Diseño de un banco de pruebas para la caracterización óptica de fugas controladas de gas mediante la técnica Background Oriented Schlieren (BOS)

Luis Carlos Lizarazo Arguello

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

Carlos Eduardo García Sánchez

PhD. Ingeniería Química

Codirector:

Diego Luis Franco Jácome

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Detrás de cada título académico no se encuentra únicamente el esfuerzo individual, sino la suma silenciosa de sacrificios, fe incondicional y amor de toda una familia. Este logro es la culminación y el reflejo de esa entrega compartida.

A mi madre, María Isabel, pilar inquebrantable de mi vida. Su amor incondicional fue el refugio que me sostuvo incluso en los momentos en que dudé de mí mismo. Gracias por enseñarme que los sueños no se construyen por el camino fácil, sino a través de la disciplina y la perseverancia, y por recordarme que detrás de esta meta alcanzada está la huella de cada uno de sus esfuerzos.

A mis hermanos, por ser la compañía constante en los días difíciles. Su fe en mí, su apoyo incondicional y sus palabras de aliento no solo renovaron mis fuerzas, sino que convirtieron sus muestras de orgullo en mi mayor motivación para no rendirme.

De manera muy especial, a mi sobrino, quien acompañó de cerca este proceso con una admiración constante. Saber que el camino recorrido sirvió para inspirarlo, al punto de descubrir su propio amor por la ingeniería e iniciar hoy su formación profesional con la convicción de que se puede transformar la sociedad, le otorga a este logro un valor que trasciende cualquier título.

Agradecimientos

La culminación de este trabajo de grado es el resultado del respaldo institucional, académico y técnico brindado por entidades y profesionales comprometidos con la formación científica.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por garantizar el acceso a una educación superior pública y gratuita, espacio fundamental donde se consolidó la formación académica y se forjó la visión de responsabilidad social que orienta este ejercicio profesional.

A la Escuela de Ingeniería Química y a su cuerpo docente, por la orientación constante en el dominio de la disciplina, el rigor conceptual impartido durante el proceso formativo y el fomento de la integridad en la práctica de la ingeniería.

Al Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas), por la disposición de sus instalaciones e infraestructura técnica, requeridas para la ejecución y desarrollo de esta investigación.

De manera especial, a los profesores Diego Franco y Carlos García, por la supervisión, el acompañamiento técnico y la valiosa dedicación de tiempo prestada durante el desarrollo de este proyecto; aportes que fueron determinantes para el cumplimiento de los objetivos y por los cuales se expresa un profundo respeto y reconocimiento profesional.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN **12**

1. OBJETIVOS **13**

1.1 Objetivo General 13

1.2 Objetivos específicos 13

2. MARCO CONCEPTUAL **14**

2.1 Fundamentos teóricos. 14

2.2 Principios de diseño del patrón de fondo 16

2.3 Configuración geométrica del sistema BOS 19

2.4 Propiedades de la mezcla y dinámica de la fuga. 21

3. ESTADO DEL ARTE **24**

3.1 Evolución de las técnicas ópticas para la visualización de fugas gaseosas. 24

3.2 Sensibilidad de la técnica BOS 25

3.3 Limitaciones, protocolos experimentales y perspectivas futuras 26

4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO **27**

4.1 Diagrama de flujo general del proyecto 27

4.2 Diseño de experimentos y matriz operacional 27

TABLA 3 *COMPILACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN* **29**

4.3 Montaje y acondicionamiento del banco de pruebas BOS. 30

4.4 Protocolo de la ejecución experimental y captura de imágenes 31

4.4.1 Pruebas de régimen estacionario 31

4.4.2 Pruebas de régimen transitorio 33

4.5 Procesamiento digital y caracterización cualitativa de la pluma 34

5. RESULTADOS **37**

5.1 Evaluación de la detectabilidad óptica y delimitación de rangos operativos. 37

5.2 Caracterización y análisis morfológico de la pluma gaseosa (ϕ= 20%) 39

5.3 Evolución transitoria de una emisión 41

5.4 Análisis de la dinámica de flujo de la pluma y comparación con la literatura. 42

6. CONCLUSIONES. 45

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47

APÉNDICES 52

Lista de tablas.

TABLA 1 CONSTANTES DE GLADSTONE – DALE K PARA ALGUNOS GASES DE INTERÉS. **52**

TABLA 2 COMPARACIÓN DE PATRONES DE FONDO PARA BOS. **52**

TABLA 3 COMPILACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN **29**

TABLA 4 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y ÓPTICOS DE LOS COMPONENTES PUROS **54**

TABLA 5 PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO DE CAPTURA DE IMAGENES. **54**

TABLA 6 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DEL SISTEMA BOS **55**

TABLA 7 PARÁMETROS DEL PATRÓN DE FONDO. **55**

TABLA 8 SECUENCIA CRONOLÓGICA Y MATRIZ DEL DISEÑO EXPERIMENTAL **56**

TABLA 9 CONFIGURACIÓN ESTANDARIZADA PARA EL PROCESAMIENTO DE FLUJO. **58**

TABLA 10 SÍNTESIS DE LA VISUALIZACIÓN POR BOQUILLA Y FLUIDO **59**

TABLA 11 VALORES EXPERIMENTALES OBTENIDOS CON LA BOQUILLA DE 5 MM. **60**

Lista de figuras.

FIGURA 1 VISUALIZACIÓN DEL DESVÍO DE UN HAZ DE LUZ AL ATRAVESAR UNA PLUMA DE GAS. **14**

FIGURA 2 TIPO DE PATRONES DE FONDO MÁS USADOS EN LA TÉCNICA BOS. **17**

FIGURA 3 PATRONES DE FONDO CON DIFERENTES DENSIDADES ESPACIALES DE ELEMENTOS. **18**

FIGURA 4 ESQUEMA DEL BANCO DE PRUEBAS EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN **19**

FIGURA 5 CLASIFICACIÓN DE DESCARGAS GASEOSAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE RICHARDSON **23**

FIGURA 6 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DE LA METODOLOGÍA USADA. **27**

FIGURA 7 MONTAJE ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA BOS. **31**

FIGURA 8 COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS CINCO REPRESENTACIONES SINTÉTICAS DEL FLUJO **35**

FIGURA 9 ESCALA DE VISUALIZACIÓN DE PLUMA PARA GAS NATURAL Y MEZCLAS **38**

FIGURA 10 ESCALA DE VISUALIZACIÓN DE PLUMA PARA GAS NATURAL Y MEZCLAS DE HIDRÓGENO. **61**

FIGURA 11 ESCALA DE VISUALIZACIÓN DE PLUMA PARA GAS NATURAL Y MEZCLAS DE HIDRÓGENO PARA UNA BOQUILLA DE 5 MM **61**

FIGURA 12 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA TRAS EL FILTRADO PARA DIFERENTES CAUDALES **39**

FIGURA 13 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES **62**

FIGURA 14 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES EN UNA BOQUILLA DE 5 MM **63**

FIGURA 15 COMPARACIÓN DE LOS PERFILES A Y B PARA LAS COMPOSICIONES DE GAS ESTUDIADAS. **41**

FIGURA 16 EVOLUCIÓN TRANSITORIA DE UNA PLUMA DE GAS APLICANDO EL FILTRO FIRE **42**

FIGURA 17 EFECTO DE LA BOQUILLA, CAUDAL Y COMPOSICIÓN EN EL RÉGIMEN DE LIBERACIÓN **43**

FIGURA 18 EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓGENO EN EL RÉGIMEN Y ÁNGULO DE DISPERSIÓN. **44**

FIGURA 19 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 1.5 MM. **64**

FIGURA 20 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 1.5 MM Y GN. **64**

FIGURA 21 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 1.5 MM Y UNA MEZCLA DE 13.25% H_2. ..... **65**

FIGURA 22 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 0.3 MM Y UNA MEZCLA DE 28.8% H_2. ..... **66**

FIGURA 23 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 0.3 MM Y GN. **66**

FIGURA 24 ALTURA MÁXIMA (HMAX) DETECTADA PARA DIFERENTES CAUDALES CON UNA BOQUILLA DE 0.3 MM Y UNA MEZCLA DE 13.25% H_2. ..... **67**

Lista de Apéndices

Apéndice A: Tablas relacionadas 52

A**péndice B**: Figuras relacionadas 61

Resumen.

Título: Diseño de un banco de pruebas para la caracterización óptica de fugas controladas de gas mediante la técnica Background Oriented Schlieren (BOS)*

Autor: Luis Carlos Lizarazo Argüello**

Palabras clave: Background Oriented Schlieren (BOS), fugas controladas, blending de hidrógeno, patrón de fondo, caracterización óptica, flujo óptico, dinámica de fluidos.

Descripción: La presente investigación evalúa la pertinencia de la técnica *Background Oriented Schlieren* (BOS) para la caracterización óptica de fugas controladas de mezclas de gas natural e hidrógeno (hasta 30 % v/v de H_2) a baja presión, mediante el diseño, implementación y validación de un banco de pruebas experimental. La metodología integró un diseño factorial multinivel de 126 tratamientos, evaluando dos patrones de fondo aleatorios de tipo *wavelet noise* (densidades espaciales del 20% y 40%), tres composiciones de fluido, tres diámetros de descarga (0.3 mm; 1.5 mm y 5.0 mm) y siete caudales volumétricos entre 30 cm^3/min y 800 cm^3/min.

Fijando la relación geométrica óptima en $Zf = 0.5*Zb$, las capturas fotográficas se procesaron mediante algoritmos de flujo óptico (componente u) en la plataforma *Pocket Schlieren*, extrayendo métricas morfológicas (altura máxima *Hmax*, ángulo de desviación α y expansión β) e identificando los regímenes dinámicos de emisión a través de los números de Reynolds (*Re*) y Richardson (*Ri*).

Los resultados demostraron que el patrón del 20% de densidad acoplado a la boquilla de 5.0 mm ofreció el mayor rango operativo, sosteniendo visibilidad de alto contraste en todo el espectro de flujo. La incorporación de H_2 atenuó el gradiente refractivo, pero incrementó el empuje boyante, evidenciando una transición desde un régimen de flotabilidad a bajos caudales ($Ri > 1.0$; $Re < 30$; β hasta 143.85°), hacia un comportamiento colimado dominado por las fuerzas inerciales a mayor velocidad ($Ri < 0.10$; $Re > 150$; $\beta < 5.0°$, $\alpha < 2.5°$), en concordancia con modelos de la literatura.

Se concluye que la técnica BOS constituye una herramienta accesible, no intrusiva y altamente sensible (con umbrales de detección desde 30 cm^3/min) para el monitoreo de *blending*, estando restringida principalmente por el campo visual de la ventana de visualización (20 cm) que depende de las restricciones sobre las distancias entre la cámara, la fuga y el patrón ante liberaciones de alta energía.

---

* Diseño de un banco de pruebas para la caracterización óptica de fugas controladas de gas mediante la técnica Background Oriented Schlieren (BOS)*

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Director: Carlos Eduardo García Sánchez. PhD Ingeniería Química. Codirector: Diego Luis Franco Jácome. PhD Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Design of a Test Rig for the Optical Characterization of Controlled Gas Leaks Using the Background Oriented Schlieren (BOS) Technique*

Author: Luis Carlos Lizarazo Argüello**

Keywords: Background Oriented Schlieren (BOS), controlled leaks, hydrogen blending, background pattern, optical characterization, optical flow, fluid dynamics.

Description: This research evaluates the suitability of the Background Oriented Schlieren (BOS) technique for the optical characterization of controlled, low-pressure leaks of natural gas and hydrogen mixtures (up to 30% v/v H_2) through the design, implementation, and validation of an experimental test rig. The methodology integrated a multilevel factorial design of 126 treatments, evaluating two random wavelet noise background patterns (spatial densities of 20% and 40%), three fluid compositions, three discharge diameters (0.3 mm, 1.5 mm, and 5.0 mm), and seven volumetric flow rates ranging between 30 cm^3/min and 800 cm^3/min.

By setting the optimal geometric ratio at $Zf = 0.5*Zb$,, the photographic captures were processed using optical flow algorithms (*u-component*) on the Pocket Schlieren platform, extracting morphological metrics (maximum height *Hmax*, deflection angle α and expansion β) and identifying the dynamic emission regimes via Reynolds (*Re*) and Richardson (*Ri*) numbers.

The results demonstrated that the 20% density pattern coupled with the 5.0 mm nozzle provided the widest operating range, maintaining high-contrast visibility across the entire flow spectrum. The incorporation of H_2 attenuated the refractive gradient but increased buoyant force, revealing a transition from a buoyancy-driven regime at low flow rates ($Ri > 1.0$, $Re < 30$, β up to 143.85°) to a collimated behavior dominated by inertial forces at higher velocities ($Ri < 0.10$, $Re > 150$, $\beta < 5.0°$, $\alpha < 2.5°$), consistent with models reported in the literature.

It is concluded that the BOS technique constitutes an accessible, non-intrusive, and highly sensitive tool (with detection thresholds starting from 30 cm^3/min) for hydrogen blending monitoring, being primarily limited by the field of view of the visualization window (20 cm), which depends on distance constraints between the camera, the leak, and the background pattern during high-energy releases.

---

* Design of a Test Rig for the Optical Characterization of Controlled Gas Leaks Using the Background Oriented Schlieren (BOS) Technique

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Advisor: Carlos Eduardo García Sánchez, PhD Chemical Engineering. Co-advisor: Diego Luis Franco Jácome, PhD Mechanical Engineering.

Introducción

La integración del hidrógeno en la infraestructura de gas natural (*blending*) constituye una estrategia clave para la descarbonización en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2021), siendo Santander una región propicia para evaluar sus impactos operativos debido a la convergencia entre su industria gasífera y su ecosistema de investigación (DNP, 2022). No obstante, la adición de H_2 altera la densidad y difusividad de la mezcla, planteando retos en los sistemas de detección puntual y en las cámaras que funcionan bajo el principio *Optical Gas Imaging* (OGI) que requiere bandas de absorción espectral específicas de IR (Zimmerle *et al*, 2020; Sun *et al*, 2023; Shetty *et al*, 2023).

Frente a esta limitación, la técnica *Background Oriented Schlieren* (BOS) surge como una alternativa no intrusiva que revela variaciones de densidad mediante deformaciones ópticas en un patrón de fondo (Settles, 2001; Atcheson *et al*, 2009). A pesar de su potencial, persisten vacíos sobre su sensibilidad a baja presión y la influencia del diseño del patrón de fondo en los límites de detección de mezclas gaseosas (Zimmerle *et al*, 2020; Shetty *et al*, 2023).

Para abordar esta brecha, la presente investigación propone implementar un banco experimental en condiciones controladas, orientándose a resolver la siguiente pregunta: ¿Cuál es la capacidad de detección de la técnica Background Oriented Schlieren (BOS) en liberaciones controladas de mezclas de gas natural e hidrógeno con hasta 30 % v/v de H_2 a baja presión?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la pertinencia de la técnica *Background Oriented Schlieren* (BOS) para la caracterización óptica de fugas controladas de gas mediante el diseño, construcción y validación de un banco de pruebas experimental.

1.2 Objetivos específicos

1. Diseñar el banco de pruebas experimental que permita aplicar la técnica BOS en condiciones controladas, definiendo los parámetros ópticos, geométricos y de operación necesarios para la adquisición y procesamiento de imágenes.
2. Implementar el banco de pruebas con la integración de los sistemas ópticos, mecánicos y de generación de fugas, garantizando su calibración y la reproducibilidad de las condiciones experimentales.
3. Comparar los perfiles de dispersión obtenidos mediante la técnica BOS con los resultados de sensores de referencia y estudios reportados en la literatura, con el fin de establecer la sensibilidad, ventajas y limitaciones del método frente a otros enfoques de caracterización.

2. Marco conceptual

2.1 Fundamentos teóricos.

Para visualizar una fuga de gas mediante la técnica BOS es necesario comprender cómo la luz interactúa con regiones de densidad variable. Cuando un haz de luz atraviesa un medio transparente, su velocidad se reduce en función del índice de refracción del fluido, según la Ecuación 1 (Settles, 2001):

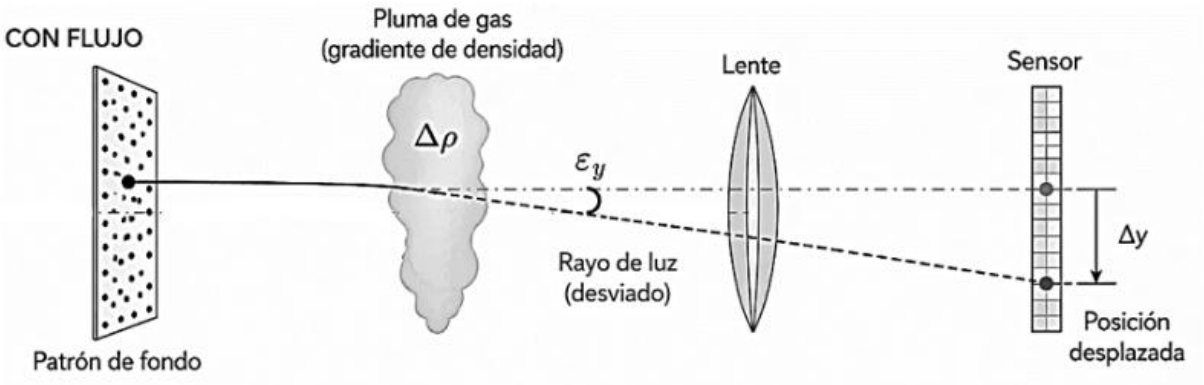
$$n = {}^{c}/_{v} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde *n,* representa el índice de refracción del medio, *c* la velocidad de la luz en el vacío y *v* la velocidad de la luz en el medio de estudio. Si dicho medio presenta gradientes de densidad, la luz se desvía de su trayectoria rectilínea al atravesar la pluma de gas, tal y como se ilustra en la Figura 1 (Settles, 2001). Este fenómeno de refracción se rige por la Ley de Snell, la cual relaciona los índices de refracción de las regiones contiguas (n_1 y n_2) con los ángulos de incidencia (θ_i) y de refracción (θ_t) medidos respecto a la normal de la interfaz, según la Ecuación 2:

$$n_1 \cdot seno\ \theta_t = n_2 \cdot seno\ \theta_i \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Figura 1

Visualización del desvío de un haz de luz al atravesar una pluma de gas.



En el caso de los gases, la relación entre el índice de refracción (n) y la densidad (ρ) es lineal y está descrita por la ecuación de Gladstone-Dale (Richard & Raffel, 2001):

$$n - 1 = K \cdot \rho \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Donde la constante de Gladstone-Dale (K) depende del tipo de gas y la longitud de onda de la luz usada. El valor de la constante K para el gas natural e hidrógeno es 2.57×10^{-4} [m3/kg] y 1.34×10^{-4} [m3/kg] respectivamente. La constante para otros gases de interés se puede consultar en el Apéndice Tabla 1.

A partir de la refracción de medio continuos descrita por la Ley de Snell (Ec.2), la curvatura local que sufre un haz de luz al atravesar un gradiente de densidad, genera un ángulo de deflexión acumulado (ε_y). Este ángulo es físicamente equivalente al ángulo neto de refracción ($\theta_y = \theta_i - \theta_t$) experimentado por la onda de luz a lo largo de su trayectoria óptica (Settles, 2001). Cuando el espesor L [m] de una pluma gaseosa es pequeño en comparación con las distancias geométricas del sistema, la ecuación diferencial de rayos se simplifica al integrar el gradiente del índice de refracción a lo largo del eje óptico z [m], relacionándose de forma directa con la constante de Gladstone-Dale (Settles, 2001):

$$\varepsilon_y = \frac{1}{n_0}\int_0^L \frac{\partial n}{\partial y} dz \approx \frac{L}{n_0}\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{L \cdot K}{n_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

Donde ε_y representa el ángulo de deflexión neto del haz luminoso en el eje y [rad], mientras que n_0 es el índice de refracción del medio circundante o medio no perturbado y L es el espesor físico de la pluma de gas a lo largo del eje óptico z. Por otro lado, el comportamiento refractivo integra el gradiente transversal del índice de refracción en el eje y, $\frac{\partial n}{\partial y}$ [m^{-1}], que se vincula directamente con el gradiente transversal de densidad del fluido en la misma dirección $\frac{\partial \rho}{\partial y}$ [kg/m^4], mediante la constante de K específica para la mezcla gaseosa [m^3/kg].

Posteriormente, este ángulo ε_y, se proyecta geométricamente sobre el sensor del dispositivo de captura como un desplazamiento aparente (Δy) de los elementos del patrón de fondo. La geometría experimental BOS vincula ambas magnitudes mediante la siguiente relación (Richard & Raffel, 2001):

$$\Delta y = M \cdot Z_f \cdot \varepsilon_y = f \cdot \left(\frac{Z_f}{Z_b - Z_f}\right) \cdot \varepsilon_y \quad \text{(Ec. 5)}$$

En esta ecuación *M*, es la magnificación óptica del sistema, *f*, es la distancia focal física de la lente, Z_f, es la distancia longitudinal entre la pluma de gas y el patrón de fondo [m] y Z_b, la distancia axial entre la lente de la cámara y el patrón de fondo [m].

2.2 Principios de diseño del patrón de fondo

En la técnica BOS, alcanzar el umbral de visualización ante fugas de gases puros o mezclas gaseosas depende de la selección del patrón de fondo. Dado que las diferencias de densidad respecto al medio circundante están sujetas a la presión y temperatura locales en el punto de descarga, los ángulos de desviación de luz pueden ser muy pequeños. Al funcionar como referencia espacial de alta frecuencia, la adecuada configuración del patrón de fondo (su contraste, densidad de elementos y distribución clara) evita ambigüedades; esto determina la sensibilidad ante el mínimo gradiente detectable y la resolución espacial del sistema (Mercier & Lacassagne, 2023).

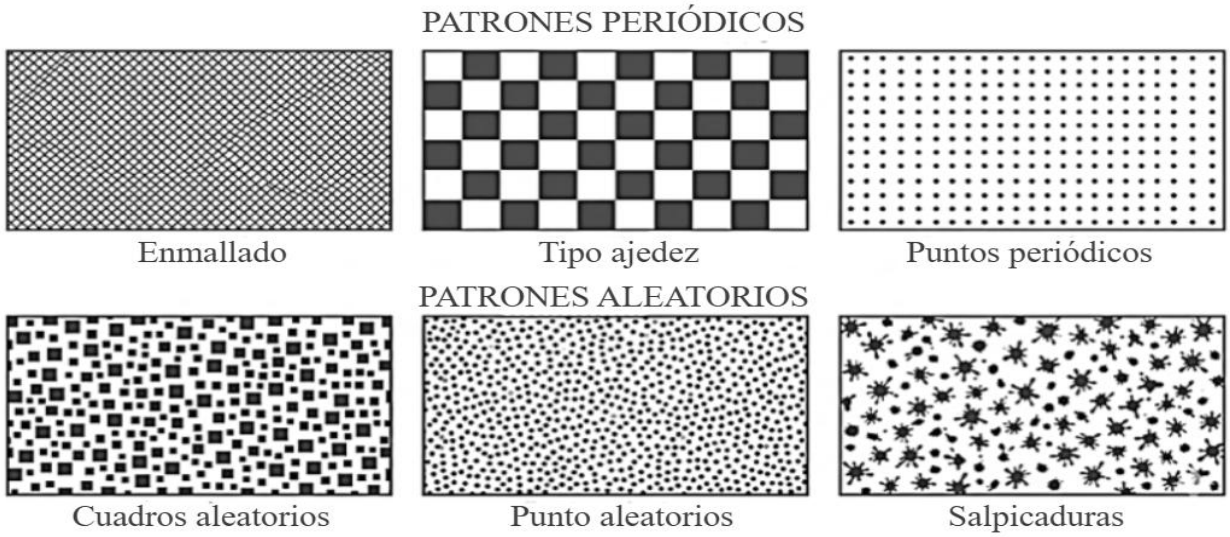
2.2.1 Tipo de patrones de fondo usados en BOS

Los patrones de fondo en BOS se clasifican en periódicos y aleatorios (Figura 2). Las geometrías periódicas (como enmallados, tramas de ajedrez o matrices de puntos alineados) destacan por su simplicidad en la alineación y su sensibilidad ante gradientes unidireccionales. No obstante, su rango dinámico está restringido por el límite de ambigüedad de fase: si el desplazamiento aparente (Δy) supera la mitad del espaciamiento entre elementos adyacentes (d/2),

el procesamiento correlativo genera correspondencias falsas (*aliasing*) (Wildeman, 2018). Por el contrario, las distribuciones aleatorias o estocásticas (puntos estocásticos, salpicaduras y *wavelet noise*) eliminan la ambigüedad periódica al ofrecer firmas de autocorrelación únicas, garantizando una detección en todas las direcciones del desplazamiento con precisión uniforme (Hartberger, 2011). En particular, *wavelet noise* es un patrón sintético caracterizado por contener información espacial acotada en múltiples escalas; esta propiedad permite conservar el contraste y el detalle espectral ante variaciones en la magnificación óptica (*M*), proporcionando alta robustez analítica en flujos con turbulencia compleja o gradientes compresibles. Una caracterización detallada con los parámetros específicos de cada patrón se incluye en el Apéndice Tabla 2.

Figura 2

Tipo de patrones de fondo más usados en la técnica BOS.



2.2.2 Parámetros de calidad del patrón de fondo

La calidad del patrón de fondo se rige por tres parámetros clave: el contraste, la densidad y la distribución. En conjunto, estos factores definen la sensibilidad y la resolución del sistema BOS.

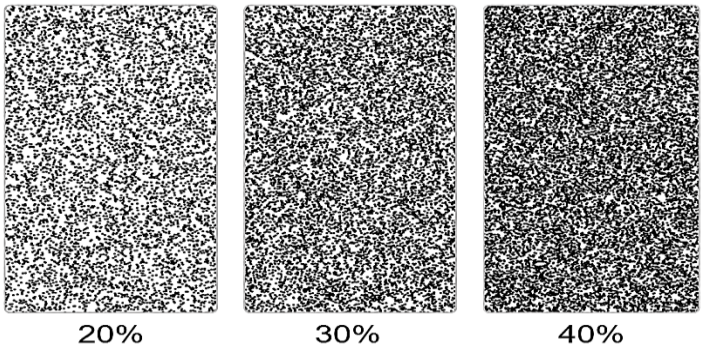
- **Contraste:** Representa la diferencia de intensidad entre los elementos del patrón (negro) y el fondo (blanco). Debe ser máximo para obtener bordes nítidos en la pluma. Esto previene la degradación por ruido digital, pues la pérdida de contraste reduce la relación señal-ruido (SNR) e impide delimitar con fidelidad las deformaciones ópticas (Yevtikhiyeva, 2009).
- **Densidad espacial de elementos (ϕ):** Corresponde al porcentaje del área total del fondo ocupada por los elementos de contraste (*Fill Area Ratio*), según la Ecuación 6 (Gojani, 2013):

$$\phi = \left(\frac{Área\ ocupada\ por\ los\ puntos}{Área\ total\ del\ fondo}\right) \times 100 \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Como se ilustra en la Figura 3, el porcentaje de área de llenado (proporción de elementos negros sobre un fondo blanco) condiciona la textura del patrón. Una densidad insuficiente deja zonas sin información; por el contrario, una densidad excesiva genera solapamiento entre elementos proyectados y amplifica el ruido ambiental. Para la visualización de gases ligeros se sugiere un rango entre 20% y 40% (Mercier & Lacassagne, 2023).

Figura 3

Patrones de fondo con diferentes densidades espaciales de elementos ϕ (fill area ratio).



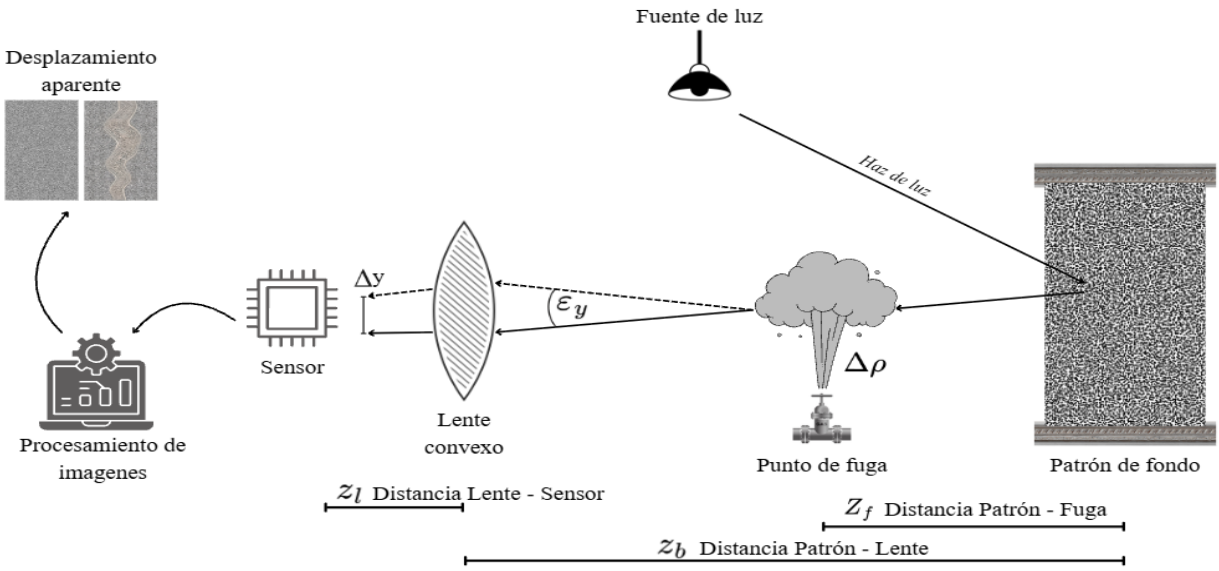
- **Distribución espacial:** Para evitar confusiones en la visualización de la pluma, la textura del patrón se optimiza mediante el método de Haralick (1973), cuya medición de contraste entre píxeles vecinos exige que la distancia entre centros cumpla d > 0.5*D (donde D es diámetro del punto en mm). Este distanciamiento asegura la homogeneidad espacial del sistema y reduce errores sistemáticos en el procesamiento (Hartberger, 2011).

2.3 Configuración geométrica del sistema BOS

La sensibilidad del método depende de la disposición espacial entre el patrón de fondo, la fuga gaseosa y el dispositivo de captura (Raffel, 2015).

Figura 4

Esquema del banco de pruebas experimental para la caracterización óptica de fugas mediante la técnica de Schlieren Orientado al Fondo (BOS).



2.3.1 Parámetros del dispositivo de captura.

El dispositivo de captura aporta cuatro parámetros clave que condicionan el diseño: la distancia focal (*f*), el tamaño físico del sensor [mm], tamaño del pixel [μm] y la resolución espacial (MP). La distancia focal determina la magnificación y el campo de visión; siendo los sensores con pixeles mayores o iguales a 1 μm los que permiten detectar mejor los desplazamientos (Venkatakrishnan & Meier, 2004). La alineación debe ser perpendicular entre el eje óptico de la lente y el centro del patrón de fondo (Settles, 2001).

2.3.2 Distancia Patrón de fondo – lente (Zb)

La determinación de la distancia Z_b garantiza que el patrón de fondo proyecte una resolución adecuada sobre el sensor de la cámara. A partir de la ecuación de lentes delgadas y la magnificación del sistema (*M*) (Richard & Raffel, 2001).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_l} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

$$M = \frac{P_s}{P_r} = \frac{Z_l}{Z_b} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Donde Z_l es la distancia entre la lente y el sensor [m], mientras que P_s y P_r, representan el tamaño del elemento del patrón en el sensor y en el plano impreso, respectivamente.

$$Z_b = f \cdot \left(1 + \frac{1}{M}\right) \quad \text{(Ec. 9)}$$

Esta relación despeja de forma directa Z_b una vez fijada la distancia focal *f* y seleccionada la magnificación *M* requerida por la resolución del sensor y la escala del patrón impreso.

2.3.3 Distancia Patrón – fuga (Zf) y la sensibilidad del sistema.

La ubicación de la pluma de gas entre el patrón de fondo y la cámara rige la sensibilidad del sistema (Hargather & Settles, 2010; Zhou *et al.,* 2025). El desplazamiento aparente (Δy) proyectado en el sensor se modela como (Raffel, 2015):

$$\Delta y = f \cdot \left(\frac{Z_f}{Z_b - f}\right) \cdot \varepsilon_y \quad \text{(Ec. 10)}$$

Como se deduce de la relación geométrica, la sensibilidad aumenta proporcionalmente con Z_f. Sin embargo, aproximar excesivamente la perturbación al objetivo degrada la nitidez por profundidad de campo. Para maximizar el desplazamiento registrado sin inducir un desenfoque crítico, la condición de máxima sensibilidad para gradientes débiles se logra en la posición intermedia $Z_f = 0.50 \cdot Z_b$ (Hargather & Settles, 2010; Zhou *et al.*, 2025). Bajo esta configuración, la detección es efectiva cuando el desplazamiento alcanza o supera la resolución del algoritmo ($\Delta y \geq 1\ px$) (Settles, 2001; Sun *et al*, 2023).

2.4 Propiedades de la mezcla y dinámica de la fuga.

2.4.1 Comportamiento fisicoquímico de la mezcla GN/H_2

La caracterización óptica de una liberación gaseosa mediante BOS depende de las propiedades termodinámicas del gas y de las fuerzas aerodinámicas y de flotabilidad que gobiernan

su interacción con el medio circundante. En condiciones cercanas a la atmosférica, la mezcla de gas natural e hidrogeno (GN/H_2) el sistema se puede modelar considerando un comportamiento de gas ideal (Blanco Miranda, 2010). Relacionando la densidad de la mezcla (ρ_{mix}) en función de la masa molar promedio (M_{mix}), la presión (P) y la temperatura (T) según la siguiente ecuación:

$$\rho_{mix} = \frac{P * M_{mix}}{R * T} \quad \text{(Ec. 11)}$$

Debido a que el hidrógeno y el gas natural son especies notablemente más ligeras que el aire (con densidades de 0.09 kg/m^3 y 0.716 kg/m^3 en condiciones estándar, respectivamente), la mezcla exhibe un comportamiento boyante ($\rho_{mix} < \rho_{aire}$) (ADMLC, 2021). Esta diferencia de densidad induce una fuerza de empuje ascendente que no solo condiciona la dinámica de la pluma, sino que genera un gradiente refractivo necesario para el contraste óptico del sistema BOS. De acuerdo con la relación de mezclas gaseosas, el coeficiente refractivo efectivo de la mezcla (K_{mix}) se obtiene a través de la fracción másica (y_i) y la constante K_i de cada una de las especies (U.S. Department of Commerce, 1988):

$$K_{mix} = \sum (K_i * y_i) \quad \text{(Ec. 12)}$$

Donde el gradiente local de índice de refracción ($\nabla n = K_{mix} * \nabla \rho$), originado en la interfaz entre la mezcla y el medio circundante, es la magnitud física responsable de desviar los rayos luminosos y proyectar un desplazamiento aparente (Δy) sobre el sensor del dispositivo de captura (Settles, 2001; Richard & Raffel, 2001).

2.4.2 Dinámica de fuerzas: inercia y flotabilidad de la liberación.

Comprender la dinámica de un penacho gaseoso requiere evaluar tanto la interacción de fuerzas en la atmósfera como la naturaleza del flujo en la descarga. Su morfología espacial y comportamiento cinemático responden al balance entre la energía inercial de salida, las fuerzas

viscosas y el empuje boyante generado por el gradiente de densidad con el medio (Kundu & Cohen, 2002). Específicamente en el orificio de salida (de diámetro d_h). El Número de Richardson (*Ri*) evalúa si la estructura de la fuga está gobernada por la inercia del chorro o por el ascenso boyante, al relacionar las fuerzas de flotabilidad e inerciales (Kundu & Cohen, 2002):

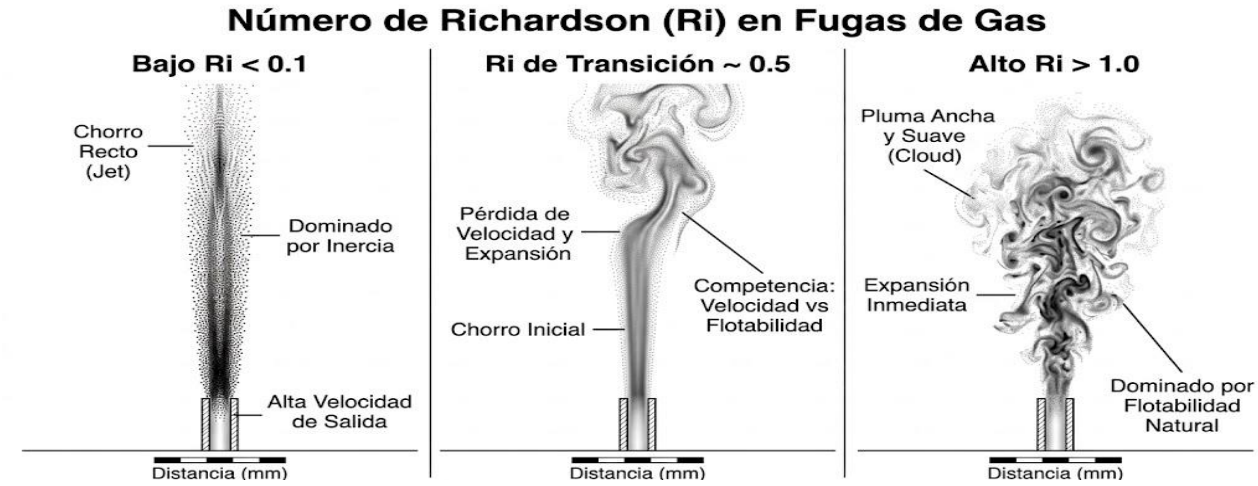
$$Ri = \frac{g * (\rho_{aire} - \rho_{mix}) * dh}{\rho_{aire} * u^2} \quad \text{(Ec. 13)}$$

El número de *Ri* establece la transición entre dos regímenes hidrodinámicos principales de la fuga (Kundu & Cohen, 2002):

- ***Ri < 0.10*** **(Dominio inercial/chorro o Jet):** Las fuerzas inerciales prevalecen sobre la flotabilidad. La alta velocidad cinemática a la salida de la boquilla domina la trayectoria inicial del gas, produciendo plumas colimadas de baja apertura lateral (Kundu & Cohen, 2002).
- ***Ri > 1.00*** **(Dominio de flotabilidad/pluma boyante):** Las fuerzas de empuje natural superan el impulso cinético inicial. La aceleración por flotabilidad gobierna el movimiento del gas, induciendo la formación de bordes periféricos y mezcla convectiva con el aire (Kundu & Cohen, 2002).

Figura 5

Clasificación de descargas gaseosas en función del Número de Richardson (Ri).



Nota: Adaptado de Chen & Rodi, (1980). Vertical Turbulent Buoyant Jets. Pergamon Press.

3. Estado del arte

3.1 Evolución de las técnicas ópticas para la visualización de fugas gaseosas.

En el marco de la transición energética actual, el análisis de dispersión gaseosa exige tecnologías capaces de superar las limitaciones de la inspección convencional; en este escenario, la técnica *Background Oriented Schlieren* (BOS) cobra singular relevancia al permitir la detección de fugas de hidrógeno (H_2), invisibles a los sistemas infrarrojos tradicionales debido a la inactividad de su molécula diatómica en dicho espectro (Sun *et al*, 2023).

Históricamente, el estudio de fugas ha dependido de métodos ópticos para revelar variaciones de densidad refractiva mediante la relación de Gladstone-Dale (Settles, 2001). Sin embargo, la estrioscopía tradicional de Toepler y los montajes clásicos de *Schlieren* estuvieron restringidos por décadas al entorno de laboratorio debido a la rigurosa alineación y al elevado costo de sus espejos de alta calidad (Settles, 2001).

La irrupción de BOS transformó este paradigma al reemplazar los complejos componentes ópticos por un patrón de fondo y una cámara digital convencional (Richard & Raffel, 2001). Al

cuantificar los desplazamientos aparentes en el fondo causados por los gradientes de densidad, esta técnica descentralizó la visualización de flujos hacia aplicaciones de campo abierto, evolucionando hoy hacia reconstrucciones plenópticas volumétricas y plataformas de captura portátiles en teléfonos inteligentes (Rabha *et al.*, 2025; Atcheson *et al.*, 2009).

3.2 Sensibilidad de la técnica BOS

La inyección de hasta un 30% v/v de H_2 en redes de gas natural (*blending*) altera significativamente la densidad, flotabilidad y difusividad del fluido (Ministerio de Minas y Energía, 2021), lo que exige adaptar los métodos de detección óptica a estas nuevas propiedades. Dado que la sensibilidad del sistema BOS y el mínimo gradiente detectable están determinados directamente por la calidad del patrón de fondo (Raffel, 2015), su diseño resulta crítico. No obstante, aunque se ha demostrado la eficacia de BOS en la visualización de gases puros como helio y metano (Meyers *et al*., 2022), persiste la falta de protocolos específicos para caracterizar fugas en mezclas gaseosas (Topolski *et al*., 2022).

Para optimizar la respuesta óptica ante gases ligeros, Sun *et al*. (2023) establecieron que la detección eficiente de fugas de hidrógeno requiere vincular un diámetro de punto real de 1.00 a 3.00 mm con un tamaño de partícula en el sensor de 3 a 5 px (cámaras de alta velocidad) o 10 a 15 px (*smartphones*). Asimismo, la densidad del patrón, expresada como porcentaje del área de llenado, debe equilibrar el contraste y prevenir el solapamiento de puntos ante desplazamientos aparentes (Raffel, 2015; Mercier & Lacassagne, 2023). Aunque valores entre el 19.0% y el 30.0% han demostrado resultados prometedores en chorros de helio a alta presión, el impacto de esta variable en la detección de mezclas de GN/H_2 a baja presión permanece aún sin documentar.

3.3 Limitaciones, protocolos experimentales y perspectivas futuras.

Establecer criterios operativos para la seguridad industrial en la transición energética requiere abordar la caracterización óptica de mezclas de gas natural e hidrógeno (GN/H_2 con hasta 30.0 % de H_2). Aunque la inteligencia artificial proyecta la automatización y detección autónoma de fugas mediante la técnica BOS (Sun *et al*., 2023; Wang *et al*., 2026), su consolidación exige superar la falta de protocolos experimentales reproducibles y disponer de bancos de pruebas rigurosos para generar datos confiables y validar algoritmos (Zimmerle *et al*., 2020).

En términos ópticos, la calibración geométrica está bien establecida: la sensibilidad aumenta con la distancia entre la liberación de gas y el fondo (limitada únicamente por el desenfoque), siendo óptimo posicionar la descarga en el punto medio entre el patrón y el lente para maximizar la deflexión refractiva (Hargather & Settles, 2010; Raffel, 2015). Sin embargo, estos principios se han validado primordialmente en gases puros. En mezclas ligeras a baja presión, los gradientes de densidad son débiles, lo que exige una mayor sensibilidad para distinguir la pluma del ruido térmico o ambiental (Zimmerle *et al*., 2020), una interacción aún no caracterizada en entornos controlados.

Para resolver esta brecha metodológica, la presente investigación acopla experimentalmente el montaje y la parametrización de la detección óptica BOS con la infraestructura de generación y control de fugas provista por Laboratorio del Estudio de Mezclas de Gas Natural e Hidrógeno de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, con el propósito de evaluar la influencia de la composición del gas y la densidad del patrón de fondo sobre el caudal mínimo de gas detectable.

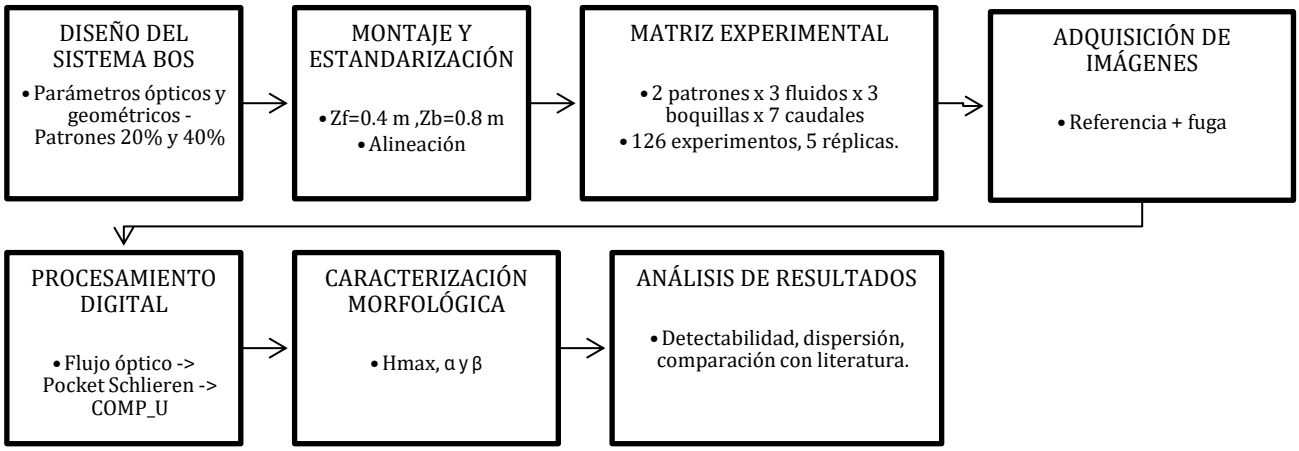
4. Metodología del proyecto

4.1 Diagrama de flujo general del proyecto

La caracterización óptica de la pluma en fugas gaseosas mediante BOS abarca cinco fases secuenciales: desde los fundamentos físico-ópticos hasta el posprocesamiento cuantitativo y morfológico.

Figura 6

Diagrama de flujo general de la metodología usada.



4.2 Diseño de experimentos y matriz operacional

Para evaluar la visibilidad y morfología de la pluma en fugas gaseosas, la caracterización óptica mediante BOS adopta un diseño factorial multinivel estructurado en cuatro factores de control (ópticos, geométricos y dinámicos):

1. **Densidad espacial del patrón de fondo (ϕ):** Se evaluaron dos niveles de área de llenado (*Fill Area Ratio*) de 20 % y 40 %, constituidos por elementos aleatorios de tipo *wavelet noise* con una longitud de lado promedio de 1.80 mm. Los patrones se

generaron en MATLAB mediante un algoritmo estructurado bajo el análisis de textura de Haralick para garantizar su homogeneidad espacial, e impresos en papel opalina formato A1 (594 x 841 mm) a una resolución de 300 DPI.

2. **Composición de la mezcla gaseosa:** Se definieron 3 niveles de composición para representar escenarios clave de inyección de hidrógeno en redes de gas natural (*blending*) y gas de referencia.
    - 100% v/v gas natural domiciliario (GN) usado como referencia.
    - Mezcla de 13.25% v/v de hidrógeno (H_2) y 86.75% v/v (GN).
    - Mezcla de 28.80% v/v de H_2 y 71.20% v/v de GN.
3. **Diámetro interno de descarga de la boquilla (d_h)**: Se seleccionaron 3 niveles de diámetro nominal de salida (0.30 mm, 1.50 mm y 5.00 mm), permitiendo variar la velocidad de inyección y abarcar regímenes hidrodinámicos desde chorros inerciales hasta plumas boyantes.
4. **Caudal de inyección de referencia (Q_{ref})**: Se seleccionaron 7 magnitudes de caudal volumétrico medidos en condiciones estándar: 30, 60, 100, 150, 250, 500 y 800 cm^3/min.

La combinación de los factores define una matriz factorial de 126 tratamientos (2 × 3 × 3 × 7). Con el fin de garantizar la reproducibilidad estadística y mitigar variaciones por ruido térmico o ambiental, se capturaron 5 réplicas fotográficas consecutivas por tratamiento a intervalos de un segundo, tras una preestabilización de 3 segundos. Asimismo, se registró una imagen de referencia sin flujo (Q = 0 cm^3/min) por cada una de las 18 combinaciones de patrón, fluido y boquilla, consolidando un total de 630 fotografías en condiciones de flujo y 126 imágenes de referencia. La visibilidad de plumas gaseosas en técnicas ópticas depende del contraste con el

fondo, la definición de los límites y la dinámica multitemporal de la fuga (Zhang & Xu, 2026). Bajo este principio, la detectabilidad se parametrizó en un índice ordinal de respuesta Q usado en termografía óptica: valor 2 (alta detectabilidad: pluma prominente, bordes nítidos y alto contraste), valor 1 (visibilidad marginal: pluma sutil, bordes difusos y bajo contraste) y valor 0 (baja visibilidad: sin respuesta o contraste no detectable en la fotografía) (Zhang & Xu, 2026). A partir de esta categorización, el procesamiento digital del software permitió extraer cuantitativamente las principales variables de respuesta.

- **Altura máxima de visibilidad de la pluma (***Hmax* [cm]): Distancia vertical máxima identificada por la perturbación óptica dentro del campo de visión establecido en el montaje (de 20.0 cm).
- **Ángulo de desviación (**α [grad]): Inclinación del eje central de la fuga con respecto a la normal de descarga (eje vertical de la boquilla).
- **Ángulo de expansión o apertura (**β [grad]): Ángulo delimitado por las tangentes que envuelven el contorno de la pluma.
- **Umbrales de detección (**Q_{min} *y* Q_{max}**)**: Caudal mínimo detectable y caudal límite superior donde la turbulencia o difusión inhibe la caracterización del contorno.

En la Tabla 3 se sintetiza la matriz operacional completa del diseño de experimentos.

Tabla 3

Compilación del diseño experimental de la investigación

Variable	Niveles	Valores / Descripciones	Tipo de Variable
Densidad del patrón de fondol (ϕ)	2	20 %, 40 % (*Fill Area Ratio*)	Discreta / Independiente

Concentración de H_2 en la mezcla GN/H_2	3	13.25 % H_2 28.80 % H_2 100 % GN	Cuantitativa / Independiente
Diámetro de boquilla (d_h)	3	• 0.3 mm • 1.5 mm • 5.0 mm	Discreta / Independiente
Caudal de emisión (Q_{ref})	7	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	Continua / Independiente

Bajo las condiciones ambientales históricas locales de operación (24 °C y 0.89 atm; IDEAM, 2020), el marco fisicoquímico y óptico del sistema se estableció con densidades de 1.057 kg/m³ (aire), 0.585 kg/m³ (gas natural) y 0.074 kg/m³ (hidrógeno), junto con sus correspondientes constantes de Gladstone-Dale de 2.57×10^{-4} m³/kg (GN) y 1.34×10^{-4} m³/kg (H_2). La compilación extendida de propiedades (masas molares y viscosidades dinámicas) se presenta en la Tabla 4 de Apéndices.

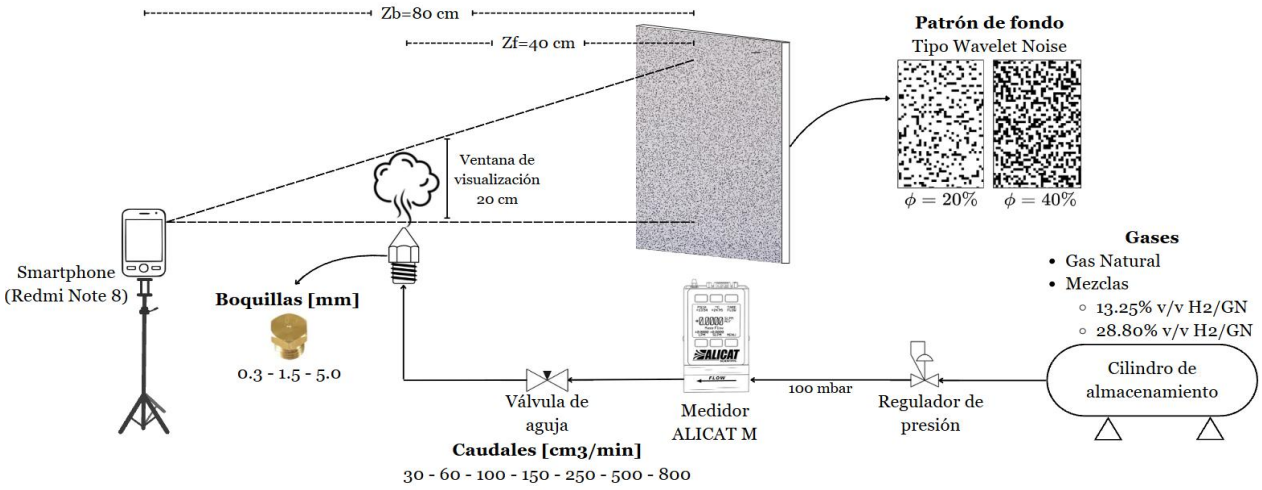
4.3 Montaje y acondicionamiento del banco de pruebas BOS.

El montaje experimental (Figura 7) se contempló el diseño, acondicionamiento y evaluación del sistema óptico BOS, integrado sobre la infraestructura de presurización, almacenamiento y suministro de mezclas de la Corporación del CDT de Gas. Sobre la estructura base se fijó verticalmente un patrón aleatorio de tipo *wavelet noise* (elementos de 1.80 mm, impreso en formato A1 a 300 DPI) a 1.0 m del suelo. La boquilla utilizada para la de emisión controlada de gas fue alineada en posición vertical mediante su montaje en un riel metálico, de tal manera que permitiera orientar la liberación de gas hacia el área de interés del patrón. Este elemento fue ubicado a una distancia de $Z_f = 0.4\,m$ del fondo, en cuanto que el dispositivo de captura de imagenes (*Xiaomi Redmi Note* 8, f = 4.6 mm, tamaño pixel 0.7 μm/pixel), fue ubicado a una distancia $Z_b = 0.8\,m$ con respecto al patrón. Esta relación de posición axial ($Z_f = 0.5 \cdot Z_b$)

cumple el criterio de sensibilidad óptima propuesto por Hargather & Settles (2010) para maximizar el desplazamiento aparente (Δy). La adquisición fotográfica se alineó de forma perpendicular al patrón, fijando el enfoque manual y desactivando los automatismos del sensor (autoexposición y filtros) para evitar funciones dinámicas de la cámara. La emisión controlada del fluido se reguló mediante una válvula de aguja micrométrica acoplada a un medidor de flujo másico ALICAT *Scientific* MQ. La disposición general del montaje, la boquilla de descarga y el soporte mecánico se ilustran en la Figura 6. Parámetros complementarios del sensor, la geometría extendida y el patrón se compilan en las Tablas 5, 6 y 7 de los Apéndices.

Figura 7

Montaje esquemático del sistema BOS.



4.4 Protocolo de la ejecución experimental y captura de imágenes

4.4.1 Pruebas de régimen estacionario

El plan experimental se ejecutó mediante un esquema anidado e iterativo para recorrer la matriz factorial completa, constituida por 2 patrones de fondo, 3 fluidos, 3 boquillas de descarga

y 7 caudales volumétricos (ver Tabla 3). Con el propósito de mitigar interferencias externas y garantizar la reproducibilidad, cada sesión inició con el ajuste de la iluminación en recinto, mediante el uso de iluminación artificial constante y evitando la presencia de sombras parasitarias, fluctuaciones de luz y corrientes de aire. Asimismo, en el dispositivo de captura se fijó el enfoque manual sobre la textura del patrón y se bloquearon la exposición y el balance de blancos, de esta manera se previenen los reajustes automáticos entre tomas, asegurando la constancia óptica y cromática entre las imágenes de referencia de pruebas.

Con el entorno estabilizado, se aplicó la siguiente secuencia operativa:

1. **Registro de referencia (**$Q = 0$ [cm^3/min]): Se capturó una fotografía inicial del fondo inalterado previo a la liberación del gas, actuando como imagen base sin perturbación para el posterior procesamiento del flujo óptico.
2. **Ajuste de flujo y estabilización fluidodinámica:** Se abrió gradualmente la válvula de aguja micrométrica hasta alcanzar el caudal objetivo en el medidor de flujo másico ALICAT M, registrando el valor real en la bitácora. Tras fijar la liberación, se otorgó un tiempo de estabilización de 3 segundos para permitir el desarrollo fluidodinámico completo de la pluma y la estabilización de los gradientes del medio.
3. **Adquisición fotográfica:** Se realizó el registro de 5 fotografías consecutivas con intervalos de 3 a 5 segundos entre tomas. Para ello se utilizó un obturador remoto *Bluetooth* para evitar vibraciones mecánicas o desalineaciones en el trípode. Se decidió tomar 5 fotos, de tal manera, que se pudiese seleccionar la foto que suministrara los mejores contrastes y menores inestabilidades fluidodinámicas asociadas a los flujos convectivos en el área.

4. **Cierre y purga de seguridad:** Al finalizar el registro fotográfico, se cerró completamente la válvula de aguja y se ventiló el recinto (apertura de accesos) para dispersar el gas acumulado, atendiendo a las normas de seguridad industrial antes de proceder con el siguiente ciclo.

Todas las combinaciones y niveles de la matriz se recorrieron mediante la repetición ordenada de esta secuencia base (para mayor información véase en la Tabla 8):

- **Variación del caudal (Q_{ref}):** Para cada boquilla instalada el ciclo se ejecutó sucesivamente en los 7 niveles definidos: 30, 60, 100, 150, 250, 500 y cm^3/min.
- **Variación de boquilla (d_h):** Completada la serie de caudales, se reemplazó secuencialmente la boquilla de descarga, evaluando los diámetros de 0.3 mm, 1.5 mm y 5.0 mm.
- **Variación del patrón de fondo (ϕ):** La matriz de boquillas y caudales se repitió íntegramente para cada patrón de fondo. Se ejecutó primero el patrón de mayor densidad (ϕ = 40%) y se replicó posteriormente bajo las mismas condiciones con el patrón de menor densidad (ϕ = 20%).
- **Variación de la mezcla:** El procedimiento global se ejecutó en su totalidad para cada mezcla: iniciando con la mezcla GN/H_2 con 13.25%, seguido por la mezcla al 28.80% de H_2 y finalizando con el gas natural (gas de referencia).

4.4.2 Pruebas de régimen transitorio

Como complemento al análisis en estado estacionario de la pluma, se evaluó su evolución transitoria mediante el registro de una ráfaga extendida de 50 imágenes consecutivas a un intervalo de 0.2 segundos. Estas pruebas se realizaron únicamente bajo las siguientes condiciones

experimentales: $d_h = 5\ mm$, ϕ = 40% y mezcla GN/H_2 con 13.25% de H2. Este ensayo se realizó, dado que la plataforma *Pocket Schlieren* en su configuración de video, no logró detectar la emisión de la pluma bajo ninguna de las condiciones experimentales. Con este registro, se busca evaluar el potencial de esta aplicación en la visualización continua de la liberación, dispersión y dinámica de fluidos con bajos índices de refracción. Esta condición se presenta debido a que la cámara de video posee menor resolución (2 MP) que las fotos (hasta 48 MP).

4.5 Procesamiento digital y caracterización cualitativa de la pluma

5.5.1 Procesamiento de imágenes mediante flujo óptico en Pocket Schlieren

El procesamiento digital de imágenes se ejecutó en la plataforma *Pocket Schlieren* (Rabha *et al.*, 2025), calculando el campo de desplazamientos aparentes entre la imagen de referencia y las cinco capturas bajo descarga mediante algoritmos de flujo óptico. Para mejorar la relación señal-ruido (SNR) y la sensibilidad del sistema, se estandarizó una configuración numérica con 6 niveles en la pirámide gaussiana, una ventana de integración de 25 px y 8 iteraciones por capa (más detalles de los parámetros de escalamiento vectorial en la Tabla 9 del Apéndice).

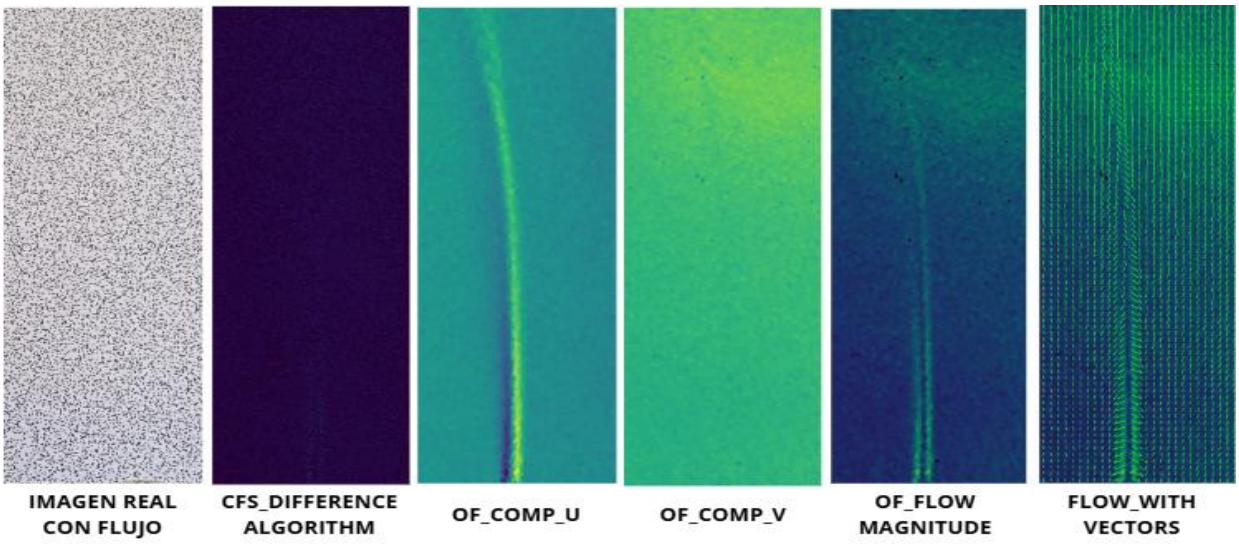
El algoritmo de flujo óptico permitió evaluar el campo de deformación mediante cinco representaciones sintéticas: 1) sustracción directa de intensidad (*CFS_DIFFERENCE_ALGORITHM*), que determina variaciones cromáticas locales entre cuadros; 2) componente horizontal (*OF_COMP_U*, u_y), que aísla los desplazamientos ortogonales al eje de descarga; 3) componente vertical (*OF_COMP_V*, v_x), que registra la deformación paralela a la dirección del flujo; 4) magnitud escalar total (*OF_FLOW_MAGNITUDE*), correspondiente a la norma euclídea del vector de desplazamiento ($|u_{xy}| = \sqrt{{u_y}^2 + {v_x}^2}$) y 5) mapa de magnitud

con vectores (*FLOW_WITH_VECTORS*), que superpone la magnitud escalar con el campo vectorial de velocidad local.

Tras la evaluación comparativa (ver Figura 8), se seleccionó la componente horizontal u_x (*OF_COMP_U*) como el filtro óptimo para la caracterización morfológica, debido a que aísla los desplazamientos perpendiculares al eje de descarga, mitiga el ruido de fondo vertical y resalta con nitidez las fronteras del gradiente de refractividad de la pluma.

Figura 8

Comparación cualitativa de las cinco representaciones sintéticas del flujo óptico en Pocket Schlieren para las condiciones de 20% de densidad de patrón, boquilla de 5 mm, 751 cm^3/min y una mezcla de 13.25% de H_2.



4.5.2 Selección de réplica y post-procesamiento morfológico.

De las cinco réplicas fotográficas procesadas por tratamiento, se seleccionó una réplica representativa para el análisis cuantitativo, priorizando la menor distorsión óptica y la mayor nitidez de la pluma de gas. La imagen filtrada en formato *OF_COMP_U* se importó en el *software Photopea*, donde se aplicó un ajuste de contraste (+70) y brillo local (-40). Para acentuar la frontera

de la descarga con precisión, se combinó el filtro «detectar bordes» con el complemento *Krea AI*, definiendo los límites perimetrales de la perturbación para generar el trazo punteado del contorno externo del fluido.

4.5.3 Caracterización morfológica y métricas mediante GeoGebra.

Las imágenes con el contorno punteado se exportaron a *GeoGebra Clásico* para realizar la extracción objetiva de las variables morfológicas:

1. **Escalado geométrico y altura (**H_{max}*, [cm]*$)$**:** Teniendo en cuenta que la ventana de visualización del ensayo corresponde a 20 cm en la dirección vertical, las imágenes capturadas fueron alineadas con un plano cartesiano donde el borde inferior izquierdo de la imagen representa el origen (0,0) y se escala el eje vertical (y), de forma que la marca superior de la imagen corresponda a 20 unidades manteniendo la relación original de la imagen. Se ubicó un marcador sobre la cúspide de la pluma previamente punteada y se configuró la etiqueta con el parámetro *% y*, obteniendo el valor numérico exacto de la altura máxima alcanzada detectada (H_{max}).
2. **Ángulo de desviación (**α*, [grad]*$)$**:** Se trazó una recta normal vertical a la salida de la boquilla (*eje y*) y una recta que une el centro de la descarga con el centroide del cenit de la pluma. El ángulo formado entre ambas rectas define la inclinación del eje central de la fuga respecto a la normal de descarga.
3. **Ángulo de apertura o dispersión (**β*, [grad]*$)$**:** Se trazaron dos rectas tangentes que envuelven el promedio de los bordes laterales del contorno punteado desde su zona de expansión. Dado que la dispersión no siempre inicia en la salida sino a cierta altura de desarrollo, las líneas se ajustaron a partir del punto donde se identifica el

ensanchamiento lateral de la pluma. El ángulo formado entre las dos rectas define el ángulo de dispersión de la pluma (β).

Para evaluar la evolución espacio-temporal de la pluma, la secuencia de 50 imágenes correspondiente a la condición de máxima respuesta óptica ($d_h = 5\ mm$, ϕ = 40% y con el fluido A) se importó al software libre de procesamiento de imágenes *ImageJ* como un *stack* de imágenes. Mediante el módulo *image calculator*, se ejecutó la operación de sustracción (*difference*), entre el primer cuadro de referencia y la totalidad del *stack*. Sobre la secuencia resultante, se aplicaron cinco tablas de consulta de color (*Lookup Tables*, LUT: *Black & White*, *Blue Orange*, *Cyan*, *Fire* y *Gem*), renderizando animaciones a 3 FPS para la evaluación cualitativa del desarrollo espacio-temporal, la estabilidad del núcleo y la dispersión del fluido liberado.

5. Resultados

5.1 Evaluación de la detectabilidad óptica y delimitación de rangos operativos.

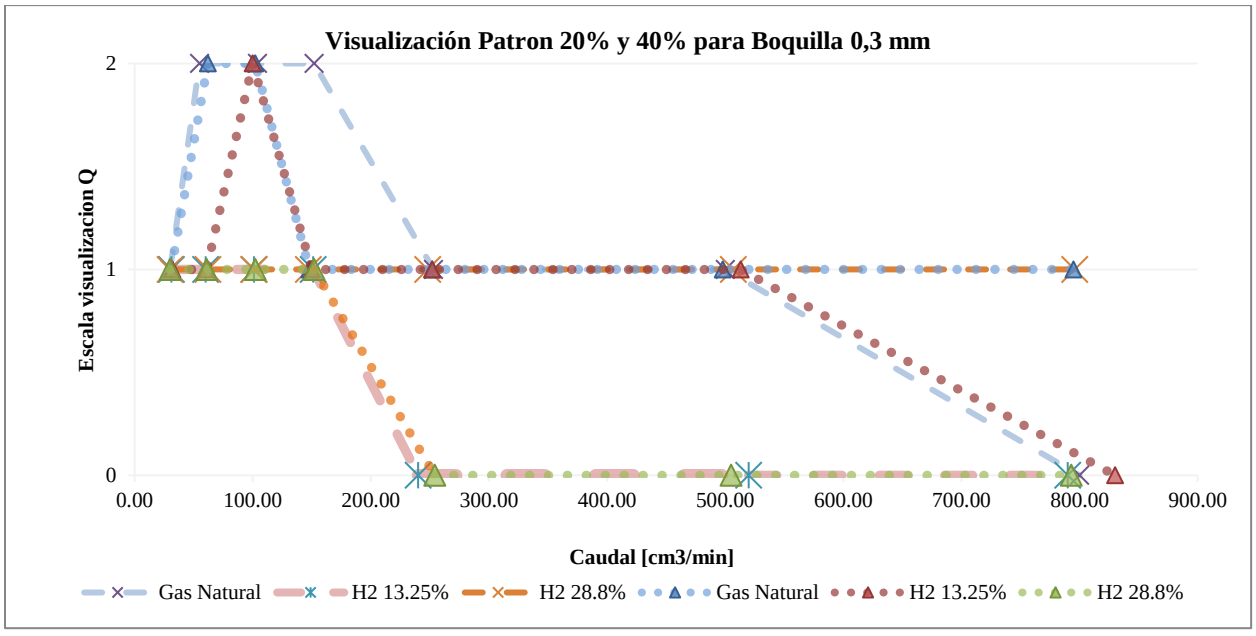
La detectabilidad óptica de la pluma de gas se categorizó mediante un índice ordinal de respuesta Q de Zhang & Xu del 2026. El diámetro de la boquilla de descarga (d_h) actuó como la variable crítica que gobierna la velocidad de salida (u), condicionando el régimen de flujo y la distribución espacial de los gradientes de refractividad.

Para la boquilla de menor diámetro ($d_h = 0.3\ mm$), la alta velocidad inercial incrementó la cizalladura con el aire circundante, favoreciendo la disipación turbulenta de la pluma, perdiendo rápidamente capacidad de observación, según se visualiza. En el gas natural (GN), el patrón ϕ = 40% alcanzó un alto contraste y bordes nítidos entre 55 y 152 cm^3/min y sus bordes a medida que aumenta el caudal pierden definición perdiendo la señal a 800 cm^3/min, caso contrario que con ϕ =20%, cuya detectabilidad abarcó todo el rango. La incorporación de H_2 puede reducir la

detectabilidad al disminuir el índice de refracción de la mezcla. Con 13.25% de H_2, ϕ = 20% mantuvo detección mínima hasta 513 cm^3/min, mientras ϕ = 40% perdió la señal a 240 cm^3/min. Para 28.80% de H_2, ningún patrón alcanzó una alta detectabilidad; ϕ = 40% mantuvo bordes difusos y bajo contraste entre 30 y 796 cm^3/min, mientras ϕ = 20% tuvo ausencia de respuesta óptica desde 254 cm^3/min. La Figura 9 resume gráficamente este comportamiento. La compilación de los rangos óptimos y umbrales de visibilidad por combinación de fluido y boquilla se presenta en la Tabla 10.

FIGURA 9

Escala de visualización de pluma para gas natural y mezclas de hidrógeno para una boquilla de 0.3 mm en patrones de 20% (estrellas-línea segmentada) y 40% (triángulos – línea punteada) de densidad.



El incremento del diámetro a 1.5 mm redujo la energía cinética inicial a igual caudal, produciendo plumas de menor turbulencia y bordes más definidos. Para GN y la mezcla 13.25% de H_2, el patrón ϕ = 20%, mostró mayor estabilidad, alcanzando bordes nítidos y definidos desde

62 y 59 cm^3/min, respectivamente y manteniéndola por encima de 730 cm^3/min. Con 28.80% H_2, ϕ = 40% se anticipó en la detección con una visualización definida hasta 104 cm^3/min, mientras ϕ = 20% alcanzó el límite superior de visualización hasta 151 cm^3/min, aunque extendió su umbral máximo hasta 832 cm^3/min. (véase en la Figura 10).

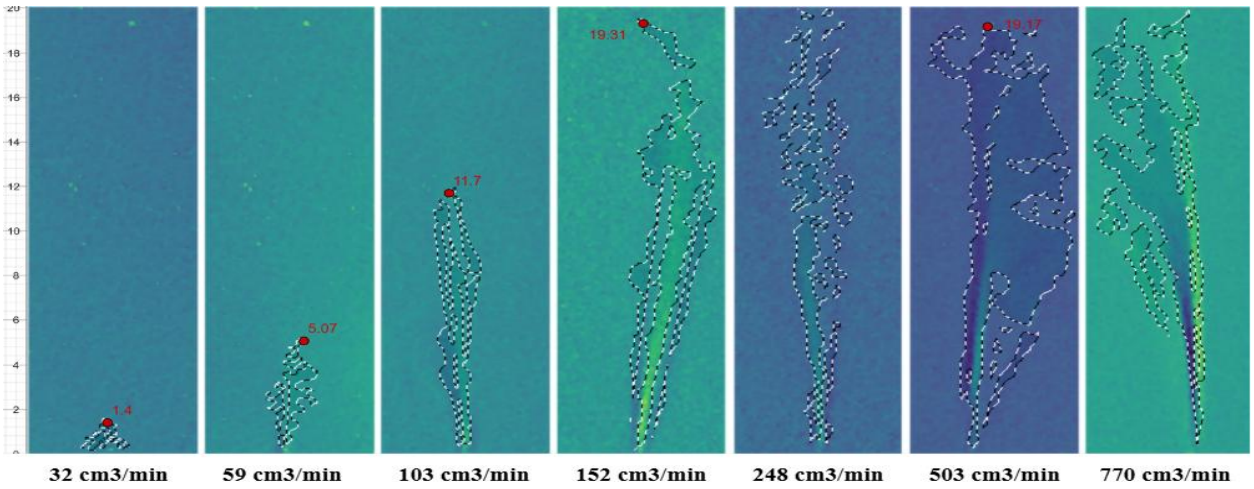
La boquilla de 5.0 mm registró el mejor desempeño global. Las bajas velocidades de descarga pueden favorecer el dominio de la flotabilidad y la conservación de los gradientes de densidad. Para el gas natural, el patrón ϕ = 20%, alcanzó la alta detectabilidad desde 60 cm^3/min hasta 803 cm^3/min. En la mezcla de 13.25% H_2 ambos patrones sostuvieron un índice Q=2 en la totalidad del rango evaluado. Para la mezcla de 28.80%, Q=2 inició en 152 cm^3/min (ϕ = 20%) y con 155 cm^3/min (ϕ = 40%) alcanzando un límite superior en 806 cm^3/min, este comportamiento se puede detallar en la Figura 11.

5.2 Caracterización y análisis morfológico de la pluma gaseosa (ϕ= 20%)

El análisis geométrico de la pluma se basó en los datos obtenidos con el patrón (ϕ = 20%), seleccionado por su versatilidad para mitigar ambigüedades en el procesamiento del flujo óptico de mezclas ligeras y su amplio rango de detecciones de alta definición. La medición angular se restringió a la boquilla de 5.0 mm, debido a que las boquillas de 0.3 mm y 1.5 mm generaron chorros colimados de bajo espesor óptico sin desarrollo de contornos laterales diversos. En la Figura 12 se muestra la máxima altura detectable para una mezcla de 28.80% de H_2, y una boquilla de 5.0 mm.

Figura 12

Altura máxima (Hmax) detectada tras el filtrado para diferentes caudales en una ventana de 20 cm con una boquilla de 5 mm y una mezcla de 28.8% H_2.



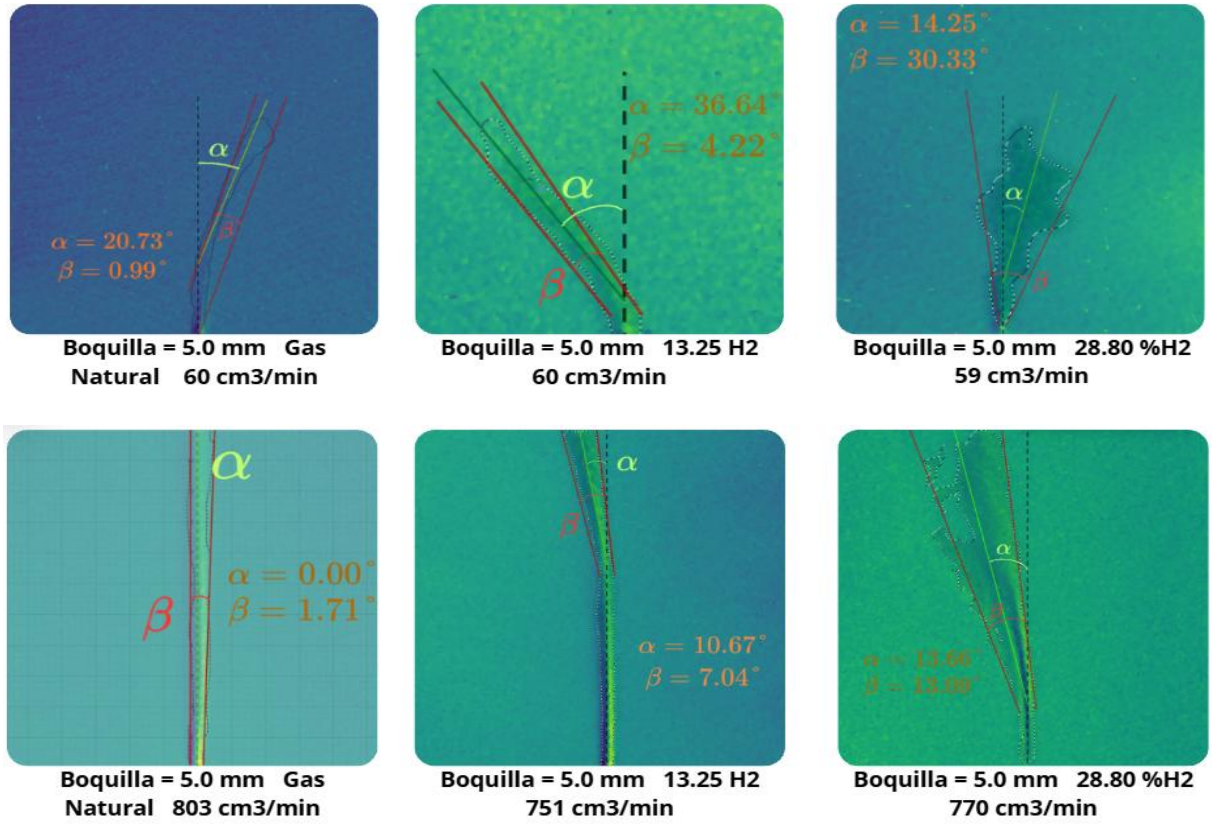
La altura máxima (*Hmax*) presenta una relación directa con el caudal inyectado, limitada por el tope del campo visual (20 cm). En ensayos con gas natural (Figura 13) la máxima altura excedió este límite más rápido (a partir de 99 cm^3/min), seguido por la mezcla con 13.25% H_2 (Figura 14) a los 154 cm^3/min, y la mezcla con 28.80% H_2 a los 248 cm^3/min. Esta última registró las menores alturas iniciales y una contracción transitoria a altos caudales (503 cm^3/min) causada por la turbulencia y entronización de aire.

El ángulo de desviación central (α) evidenció la estabilidad de la liberación frente a corrientes convectivas secundarias. A bajos caudales (Q_{ref} < 60 cm^3/min), la baja inercia produjo mayores desviaciones, alcanzando 20.73° para GN, 37.29° para 13.25% H_2 y 14.04° para 28.80% H_2. Al incrementar el caudal ($Q_{ref} \geq$ 150 cm^3/min), el impulso cinético predominó sobre la flotabilidad lateral, reduciendo α a valores inferiores a 2.5° en todas las composiciones. Por otra parte, el ángulo de apertura lateral (β) representó la expansión transversal de la pluma y disminuyó generalmente con el aumento del caudal, aunque presentó máximos que se pueden asociar a la interacción entre flotabilidad, difusión y diferencias de densidad, especialmente para 28.80% H_2, donde alcanzó 143.85° a 32 cm^3/min. La Figura 15 presenta un comparativo de los ángulos de apertura y desviación calculados usando una boquilla de 5 mm y variando las concentraciones de

H_2 en la mezcla y los flujos volumétricos. Los ángulos para otras condiciones de flujo se pueden consultar en el Apéndice A11.

Figura 15

Comparación de los perfiles α y β para las tres composiciones de gas estudiadas, evaluadas bajo las mismas condiciones equivalentes de caudal bajo (60 cm3/min) y caudal alto (800 cm3/min) con una boquilla de 5 mm.



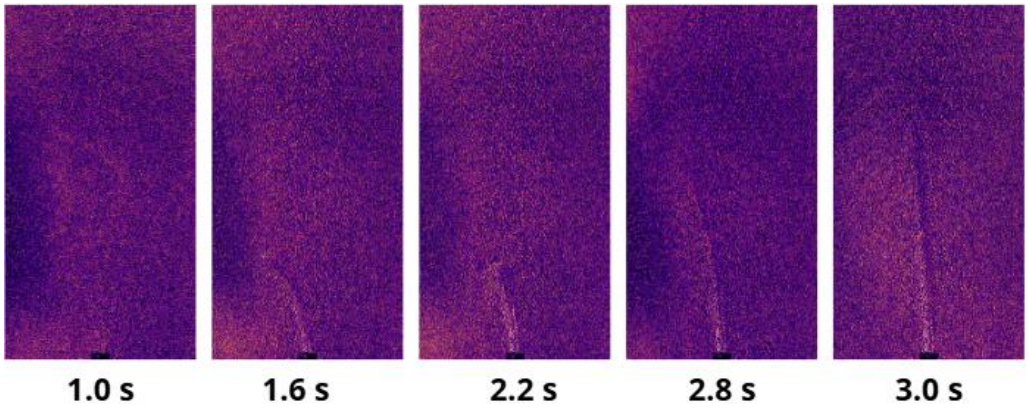
5.3 Evolución transitoria de una emisión

En la Figura 16 se puede observar una secuencia de 5 fotografías desde el segundo uno hasta el segundo tres cada 0.6 segundos, procesados con el filtro *Fire* de *ImageJ*, con el cual se

evaluó el proceso de emisión de gas bajo condiciones de diámetro de boquilla de 5 mm, 40% de densidad de patrón de fondo y mezcla con concentración de 13.25% de H_2. En la imagen se aprecia cómo el gas emerge en el segundo formando un núcleo concentrado. Entre 1.6 segundos y 2.8 segundos, la fricción con el aire genera remolinos en los bordes que expanden el ancho de la pluma mientras esta asciende. Finalmente, a partir de 3.0 segundos el flujo se estabiliza de manera continua.

Figura 16

Evolución transitoria de una pluma de gas aplicando el filtro Fire, en la cual se evidencia la expansión lateral y transición a un flujo contínuo.



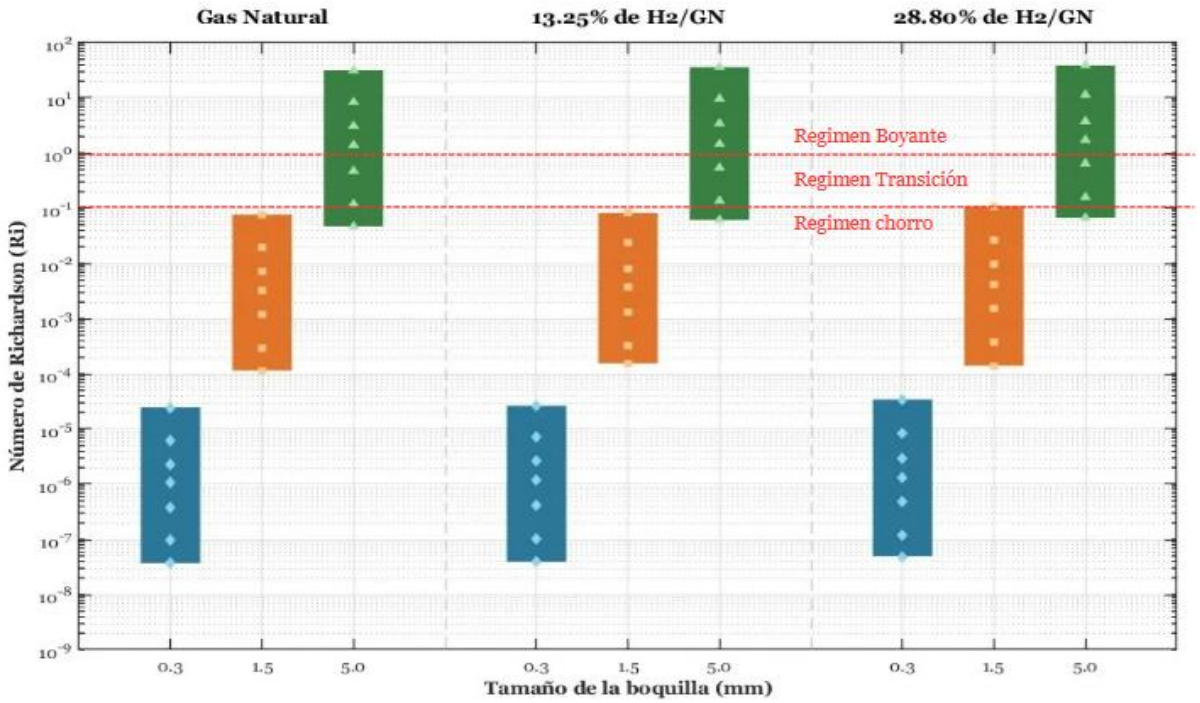
5.4 Análisis de la dinámica de flujo de la pluma y comparación con la literatura.

Los hallazgos se fundamentaron mediante el número adimensionales de Richardson (*Ri*) y su interacción con las variables medidas a condiciones de 24°C y 0.89 atm. En la Figura 17 se puede inferir la influencia del caudal y el diámetro de la boquilla respecto al régimen de liberación, en donde la boquilla de 5 mm presenta un comportamiento dominado por la flotabilidad, que se acentúa a caudales bajos y a medida que aumenta el caudal y por tanto, la velocidad de salida, el flujo transiciona a una liberación tipo chorro. Para las boquillas de 0.3 y 1.5 mm su

comportamiento fue netamente de chorro. Es de notar que, aunque la integración del hidrógeno cambió la densidad e induce una tendencia ligeramente boyante, su efecto fue mínimo en el régimen de liberación.

Figura 17

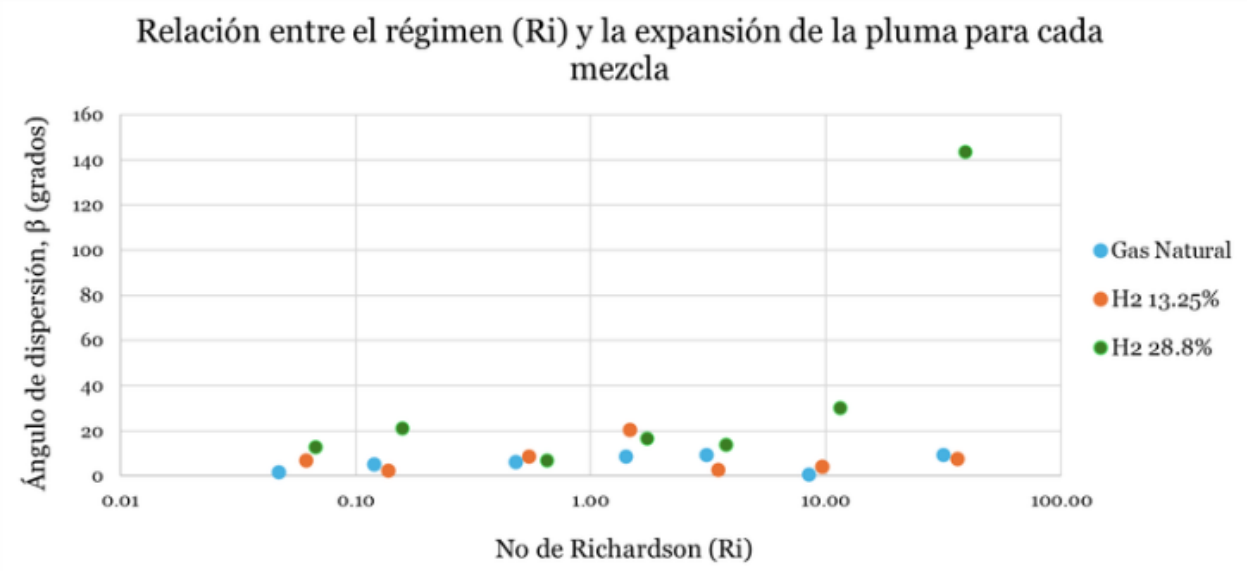
Efecto de la boquilla, caudal y composición en el régimen de liberación de la pluma.



El análisis del ángulo de dispersión (β) frente a *Ri* sugirió que para este estudio que el gas se ve influenciado por la adición del hidrógeno a la mezcla, en particular a caudales bajos con regímenes boyantes. El hidrógeno incrementa la capacidad de dispersión en el entorno y su flotabilidad en la mezcla al reducir la densidad del fluido, registra mayores ángulos de dispersión a medida que su contenido se acerca a un enriquecimiento del 30% seguido por mezclas de 13.25% siendo más fácil de identificar cuando su comportamiento es dominado por la flotabilidad según se ve en la Figura 18.

Figura 18

Efecto de la adición de hidrógeno en el régimen y ángulo de dispersión de la liberación.



Aparentemente a bajas proporciones de H_2 (13.25%) el comportamiento del régimen es similar al del gas natural puro, generando plumas más cohesivas y ángulos de dispersión inferiores a 10 grados en todo el caudal evaluado. En contraste al acercarse al 30% la cohesión de la pluma se reduce e incrementa la expansión lateral incluso desde el régimen tipo chorro.

El comportamiento observado en el banco BOS concuerda físicamente con lo reportado por Li *et al*. (2024): a bajos valores de caudal (< 200 cm^3/min en BOS y 5000 cm^3/min en Li *et al.*), las fuerzas del empuje boyante predominan sobre la inercia, favoreciendo la expansión lateral y generando ángulos de apertura de la pluma de hasta β de hasta 143.85° para la mezcla con 28.80% de H_2. Al superar el umbral de inercia (>200 cm^3/min en BOS; > 15000 cm^3/min en Li *et al.*), la energía cinética colima el chorro, contrayendo el ángulo de expansión (β < 5° para el gas natural y la mezcla con 13.25% H_2) y alineando el flujo con el eje central de descarga. Las variaciones cuantitativas entre ambos estudios responden a sus condiciones de contorno: Li *et al.* (2024)

emplearon helio puro a caudales mayores (5000-25000 cm^3/min) sobre un orificio en una tubería horizontal, mientras que el presente trabajo evaluó caudales menores (30-800 cm^3/min) con mezclas de GN/H_2 en descarga libre. Este análisis evidencia que el diámetro de la liberación y el caudal, poseen mayor influencia que la composición de la mezcla en el régimen de liberación, pero a bajos caudales y en régimen boyante, el hidrógeno obtiene gran relevancia en la velocidad y en el ángulo con el que el fluido se dispersa en el ambiente. Ambos métodos confirman que la caracterización óptica Schlieren permite identificar el régimen morfológico y que la inercia del flujo inhibe el ensanchamiento lateral de la pluma.

6. Conclusiones.

Se confirmó la pertinencia y capacidad de la técnica BOS como una metodología óptica no intrusiva y accesible para la caracterización cualitativa y morfológica de liberaciones controladas de mezclas de gas natural e hidrógeno (hasta 28.80% v/v de H_2) a baja presión y bajos caudales (30 a 800 cm^3/min). A través de la validación experimental del banco de pruebas, el sistema registró eficazmente los gradientes del índice de refracción (∇n), permitiendo reconstruir el perfil de dispersión de la pluma, delimitar su expansión e identificar las transiciones de régimen fluidodinámico en estado estacionario para escenarios de *blending*. Asimismo, en transitorio se logró visualizar la evolución temporal de una pluma con una mezcla de 13.25% de H_2 hasta su estabilización, presentándose como una herramienta viable para caracterizar diferentes fluidos.

La especificación detallada de la geometría entre el patrón de fondo, la zona de liberación de la fuga y el sensor de captura resultó determinante para optimizar la sensibilidad del sistema BOS. La selección de la densidad del patrón tipo *wavelet noise* aleatorio permitió maximizar la magnitud de los microdesplazamientos aparentes de píxeles sin saturar el campo óptico (especialmente para

ϕ = 20% que permitió una observación de mayor calidad), evidenciando que la respuesta de la técnica depende directamente de un acoplamiento preciso entre la resolución espacial del patrón y el gradiente de densidad inducido por el caudal del fluido.

La integración de los subsistemas mecánico, óptico y de suministro de gas garantizó la repetibilidad experimental y la estabilidad de las descargas. No obstante, se determinaron limitaciones técnicas claras: en la boquilla de $d_h = 0.3\ mm$ se dificultó la identificación de flujos para la mayoría de caudales y mezclas a partir de los 200 cm^3/min, mientras que en las boquillas de 1.5 y 5 mm bajo condiciones de alto flujo, la expansión de la pluma superó el campo visual, restringiendo la caracterización a la ventana física de 20 cm. También la resolución del dispositivo de captura fue un factor determinante en la detección de los microdesplazamientos.

Los perfiles de dispersión obtenidos mostraron coherencia física con los modelos reportados en la literatura (e.g., Li *et al.*), capturando la transición desde un régimen dominado por la flotabilidad bajo el número de Richardson ($Ri > 1.0$, con ángulos de apertura β de hasta 143.85°), hacia un régimen inercial o de chorro ($Ri < 0.10$, con colimación $\beta < 5°$ y $\alpha < 2.5°$). Aunque fallas operativas en los sensores de referencia impidieron una validación cuantitativa directa, la técnica BOS demostró ser una alternativa sensible en todas las combinaciones evaluadas (exceptuando la boquilla de 0.3 mm), no invasiva y económicamente viable. Sus principales restricciones operativas responden a la interferencia por iluminación ambiental, corrientes de aire convectivas, el límite de detección ante flujos turbulentos o tipo “hilo” y sensibilidad de la cámara ante este fenómeno.

Referencias bibliográficas

Advisory Group for Aerospace Research and Development. (1988). Schlieren and shadowgraph techniques: Methods based on refractive index measurements (Report No. AGARD-AG-302; NTIS No. AD-A194291). NATO; U.S. Department of Commerce. dtic.mil

Atcheson, B., Heidrich, W., & Ihrke, I. (2009). An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging. *Experiments in Fluids*, *46*(3), 467–476.

Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee. (2021). Review of dense-gas dispersion for industrial regulation and emergency response (Report No. ADMLC/2021/1). Public Health England; ADMLC

Blanco Miranda, A. D. (2010). Comparación de Tres Método Ópticos para la Medición de Temperatura en Objetos de Fase (Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.). Repositorio Institucional del CIO. https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/824

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (4.ª ed.). McGraw-Hill Education. ISBN: 978-1-4562-6094-1. Repositorio de verificación: https://www.mheducation.com.co/mecanica-de-fluidos-fundamentos-y-aplicaciones-9781456260941-col

Chen, C.-J., & Rodi, W. (1980). Vertical turbulent buoyant jets: A review of experimental data. Pergamon Press. ISBN: 978-0-08-024772-4. Repositorio de verificación: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980STIA...8023073C/abstract

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2022). *Documento CONPES 4075: Política de transición energética*. Departamento Nacional de Planeación. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf

Gojani, A. B., Kamishi, B., & Obayashi, S. (2013). Measurement sensitivity and resolution for background oriented schlieren during image recording. *Journal of Visualization, 16*(3), 201–207. https://doi.org/10.1007/s12650-013-0170-5.

Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-3*(6), 610–621. https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314

Hargather, M. J., & Settles, G. S. (2010). Natural-background-oriented schlieren imaging. Experiments in Fluids, 48(1), 59–68. DOI: 10.1007/s00348-009-0709-3.

Hartberger, J. E. (2011). *Background-Oriented Schlieren Pattern Optimization* (Tesis de maestría, Air Force Institute of Technology). Defense Technical Information Center. https://doi.org/10.21236/ADA552950

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020). Promedios climatológicos normales 1991-2020: Estación Piedecuesta - Guatiguará (Código 24035010). IDEAM. http://www.ideam.gov.co

Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2002). Fluid Mechanics (2.ª ed.). Academic Press. DOI: 10.1016/C2009-0-20716-1.

Li, Y., Wang, Z., Shang, Z., & Li, Z. (2024). Effect of leakage source condition on the unignited hydrogen released issuing through a horizontal realistic pipeline geometry. International Journal of Hydrogen Energy, 55, 1090–1101. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.281

Mercier, B., & Lacassagne, T. (2023). Design rules for Background Oriented Schlieren experiments with least-squares based displacement calculation. Flow Measurement and Instrumentation, 92, Artículo 102395. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102395

Meyers, J., Goethals, M., & Verhelst, S. (2022). Schlieren and BOS velocimetry of a round turbulent helium jet in air. Experiments in Fluids, 63(7), Artículo 115. DOI: 10.1007/s00348-022-03478-9. Enlace permanente: https://doi.org/10.1007/s00348-022-03478-9

Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia: una apuesta por la transición energética. Gobierno de Colombia; Banco Interamericano de Desarrollo.https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/

Rabha, D., Saini, D., Kumar, A., Kumar, V., & Kumar, M. (2025). Pocket schlieren: a background-oriented schlieren imaging platform on a smartphone. Experiments in Fluids, 66(8), Artículo 147. DOI: 10.1007/s00348-025-04071-4. Enlace permanente: https://doi.org/10.1007/s00348-025-04071-4

Raffel, M. (2015). Background-oriented schlieren (BOS) techniques. Experiments in Fluids, 56(6), Artículo 60. https://doi.org/10.1007/s00348-015-1927-5

Richard, H., & Raffel, M. (2001). Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method. Measurement Science and Technology, 12(9), 1576–1585. https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/9/325.

Ruz Espinoza, A. A. (2008). Diseño, Construcción y Pruebas de un Quemador de Gas. Estudio de Diseño de Torre Precalcinadora para Planta Piloto de Production de Clinker (Tesis de pregrado, Universidad de Chile). Repositorio Académico de la Universidad de Chile.

Settles, G. S. (2001). *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56640-0

Shetty, S. P., Shafi, S. S., & Shetty, K. (2023). A review on hydrogen leak detection technologies and safety measures. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(89), 34911–34932.

Sun, R., Zhou, X., Yu, J., & Zhang, J. (2023). A study of hydrogen leak and explosion in different regions of a hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(4), 1642–1655.

Topolski, K., Reznicek, E. P., Erdener, B. C., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J. G., Hodge, B. M., & Chung, M. (2022). *Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology* (Report No. NREL/TP-5400-81704). National Renewable Energy Laboratory. DOI: 10.2172/1854199.

Venkatakrishnan, L., & Meier, G. E. A. (2004). Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique. Experiments in Fluids, 37(2), 237–247. DOI: 10.1007/s00348-004-0807-1.

Wang, J., Liu, Y., & Zhang, H. (2026). Study on a high-pressure pipeline micro-leakage detection method based on background-oriented schlieren measurement and feature matching. Applied Sciences, 16(15), Artículo 7809. DOI: 10.3390/app16157809

Wildeman, S. (2018). Real-time quantitative Schlieren imaging by fast Fourier demodulation of a checkered backdrop. Experiments in Fluids, Artículo 97. https://doi.org/10.1007/s00348-018-2553

Yevtikhiyeva, O. A., Skornyakova, N. M., & Udalov, A. V. (2009). An investigation of the error of the background schlieren method. *Measurement Techniques*, *52*(12), 1300–1305. https://doi.org/10.1007/s11018-010-9437-6

Zhang, X., & Xu, S. (2026). Infrared gas detection method based on non-solid characteristics and spatiotemporal information. *Sensors*, 26(11), Article 3284. https://doi.org/10.3390/s26113284

Zhou, T., Gaskins, J., Poggie, J., & Bane, S. (2025). Optimization of optical systems for background oriented schlieren. Measurement Science and Technology, 36(1), Artículo 015302. DOI: 10.1088/1361-6501/ad8944

Zimmerle, D., Vaughn, T., Bell, C., Bennett, K., Deshmukh, P., & Thoma, E. (2020). Detection limits of optical gas imaging for natural gas leak detection in realistic controlled conditions. *Environmental Science & Technology*, *54*(19), 11506–11514.

Apéndices

Apéndice A: Tablas

Tabla 1

Constantes de Gladstone – Dale K para algunos gases de interés.

Gas	K [m^3/kg] para λ = 589 nm
Aire	$2.266x10^{-4}$
Nitrógeno	$2.320x10^{-4}$
Helio	$1.234x10^{-4}$
Hidrógeno	$1.340\ x10^{-4}$
GN	$2.570\ x10^{-4}$

Nota: Adaptado de Settles, G. S. (2001). Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Springer Berlin Heidelberg.

Tabla 2

Comparación de patrones de fondo para BOS.

Tipo de patrón	Estructura / generación	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones típicas
Puntos aleatorios	Círculos negros en fondo blanco,	Muy robusto frente al ruido. Detecta gradientes en	Requiere buena impresión. Densidad mal	Flujos de baja densidad, plumas

	posición pseudoaleatoria.	cualquier dirección. Ideal para gases ligeros (H_2, GN).	controlada genera zonas vacías.	térmicas, túneles de viento.
Cuadrados aleatorios	Cuadrados negros de tamaño fijo, posición aleatoria.	Mayor área de contraste. Funciona bien con flujo óptico en móviles.	Bordes rectos causan artefactos. Sensible al desenfoque.	Pocket BOS, detección de fugas en exteriores.
Moteado (*speckle*)	Generado por láser o simulado por ruido multiplicativo.	Escala muy fina. Útil para reconstrucción 3D (tomografía BOS).	Necesita láser. Se degrada con gradientes fuertes.	Llamas, flujos compresibles, mediciones volumétricas.
Wavelet noise	Ruido sintético con información en múltiples escalas.	Conserva detalles al cambiar resolución. Robusto en flujos turbulentos.	Complejo de generar. La impresión debe ser muy fiel.	Turbulencia compleja, flujos compresibles.
Rejilla / malla	Líneas horizontales y verticales equiespaciadas.	Fácil de imprimir. Sirve para calibración geométrica.	Baja resolución. Produce bandas de Moiré.	Calibración de sistemas, visualización cualitativa de choques.
Ajedrez	Cuadros blancos y negros alternados.	Alto contraste. Permite demodulación rápida por fase. Mide gradientes grandes.	Ambigüedad si el desplazamiento supera medio período.	Ondas de choque, explosiones, flujos supersónicos.
Líneas (HoV)	Franjas paralelas en una sola dirección.	Máxima sensibilidad en dirección perpendicular. Muy simple.	No detecta movimientos paralelos a las líneas.	Flujos estratificados, capas límite planas.
Fondos naturales	Textura existente (pared, follaje, campo).	Sin costo. Permite mediciones a gran escala en exteriores.	Contraste variable. Puede tener zonas homogéneas sin datos.	Detección de fugas en fachadas, explosiones al aire libre.

Nota: Adaptado Raffel, M. (2015). Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Experiments in Fluids, 56*(60).

Tabla 4

Parámetros fisicoquímicos y ópticos de los componentes puros bajo condiciones locales de operación (24 ° y 0.89 atm en el PTG, Piedecuesta).

Propiedad	Hidrógeno (H2)	Gas Natural (GN)	Aire ambiental	Unidad
Masa Molar (M)	2.016	16.040	28.970	g/mol
Densidad (ρ)	0.074	0.585	1.057	kg/m³
Densidad Relativa (d_r, Aire = 1)	0.070	0.553	1.000	—
Viscosidad Dinámica (μ)	$8.84x10^{-6}$	$11.02x10^{-6}$	$18.36x10^{-6}$	Pa*s
Constante de Gladstone-Dale (K)	$1.34x10^{-4}$	$2.57x10^{-4}$	$2.266x10^{-4}$	m³ / kg

Nota. Valores calculados para la temperatura media ambiental (24 ° C y la presión atmosférica local (0.89 atm a 1.005 ms. n.m.) del Parque Tecnológico Guatiguará (IDEAM, 2020). Adaptado de Blanco Miranda (2010) y Settles (2001).

Nota. Compilación del diseño experimental de la investigación.

Tabla 5

Parámetros del dispositivo de captura de imagenes.

PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO DE CAPTURA

Marca y Modelo del dispositivo	Xiaomi Redmi Note 8 (M1908C3JGG)			
Sensor óptico	1/2" Sensor (Samsung ISOCELL Bright GM1)			
Distancia Focal (f) física	4.6	mm		
Distancia Lente - Sensor (Zl)	4.62683333	mm		
Ángulo de Vision (FOV Horizontal)	68.3	grados	1.19206	rad
Ángulo de Vision (FOV Vertical)	54	grados	0.942478	rad
Tamaño real del pixel	0.7	μm/pixel		
Resolución digital	2	MP		
Ancho	1920	Pixeles		
Alto	1080	Pixeles		
Frame Rate / FPS promedio	60	FPS		

Tabla 6

Dimensionamiento geométrico del sistema BOS

Parámetro Geométrico	Símbolo	Valor	Unidad
Distancia patrón de fondo – lente	Z_b	0.80	m
Distancia patrón de fondo – fuga	Z_f	0.40	m
Distancia fuga – lente	$Z_b - Z_f$	0.40	m
Relación de posición axial	Z_f / Z_b	0.50	—
Altura de la boquilla desde el suelo	H_{boq}	1.00	m
Ventana vertical de visualización	W_y	20.00	cm

Nota. Parámetros geométricos fijos configurados en el montaje experimental.

Tabla 7

Parámetros del patrón de fondo.

Parámetro	Especificación	Unidad
Tipo de patrón	*Wavelet Noise* aleatorio (Haralick)	—
Geometría de elementos	Cuadrados / Rectángulos	—
Tamaño promedio de elemento (Pr)	1.80	mm

Contraste	Blanco / Negro (Máximo)	—
Formato de impresión	A1 (594x841)	mm
Resolución de impresión	300	DPI
Soporte físico	Papel Opalina montado sobre lámina metálica	—
Tamaño característico del elemento del patrón proyectado [Ps]	15	Pixeles

Nota. Propiedades de los patrones impresos para las corridas experimentales.

Tabla 8

Secuencia cronológica y matriz del diseño experimental factorial

Secuencia (Exp. N.°)	**Patrón de Fondo (ϕ)**	**Composición del Gas**	**Diámetro de Boquilla (dh)**	**Caudales de Referencia (Qref)**	**Adquisición por Tratamiento**
1 – 7	40%	13.25% de H_2	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
8 – 14	40%	13.25% de H_2	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
15 – 21	40%	13.25% de H_2	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
22 – 28	40%	28.8% de H_2	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
29 – 35	40%	$28.8% de H_2	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
36 – 42	40%	28.8% de H_2	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas

43 – 49	40%	GN	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
50 – 56	40%	GN	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
57 – 63	40%	GN	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
64 – 70	20%	13.25% de H_2	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
71 – 77	20%	13.25% de H_2	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
78 – 84	20%	13.25% de H_2	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
85 – 91	20%	28.8% de H_2	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
92 – 98	20%	28.8% de H_2	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
99 – 105	20%	28.8% de H_2	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
106 – 112	20%	GN	0.3 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
113 – 119	20%	GN	1.5 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas
120 – 126	20%	GN	5.0 mm	30, 60, 100, 150, 250, 500, 800 cm^3/min	1 ref. + 5 descargas

Tabla 9

Configuración numérica estandarizada en Pocket Schlieren para el procesamiento de flujo óptico.

Módulo / Parámetro	**Valor Estandarizado**	**Función / Significado Técnico**
Visualize Flow Magnitude		
Pirámide de resolución (*Levels*)	6	Capas de la pirámide gaussiana para estimación multi-escala
Tamaño de ventana (*Window Size*)	25 px	Tamaño del bloque de integración espacial para correlación local
Número de iteraciones (*Iterations*)	8	Iteraciones del solucionador numérico por capa piramidal
Visualize Flow Vectors		
Niveles piramidales	6	Resolución de descomposición piramidal
Tamaño de ventana (*Window Size*)	25 px	Dimensión del núcleo de búsqueda de vectores
Escalamiento vectorial (*Vector Scaling*)	40	Factor de amplificación visual de los vectores de desplazamiento
Longitud vectorial (*Vector Length*)	80	Límite máximo de representación gráfica de la magnitud del vector

Nota. Configuración optimizada para la visualización de gradientes de densidad en mezclas GN/H_2

Tabla 10

Síntesis de la visualización por boquilla y fluido

Boquilla (dh)	Fluido	Patrón óptimo	Rango visible (cm^3/min)	Lectura rápida del desempeño
0.3 mm	Gas Natural (GN)	40%	30–500	ϕ= 40% otorgó mejor contraste; ϕ = 20% visibilidad hasta 795 cm^3/min
0.3 mm	13.25% H_2	20%	32–513	ϕ = 20% amplió la detectabilidad; ϕ= 40% perdió señal a partir de 240 cm^3/min.
0.3 mm	28.80% H_2	40%	30–796	ϕ = 20% decayó a Q=0 desde 254 cm^3/min.
1.5 mm	GN	20%	31–800	ϕ = 20% el umbral claramente visible y se sostuvo hasta 800 cm^3/min.
1.5 mm	13.25% H_2	20%	32–738	ϕ = 20% fue continuo; ϕ= 40% mostró intermitencia (104–145 y 501–750 cm^3/min).
1.5 mm	28.80% H_2	40% / 20%	32–803 / 30–832	ϕ= 40% detectó a menor caudal; ϕ = 20% amplió el límite superior.
5.0 mm	GN	20%	31–803	ϕ = 20% alcanzó apenas visible desde 60 cm^3/min; ϕ= 40% desde 96 cm^3/min.
5.0 mm	13.25% H_2	20% / 40%	31–797	Comportamiento equivalente; ϕ= 40% con límite superior ligeramente mayor.
5.0 mm	28.80% H_2	40%	30–806	ϕ = 20% similar (152–770 cm^3/min); ϕ= 40% presentó mayor techo operativo.

Tabla 11

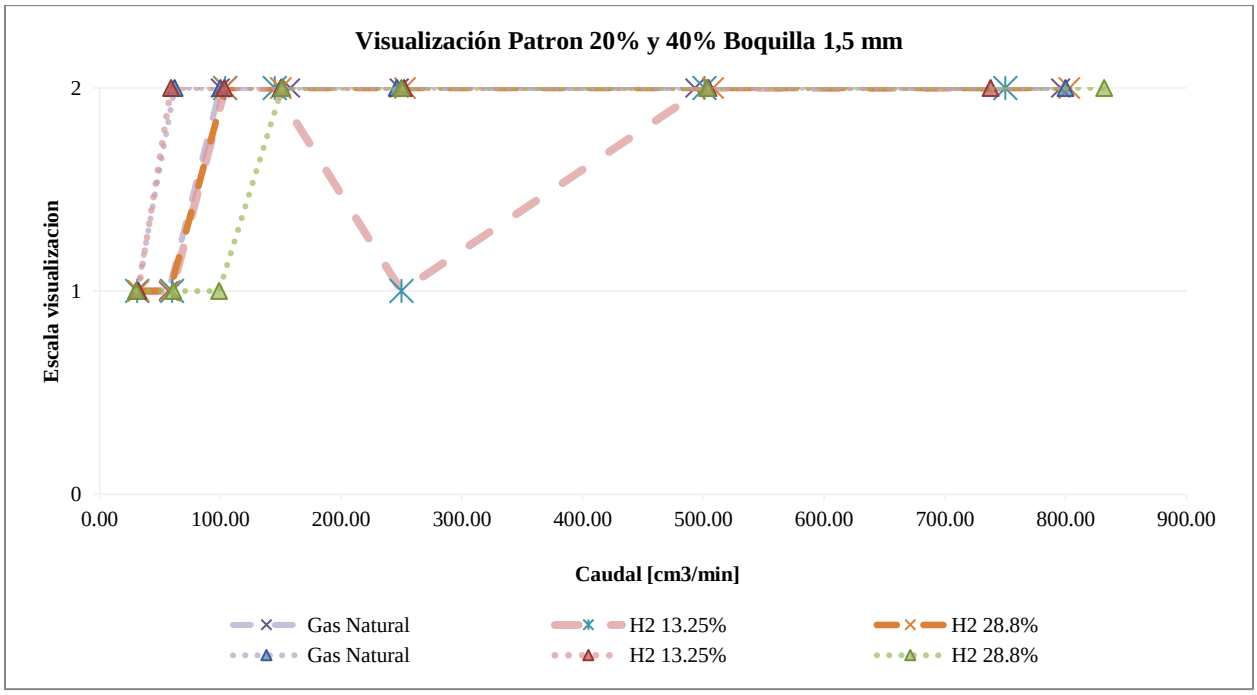
Valores experimentales de los ángulos de desviación (α) y apertura lateral (β) obtenidos con la boquilla de 5 mm para diferentes caudales y composiciones de gas.

Fluido	Caudal (cm^3/min)	Altura de la pluma, Hmax (cm)	Ángulo de desviación, α (grados)	Ángulo de dispersión, β (grados)
C	31	1.94	9.48	9.49
	60	11.07	20.73	0.99
	99	-	5.37	9.47
	147	18.86	15	8.66
	252	19.42	0.61	6.26
	504	-	2.44	5.36
	803	-	0	1.71
A	31	2.97	37.29	7.68
	60	6.66	36.64	4.22
	100	11.85	8.58	2.91
	154	-	14.8	20.67
	253	-	0.77	8.93
	503	-	1.47	2.61
	751	-	10.67	7.04
B	32	1.4	14.04	143.85
	59	5.07	14.25	30.33
	103	11.7	7.14	13.91
	152	19.31	8.72	16.72
	248	-	1.84	7.13
	503	19.17	10.56	21.14
	770	-	13.66	13.09

Apéndice B: Figuras

FIGURA 10

Escala de visualización de pluma para gas natural y mezclas de hidrógeno para una boquilla de 1.5 mm en patrones de 20% (estrellas-línea segmentada) y 40% (triángulos – línea punteada) de densidad.

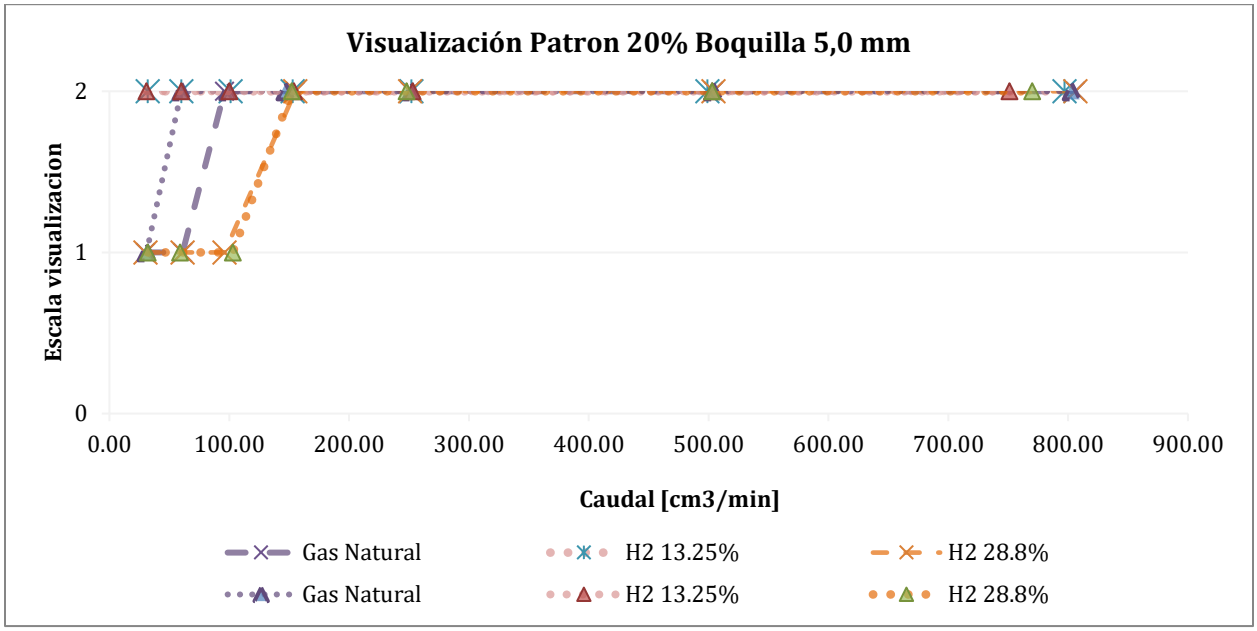


Nota: Gráficas para boquilla de 1.5 mm que muestran la escala de visualización frente al caudal para las tres composiciones de gas. Paneles: a) patrón al 40% y b) patrón al 20%.

FIGURA 11

Escala de visualización de pluma para gas natural y mezclas de hidrógeno para una boquilla de

5 mm en patrones de 20% (estrellas-línea segmentada) y 40% (triángulos – línea punteada) de densidad.



Nota: Gráficas para boquilla de 5.0 mm que muestran la escala de visualización frente al caudal para las tres composiciones de gas. Paneles: a) patrón al 40% y b) patrón al 20%.

FIGURA 13

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 5 mm y gas natural puro.

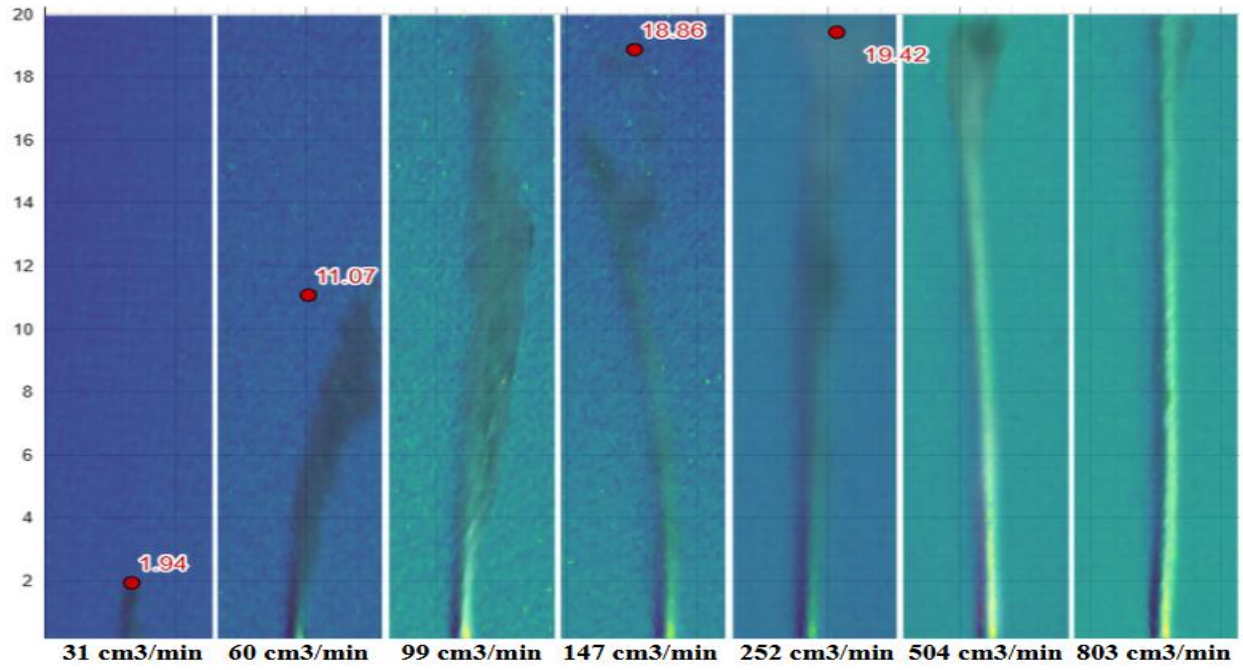


FIGURA 14

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales en una ventana de 20 cm con una boquilla de 5 mm y una mezcla de 13.25% H_2.

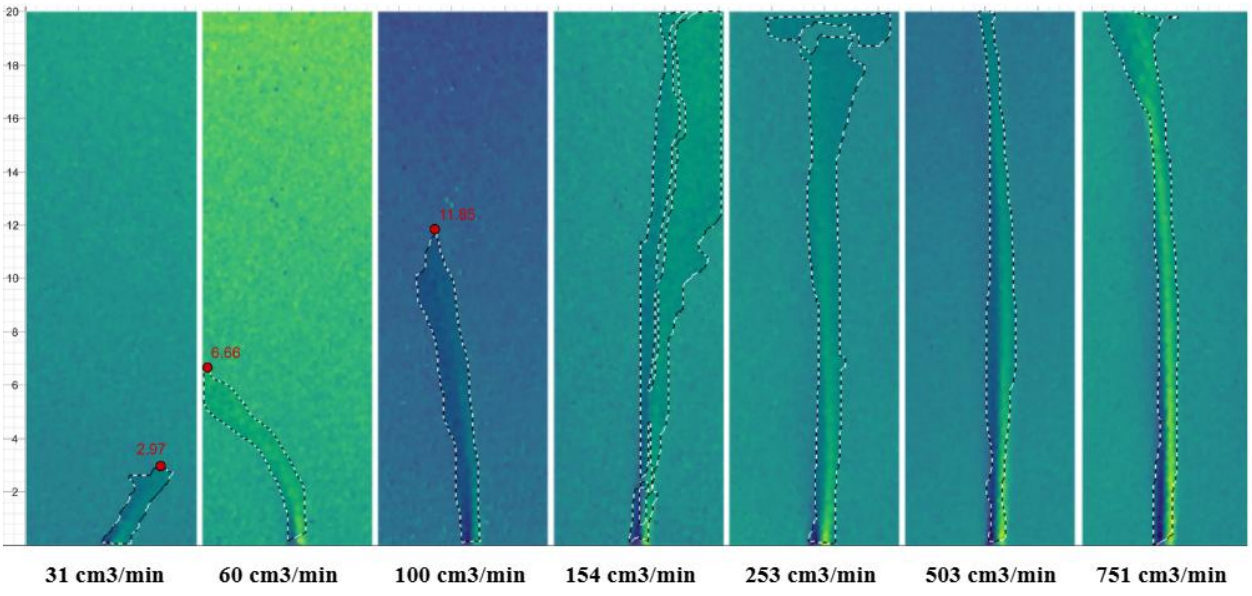


FIGURA 19

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 1.5 mm y una mezcla de 28.8% H_2.

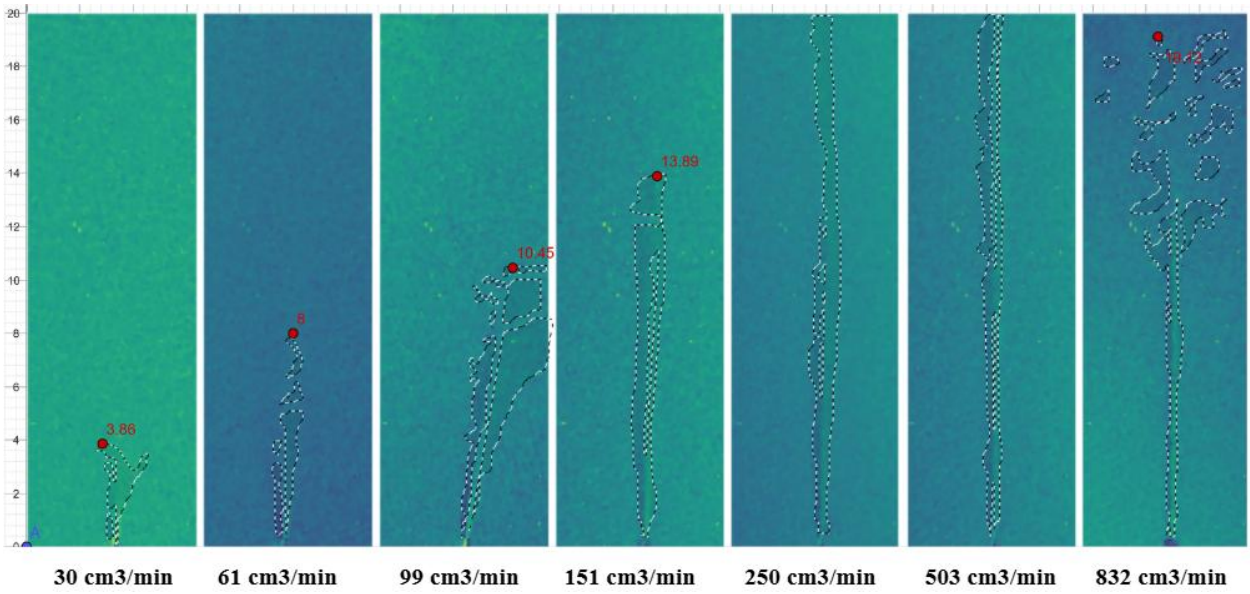


FIGURA 20

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 1.5 mm y GN.

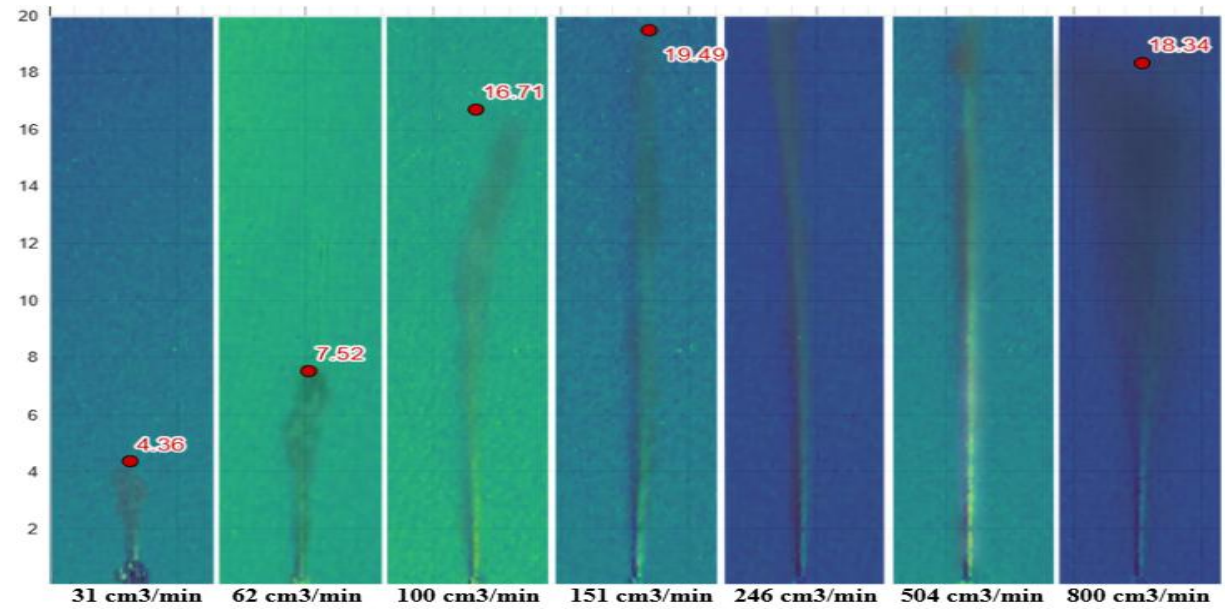


FIGURA 21

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 1.5 mm y una mezcla de 13.25% H_2.

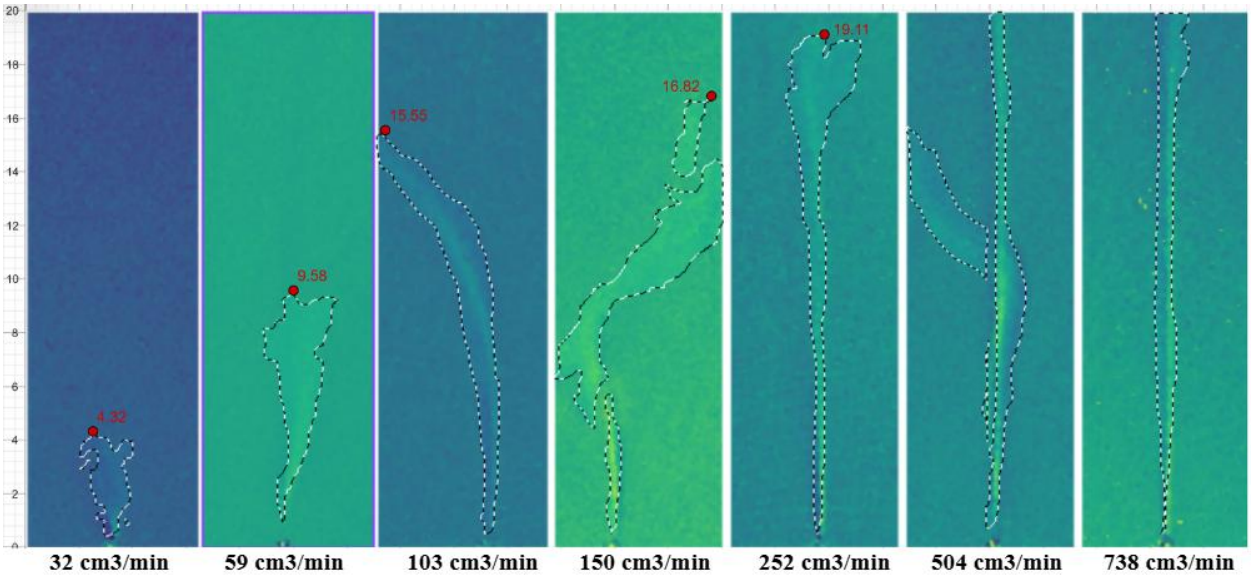


FIGURA 22

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 0.3 mm y una mezcla de 28.8% H_2.

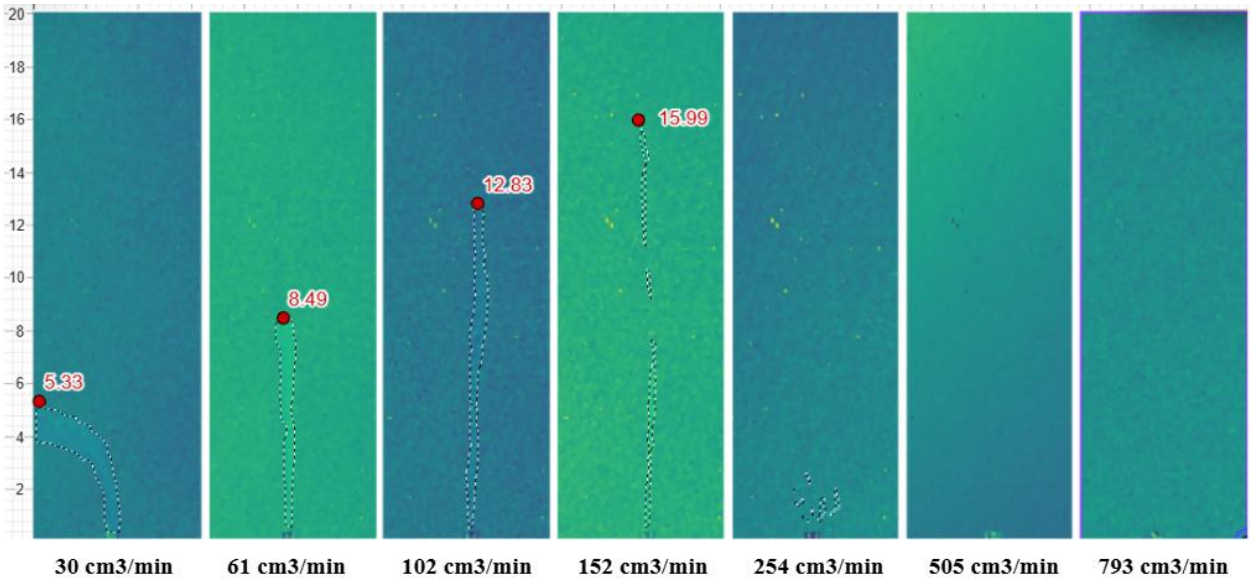


FIGURA 23

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 0.3 mm y GN.

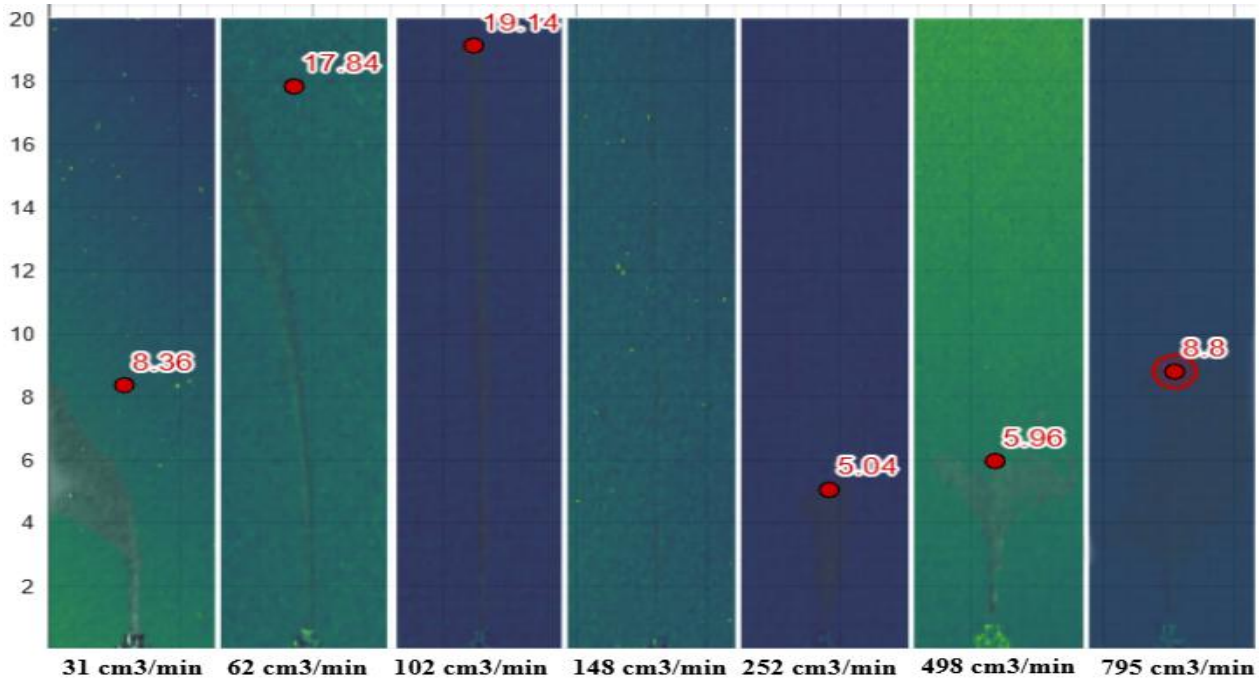


FIGURA 24

Altura máxima (Hmax) detectada para diferentes caudales con una boquilla de 0.3 mm y una mezcla de 13.25% H_2.

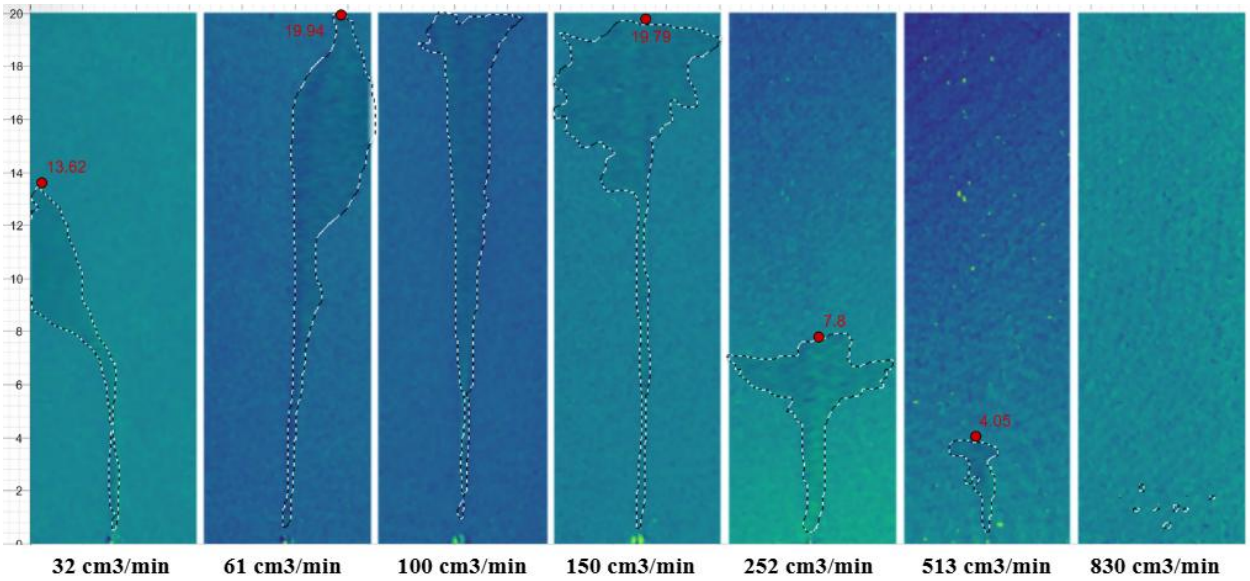


FIGURA 25

Comparación de los perfiles α y β para las tres composiciones de gas estudiadas, evaluadas bajo las mismas condiciones equivalentes de caudal bajo (30 cm^3/min y 60 cm^3/min) con una boquilla de 5 mm.

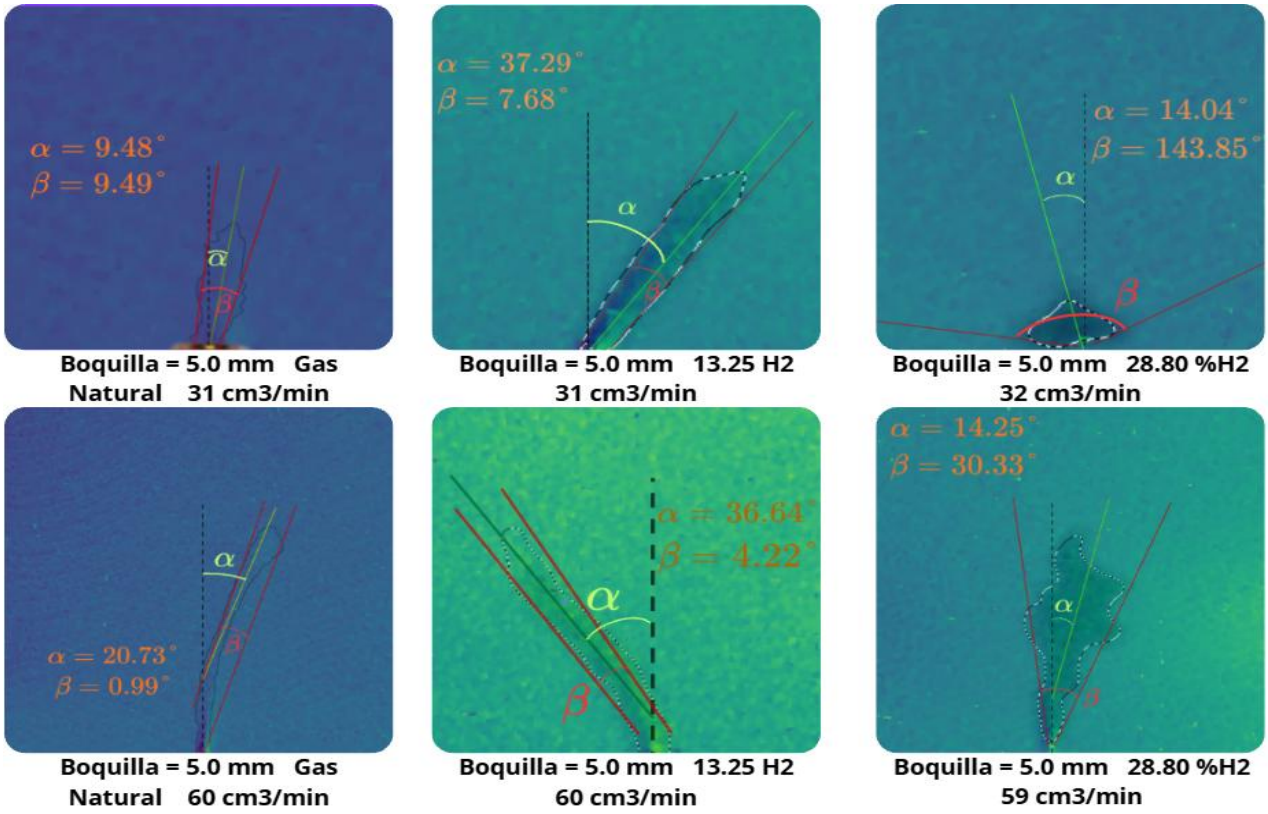


FIGURA 26

Comparación de los perfiles α y β para las tres composiciones de gas estudiadas, evaluadas bajo las mismas condiciones equivalentes de caudal intermedio (100 cm^3/min y 150 cm^3/min) con una boquilla de 5 mm.

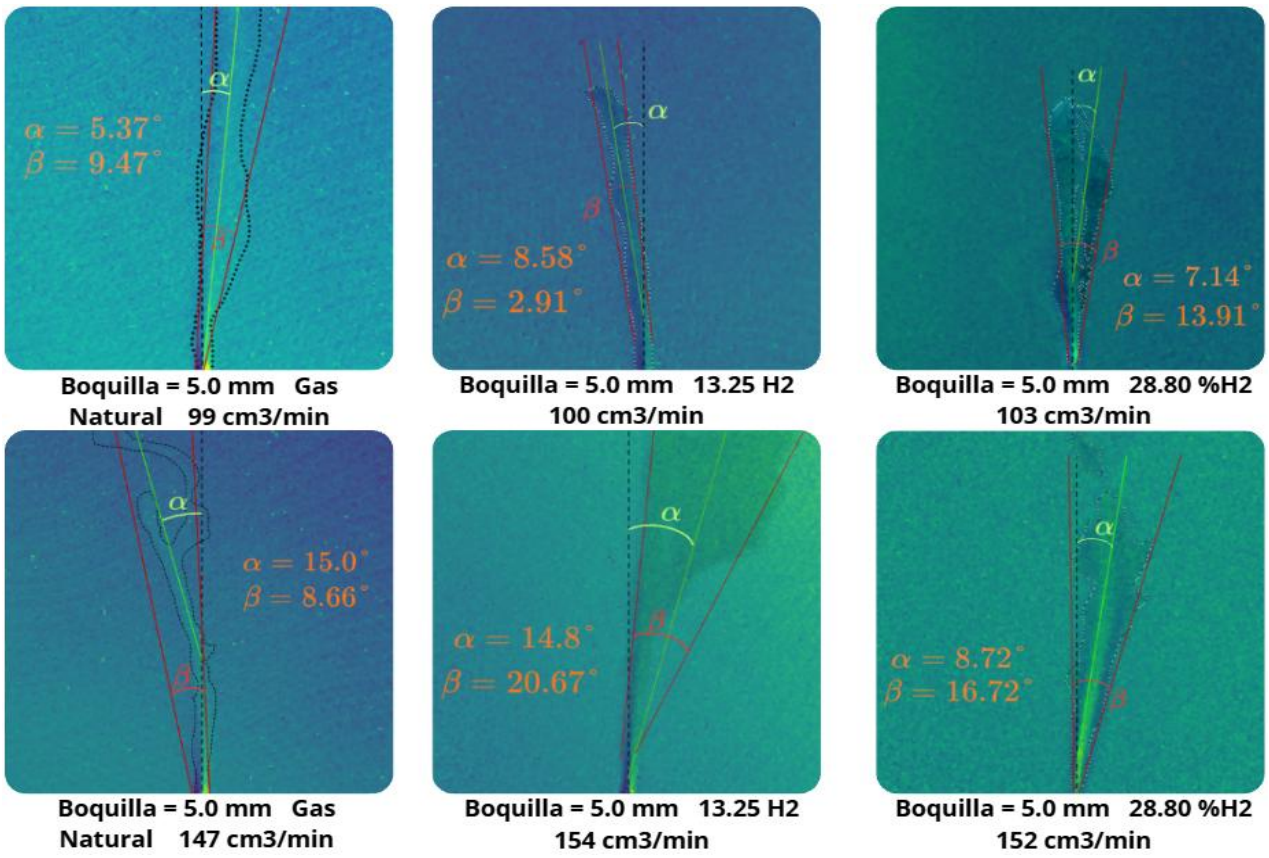


FIGURA 27

Comparación de los perfiles α y β para las tres composiciones de gas estudiadas, evaluadas bajo las mismas condiciones equivalentes de caudal intermedio y alto (250 cm^3/min y 500 cm^3/min) con una boquilla de 5 mm.

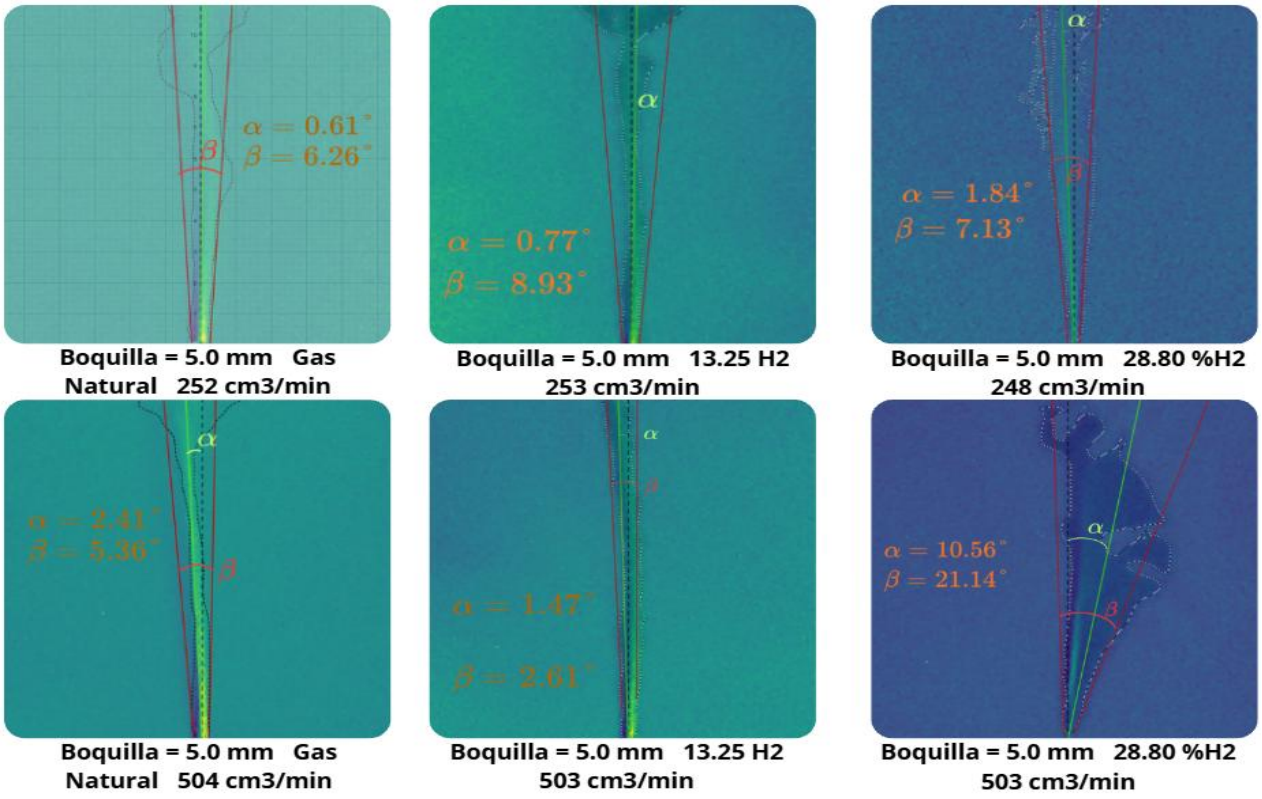


FIGURA 28

Comparación de los perfiles α y β para las tres composiciones de gas estudiadas, evaluadas bajo las mismas condiciones equivalentes de caudal alto (800 cm^3/min) con una boquilla de 5 mm.

