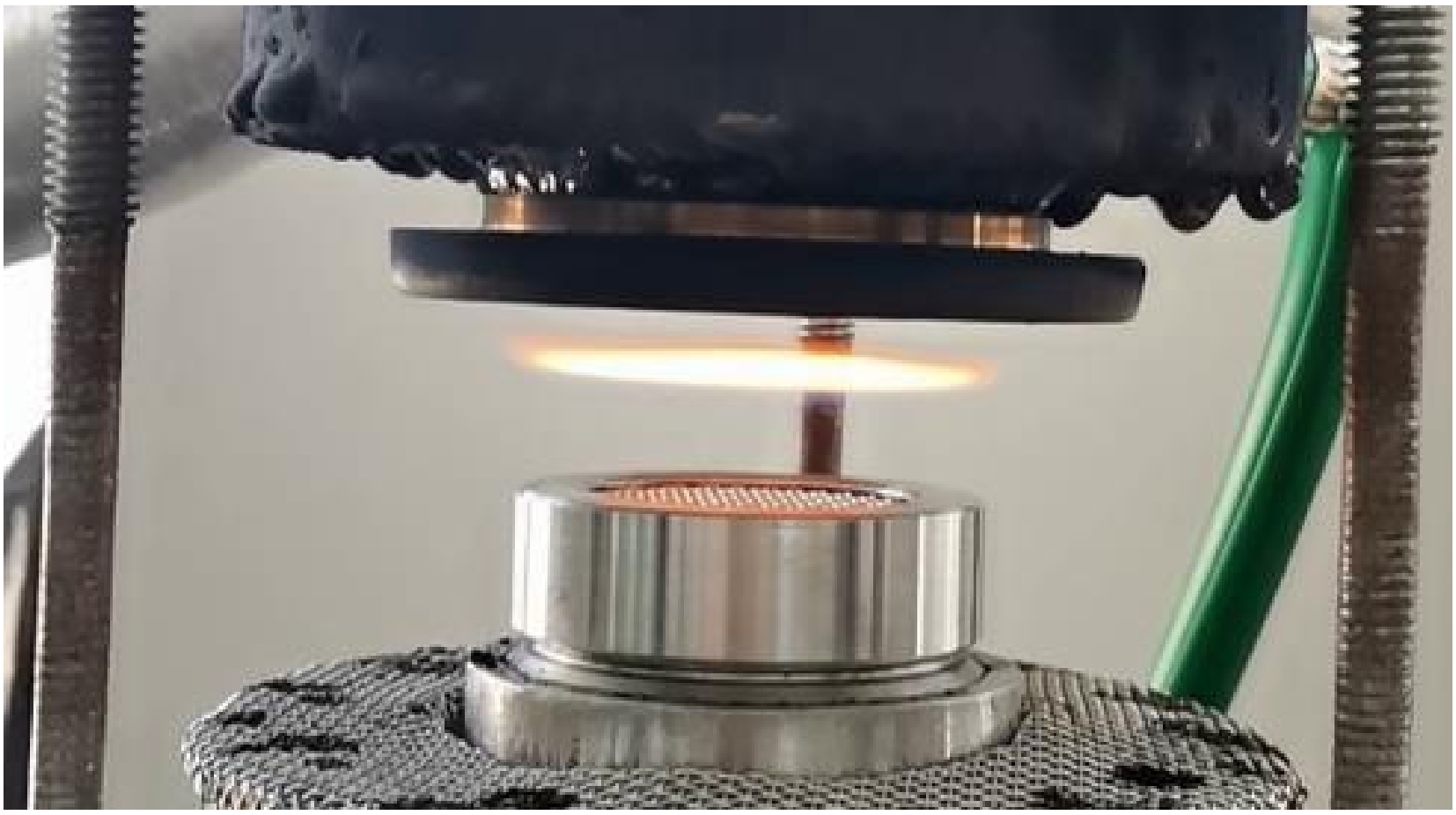


Figura 75. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].



Figura 76. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

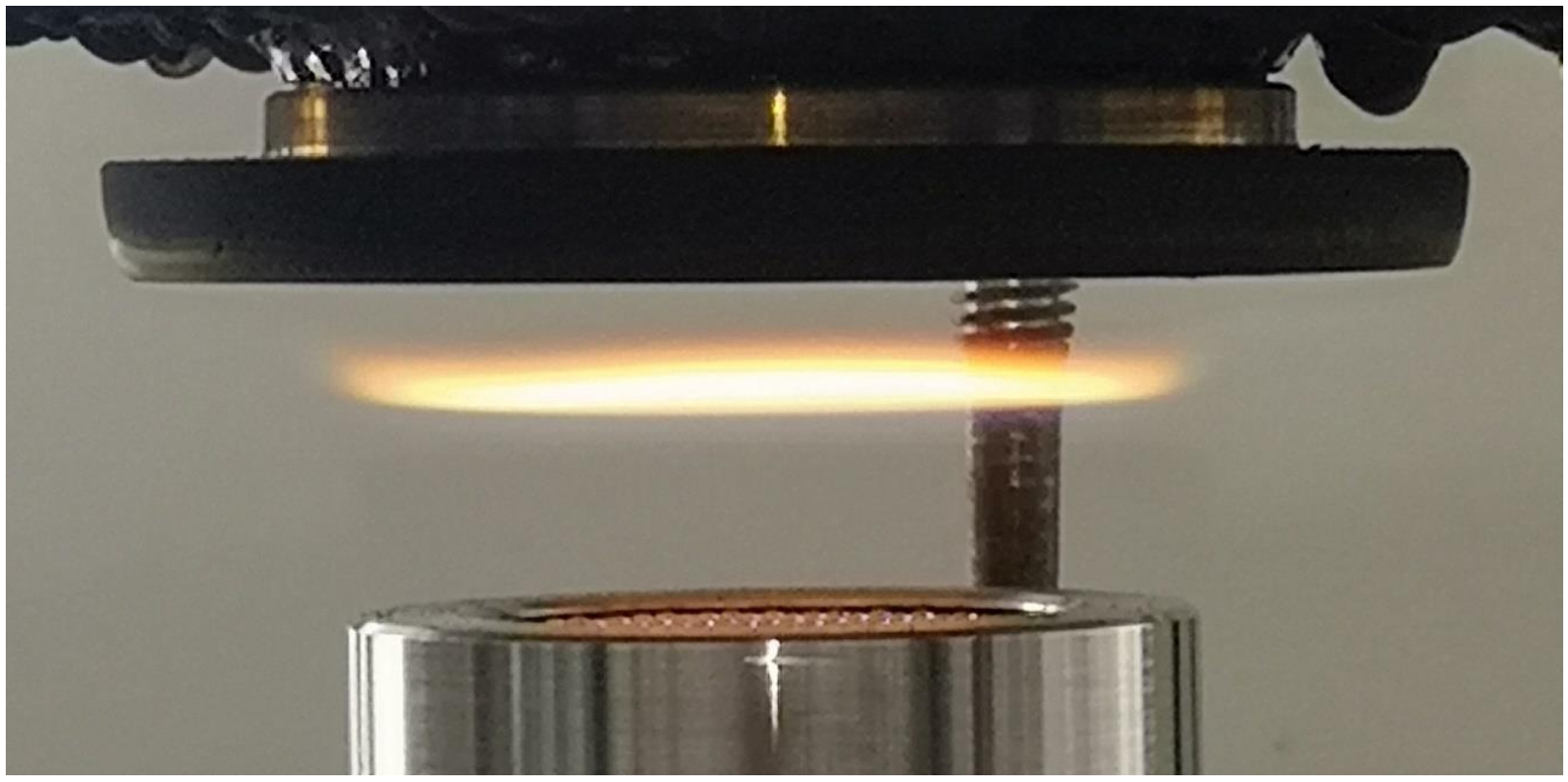


Figura 77. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

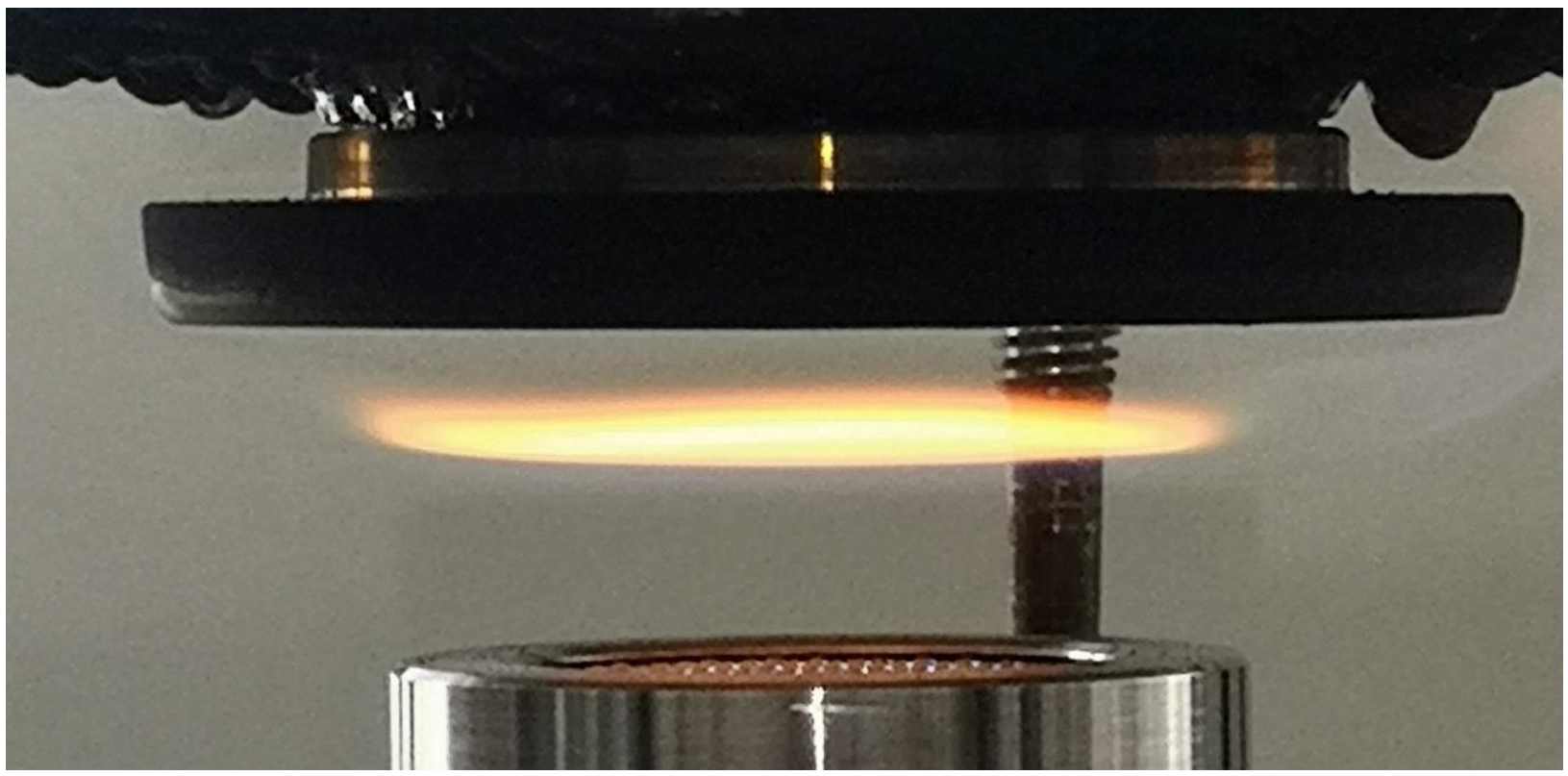


Figura 78. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire con cierta inestabilidad: L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

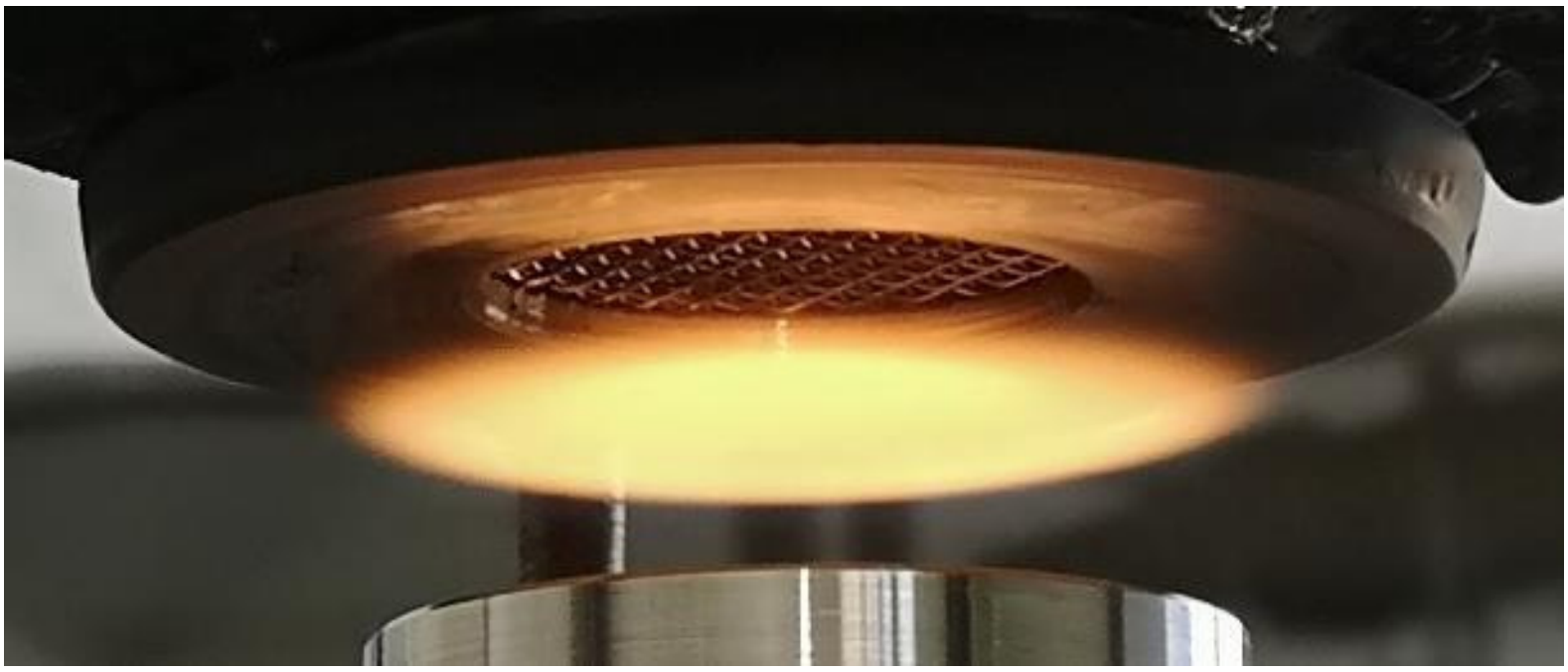


Figura 79. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire estable: L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

3.8. Ensayo 6

- Distancia entre reactivos : $L = 2.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 15\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 5.00\ (4.99)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 30.0\ (32.7)\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 80. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

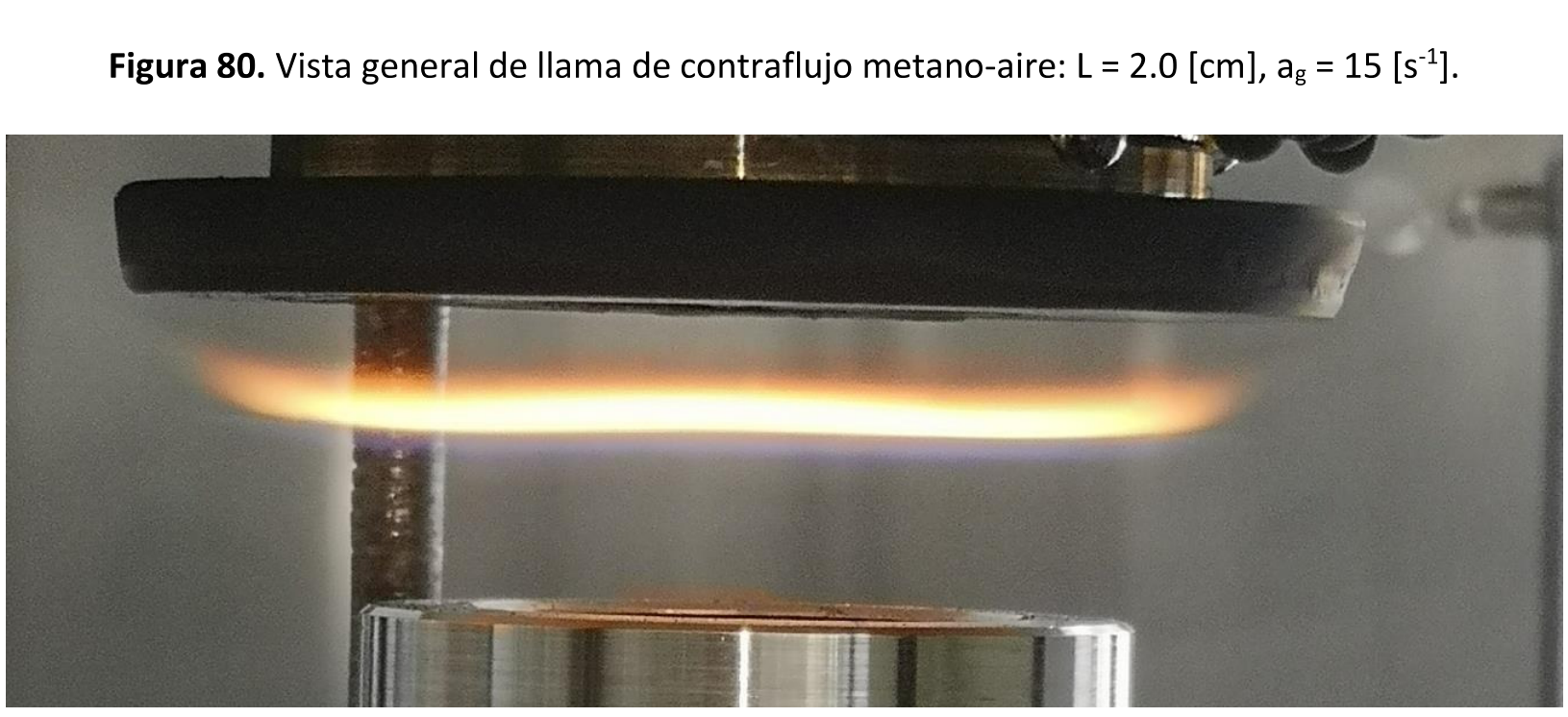


Figura 81. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].



Figura 82. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 2.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

3.9. Ensayo 7

- Distancia entre reactivos : $L = 1.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 5\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 1.25\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 8.5\ (8.2)\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 83. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

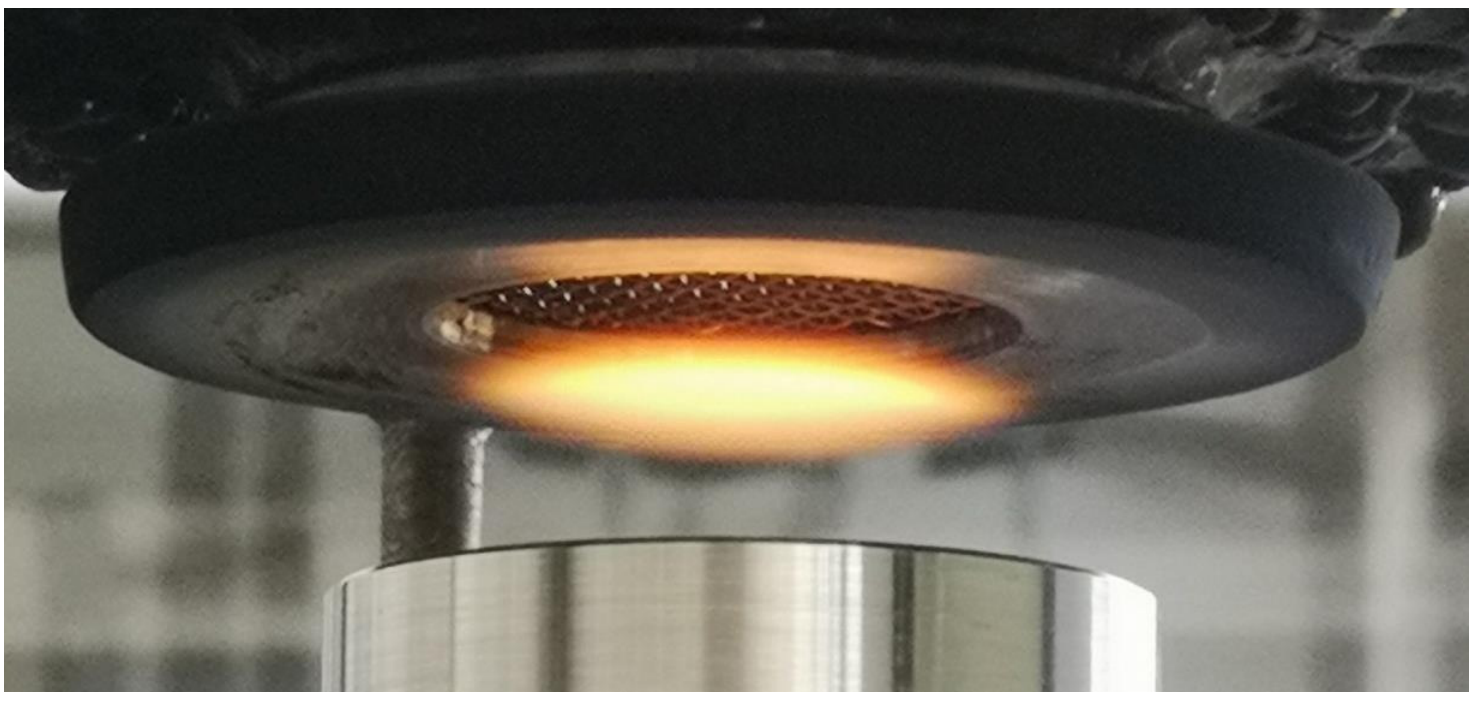


Figura 84. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

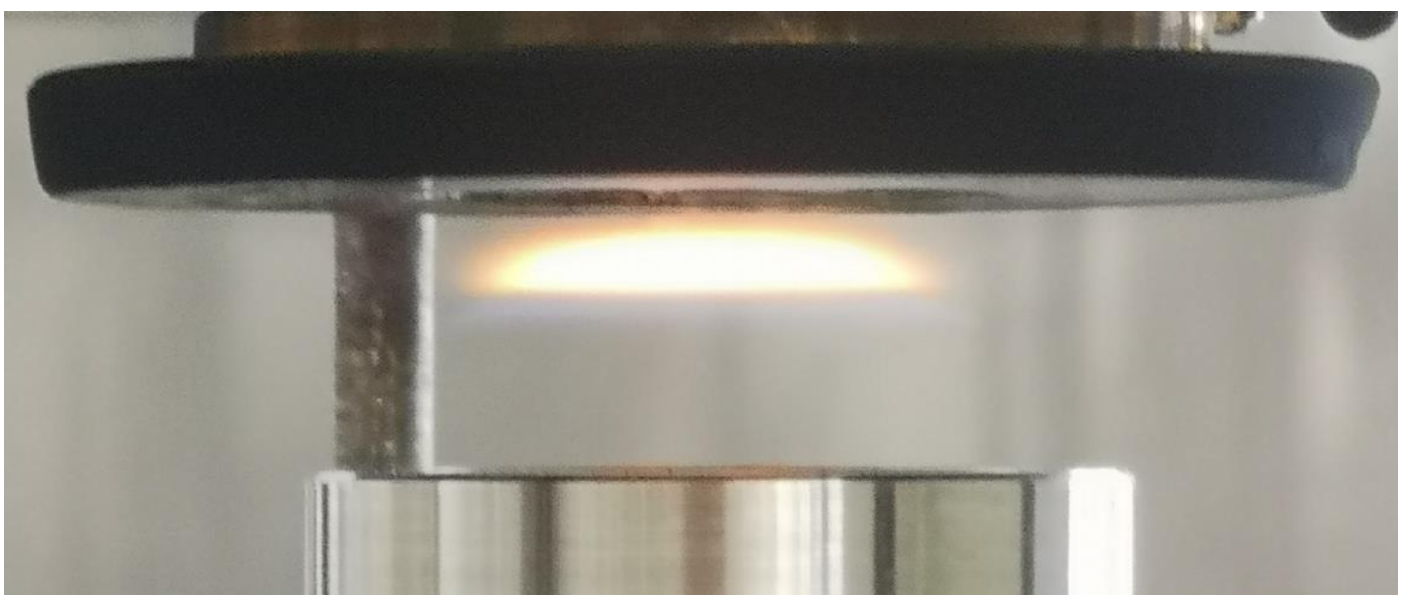


Figura 85. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}].

3.10. Ensayo 8

- Distancia entre reactivos : $L = 1.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 10\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 2.5\ (2.49)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 16.4\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 86. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

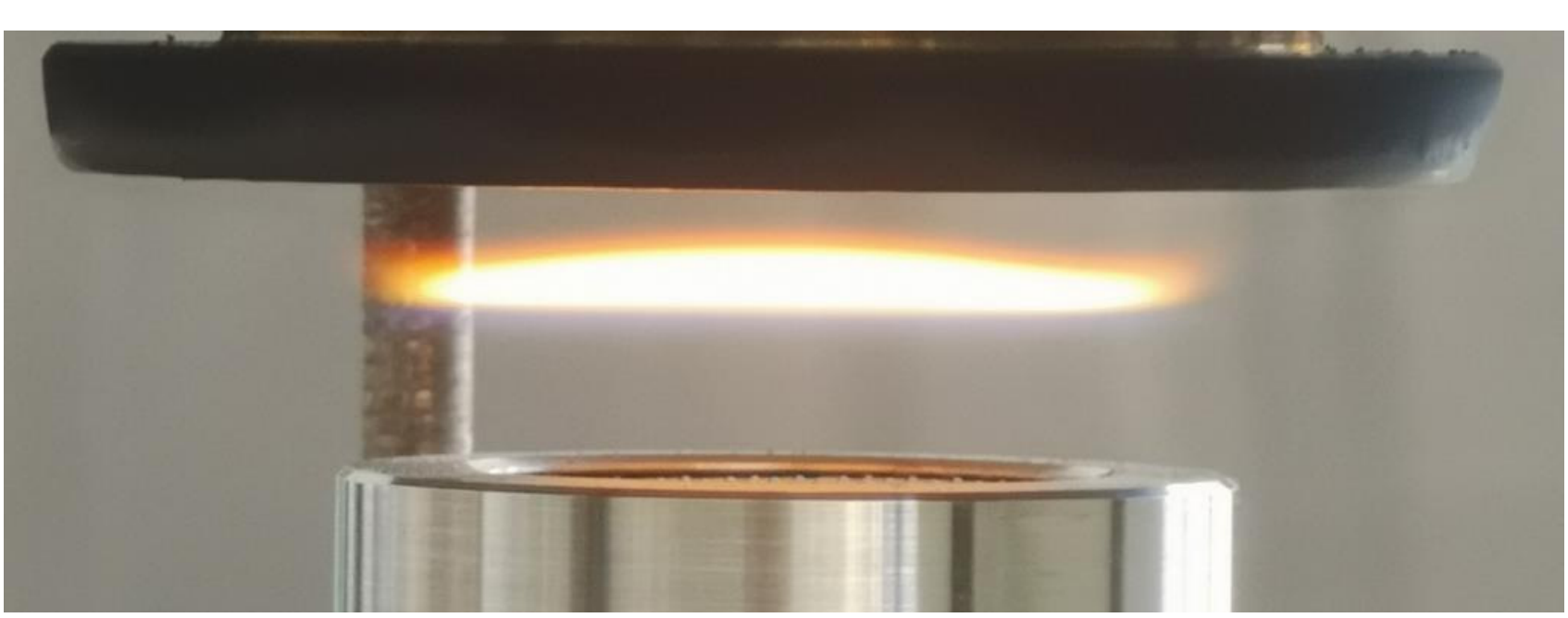


Figura 87. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

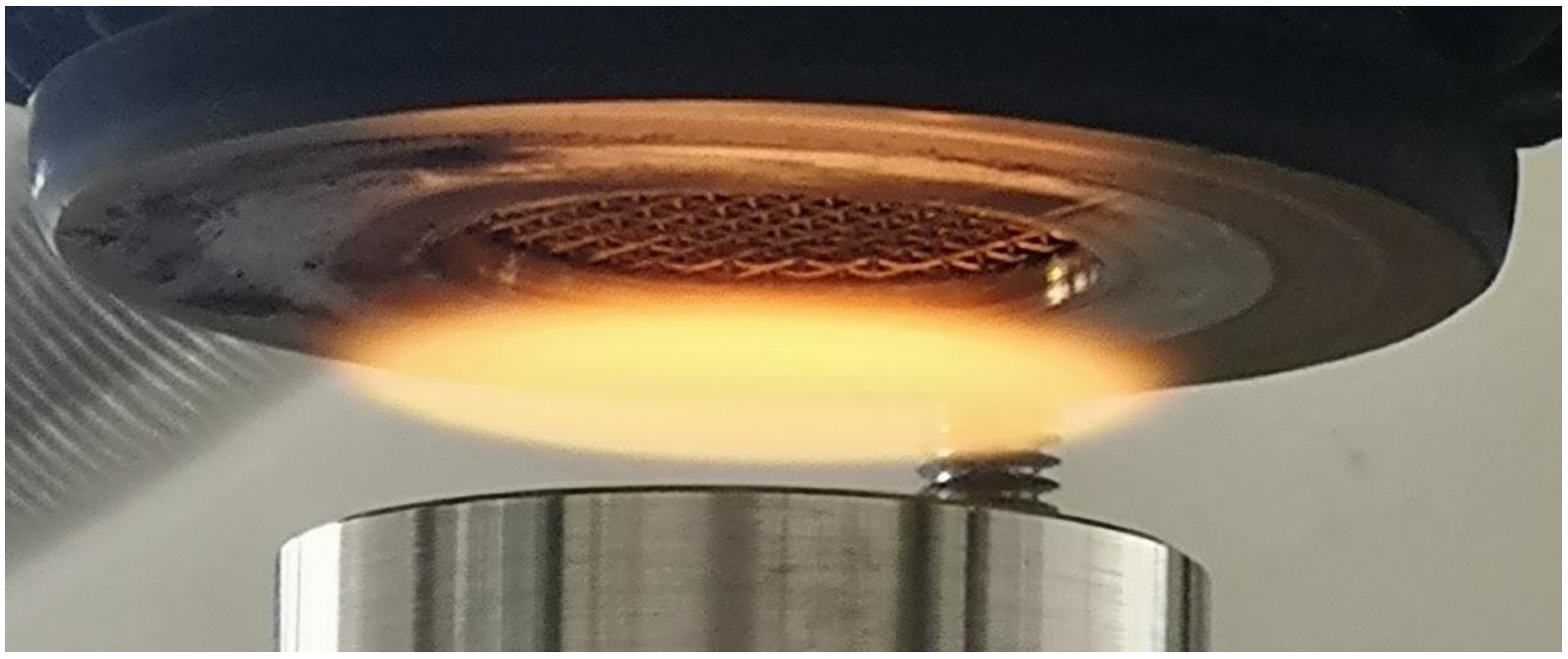


Figura 88. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

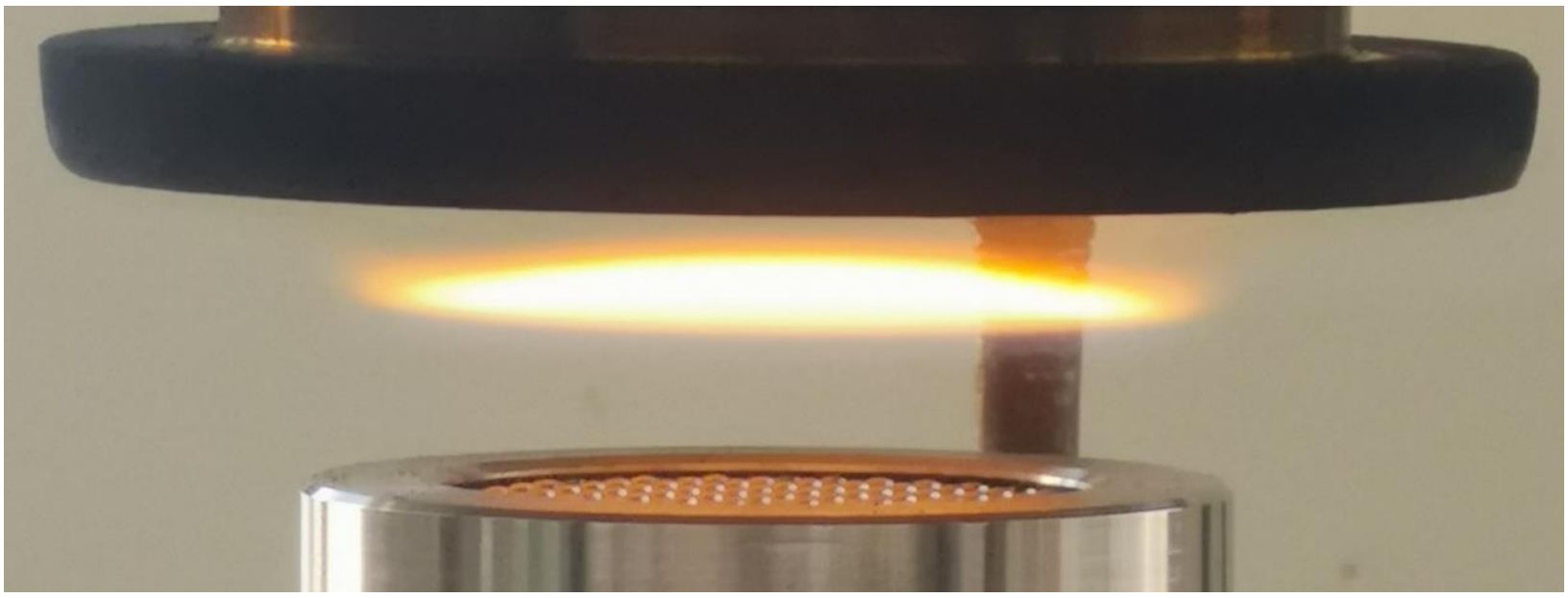


Figura 89. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

3.11. Ensayo 9

- Distancia entre reactivos : $L = 1.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 15\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 3.74\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 24.5\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 90. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

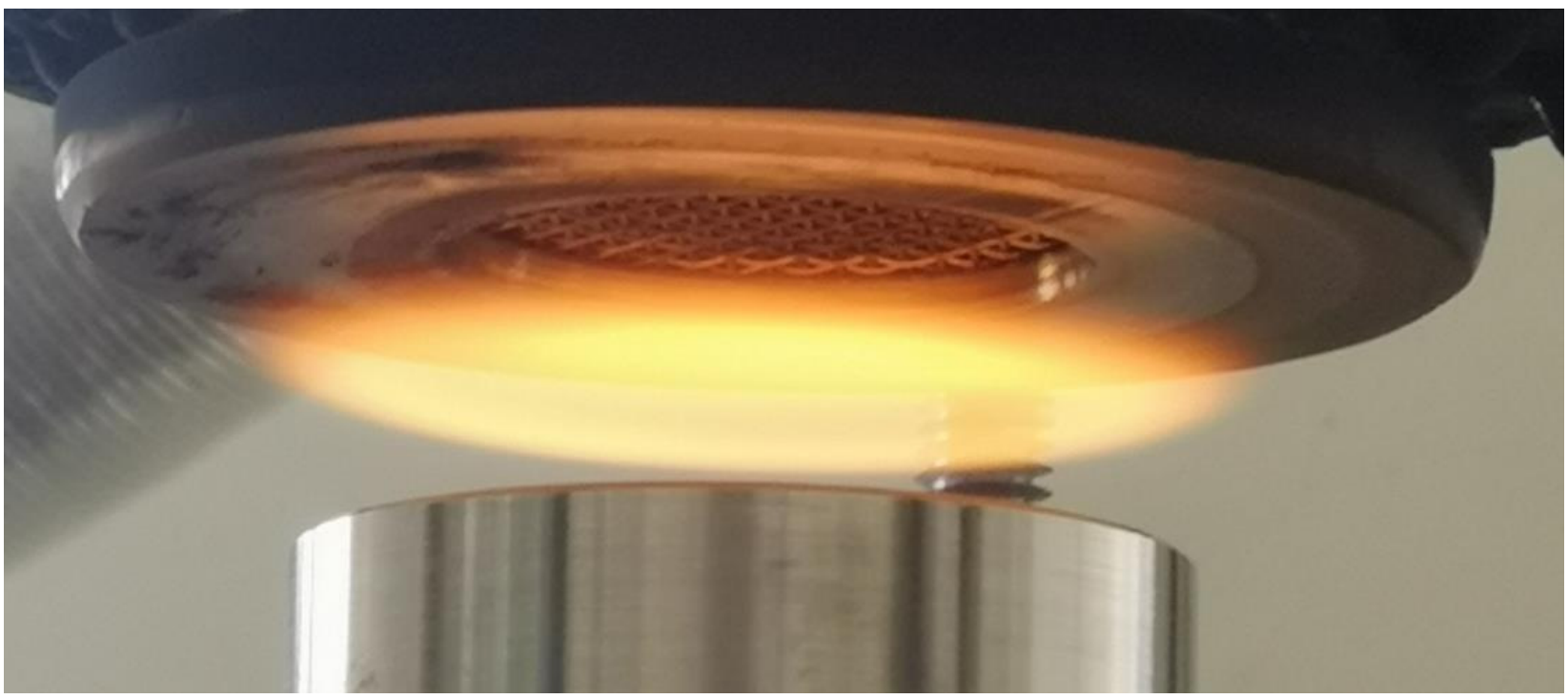


Figura 91. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

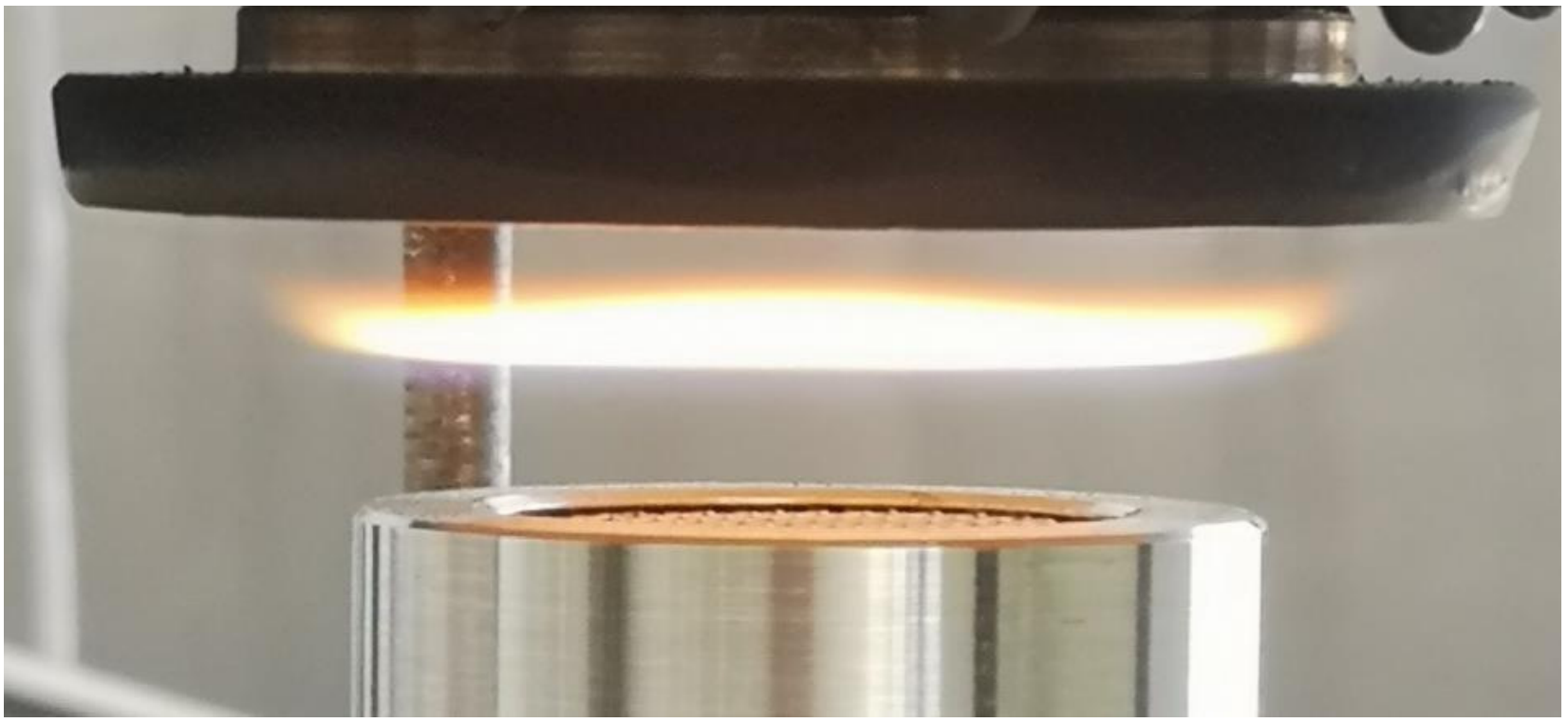


Figura 92. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

3.12. Ensayo 10

- Distancia entre reactivos : $L = 1.5\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 20\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 5\ (4.99)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} 30\ (32.7)\left[\frac{L}{min}\right]$

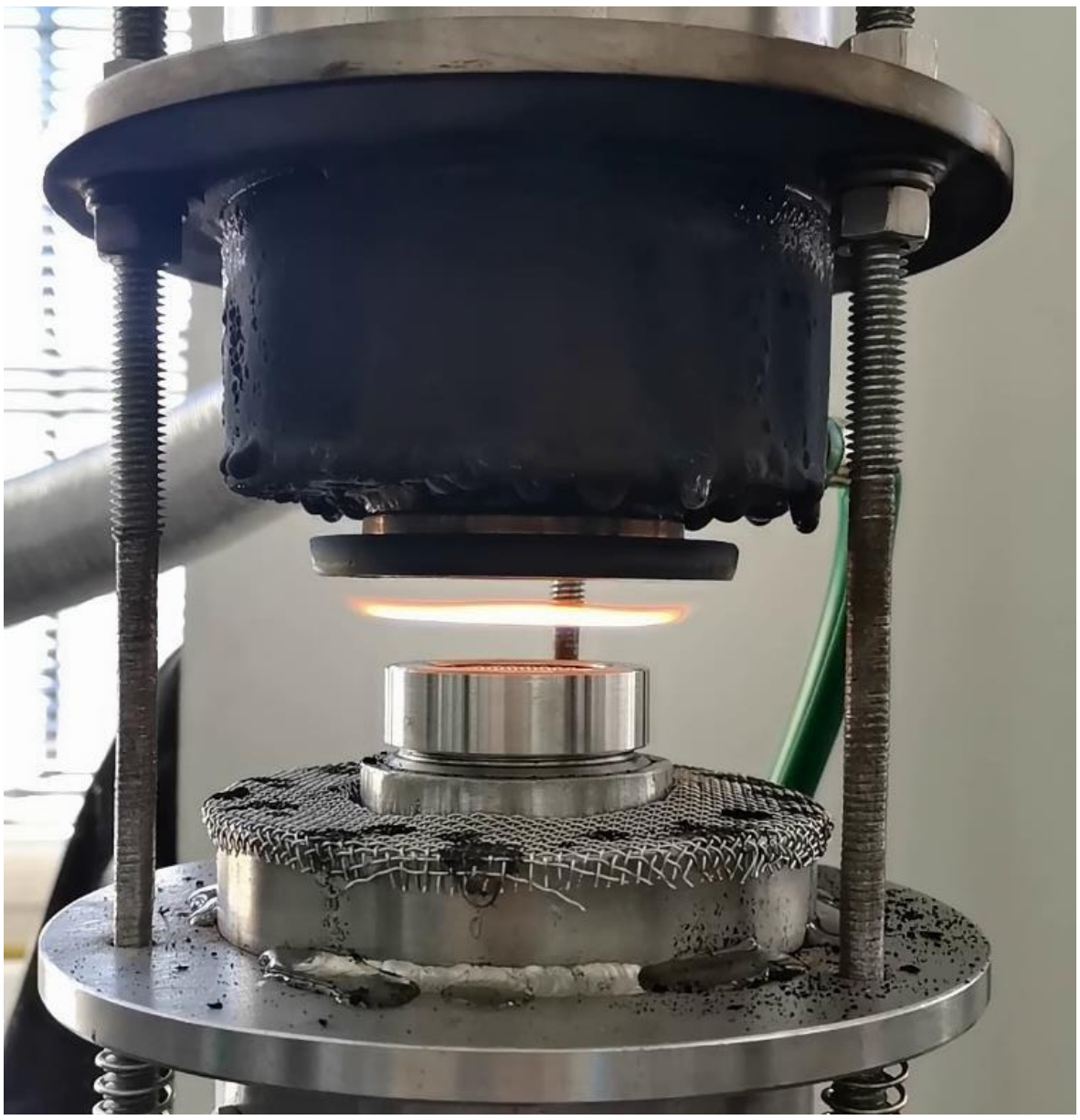


Figura 93. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

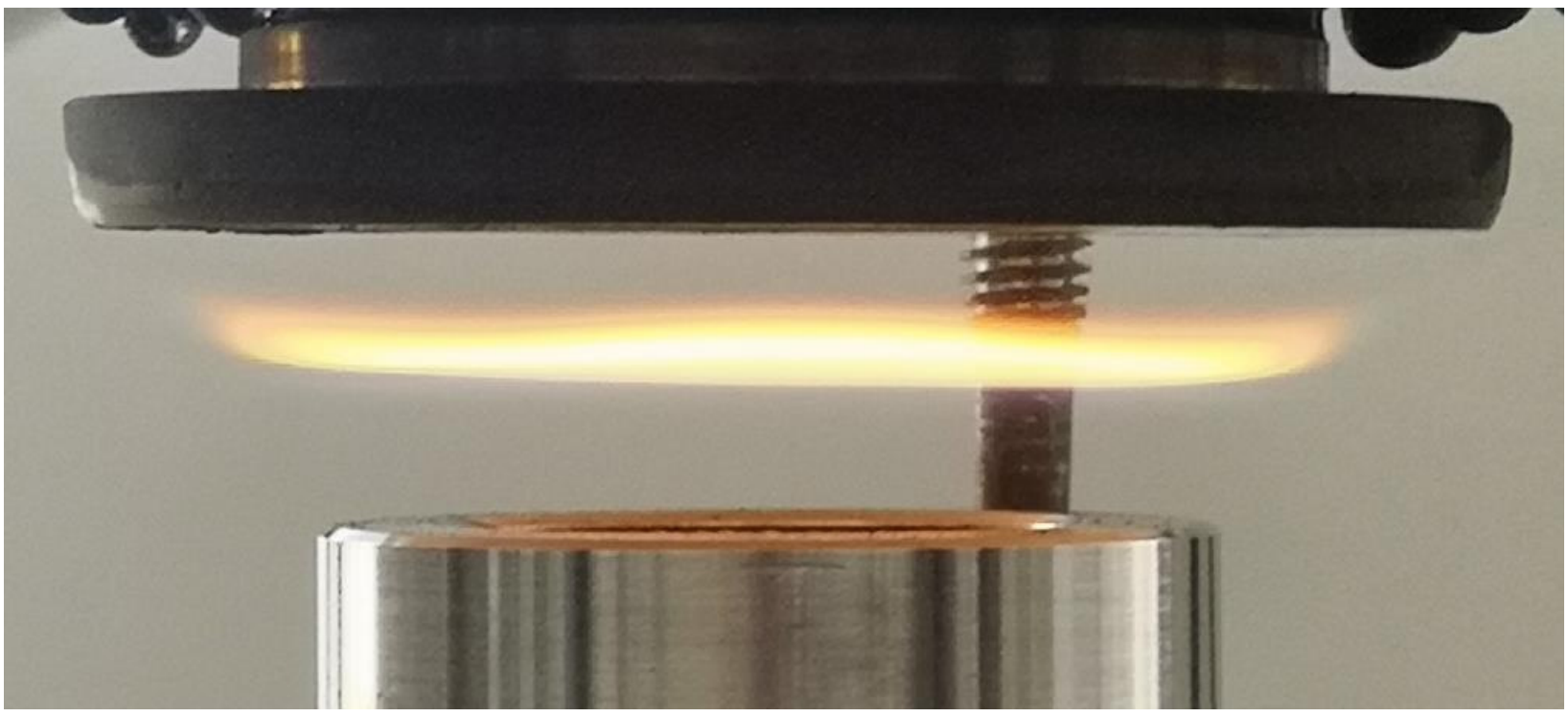


Figura 94. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].



Figura 95. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.5 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

3.13. Ensayo 11

- Distancia entre reactivos : $L = 1.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 10\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 1.67\ (1.66)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 10.9\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 96. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

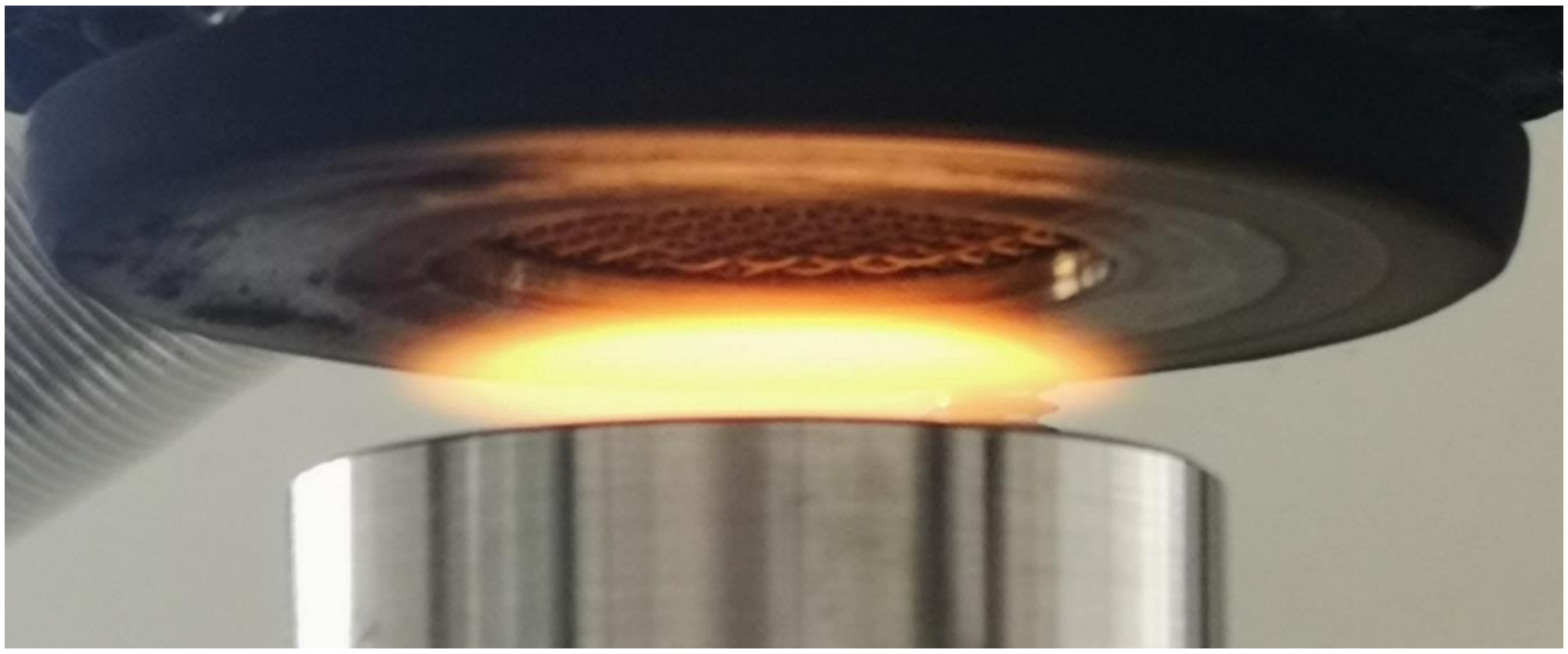


Figura 97. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].



Figura 98. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}].

3.14. Ensayo 12

- Distancia entre reactivos : $L = 1.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 15\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 2.48\ (2.49)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 16.4\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 99. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

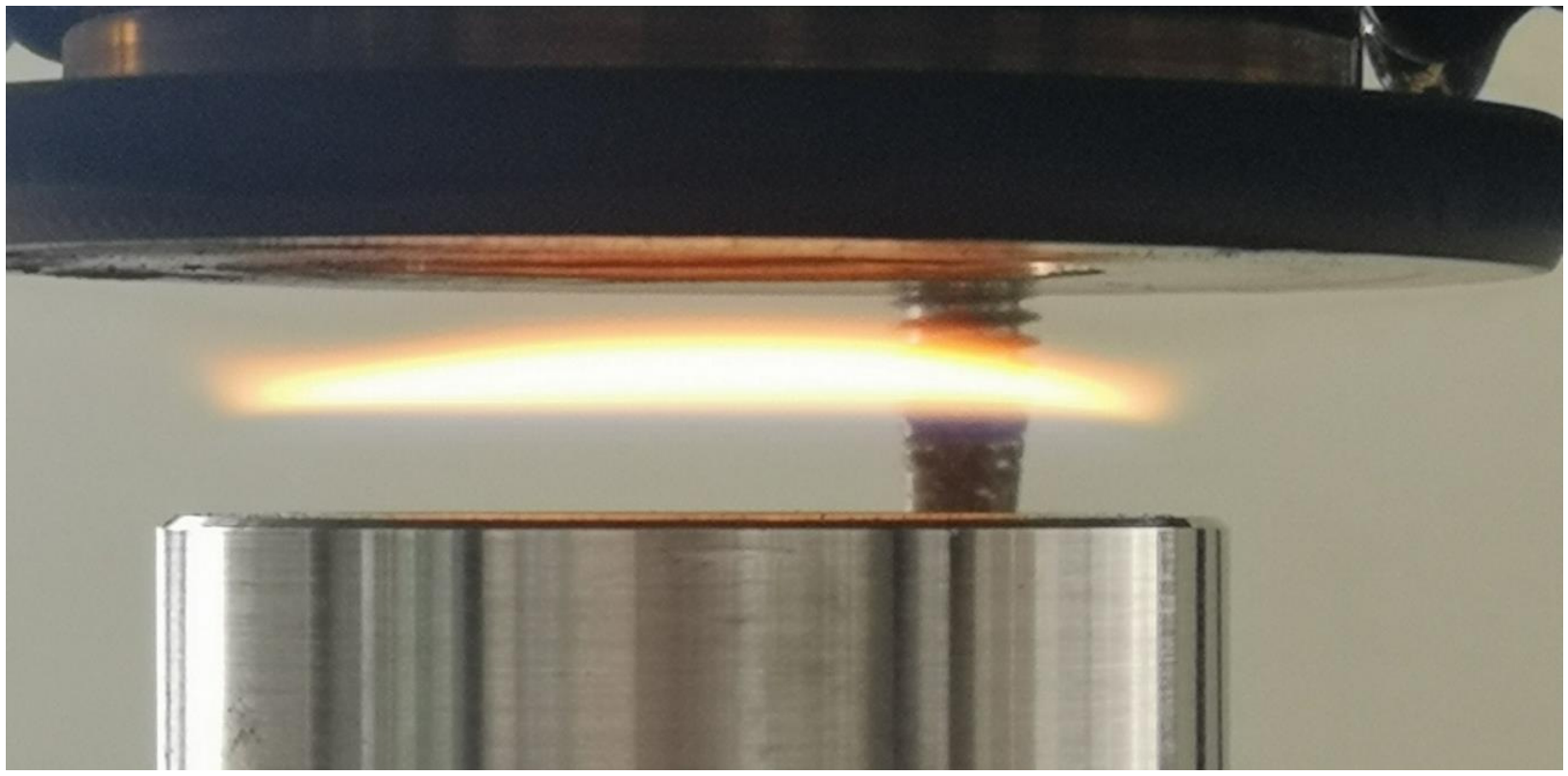


Figura 100. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

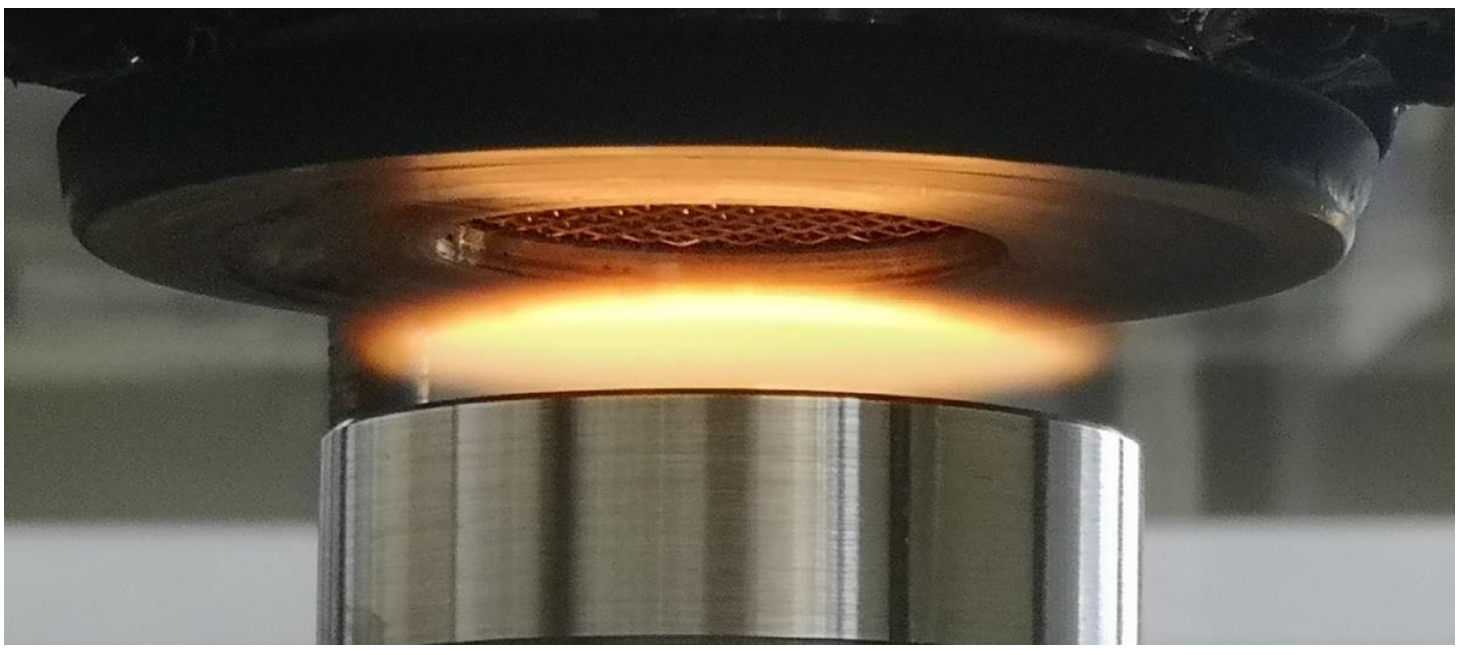


Figura 101. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}].

3.15. Ensayo 13

- Distancia entre reactivos : $L = 1.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 20\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 3.33\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 21.8\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 102. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

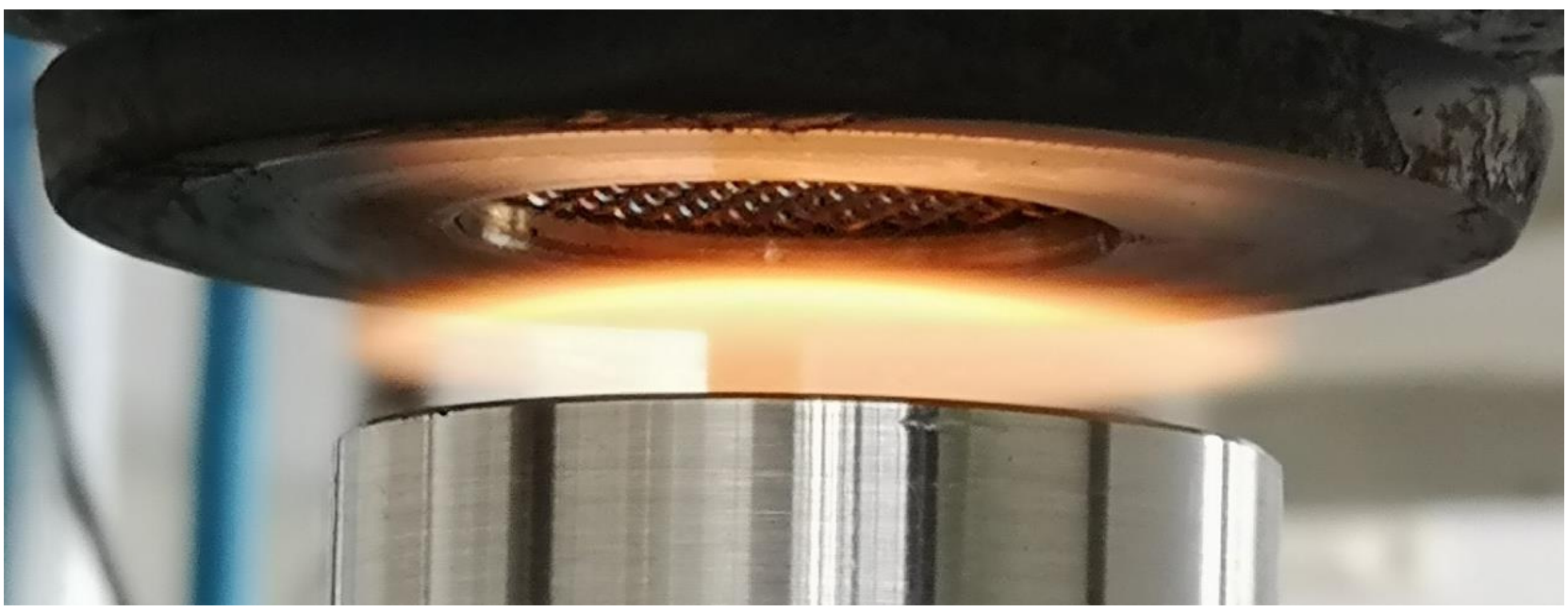


Figura 103. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

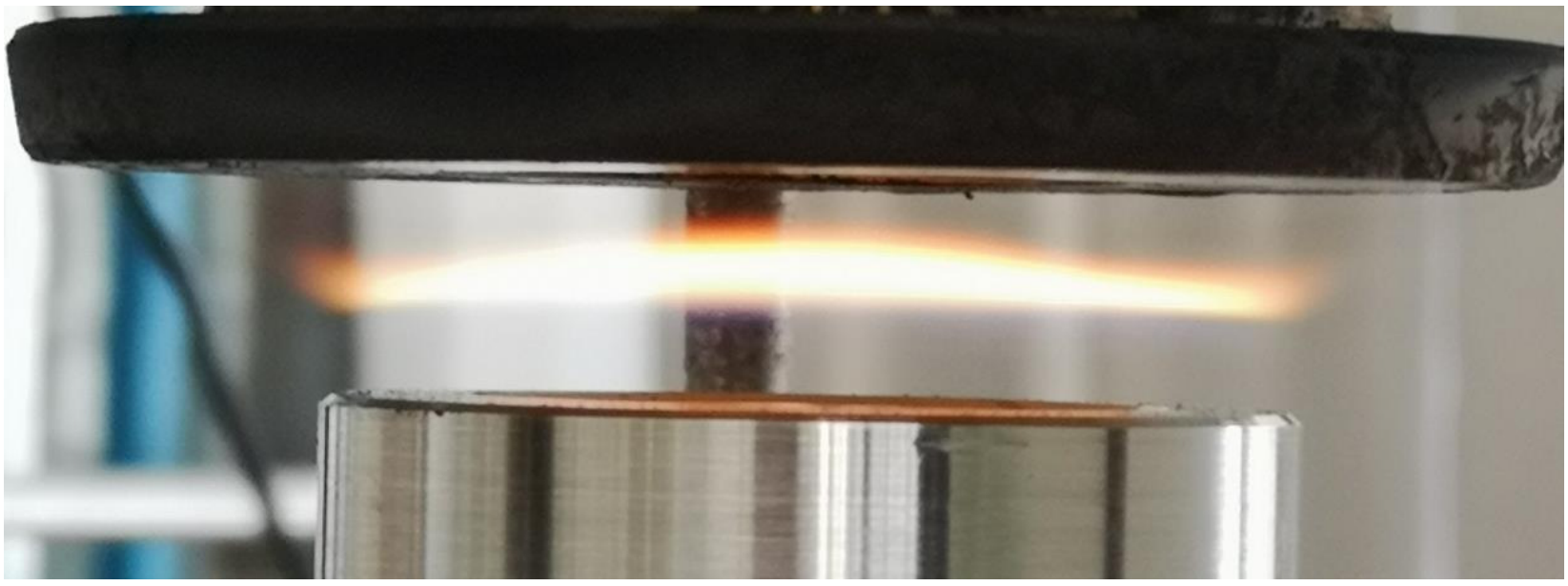


Figura 104. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

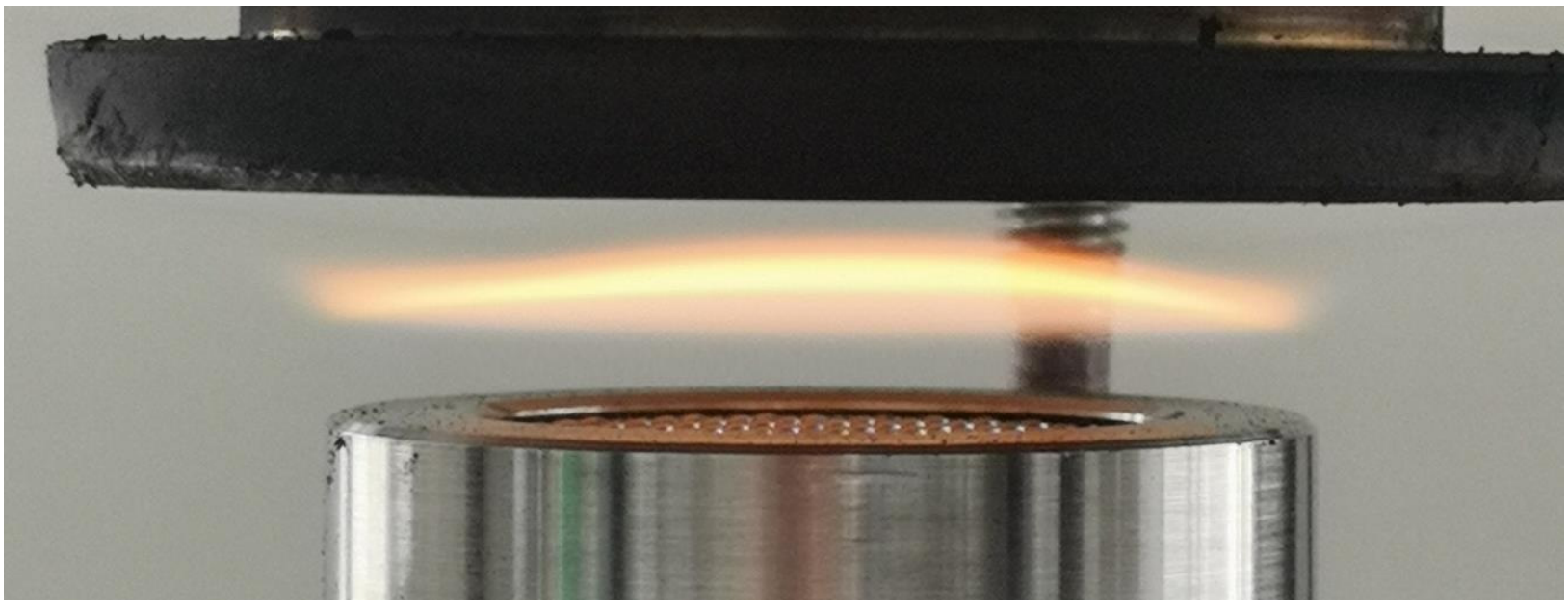


Figura 105. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 20 [s^{-1}].

3.16. Ensayo 14

- Distancia entre reactivos : $L = 1.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 25\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 4.15\ (4.16)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 27.3\left[\frac{L}{min}\right]$



Figura 106. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 25 [s^{-1}].

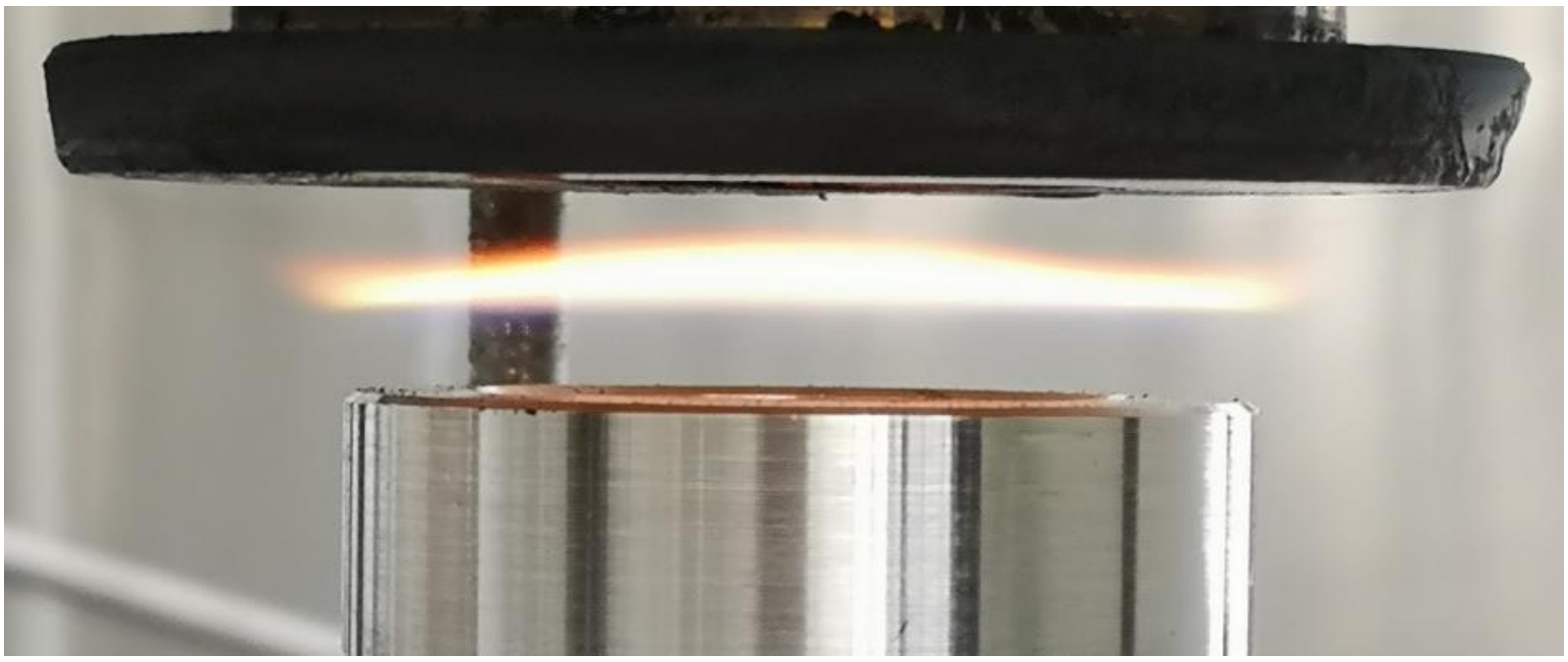


Figura 107. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 25 [s^{-1}].

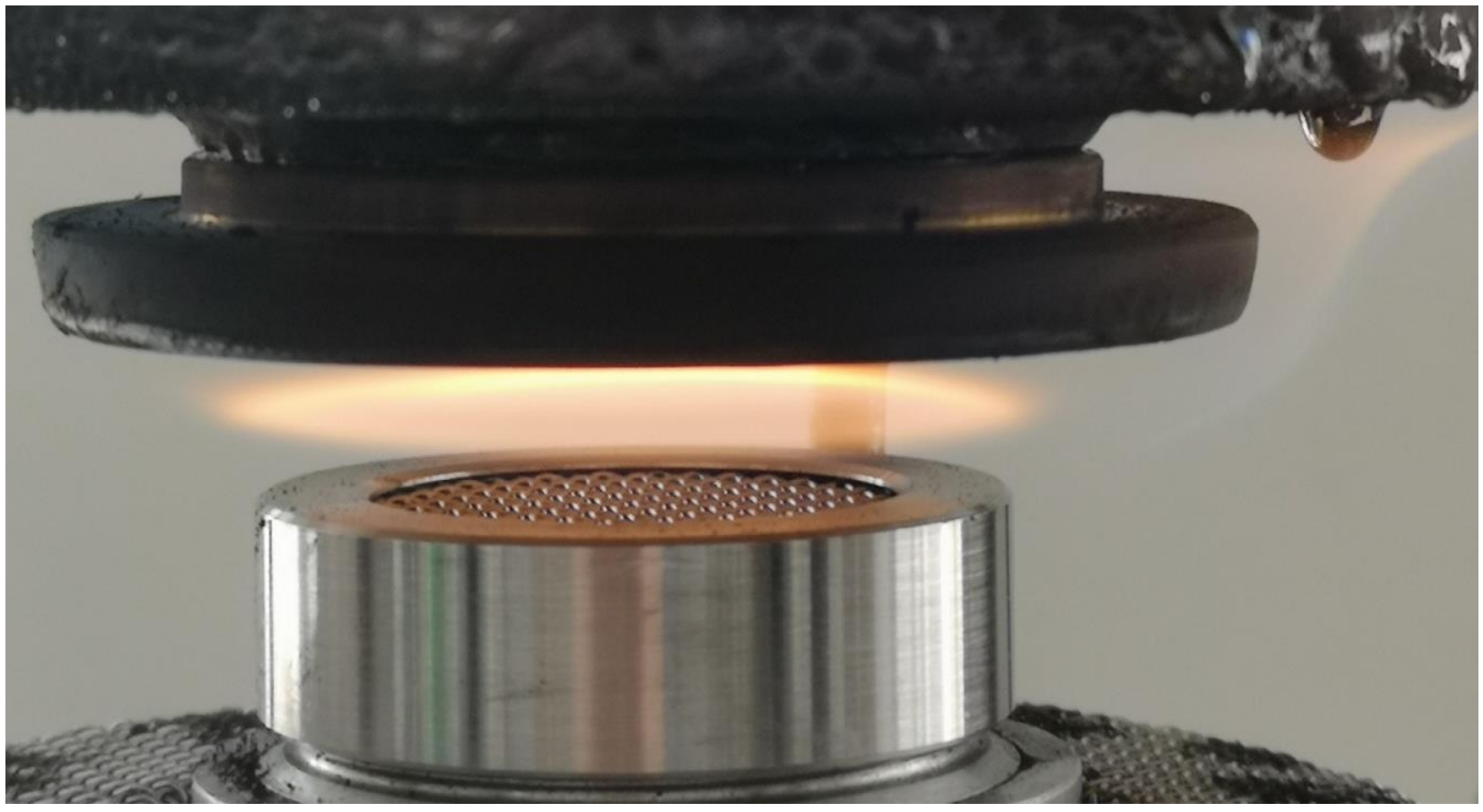


Figura 108. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 1.0 [cm], a_g = 25 [s^{-1}].

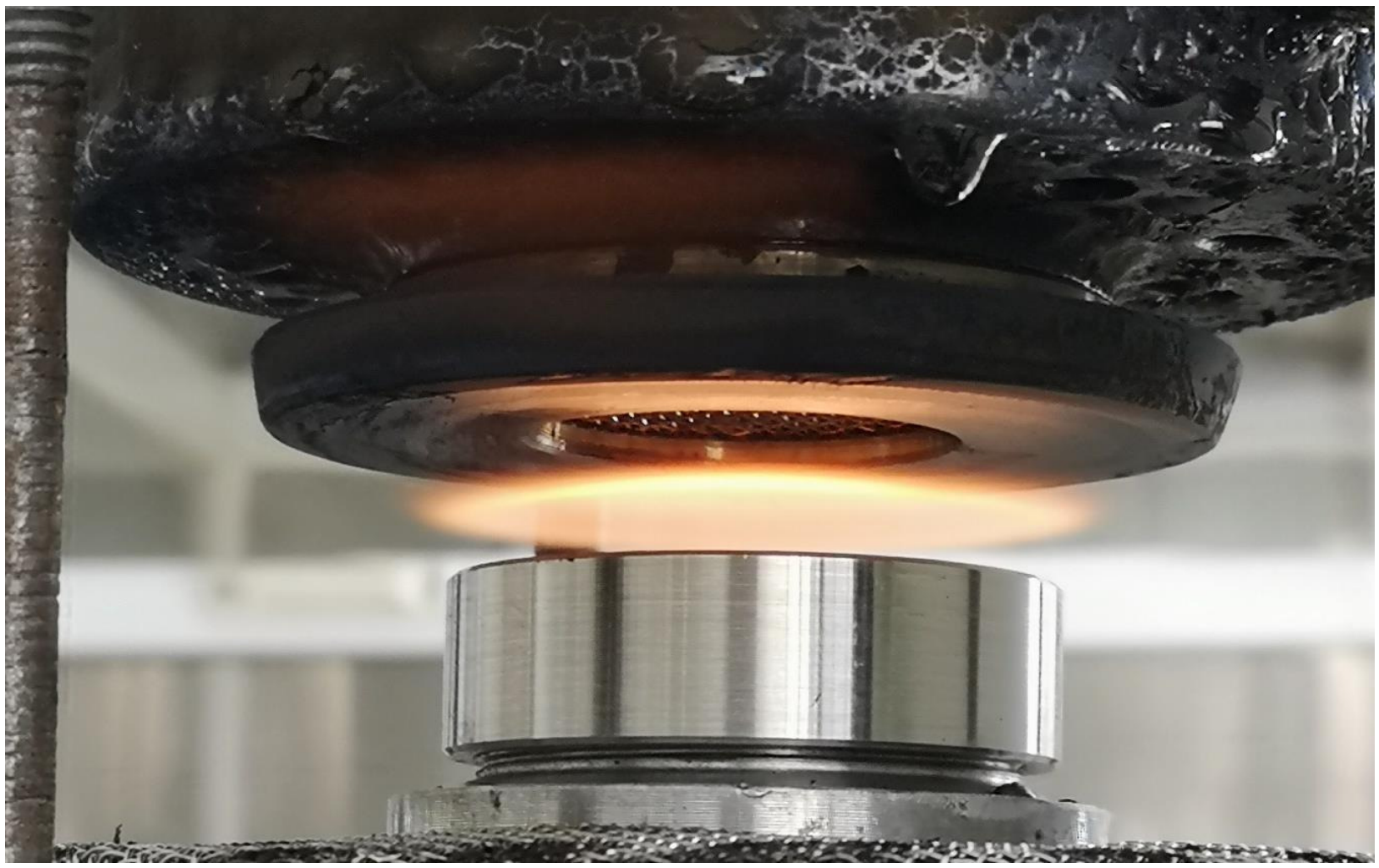


Figura 109. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 25 [s^{-1}].

3.17. Ensayo 15

- Distancia entre reactivos : $L = 1.0\ [cm]$
- Tasa de deformación : $a_g = 30\left[\frac{1}{s}\right]$
- Flujo de combustible y oxidante : $V_{CH_4} = V_{Aire} = 5.00\ (4.99)\left[\frac{L}{min}\right]$
- Flujo de nitrógeno : $V_{N_2} = 30.0\ (32.7)\left[\frac{L}{min}\right]$

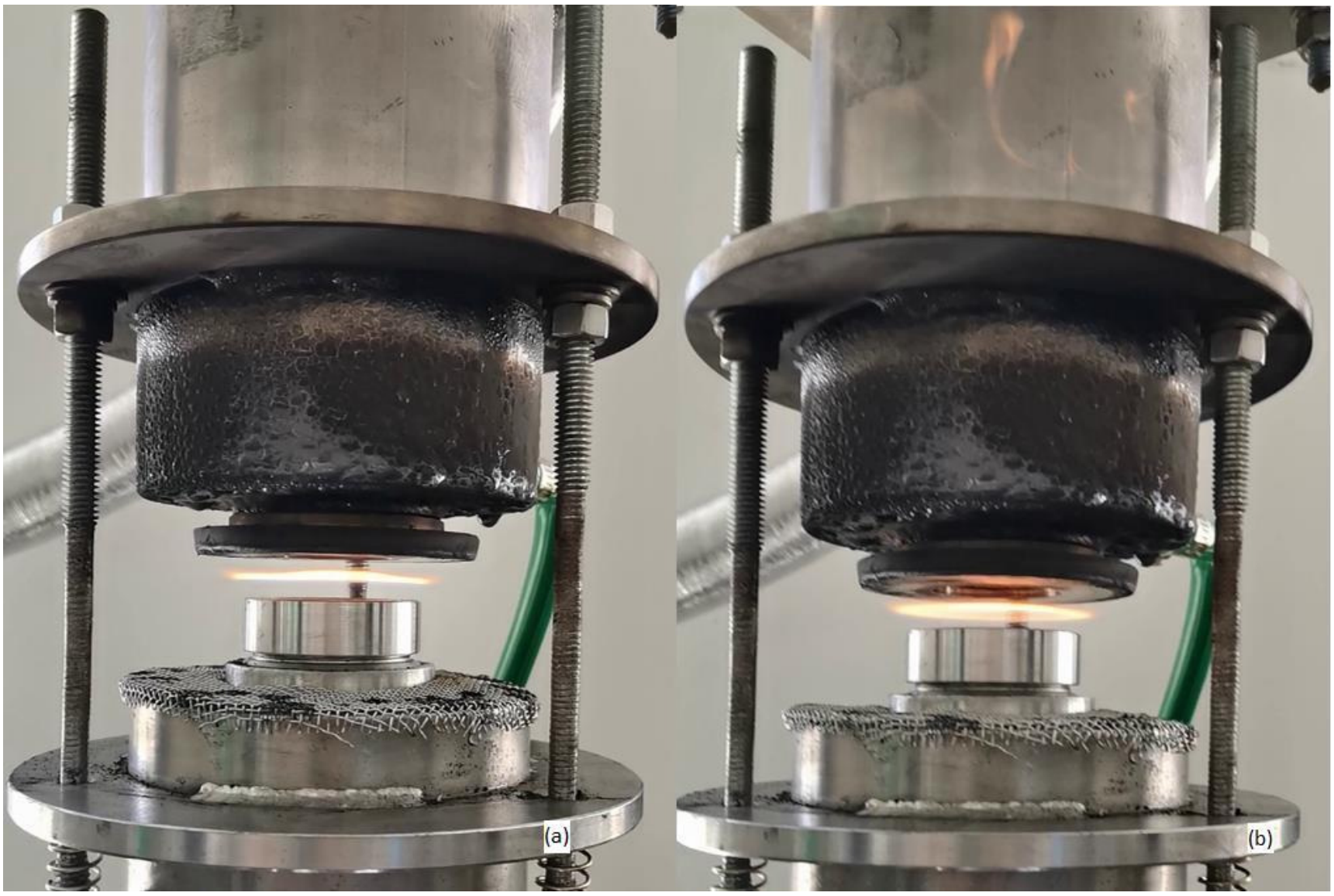


Figura 110. Vista general de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}];

(a) estable; (b) inestable.

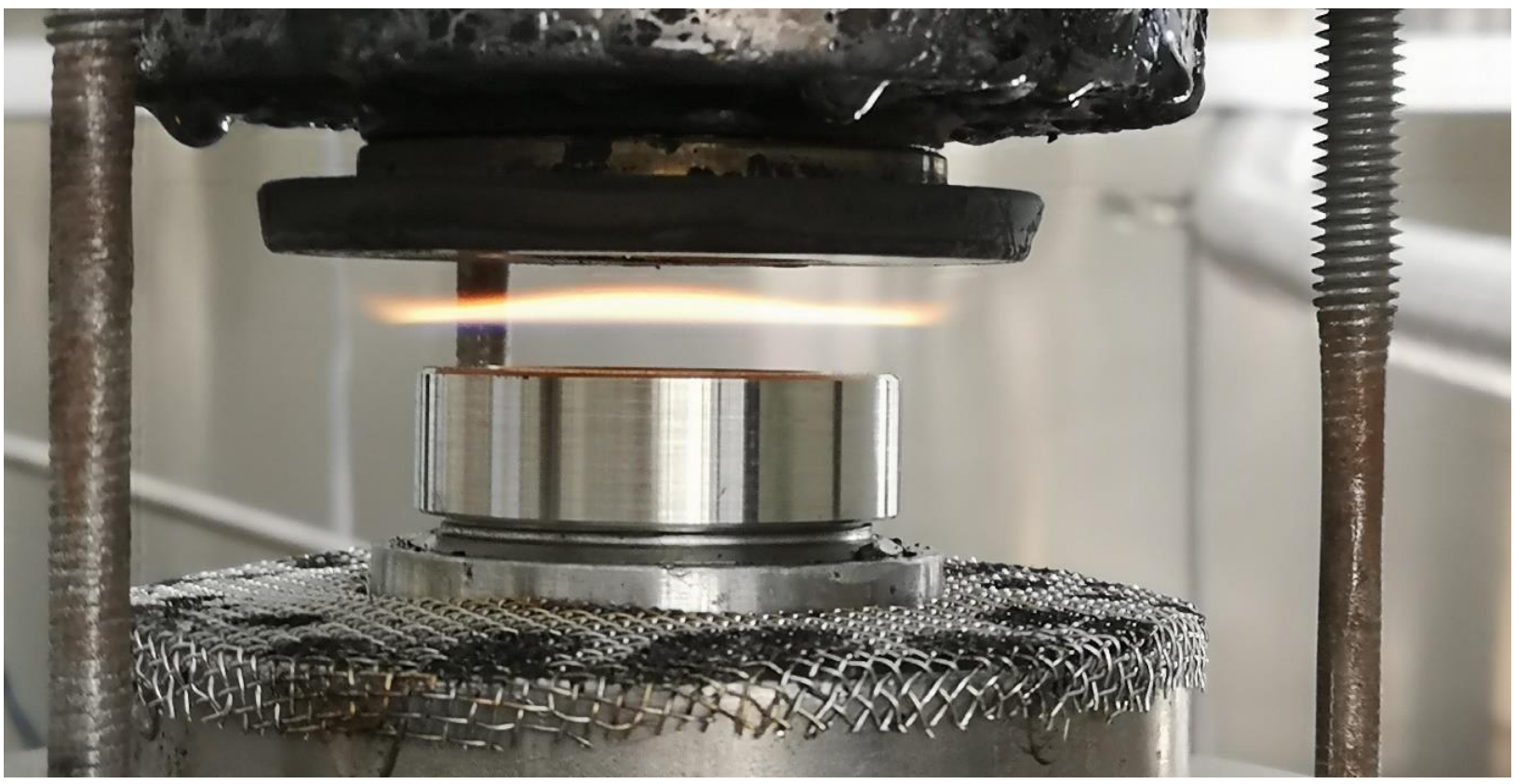


Figura 111. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}].

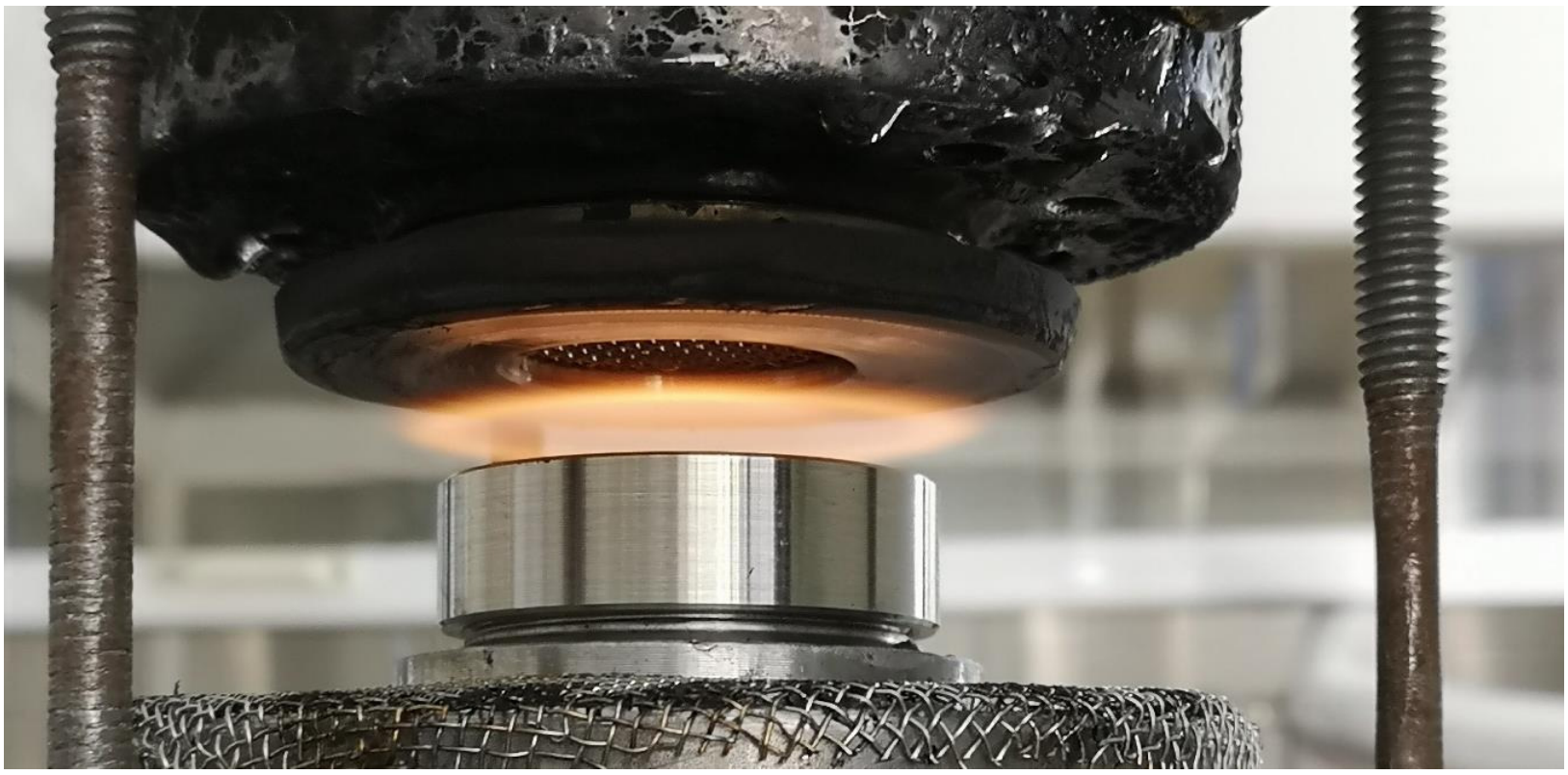


Figura 112. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire: L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}].

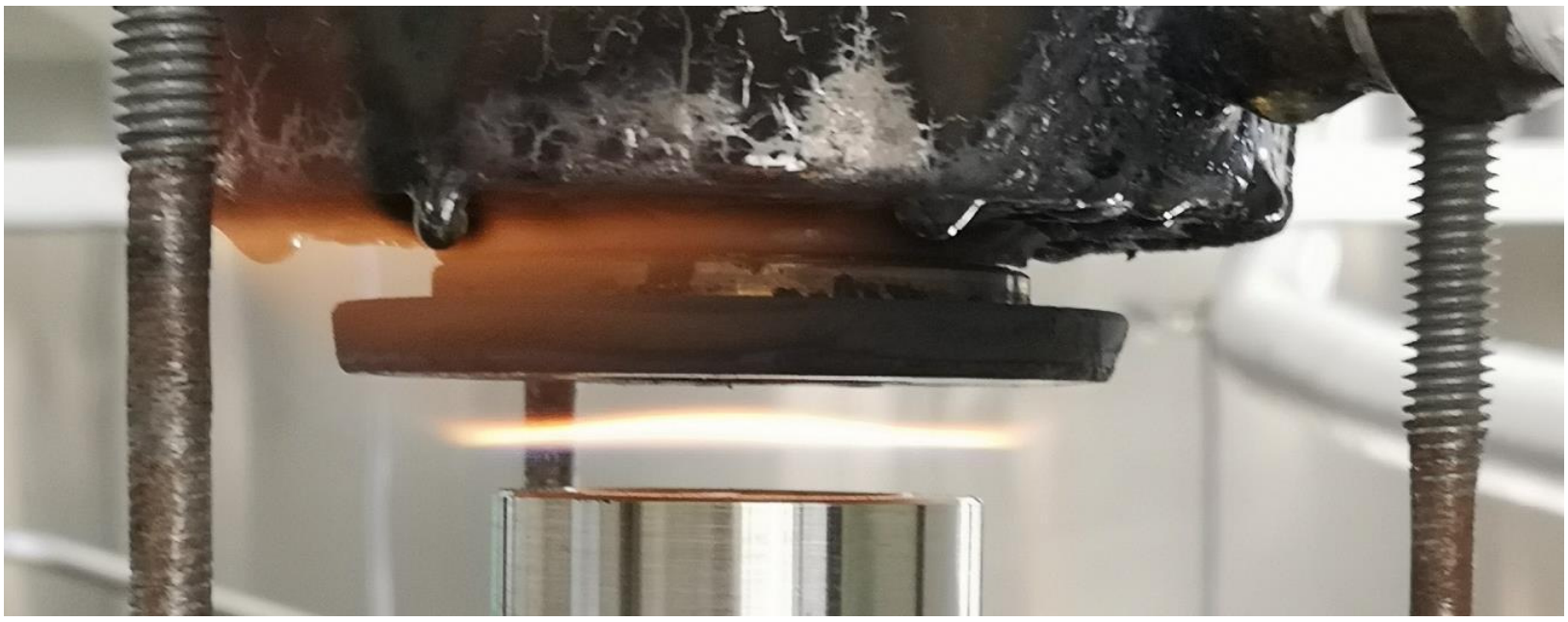


Figura 113. Vista frontal de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}].

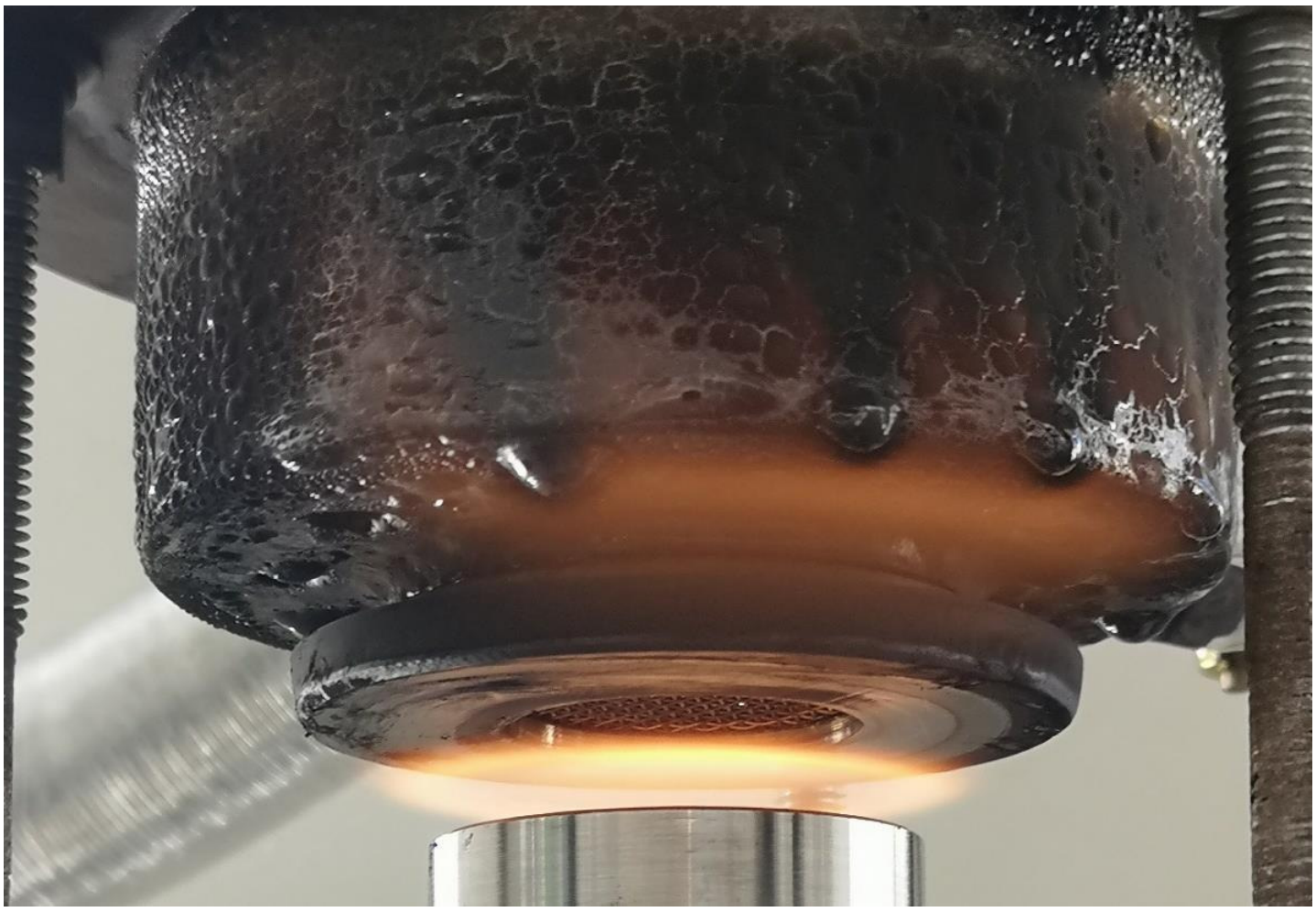


Figura 114. Vista inferior de llama de contraflujo metano-aire inestable: L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}].

Tabla 6. Resumen de resultados.

ag \ L	1 [cm]	1,5 [cm]	2 [cm]	2,5 [cm]
10 [1/s]				
15 [1/s]				
20 [1/s]				
25 [1/s]				
30 [1/s]				

IV. Análisis y resultados

1. Diseñar y construir una base-soporte que permita el movimiento vertical de las componentes del quemador.

El diseño de la estructura base-soporte es rígida y ergonómica, permitiendo un transporte y giro sin dificultades gracias a las ruedas incorporadas. El sistema de movimiento vertical demuestra un funcionamiento eficaz. Sin embargo, se observó que la ubicación del volante para ajustar la altura del quemador puede resultar algo elevada, lo que puede dificultar su manipulación. No obstante, el uso de un piso lo facilita.

2. Instalar el quemador de flujos opuestos en la base-soporte construida.

La instalación del quemador en la estructura base-soporte resulta un proceso sencillo de realizar. El quemador queda a una altura cómoda, permitiendo una visibilidad amplia de la llama. La disposición de la estructura brinda una visión completa de las cuatro caras laterales del quemador.

3. Implementar el quemador con sistemas de control y medición de combustible y oxidante, y de un sistema de refrigeración por agua.

Los controladores de flujo quedan en una buena disposición, sin molestar el funcionamiento de las otras partes. La implementación de controladores de flujo para el combustible, oxidante y gas inerte permiten un control preciso sobre las cantidades suministradas al quemador, de acuerdo con los ensayos a realizar. El sistema de refrigeración por agua ofrece una versatilidad en su ubicación de mangueras. Aunque se presentó una leve filtración de goteo en la entrada del agua durante la mitad de los ensayos, esta incidencia no afecto ni interrumpió el desarrollo de los experimentos.

4. Desarrollar ensayos de puesta en marcha con variación de parámetros operacionales, principalmente distancia de suministro de combustible y oxidante, verificando la morfología de la llama resultante.

- **Ensayo 1, L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}]:** Se observa la formación de una llama laminar redonda con curvatura convexa en el lado del combustible como muestra la **Figura 59**. La **Figura 60** y la **Figura 62** se observa que es inestable a los cambios de velocidad a su alrededor. La llama con 13.9 [l/min] de nitrógeno es parcialmente estable (**Figura 63**, **Figura 64**), pero en su mayoría inestable y se escapa de la zona de reacción como se ve en la **Figura 61**.
- **Ensayo 2, L = 2.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}], N_2 = 26.9 [l/min]:** Al Ensayo 1 se le aumentó el flujo de nitrógeno a 26.9 [l/min]. La llama se estabiliza y reduce su tamaño al diámetro de las salidas de las boquillas (**Figura 66**, **Figura 67**). En la **Figura 66** se aprecia una capa muy fina azulada en la zona inferior de la llama, lo que indica una combustión eficiente. La **Figura 65** muestra que se encuentra en el lado del combustible. En la **Figura 67** se ve que el hollín es evidente y oscurece la boquilla y la cara inferior del cuerpo superior.
- **Ensayo 3, L = 2.5 [cm], a_g = 9 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar más plana y de diámetro más ancho (**Figura 70**, **Figura 71**). Sigue siendo estable y se restringe a la cortina de nitrógeno, esta apreciación se observa en la **Figura 70** donde los límites de la llama son arrastrados hacia arriba. En la **Figura 69** se aprecia la formación de gotas de agua en toda la mayoría de la cara inferior del cuerpo superior. La llama se encuentra en el lado del combustible, cercano al plano de estancamiento. Al igual que en el Ensayo 2 en la **Figura 69** se observa una capa fina inferior azul que indica una combustión completa.
- **Ensayo 4, L = 2.0 [cm], a_g = 5 [s^{-1}]:** En la **Figura 72** se forma una llama laminar redonda con curvatura convexa del diámetro se salida de las boquillas. En la **Figura 73** se aprecia la capa delgada de combustión completa, mientas que la zona amarilla sigue siendo predominante. Se encuentra en la zona del combustible. Al igual que en el Ensayo 1 la llama es parcialmente estable, ya que en la mayoría del tiempo es inestable como se ve en la **Figura 74**.

- **Ensayo 5, L = 2.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar mayoritariamente amarilla con base redonda más plana que la anterior. La **Figura 78** muestra cierta inestabilidad produciendo escapes de llamas diminutas. En la **Figura 79** su ancho se restringe al diámetro de la boquilla. En la **Figura 76** se aprecia con más notoriedad en la zona inferior de la llama la región delgada azul. Se encuentra en la zona del combustible.
- **Ensayo 6, L = 2.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar amarilla de base circular delgada como muestra la **Figura 82**. En la **Figura 80** su ancho es aproximadamente del tubo céntrico del cuerpo inferior, es decir, aproximadamente 54 [mm]. En la **Figura 81** se aprecia en la zona inferior de la llama la región de combustión completa. Se encuentra en la zona del combustible.
- **Ensayo 7, L = 1.5 [cm], a_g = 5 [s^{-1}]:** Se forma una llama convexa débil como muestra la **Figura 83**. En la **Figura 85** se observa levemente la diferencia de regiones, amarilla por encima y un azul casi transparente por debajo. En la **Figura 84** su longitud radial es igual diámetro de salida de las boquillas. Se encuentra en la zona del combustible.
- **Ensayo 8, L = 1.5 [cm], a_g = 10 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar convexa hacia arriba ligeramente más grande que el diámetro de las salidas de las boquillas, como muestra la **Figura 87** y **Figura 88**. Amarilla por encima y una línea fina azul transparente por debajo. En la **Figura 86** se encuentra levemente en la zona del combustible.
- **Ensayo 9, L = 1.5 [cm], a_g = 15 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar relativamente plana con ligera convección aproximadamente del mismo diámetro de la boquilla como en la **Figura 91**. Es predominantemente amarilla como muestra la **Figura 92**. Está más cerca del plano de estancamiento.
- **Ensayo 10, L = 1.5 [cm], a_g = 20 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar plana con una ligera convección en la **Figura 93**. Está ligeramente en la zona del combustible. En la **Figura 94** es una

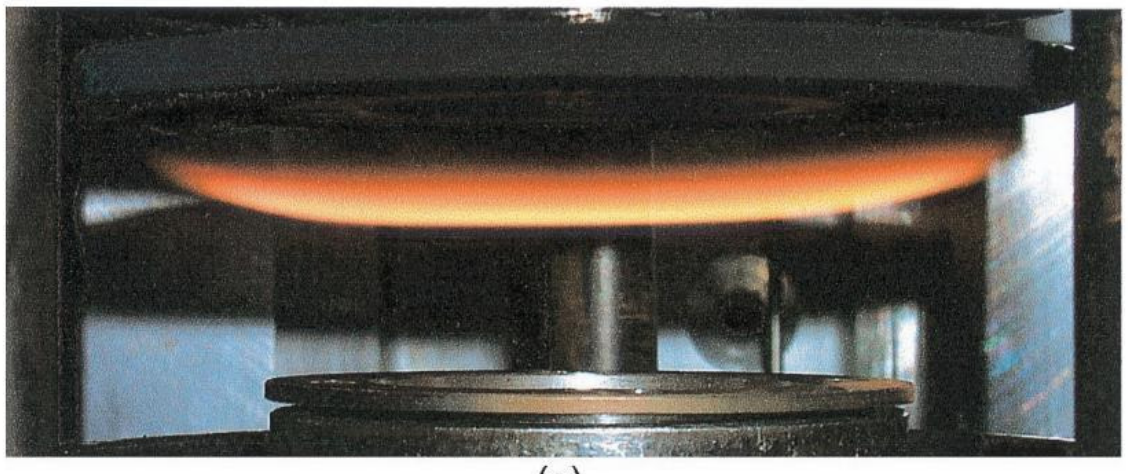
llama totalmente amarilla. Su diámetro es del diámetro de donde sale el nitrógeno. Es evidente la restricción de la cortina de nitrógeno.

- **Ensayo 11, L = 1.0 [cm], a_g = 10 [s^{-1}]:** En la **Figura 98** se forma una llama laminar solo de color amarillo en el plano de estancamiento. Es más convexa y gruesa que las demás del mismo strain rate. Su diámetro es del de las salidas de las boquillas como muestra la **Figura 97**.
- **Ensayo 12, L = 1.0 [cm], a_g = 15 [s^{-1}]:** Se forma una llama laminar convexa hacia arriba en el plano de estancamiento como muestra la **Figura 99**. Es relativamente inestable, la llama de escape avanza hacia arriba producto de la corriente del nitrógeno. En la **Figura 100** se observa la diferencia de zonas, una amarilla y una zona muy delgada azul. En la **Figura 101** se aprecia su forma circular con el tamaño de su diámetro entre el de la salida de las boquillas y las mismas boquillas.
- **Ensayo 13, L = 1.0 [cm], a_g = 20 [s^{-1}]:** En la **Figura 102** se forma una llama laminar amarilla en el plano de estancamiento. Es delgada, ligeramente convexa hacia arriba. Su diámetro es del tamaño de la boquilla como muestra la **Figura 103**. En la **Figura 104**, el monte que se produce es del tamaño de la salida de la boquilla, esto puede deberse al 78% de nitrógeno que contiene el aire, el cual empuja las partículas de metano hacia arriba y genera la combustión de esta forma. A través de los ensayos este monte que se produce simula un perfil de velocidad desarrollado de un flujo laminar. En la **Figura 105** se observa una “triple llama” [9] que consta de dos regiones externas de llamas parcialmente premezcladas unidas por la región interna de llama de difusión.
- **Ensayo 14, L = 1.0 [cm], a_g = 25 [s^{-1}]:** En la **Figura 107** se forma una llama laminar amarilla en el plano de estancamiento. Es delgada, ligeramente convexa hacia arriba. En la **Figura 108** se aprecia que es inestable y se escapa de la cortina de nitrógeno. En la **Figura 109** se observa que el tamaño de circunferencia de la llama es igual al de la boquilla.

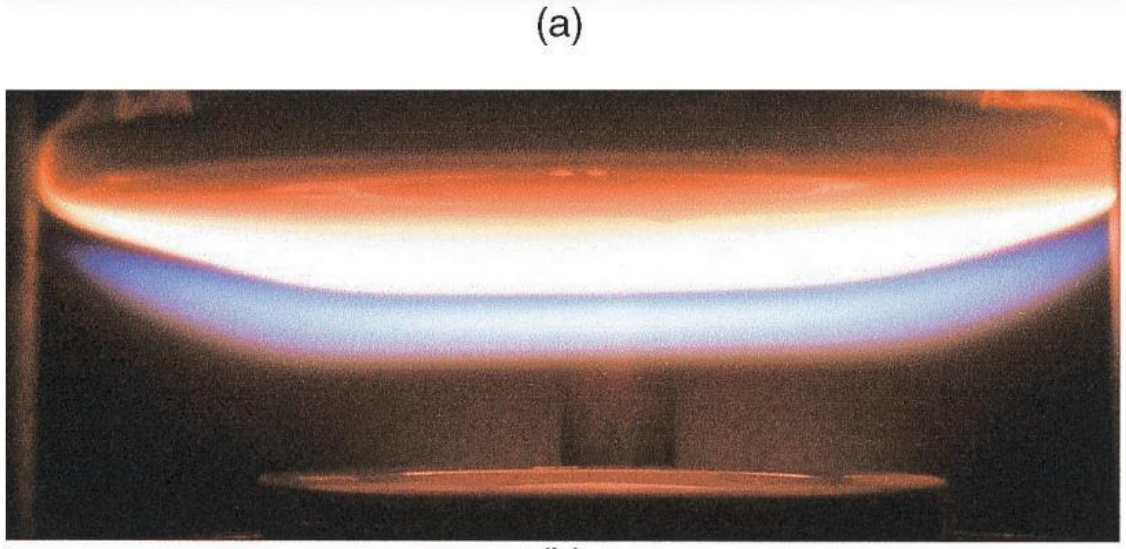
- **Ensayo 15, L = 1.0 [cm], a_g = 30 [s^{-1}]:** Como se muestra en la **Figura 111** se forma una llama laminar amarilla en el plano de estancamiento. Se forma un ligero plano azul por debajo de la llama. Es delgada, ligeramente convexa hacia arriba, principalmente dentro de la salida de la boquilla, luego, saliendo de ese diámetro, la llama se vuelve plana hasta el diámetro del tubo como se ve en la **Figura 112**. En la **Figura 110** se hace una comparación de la llama cuando **Figura 110**(a) está estable y **Figura 110**(b) se encuentra inestable. La llama logra escapar hacia arriba a través de la cortina de nitrógeno, llegando a la altura de salida de agua del sistema de refrigeración. La llama es muy inestable como muestra la **Figura 113** y **Figura 114**. Sin embargo, puede deberse a que el estiramiento de la llama llegue a longitudes más allá de la cortina de nitrógeno, por lo que requiere salir de esta zona.

En resumen, el Ensayo 1 y el Ensayo 2 demostraron que mientras hay más flujo de nitrógeno como una cortina límite, la llama tenderá a formarse mejor, esto debido al arrastre de los productos de combustión y a la atmósfera que crea la cortina de nitrógeno.

La llama principalmente se divide en dos zonas: una zona amarilla y otra zona azul. La zona amarilla corresponde a una combustión incompleta, es decir, existe un exceso de combustible en la combustión, lo cual tiene sentido ya que el gas combustible se inyecta por arriba. El color amarillo intenso es debido a que las partículas de carbono que no llegan a oxidarse (hollín), reaccionan con alta temperatura y producen una llama incandescente que emite luz en todas las direcciones. Por otro lado, la zona azul corresponde a una combustión completa, por lo que el oxígeno reacciona de manera estequiométrica con el combustible en esta delgada zona. Esto tiene sentido debido a que, durante el proceso de difusión, el combustible que no llega a combustionar atraviesa la zona de alta temperatura y llega a encontrarse estequiométricamente con el oxígeno.



(a)



(b)

Figura 115. Imágenes fotografiadas: (a) llama de metano/aire con strain rate 10 [s^{-1}]; (b) llama de metano oxígeno con strain rate 10 [s^{-1}] [7].

Según una investigación sobre el estudio de formación de NO y hollín en llamas difusivas [7] la temperatura máxima y los planos de estancamiento se desplazan hacia el lado del combustible a medida que aumenta el enriquecimiento de oxígeno. Por otro lado, la zona de pirólisis está más cerca del frente de llama en el caso de metano/aire, que en el caso de oxígeno enriquecido. Con el enriquecimiento de oxígeno, la región de alta temperatura es mucho más amplia en comparación con el caso del aire, y la pirólisis mejora significativamente. Para el caso de oxígeno puro (**Figura 115**(b)) se pueden identificar fácilmente dos zonas: una zona amarilla, en la proximidad del plano de estancamiento, y una zona azul. La zona amarilla se debe a la radiación de hollín (principalmente la zona de pirólisis); la zona azul se debe a radiaciones radicales como CH y C_2, producidas en el frente de llama. Para el caso de aire (**Figura 115**(a)) estas dos zonas están muy cerca una de la otra y casi superpuestas. Sin embargo, para llamas enriquecidas con oxígeno, la separación entre estas dos zonas es distinta [7].

Las llamas con los strain rates entre 5 a 15 [s^{-1}] no se autosostienen eficazmente, presentan un espesor más ancho. Esto se debe a que, como se vio en el capítulo de ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., un espesor más ancho produce que un porcentaje de los gases reactivos se escapen de la zona de reacción. Por el contrario, llamas con strain rates entre 15 a 30 [s^{-1}] se autosostienen mejor, presentan un espesor más delgado y una longitud de llama más grande. Para que se pueda considerar una llama de difusión unidimensional y pueda estudiarse como una "lámina de llama", la longitud de su diámetro tiene que ser diez veces su espesor [4], lo que hace a strain rates altos mejores para estudiar estas llamas.

La formación de agua es un producto del resultado de combustión. Sin embargo, posterior a los ensayos, se dio cuenta de que la vía de gases de escape estaba obstruida, por lo que la acumulación de agua se debió principalmente a este problema. No obstante, hay que recalcar que el agua es un producto natural de la combustión y no es por filtración del sistema de refrigeración por agua.

En el ensayo 13, se observó la forma de una "triple llama" [9], una triple llama es la morfología con la cual se propaga una llama difusiva. Consta de 3 regiones, una región central con la llama difusiva y dos regiones parcialmente premezcladas que la envuelven.

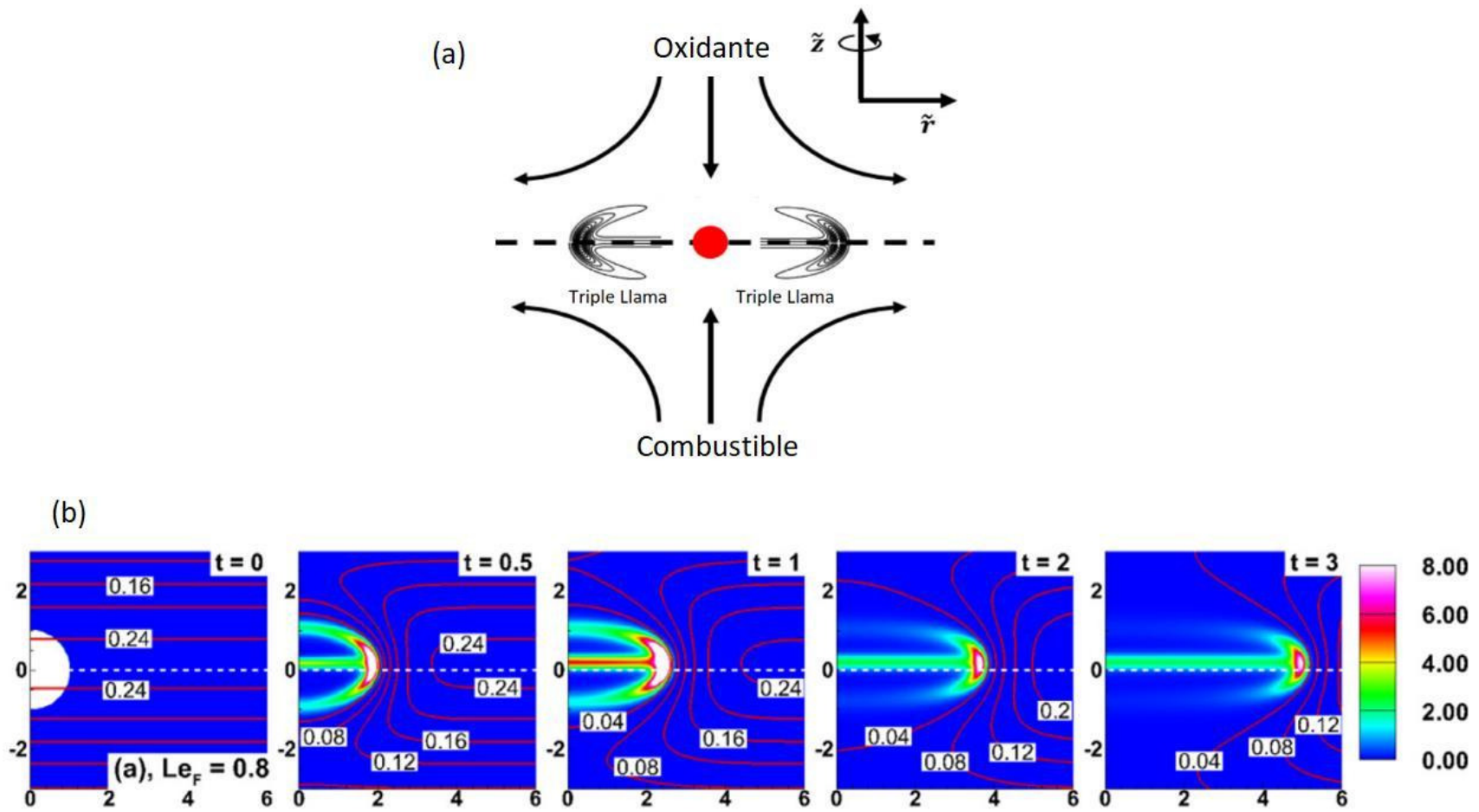


Figura 116. Ilustraciones de una “triple llama”, (a) esquema de formación de una llama difusiva, (b) evolución de una llama difusiva en el tiempo [9].

En todos los ensayos, se pudo observar una característica constante: una zona convexa en el centro de la llama, la cual prevalece hacia arriba y predomina en todo el diámetro de la salida del flujo. Además, esta zona simula notablemente un perfil de velocidad laminar desarrollado de flujo. Esto se puede atribuir a la composición del aire suministrado, compuesto por un 79% de nitrógeno y un 21% de oxígeno. Este nitrógeno, al ser inerte en la combustión, ejerce una fuerza en sentido contrario a las moléculas de metano, haciendo que la combustión tenga esa forma. Esta teoría toma mayor fuerza al observar la particular forma del perfil de velocidad, sugiriendo que el aire se introduce como un flujo. Además, al salir del diámetro de la boquilla, la llama se aplana en longitud restante. Es importante mencionar que en investigaciones previas han diluido el combustible con nitrógeno para igualar las proporciones, dando lugar a llamas exclusivamente planas.

En la **Tabla 6** se observa un resumen de los resultados variando strain rate con el distanciamiento de reactivos, se encontró una relación morfológica variando las tasas de deformación y

la distancia entre los reactivos. Se entiende que, a mayor strain rate, la llama se vuelve más plana, y con una mayor distancia entre reactivos, la llama plana se consigue más rápido a bajos strain rates.

V. Conclusiones

La investigación aplicada de este informe se centró en la implementación y puesta en marcha de un quemador de llamas difusivas. Se realizó una recopilación exhaustiva de información respecto a las llamas difusivas y su comportamiento en el proceso de combustión.

Los quemadores de llama no-premezclados tienen una configuración donde el combustible y el oxidante entran por separado a la zona de reacción. El quemador de flujos opuestos consta de dos matrices haciendo fluir en cada una oxidante y combustible, formando una llama plana. Este quemador tiene la ventaja de que matemáticamente solo depende de una dimensión.

El quemador fue construido en el año 2009, al año 2022 se encontraba desarmado, sin uso y con piezas faltantes. No obstante, mediante investigación y una evaluación fundamentada se procedió al diseño de las piezas requeridas para que posteriormente sean manufacturadas por METALMECÁNICA LOURDES. Las piezas fabricadas se basaron en el diseño que motivó principalmente su creación: la investigación de partículas nanotecnológicas.

Paralelamente, se diseñó la estructura base-soporte para el quemador, la que tiene integrado el sistema de movimiento vertical. El funcionamiento es sencillo, tiene una manivela que gira en sí misma y a través de ella hace subir y bajar un eje que, por medio de plataformas de acero tiene sostenido el conjunto superior del quemador, mientras que, el cuerpo inferior está fijo en la estructura base-soporte.

Para los sistemas de control, se optó por sistemas de control digitales para una mayor precisión y facilidad de manejo, los sistemas de control fueron tres, para el gas natural, aire y nitrógeno. Las líneas de combustible y gas inerte son de acero inoxidable, mientras que la línea del oxidante es de nylon. El sistema de refrigeración de agua es suministrado por agua potable residencial y el material de la línea es de goma.

El quemador encendió sin problemas y los ensayos que se realizaron fueron con variaciones de strain rates y distancia de suministros de combustible y oxidante.

En resumen:

- Se diseñó, construyó e implementó un quemador de manera exitosa, asegurando un correcto funcionamiento, tanto de líneas de flujo como su sistema de movimiento vertical. Queda a disposición para posterior estudio.
- En base a las pruebas experimentales, la estabilidad de la llama depende de la cortina de gas inerte. Es una hipótesis que se tiene que seguir investigando.
- En base a comparaciones experimentales realizadas con lo investigado en el estado del arte [4], [7], se logra una llama comparable logrando la unidimensionalidad.
- Se encontró una relación morfológica variando las tasas de deformación y la distancia entre los reactivos.
- Se estimó que ocurre el fenómeno “triple llama” [9], sin embargo, es un fenómeno que hay que confirmar con más investigaciones a futuro con este tipo de llamas.

5.1. Limitaciones y recomendaciones para investigaciones futuras

Aunque este estudio ha arrojado resultados positivos en el ámbito de llamas difusivas, es importante reconocer que la investigación está sujeta a ciertas limitaciones. Estas limitaciones brindan una base para identificar mejoras y da el paso a estudiar futuras investigaciones más profundas. En esta sección, se presentan recomendaciones para investigaciones futuras que permitirán un mayor avance en nuestro entendimiento de las llamas difusivas.

1. Se propone investigar cambio de los flujos reactivos de posición de acuerdo con su masa.
2. Se propone ensayar con una composición de oxidante enriquecida con oxígeno y/o con combustible diluido, para estudios de morfología y eficiencia.
3. Se propone investigar llamas para combustible gas natural – hidrógeno.

4. Se propone estudiar el principal uso para nanopartículas [10].
5. Se propone ensayar el quemador con strain rates mayores a 30 [s^{-1}].
6. Se propone instalar un ventilador en la salida del colector para asegurar la expulsión de gases.

VI. Referencias

[1] T. Poinsot y D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Bordeaux: Aquaprint, 2005.

[2] C. K. Law, Combustion Physics, New York: Cambridge University Press, 2006.

[3] H. Tsuji, «Counterflow Diffusion Flames,» *Progress in Energy and Combustion Science,* vol. 8, nº 2, pp. 93-119, 1982.

[4] J. Park, C. Bo Oh y E. Ju Lee, «Effects of the burner diameter on the flame structure and extinction limit of counterflow non-premixed flames,» *Spray and combustion dynamics,* vol. 2, nº 3, pp. 199-218, 2010.

[5] C. J. Sung, J. B. Liu y C. K. Law, «Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations,» *Combustion and Flame,* vol. 104, nº 4, pp. 481-492, 1995.

[6] M. H. Yang y I. K. Puri, «Experimental Investigation of Stretched Premixed Flames Burning Mixtures of Methane and Methyl Chloride in Air and Comparison with Numerical Simulations,» *Combustion and Flame,* vol. 94, nº 1-2, pp. 25-34, 1993.

[7] A. Beltrame, P. Porshnev, W. Merchan-Merchan, A. Saveliev, A. Fridman, L. A. Kennedy, O. Petrova, S. Zhdanok y O. Charon, «Soot and NO formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flames,» *Combustion and Flame,* vol. 124, nº 1-2, pp. 295-310, 2001.

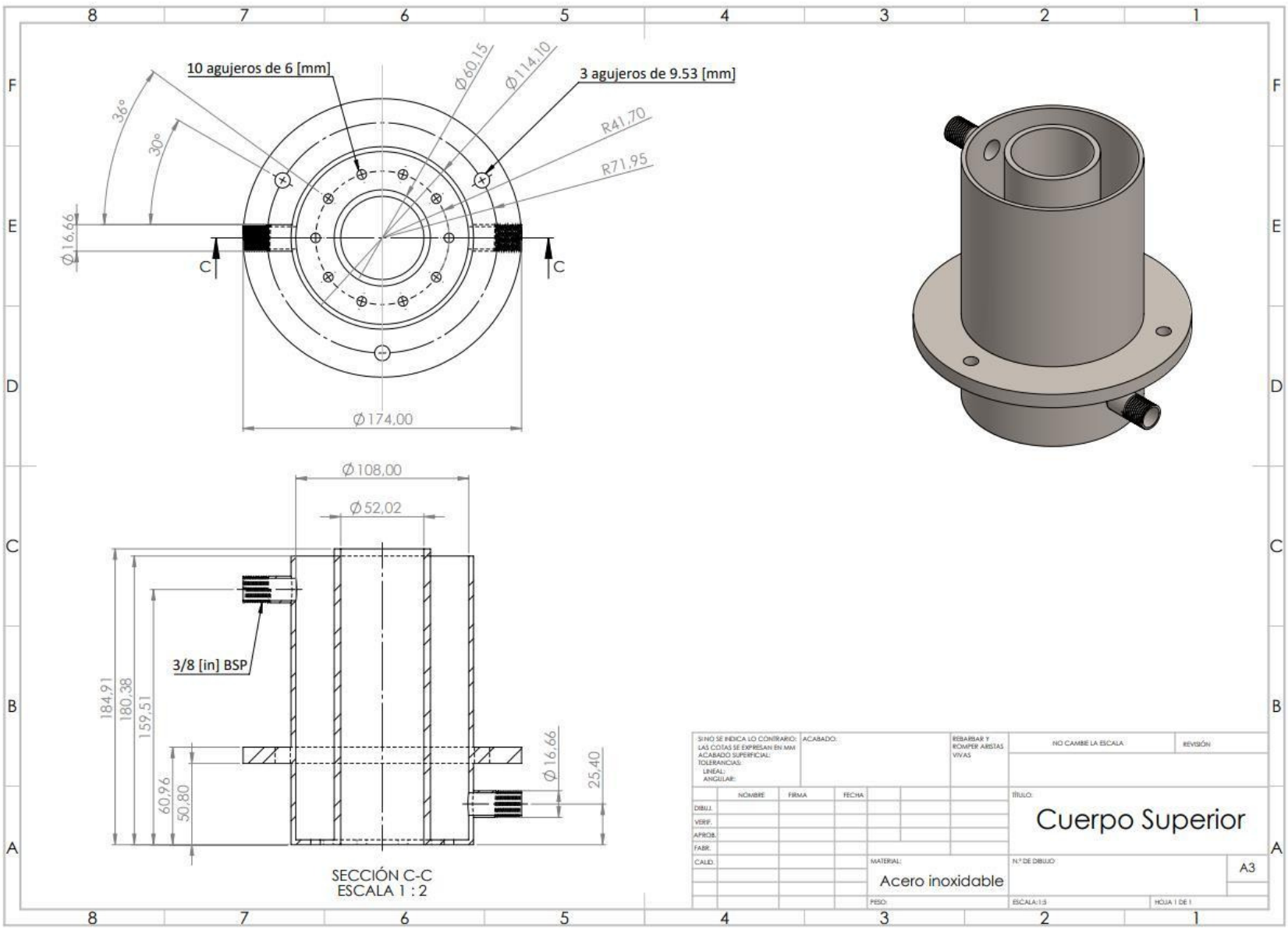
[8] M. Gallardo P. y J. C. Palomo T., «Implementación y Ensayo Preliminar de Quemador de Llamas Difusivas,» Valparaíso, 2009.

[9] S. Xie, Z. Lu y Z. Chen, «Effects of strain rate and Lewis number on forced ignition of laminar

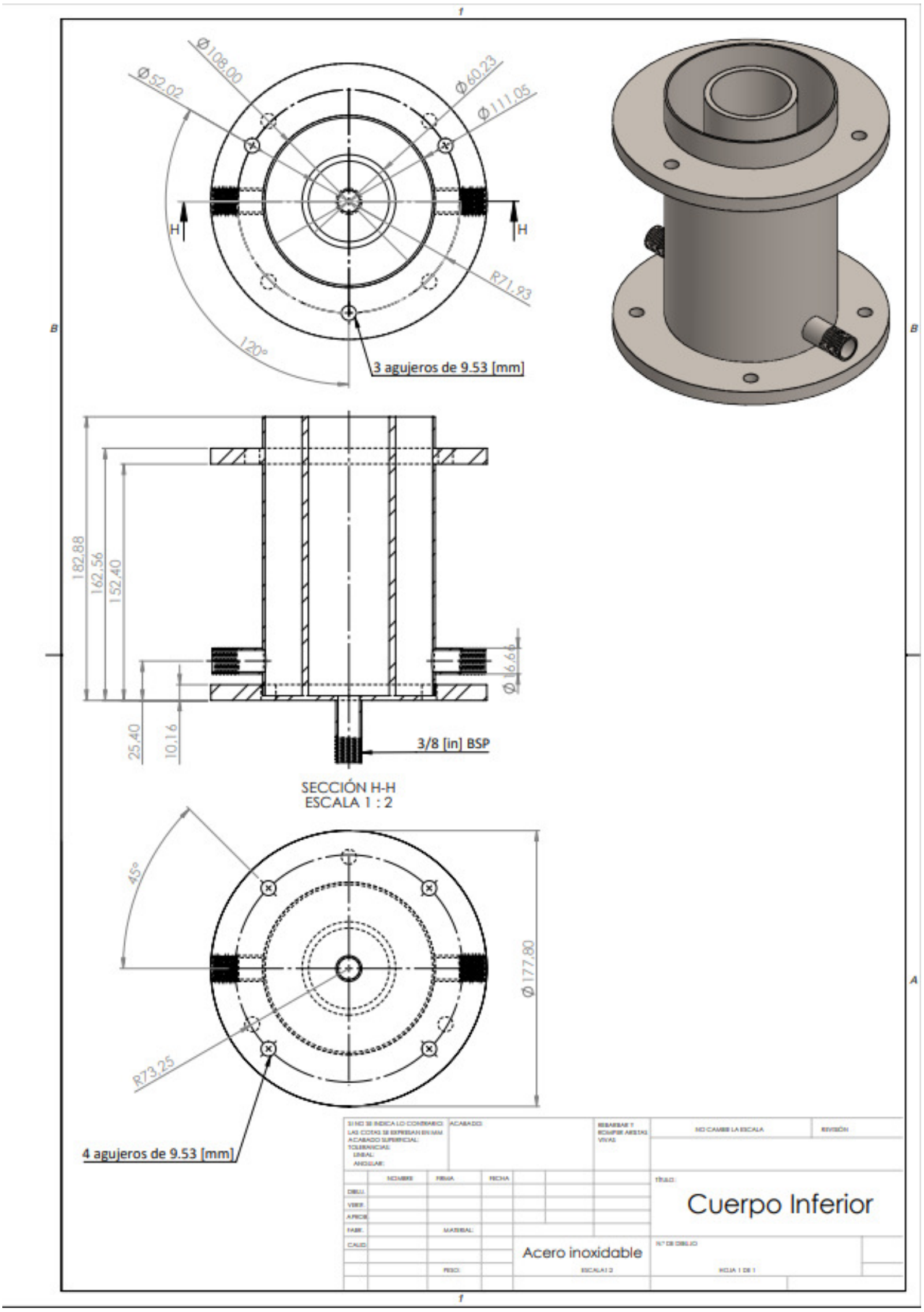
counterflow diffusion flames,» *Combustion and Flame,* vol. 226, pp. 302-314, 2021.

VII. Anexos

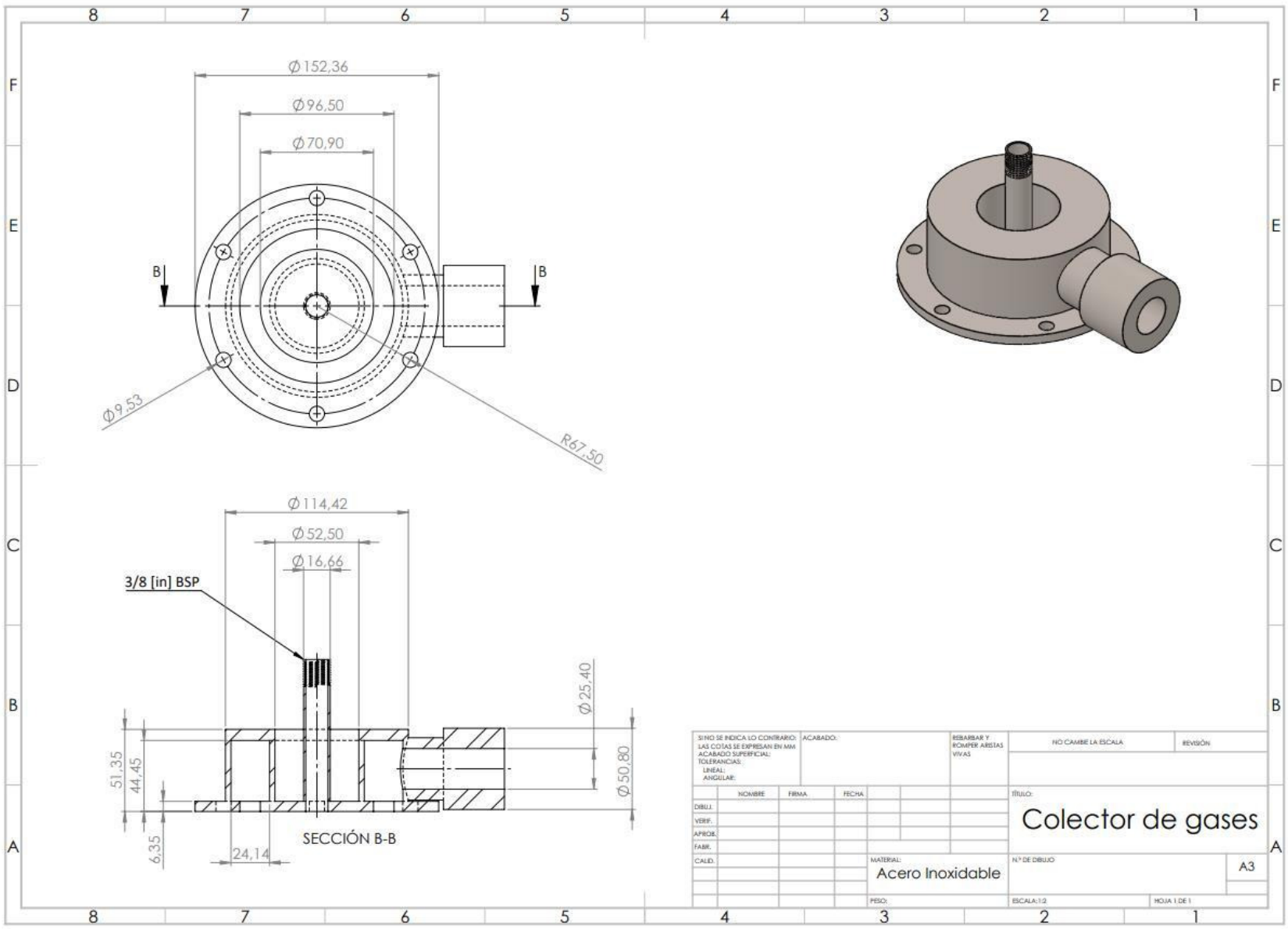
Anexo A. Plano Cuerpo Superior.



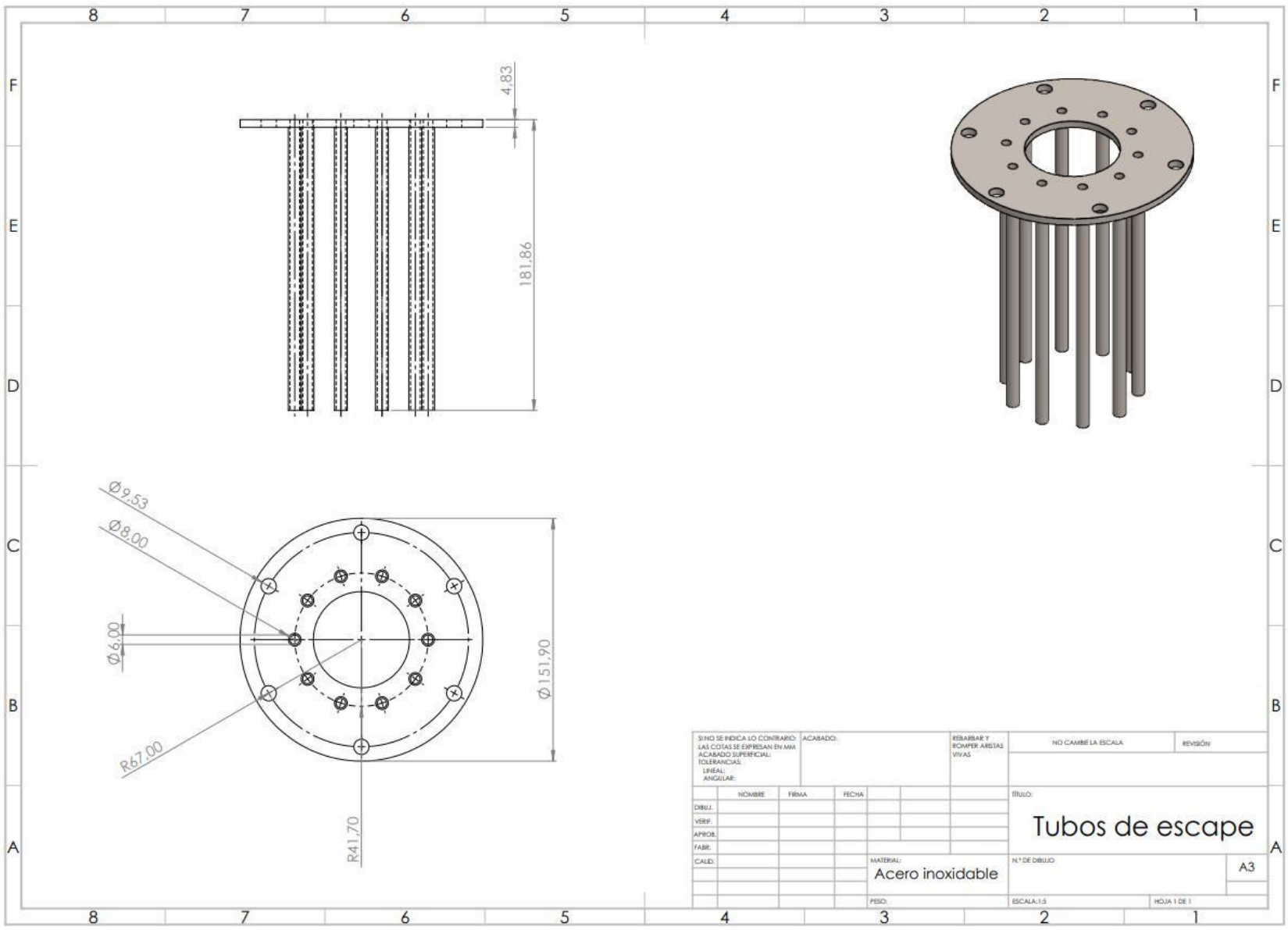
Anexo B. Plano Cuerpo Inferior.



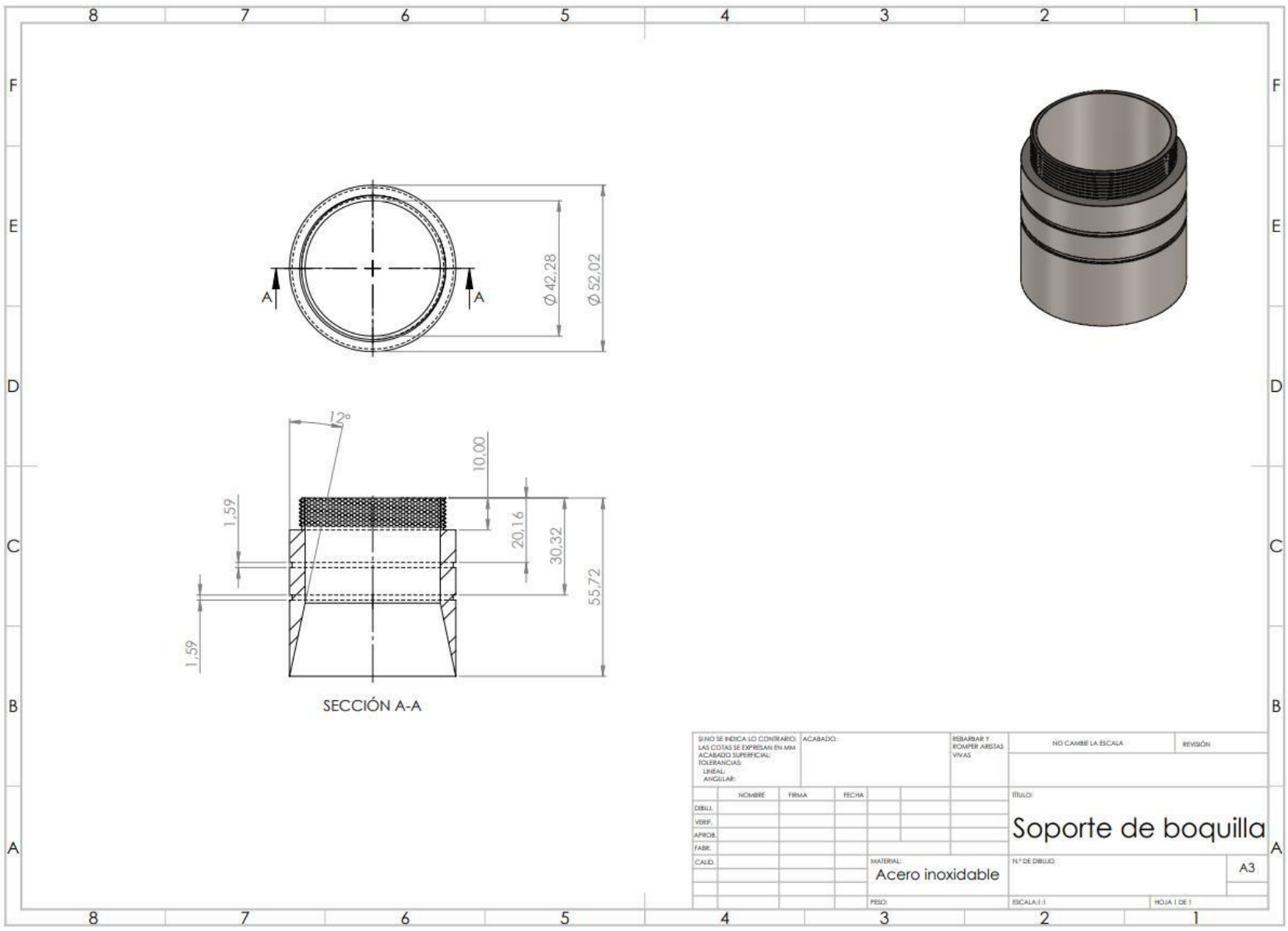
Anexo C. Plano Colector de Gases.



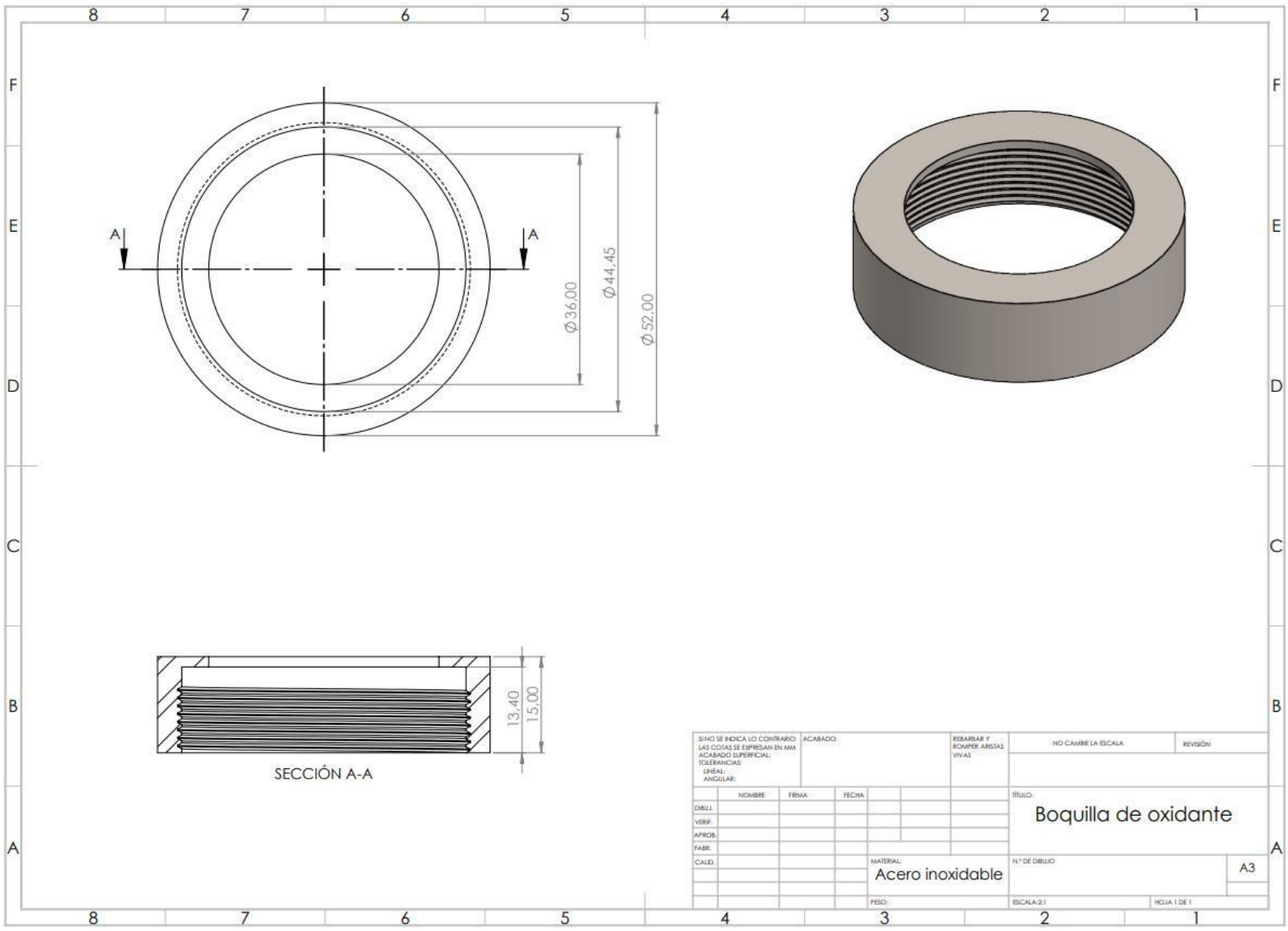
Anexo D. Plano Tubos de Escape.



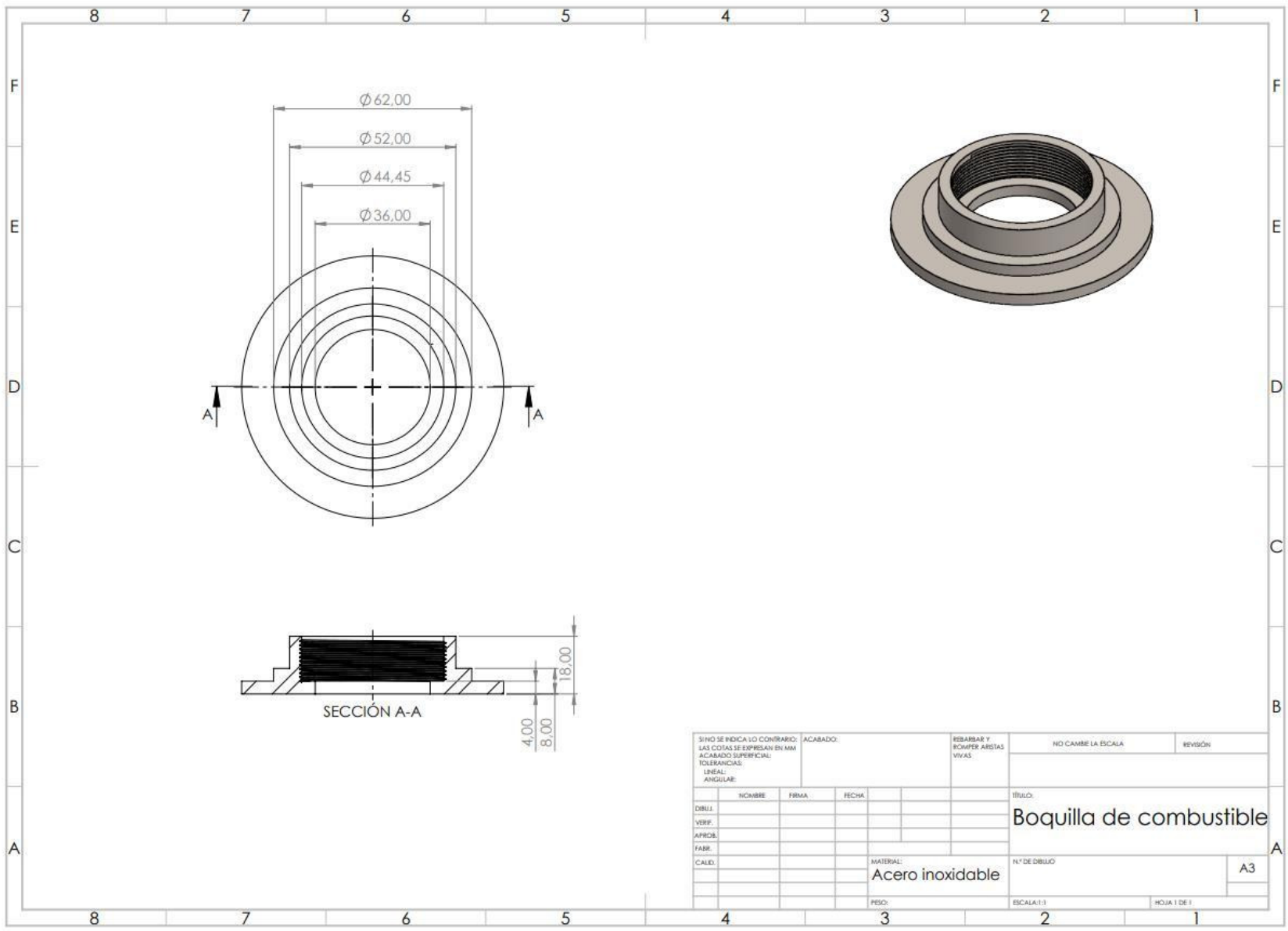
Anexo E. Plano Soporte de Boquilla.



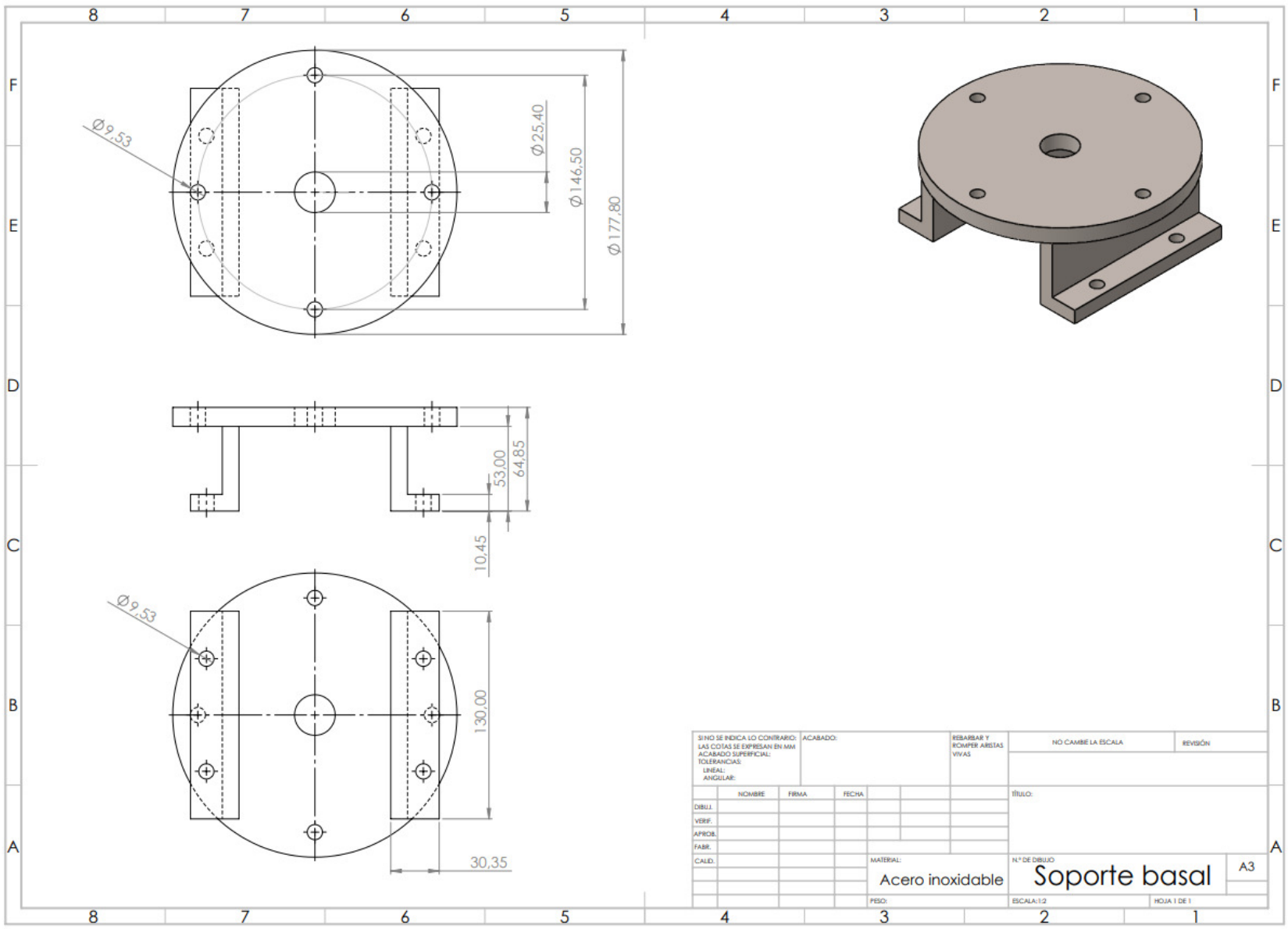
Anexo F. Plano Boquilla de Oxidante.



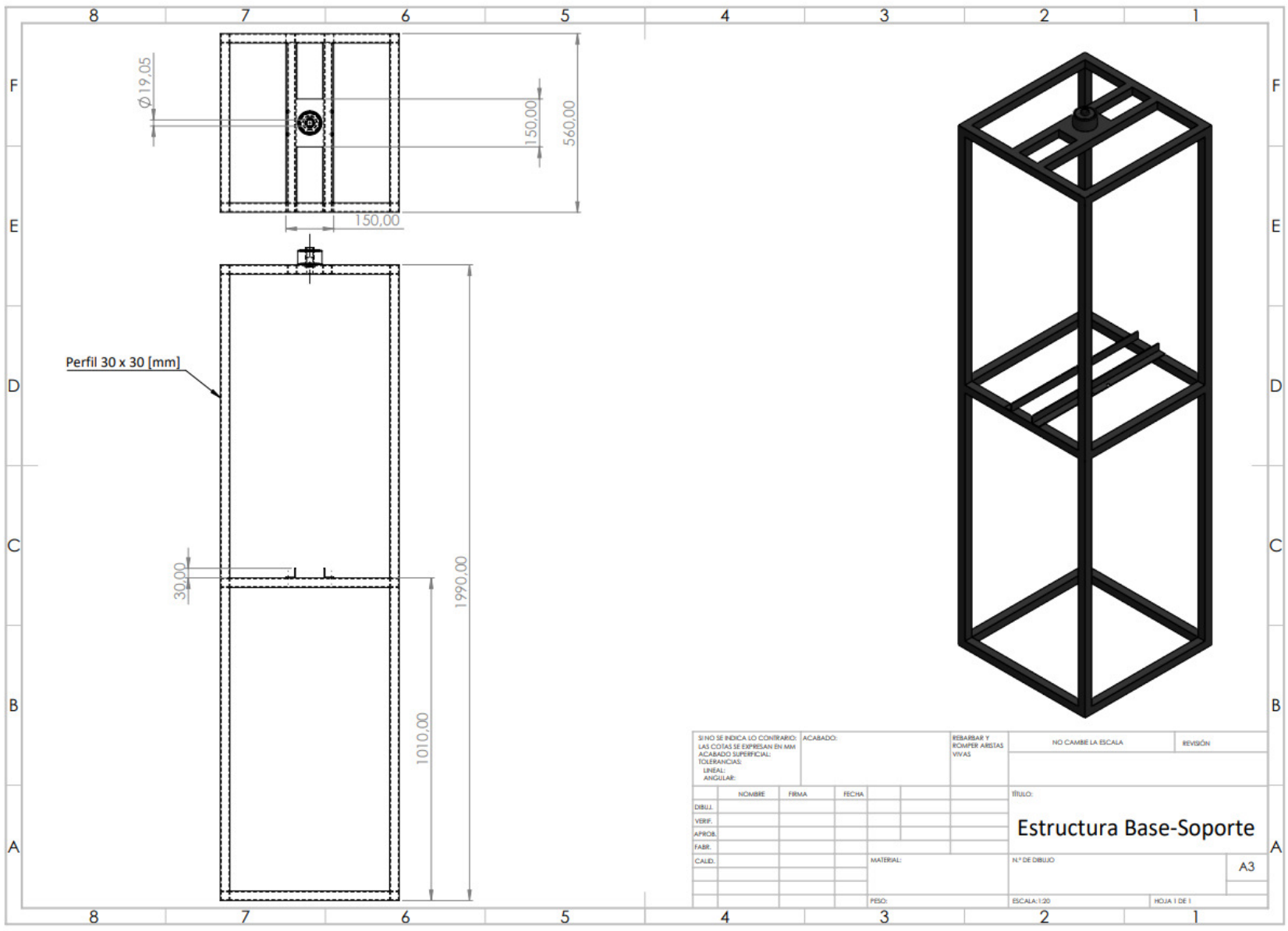
Anexo G. Plano Boquilla de Combustible.



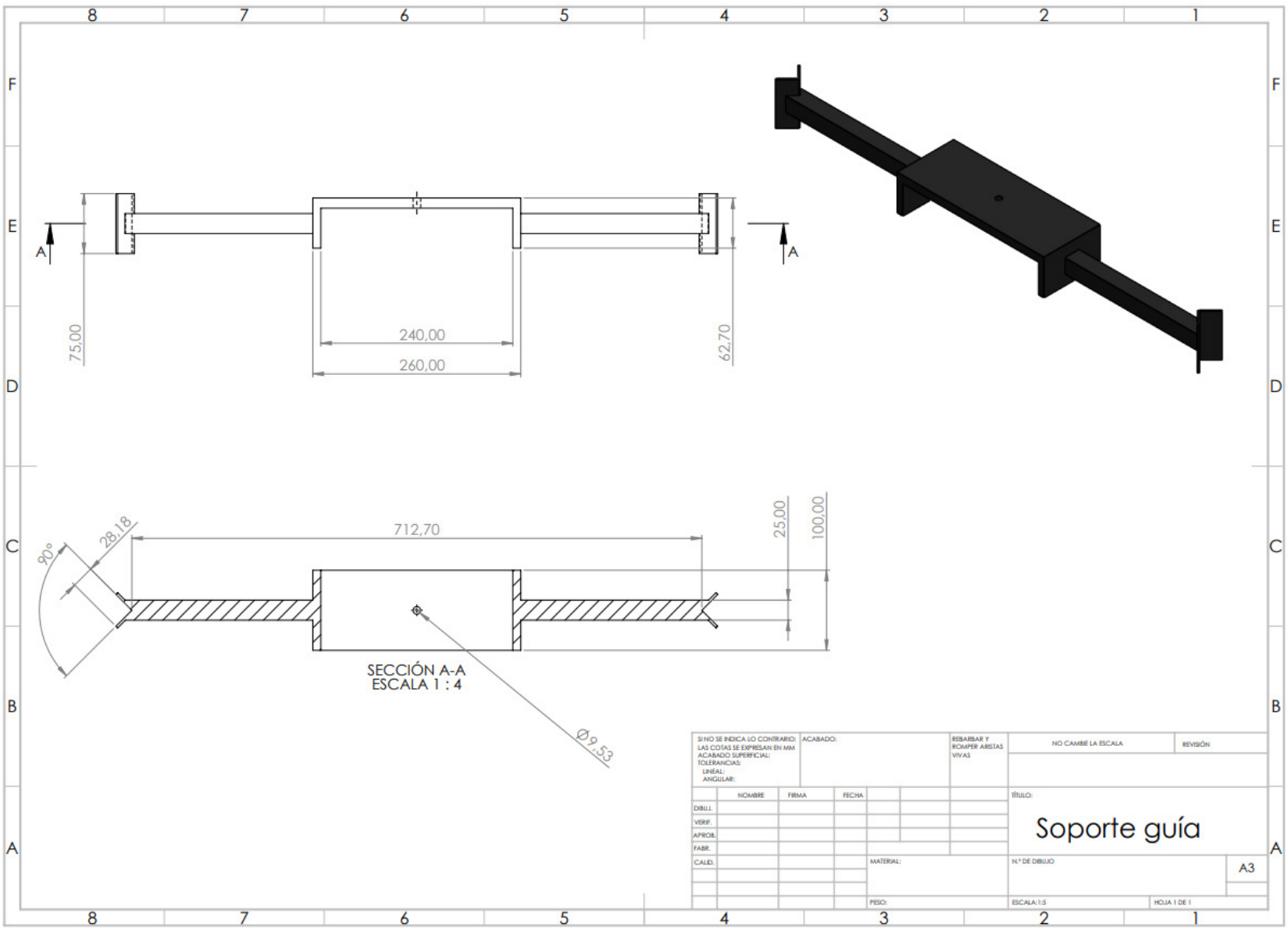
Anexo H. Plano Soporte Basal.



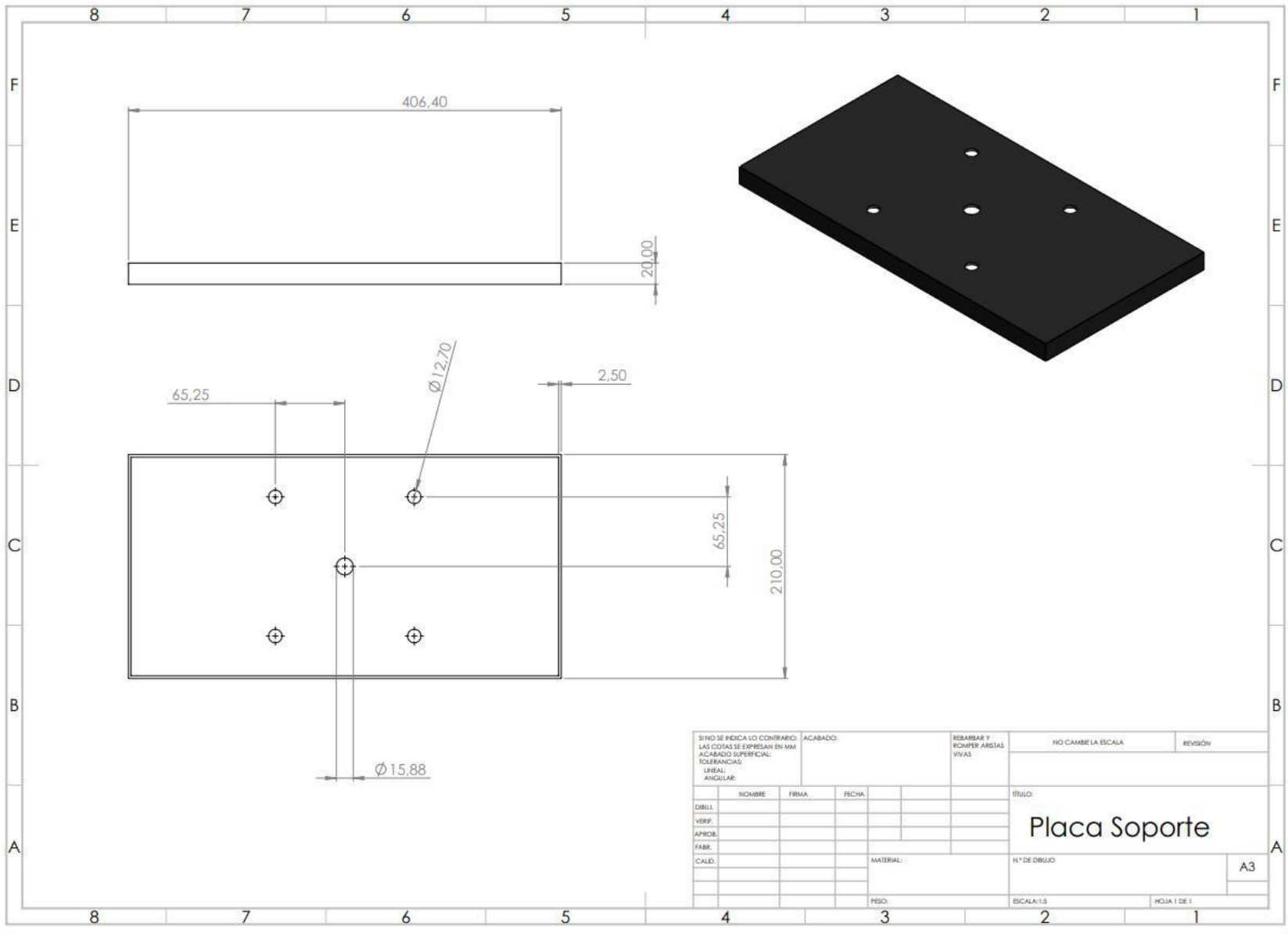
Anexo I. Plano Estructura Base-Soporte.



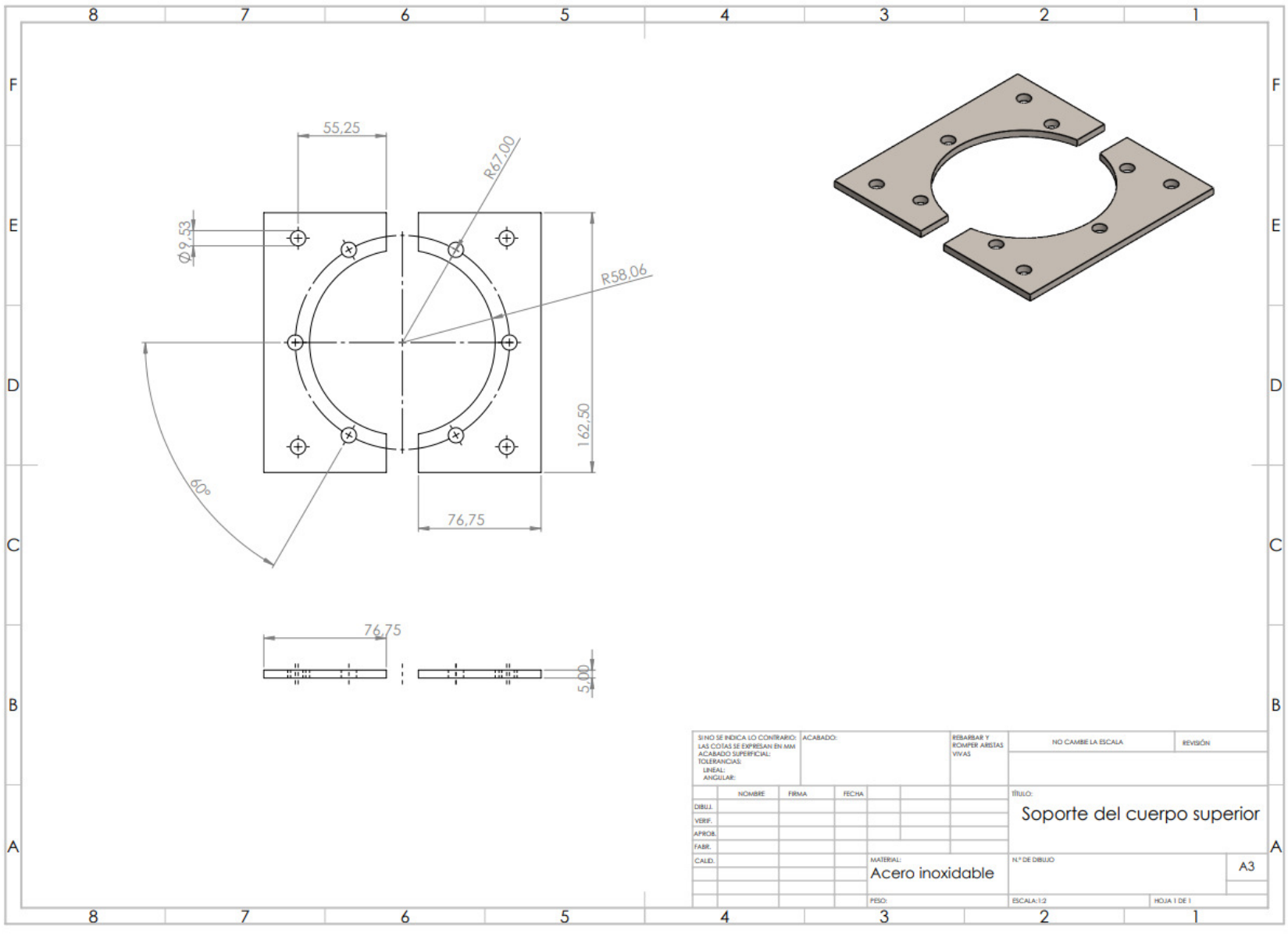
Anexo J. Plano Soporte Guía.



Anexo K. Plano Placa Soporte.



Anexo L. Plano Soporte de Cuerpo Superior.



Anexo M. Especificaciones técnicas del gas natural.

GNL Quintero

ESPECIFICACIONES DE CALIDAD GAS NATURAL

Mes = ***Febrero 2023***
Fecha = ***14-03-2023***

F01-GNLQ-MED-PR-102

	Parámetro	Unidad	Valores medidos		
			Mínimo	Promedio	Máximo
1	Poder calorífico superior	MJ/Sm^3	38,342	38,648	39,062
2	Índice de Wobbe	MJ/Sm^3	50,796	51,183	51,442
3	Densidad relativa	-	0,560	0,570	0,580
4	Gases inertes, total	% v/v	0,01	0,05	0,55
5	Punto rocío hidrocarburos*	ºC @ 5500 kPa	-76,9	-75,4	-71,9
6	Dióxido de Carbono (CO_2)	% v/v	0,00	0,00	0,00
7	Oxígeno (O_2)	% v/v	0,00	0,00	0,00
8	Sulfuro de hidrógeno	mg/Sm^3	0,00	0,00	0,00
9	Azufre total	mg/Sm^3	0,00	0,15	0,24
10	Agua	mg/m^3	0,00	0,00	0,00

* @5500 kPa o la máxima presión posible

Anexo N. Especificaciones técnicas del compresor.

MSV 6/30



Air Displacement / Desplazamiento Teórico (CFM)	pés³/min	5	6
	l/min	141	170
Maximum Pressure / Presión de Trabajo (MÁXIMA)	psig	120	
	bar	8,3	
RPM / RPM		1445	1730
Motor Power / Potencia del Motor		1 hp	
		0,75 kW	
Poles / Nº de Polos		4	

Compressor Unit	Nº of Pistons / Nº Pistones	2 - V
	Nº of Stages / Nº Etapas	1
Tank Volume / Vol. del Reserv.		30 l
Net Weight / Peso Neto		42 kg
Gross Weight / Peso Bruto		54 kg
Width X Height X Lenght / Ancho X Alto X Largo		440 x 670 x 440 mm

Anexo O. Especificaciones técnicas del nitrógeno LINDE.

3.- COMPOSICION/INFORMACION SOBRE LOS COMPONENTES

SUSTANCIA PURA

Nombre de la sustancia:	Nitrógeno Gaseoso
Nombre química sistemática:	Nitrógeno
Fórmula química:	N_2
Nombre Común o Genérico:	Nitrógeno
Sinónimo:	Nitrógeno Comprimido / GAN
NU:	1066
Número CAS:	7727-37-9
Rango de Concentración:	99,99%
MEZCLA:	No aplicable

9.- PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Estado físico	:	Gaseoso
Forma en que se presenta	:	Gas comprimido
Color	:	Incoloro
Olor	:	Inodoro
pH	:	No aplicable
Punto de fusión/punto de congelamiento	:	-210°C
Punto de ebullición, punto inicial y rango	:	-196°C
Punto de inflamación	:	Producto no inflamable
Límites de explosividad	:	No aplicable
Presión de vapor a 20°C	:	No se dispone de datos
Densidad relativa del vapor (aire = 1).	:	0.97
Densidad	:	1,19 kg/m³
Solubilidad(es)		20 mg/l
Coeficiente de partición n-octanol/agua	:	No es aplicable a gases inorganicos
Temperatura autoignición	:	No aplicable
Temperatura de descomposición	:	Desconocido

Anexo P. Especificaciones técnicas del nitrógeno INDURA.

Ficha técnica

Propiedades Físicas

Gravedad específica (0°C, 1 atm)	0,967		Punto de ebullición (1 atm)	-195,803	°C
Densidad del líquido (1 atm)	0,8066	kg	Presión crítica	33,999	bar
Densidad del gas (15°C, 1 atm)	1,165	kg/m³	Temperatura crítica	-146,95	°C
Densidad del gas (0°C, 1 atm)	1,25053	kg/m³	Peso molecular	28,0134	g/mol5
Calor latente de vaporización	47,459	kcal/kg			

Envases Usuales ARGENTINA - COLOMBIA - CHILE - ECUADOR - PERÚ

CILINDROS		Contenido		Presión de llenado a 15°C	
Tamaño	Especificación	Volumen	Peso		
	DOT	m³ (15°C, 1 atm)	kg	bar	psig
200/50	200/300	9,42	10,7	200,0	2.900 ± 50
165/50	3AA 2400	8,5	10,1	177,5	2.575
139/44	3AA 2015	6,0	7,1	139,5	2.025
124/44	3AA 1800	5,5	6,5	127,0	1.840

Conexión de salida de la válvula: Ver al final

Termos Portátiles Especificación DOT 4-L200

Tamaño-uso	Contenido			Dimens. aprox.	Peso vacío		Rendimiento
	m³	kg	l	alto	diámetro	aprox.	flujo cont.
176-gas	103	122,0	148,0	1,52 m	0,51 m	113 kg	9 m3/hr
-llq.	114	135,0	165,6	-	-	-	
196-gas	112	133,7	165,6	1,61 m	0,51 m	113 kg	10 m3/hr
-llq.	124	146,9	180,3				

Factores de Conversión

N_2	Peso		Gas		Líquido	
	kg	lb	m³ (15°C, 1 atm)	scf (70°F, 1 atm)	l (1 atm)	gas (1 atm)
1 kg	1	2,2046	0,8439	30,43	1,2367	0,3267
1 lb	0,4536	1	0,3828	13,803	0,561	0,1482
1 m3	1,185	2,6125	1	36,06	1,4655	0,3871
1 scf	0,03286	0,07245	0,02773	1	0,04064	0,01074
1 l	0,808607	1,7827	0,6824	24,61	1	0,2642
1 gal	3,0609	6,7482	2,583	93,14	3,7854	1

Reguladores de presión recomendados

1 Etapa:	Harris 825 - 10 - N
	Harris 967 - 100 - N
2 Etapa:	Harris 896 - 15 - N
De línea:	Harris 847 - 10 - N

Anexo Q. Especificaciones técnicas de las líneas de combustible y nitrógeno.

Material: acero inoxidable AISI 316-L sin costura
Rango de Medidas: 1/4, 3/8, 1/2 pulgadas y 6, 8, 10 y 12mm
Presión Máxima de Trabajo: 3.000 psi
Espesor de Pared: 0.89 mm
Largo de las Tiras: 6 metros

código	Ø externo	presión de trabajo PSI
TUSS04	1/4	4.900
TUSS06	3/8	3.200
TUSS08	1/2	1.600
MTUSS6	6 mm	5.100
MTUSS8	8 mm	3.900
MTUSS10	10 mm	3.100
MTUSS12	12 mm	2.600



Anexo R. Especificaciones técnicas de la línea de oxidante.

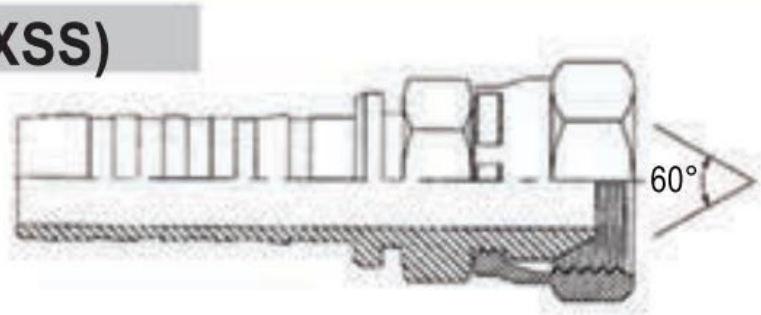
Material: Nylon 11/12 flexible (Poliamida)
Normas: SAE J844 / DIN 73378
Rango de Medidas: 1/4 a 1/2 y 4 a 12 mm exterior
Temperatura de Trabajo: -15° a +60°C
Presión Máxima de Trabajo: ver tabla
Colores: natural y negro
Características:
° Buena resistencia a productos químicos y gases
° Baja absorción de humedad
° Alta resistencia a la intemperie y corrosión
°Gran flexibilidad y excelente resistencia mecánica
Aplicaciones:
° Sistemas neumáticos industriales
° Líneas de combustibles (Gasolina, diesel, alcohol)
° Sistemas de freno de aire
° Líneas hidraúlicas y de lubricación
° Conducción de productos químicos y gases

	Ø externo		espesor de pared (mm)	Presión	
	pulgada	mm		máxima PSI	ruptura PSI
44NF	1/4	6.35	1.02	210	500
66NF	3/8	9.53	1.57	210	500
88NF	1/2	12.70	1.57	210	500
M4NF		4	1.00	210	500
M6NF		6	1.00	210	500
M8NF		8	1.00	210	500
M10NF		10	1.50	210	500
M12NF		12	1.50	210	500

Anexo S. Especificaciones técnicas de Hembra Giratoria BSP.

HEMBRA GIRATORIA BSP (FGXSS)

Medidas: manguera 1/4 a 1”
hilo 1/4 a 1” BSP
Norma: BSPP asiento 30º
Material: acero inoxidable 316





código	Ø interior manguera	hilo hembra BSP
FGXSS0404	1/4	1/4 x 19
FGXSS0606	3/8	3/8 x 19
FGXSS0808	1/2	1/2 x 14
FGXSS1212	3/4	3/4 x 14
FGXSS1616	1	1 x 11

Anexo T. Especificaciones técnicas del controlador de flujo.

TABLE 22 - SPECIFICATIONS								
ACCURACY:	**ACCURACY %FS**				**OPTIONAL ENHANCED ACCURACY %FS**			
	MODEL:	GFC 17, 37, 47	GFC 57, 67, 77		**MODEL:**	GFC 57, 67, 77		
	FLOW RANGE:	0-100%	20-100%	0-20%	**FLOW RANGE:**	20-100%	0-20%	
	ACCURACY:	±1.0%	±1.5%	±3%	**ACCURACY:**	±1%	±1.0%	REF DATA with ±1%
CALIBRATIONS:	Performed at standard conditions [14.7 psia (101.4 kPa) and 70 °F (21.1 °C)] unless otherwise requested.							
REPEATABILITY:	±0.5% of full scale.							
RESPONSE TIME:	**GFC17:** 300ms time constant; approximately 1 second to within ±2% of set flow rate for 25% to 100% of full scale flow.							
	GFC 37/47: 600ms time constant; approximately 2 seconds to within ±2% of set flow rate for 25% to 100% of full scale flow.							
	GFC 57/67/77: 1800ms time constant; approximately 5 seconds to within ± 2% of set flow rate for 25% to 100% of full scale flow.							
TEMPERATURE COEFFICIENT:	0.15% of full scale / °C.							
PRESSURE COEFFICIENT:	0.01% of full scale / psi (0.07 bar).							
PRESSURE DROP:	See Table 24.							
OPTIMUM GAS PRESSURE:	25 psig (1.73 bars).							
MAX. GAS PRESSURE:	1000 psig (70 bars) maximum GFC 17, 37, 47. 500 psig (34.5 bars) GFC 57, 67, 77.							
TURN DOWN RATIO:	40:1.							
MAX. DIFF. PRESSURE:	50 psi for GFC 17/37/57/67 and 77 (3.4 bars), 40 psi for 47 (2.7 bars).							
GAS AND AMBIENT TEMP:	32 °F to 122 °F (0 °C to 50 °C). 14 °F to 122 °F (-10 °C to 50 °C) - Dry gases only.							
****MATERIALS IN FLUID CONTACT:**	**a.** Aluminum models GFC Series: anodized aluminum, 316 stainless steel, brass and Viton® O-rings.							
	b. Stainless steel models GFC17S, 37S, 47S, 57S, 67S and 77S: 316 stainless steel and Viton® O-rings. Optional O-rings: Buna® EPR and Kalrez® .							
ATTITUDE SENSITIVITY:	No greater than +15 degree rotation from horizontal to vertical; standard calibration is in horizontal position.							
OUTPUT SIGNALS:	Linear 0-5 Vdc. (1000 ohms min. load impedance); 4-20 mA (0-500 ohms loop resistance) Max noise ±20mV.							
COMMAND SIGNALS:	Analog 0-5 Vdc or 4-20 mA for remote set point mode; NPN compatible purge /valve off.							
CONNECTIONS:	**GFC 17:** 1/4" compression fittings. Optional: 6mm, 3/8" and 1/8" compression fittings or 1/4" VCR® .							
	GFC 37: 1/4" compression fittings. Optional: 6mm and 3/8" compression fittings or 1/4" VCR® .							
	GFC 47: 3/8" compression fittings.							
	GFC 57: 3/8" compression fittings.							
	GFC 67: 1/2" compression fittings.							
	GFC 77: 3/4" FNPT fittings. Optional: 3/4" compression fittings.							
LEAK INTEGRITY:	1 x 10^{-9} smL/sec of helium maximum to the outside environment.							
TRANSDUCER INPUT POWER:	**GFC 17, 37 and 47:** Universal +12 Vdc to 26 Vdc, 650 mA maximum. **GFC 57, 67 and 77:** +12 Vdc, 800 mA; +24 Vdc, 650 mA optional.							
CIRCUIT PROTECTION:	Circuit boards have built-in polarity reversal protection. Resettable fuses provide power input protection.							
DISPLAY:	3-1/2 digit LCD, 0.5" high characters.							
CE COMPLIANT:	EN 55011 class 1, class B; EN50082-1.							

***The selection of materials of construction, is the responsibility of the customer. The company accepts no liability.*

Anexo U. Especificaciones técnicas del Filtro-Regulador Lubricante.

* Working Press.: 0.5–10Bar
* Max. Press.: 15Bar
* Working Temp.: 5–60°C
* Filter Precision: 25 μ (5 μ is optional)

Anexo V. Tabla de cálculos de flujos de gases.

Strain Rate (1/s)	Distancia (cm)	Composición de combustible (%)							Composición del oxidante (%)			Diámetro boquilla del combustible (cm)	Área combustible (cm²)
		CO	N_2	H_2	CH_4	CO_2	C_2H_2	C_4H_{10}	N_2	O_2	CO_2		
49	2,54	0	0	0	0	0	0	100	50	50	0	4,11	13,27

Total % = 100 VERDADERO

Total % = 100 VERDADERO

Diámetro boquilla del oxidante (cm)	Área oxidante (cm²)
4,11	13,27

Velocidad del Oxidante [cm/s]	Densidad del Combustible [g/cm³]	Densidad [g/cm³]
26,14	0,002416	0,001267

Diámetro boquilla de cortina de gas (cm)		Área cortina (cm²)
Inner Diameter	Outer Diameter	
6,04	10,81	63,12598468

Velocidad Flujo Combustible, SLM		Velocidad Flujo Oxidante, SLM		Velocidad Flujo Cortina, SLM	
CO	0,00	O_2	7,64	N_2	99,0
N_2	0,00	CO_2	0,00		
H_2	0,00	Air	13,17		
		Air N_2	10,40		
CH4	0,00	Air O_2	2,77		
CO_2	0,00				
C_2H_2	0,00				
C_4H_{10}	20,81				
Total:	20,81	Total:	20,81	Total:	99,0

KEY

: Valores de Entrada

: Valores de Salida. No Cambiar.

SLM : Standard Liters per Minute