



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Mecánica

Investigación Experimental de Llamas Difusivas de Metano e Hidrógeno en Quemador de Flujos Opuestos

Memoria de título presentada por

Diego Patricio Fuentes Luengo

Como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía Dr. Mario Toledo Torres

Profesor Co-Referente Dr. Germán Amador Díaz

Diciembre 2023 – Valparaíso, Chile

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi gratitud a mi padre, Patricio Fuentes, a mi madre, Claudia Luengo, y a mi hermano, Sebastián, por todo el apoyo que me han dado para lograr mis estudios, para ellos van mis primeras palabras de agradecimiento. Agradezco a mi Popa y a la linda familia que formó; ella sigue presente a través su hijos, mis tíos y tías. Tía Pinte, Taly, Ana y tía Pancha, tío Sergio, Jorge y Pablo, vaya para ustedes mis sinceros agradecimientos. A todos mis primos y primas, y también a todos los hermanos y hermanas de otra madre que he encontrado en mi camino, muchas gracias por haber estado y estar ahí.

Índice

Agradecimientos	II
1. Resumen	1
2. Abstract	2
3. Introducción	3
4. Objetivos	4
5. Marco teórico	5
5.1. Definiciones fundamentales	5
5.2. Clasificación de llamas	8
5.3. Llamas difusivas	10
5.3.1. Flame Stretch	13
5.3.2. Llama de difusión de contraflujo	15
5.3.3. Strain rate y extinción de llama	18
5.4. Combustión de metano e hidrógeno	19
5.5. Investigaciones de llamas difusivas de contraflujo	27
5.5.1. Quemador de contraflujo	33
6. 7. Desarrollo y Metodología Experimental	35
6.0.1. Metodología de cálculo de parámetros operacionales	38
6.0.2. Instrumentación y materiales	40
7. Presentación y análisis de resultados	43
7.1. Temperatura	43
7.2. Concentración de gases de escape	47
7.3. Registros visuales	49
8. Conclusiones	54

1. Resumen

El objetivo general del presente trabajo es realizar una investigación experimental sobre llamas difusivas de metano e hidrógeno en un quemador de flujos opuestos. Se desarrollan pruebas con variación de parámetros operacionales, y se analizan los resultados de temperaturas, concentraciones de gases generados, y morfología de llamas.

En primer lugar, se define un estado del arte de las investigaciones de llamas difusivas de flujos opuestos de diferentes combustibles. Los resultados de este análisis muestran escasa información en algunos ámbitos, tales como la operación con llamas de hidrógeno y sus mezclas con metano.

En el Laboratorio de Termodinámica se desarrolla la implementación de líneas de suministro de metano, hidrógeno y de su premezcla, con sistemas de control y seguridad en un quemador de flujo opuesto. La metodología de investigación considera el uso de metano en un 100 % para luego ir reemplazando el metano por hidrógeno gradualmente en cambios de un 10 % en volumen, llegando a la operación de una llama 100 % de hidrógeno. Este proceso implica la modificación del strain rate. Los resultados muestran un aumento en la temperatura al aumentar la cantidad de hidrógeno en el punto de medición. Las concentraciones de CH y CO en la línea de escape disminuyen al sustituir el metano por hidrógeno, aunque los NOx experimentan un ligero aumento asociado al incremento de temperatura.

Finalmente, la morfología de la llama se caracteriza por dos zonas, una amarilla del lado del combustible y otra azul del lado del oxidante. Estas zonas con color están separadas por una zona translúcida sin radiación visible, dando la impresión de haber dos llamas. El lado amarillo demuestra una paulatina desaparición mediante se aumenta la concentración de hidrógeno, mientras que en la zona azul experimenta un cambio hacia una tonalidades violetas y blancas. Además, durante los cambios de mezcla, la llama se desplaza hacia el lado del oxidante haciéndose más pequeña. La separación intermedia de colores desaparece al pasar a la última llama de hidrógeno puro y se observa una sola llama con colores que van de un blanco al lado del oxidante, luego un tono entre azul y violeta, y después un tono ligeramente anaranjado del lado del combustible.

En conclusión, la configuración de llama difusiva en un quemador de contraflujo permite la operación segura y controlada de mezclas ricas en hidrógeno y de hidrógeno puro. El strain rate se destaca como un parámetro operacional medible, lo cual facilita la comparación de resultados entre distintas investigaciones.

Palabras clave: Llamas difusivas, llama de hidrógeno, strain rate.

2. Abstract

The overall objective of this study is to conduct an experimental investigation on diffusive flames of methane and hydrogen in a counterflow burner with opposing fuel and oxidizer streams. Tests are conducted with variations in operational parameters, and the results of temperatures, concentrations of generated gases, and flame morphology are analyzed.

Firstly, a state-of-the-art review is provided on diffusive flames in counterflow configurations with different fuels. The analysis reveals limited information in certain areas, such as the operation with hydrogen flames and their mixtures with methane.

In the Thermodynamics Laboratory, the implementation of methane, hydrogen, and their premixed supply lines is carried out, incorporating control and safety systems in a counterflow burner. The research methodology involves initially using 100 % methane and gradually replacing methane with hydrogen in 10 % volume increments until operating with a 100 % hydrogen flame. This process involves modifying the strain rate. Results indicate an increase in temperature with the growing amount of hydrogen. The concentrations of CH and CO in the exhaust decrease when substituting methane with hydrogen, although NO_x experiences a slight increase associated with the temperature rise.

Lastly, flame morphology is characterized initially by two zones, a yellow zone on the fuel side and a blue zone on the oxidizer side. These colored zones are separated by a translucent zone without visible radiation, creating the impression of two flames. The yellow side gradually diminishes as the hydrogen concentration increases, while the blue zone shifts towards violet and white hues. Additionally, during mixture changes, the flame shifts towards the oxidizer side, becoming smaller. The intermediate color separation disappears when transitioning to the final pure hydrogen flame, revealing a single flame with colors ranging from white on the oxidizer side, then a tone between blue and violet, and finally a slightly orange tone on the fuel side.

In conclusion, the diffusive flame configuration in a counterflow burner enables the safe and controlled operation of hydrogen-rich mixtures and pure hydrogen. The strain rate stands out as a easily measurable parameter, facilitating result comparison across different laboratories.

Keywords: Diffusive flames, hydrogen flame, strain rate.

3. Introducción

F.A Williams (1985) señala que una llama difusiva es, en un sentido amplio, cualquier llama que tenga el combustible y el oxidante inicialmente separados. De forma más precisa, agrega que una llama difusiva es una llama no premezclada, cuasi-estacionaria, aproximadamente isobárica en la cual la mayoría de las reacciones ocurre en una zona estrecha que puede ser aproximada a una superficie. Un ejemplo sencillo donde este tipo de llama se genera es en el fuego de una vela. En ella el combustible y el oxidante se encuentran inicialmente separados, ya que el combustible proveniente de los gases evaporados de la mecha se encuentra con el oxidante o el aire de la atmósfera, mezclándose y reaccionando simultáneamente. La contraparte de estas llamas son las premezcladas, muy comunes en una gran variedad de procesos. En ellas el combustible y oxidante están inicialmente premezclados. Esta diferencia entre combustible y oxidante premezclado o no premezclado marca claras diferencias en la fenomenología de la llama.

Por su parte, el Hydrogen Council (2023) señala que “Hydrogen is the missing piece of the clean energy puzzle”. En otras palabras, se indica al hidrógeno como la solución para reducir las emisiones de CO₂ y alcanzar la carbono-neutralidad en el planeta. A nivel de nuestro país, en noviembre del 2020 se define la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde como una política de largo plazo, que establece las pretensiones de Chile para crear una nueva industria en este ámbito.

En este contexto, la presente investigación experimental busca aportar conocimiento a la cadena de valor del hidrógeno y su utilización en mezclas con gas natural para futuras aplicaciones industriales. Específicamente se utiliza un quemador de flujos opuestos para generar llamas difusivas de la premezcla metano-hidrógeno, variando el parámetro operacional denominado “strain rate” (SR).

4. 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 investigar experimentalmente llamas difusivas de metano e hidrógeno en un quemador de flujos opuestos de combustible y oxidante. Los objetivos específicos son:

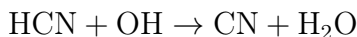
1. Reconocer las investigaciones de llamas difusivas de flujos opuestos de metano e hidrógeno.
2. Desarrollar un sistema de suministro de metano, hidrógeno y de su premezcla.
3. Desarrollar ensayos experimentales con variación de parámetros operacionales, principalmente el strain rate.
4. Analizar comparativamente los resultados obtenidos en cuanto a temperaturas, concentraciones y morfología de llamas.

5. Marco teórico

Este apartado se enfoca en explorar y explicar las bases teóricas y experimentales que sustentan la investigación actual. Particularmente, se explican los conceptos de “Stretch flame” y “Strain rate”, y su relación con la combustión de hidrógeno y metano. La principal referencia consultada corresponde a “Theoretical and Numerical Combustion” de Poinso. Se aborda también la combustión de metano e hidrógeno, y la química de las llamas de difusión a contraflujo.

5.1. Definiciones fundamentales

El tratamiento cuantitativo de los procesos de combustión requiere cierto entendimiento de conceptos y definiciones fundamentales, que se describirán en esta sección. Una reacción química es el intercambio y/o reordenamiento de átomos entre moléculas colisionando. En el curso de una reacción química, por ejemplo,



los átomos (relevantes en la combustión: C, H, O y N) se conservan. Por otro lado, las moléculas (p.ej., HCN, OH, CN y H₂O) no se conservan. Las moléculas reactivas se reordenan para convertirse en moléculas producto, con una liberación simultánea de calor. Los átomos y moléculas se cuentan convenientemente en términos de cantidad de sustancia (a menudo, pero de manera incorrecta, llamada número de moles). Un mol de un compuesto corresponde a $6,023 \times 10^{23}$ partículas (átomos, moléculas, etc.). En consecuencia, la Constante de Avogadro es $N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

La combustión involucra múltiples especies reaccionando a través de múltiples reacciones químicas. Las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicables a un gas con múltiples especies y múltiples reacciones, pero requieren algunos términos adicionales.

En primer lugar, las especies se caracterizan por sus fracciones de masa Y_k para $k = 1$ a N donde N es el número de especies en la mezcla reactiva. Las fracciones de masa Y_k están definidas por:

$$Y_k = \frac{m_k}{m} \quad (1)$$

donde m_k es la masa de la especie k presente en un volumen dado V y m es la masa total del gas en este volumen. Además, se cumple que

$$\sum_{k=1}^n Y_k = 1 \quad (2)$$

Las variables primitivas para un flujo reactivo tridimensional compresible son:

- La densidad ρ
- El campo de velocidad tridimensional u_i
- Una variable para la energía (o presión o entalpía o temperatura)

- Las fracciones de masa Y_k de las N especies reactivas

Pasar de las ecuaciones de Navier-Stokes de flujos no reactivos a flujos reactivos requiere resolver $N + 5$ variables, 1 para la densidad, 3 de conservación de momento y una variable termodinámica, que puede ser la temperatura, donde aplicando la ley de gases ideales se obtienen las demás variables termodinámicas. Por último, al ser un flujo multiespecie se tiene que resolver las fracciones de masa para las N especies reactivas. Los principales esquemas químicos usan un gran número de especies, en promedio N es mayor a 50 para la mayoría de los hidrocarburos, por lo tanto, el número de ecuaciones de conservación a resolver aumenta considerablemente.

La densidad ρ del gas de múltiples especies es:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \rho_k \quad (3)$$

donde ρ_k es la densidad de la especie k :

$$\rho_k = \rho Y_k \quad (4)$$

La ecuación de estado es:

$$p = \rho \frac{R}{W} T \quad (5)$$

donde R es la constante de los gases y T es la temperatura.

Las fracciones de masa se utilizan en la mayoría de los códigos de combustión, pero también se introducen comúnmente otras cantidades para medir concentraciones de especies. La fracción molar X_k es la relación del número de moles de la especie k en un volumen V al número total de moles en el mismo volumen.

$$X_k = \frac{W}{W_k} Y_k \quad (6)$$

La concentración molar $[X_k]$ es el número de moles de la especie k por unidad de volumen. Es la cantidad utilizada para evaluar las tasas cinéticas de reacciones químicas.

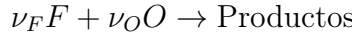
$$[X_k] = p/w_s = \frac{p}{W} X_k \quad (7)$$

El peso molecular promedio de la mezcla (W) se puede obtener de dos maneras:

$$W = \sum_{k=1}^N X_k W_k \quad (8)$$

Aunque múltiples radicales pueden estar involucrados en una llama, ciertas especies son más importantes para caracterizar el régimen de combustión. La relación de equivalencia (relación entre las fracciones de masa de combustible y oxidante) es el primer parámetro utilizado para caracterizar una llama. Su definición depende de la configuración del quemador (premezclado o no premezclado, como se explicará más adelante). En un quemador premezclado, el combustible y el oxidante se mezclan antes de entrar a la cámara de combustión. Si

ν_F y ν_O son los coeficientes correspondientes al combustible y al oxidante al considerar una reacción única general del tipo:



las fracciones de masa de combustible y oxidante corresponden a condiciones estequiométricas cuando:

$$\frac{Y_O}{Y_F} = \frac{\nu'_O W_O}{\nu'_F W_F} = s \quad (9)$$

Esta relación se denomina razón másica estequiométrica o simplemente razón estequiométrica, representada por la letra s , esta entrega la cantidad de masa de aire por masa de combustible que es necesaria en condiciones estequiométricas. En base a esta, se define la relación de equivalencia ϕ de una mezcla dada como:

$$\phi = s \frac{Y_F}{Y_O} = \frac{Y_F}{Y_O} / \left(\frac{Y_F}{Y_O} \right)_{st} \quad (10)$$

También puede ser reescrito como:

$$\phi = s \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_O} \quad (11)$$

donde $\dot{m}_F$ y $\dot{m}_O$ son, respectivamente, los caudales másicos de combustible y oxidante. La relación de equivalencia controla la combustión premezclada: se obtiene una combustión rica para $\phi > 1$ (el combustible está en exceso) mientras que se alcanzan regímenes pobres cuando $\phi < 1$ (el oxidante está en exceso). La mayoría de los quemadores operan en o por debajo de la estequiometría. En llamas de hidrocarburo/aire, los gases frescos contienen combustible, O_2 y N_2 con típicamente 3,76 moles de nitrógeno por 1 mol de oxígeno. Dado que la suma de las fracciones másicas debe ser unitaria, la fracción másica de combustible es:

$$Y_F = \frac{1}{1 + (1 + 3,76 W_{N_2}/W_{O_2})s/\phi} \quad (12)$$

La tabla 1 muestra valores de la relación másica estequiométrica s y de las correspondientes fracciones másicas de combustible para mezclas estequiométricas ($\phi = 1$) de metano y de hidrógeno con aire.

Reacción global	s	Y_F^{st}
$CH_4 + 2(O_2 + 3,76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7,52N_2$	4.00	0.055
$2H_2 + (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow 2H_2O + 3,76N_2$	8.00	0.028

Tabla 1: Valores típicos para diferentes reacciones globales.

Sobre los bajos valores de la fracción másica de combustible en condiciones estequiométricas se puede observar que, para estas mezclas de metano o hidrógeno con aire, prácticamente la mayoría de la masa es debida al aire. Así, las propiedades de la mezcla resultante en términos de pesos moleculares, propiedades de transporte y capacidades caloríficas son dominadas por el aire, al menos hasta antes de que la combustión tenga lugar.

Aquí se adelanta el concepto de llama de difusión para explicar como se define la relación de equivalencia para estos casos. En una llama de difusión el combustible y el oxidante se

introducen por separado en la cámara de combustión a través de dos (o más) entradas. Los flujos y las fracciones de masa se controlan por separado. En un quemador de llamas difusivas con solo dos entradas, la definición de la relación de equivalencia de la ecuación 10 caracteriza la estructura local de las llamas formadas cuando las dos corrientes (combustible y oxidante) interactúan. Sin embargo, no representa el comportamiento general del quemador para el cual debe introducirse una relación de equivalencia global ϕ_g :

$$\phi_g = \phi \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_O} \quad (13)$$

Esta es la relación de equivalencia global que agrega el efecto de estar trabajando con reactivos que fluyen constantemente. El exceso de aire, definido por $c = 100(1 - \phi/\phi_g)$, se utiliza también para caracterizar la mezcla en general. Proporciona el porcentaje de aire en exceso respecto a la tasa de flujo necesaria para consumir todo el combustible inyectado en el quemador.

5.2. Clasificación de llamas

Una llama es causada por una reacción química exotérmica autopropagada la cual usualmente tiene una zona luminosa asociada a ella. La forma en la que reaccionan los flujos reactivos muestra que se requieren 3 ingredientes para que la combustión proceda: (1) un combustible, (2) un oxidante y (3) una alta temperatura. En otras palabras, debe lograrse una cierta mezcla local para que el combustible y el oxidante alcancen la misma posición en un tiempo y temperatura determinados. Para estudiar los flujos reactivos, la comunidad de combustión ha identificado situaciones canónicas donde las ecuaciones de combustión pueden ser resueltas, y ha definido regímenes de llama para clasificar el nivel de complejidad encontrado en una llama dada. La Fig. 1 presenta una primera separación de llamas en cuatro categorías: completamente premezcladas frente a no premezcladas (también llamadas llamas de difusión) y laminar frente a turbulento. La Fig. 2 muestra la misma clasificación agregando algunos ejemplos de estos regímenes.

El concepto de premezcla en este caso se refiere al hecho de si los reactantes son mezclados o no antes de iniciarse la combustión. Las llamas premezcladas son cuando el combustible y oxidante ya fueron mezclados en cierta proporción y luego combustionan. Por lo cual el proceso de mezcla en estas llamas pasa a segundo plano. Por otro lado, las llamas no premezcladas es cuando estos no son mezclados previo a la combustión, entonces la mezcla y la combustión suceden simultáneamente, esto hace que proceso de mezcla se vuelva relevante en la llamas no premezcladas. Aquí sería apropiado aclarar que, debido a que el proceso de mezcla es predominante y su principal mecanismo de acción es a través de la difusión molecular, estas llamas suelen ser conocidas como llamas difusivas. Las llamas premezcladas y las no premezcladas tienen ciertas diferencias. Las llamas premezcladas son más intensas y generan menos polución, pero también son más peligrosas porque cualquier punto dentro de una llama premezclada puede conducir a una ignición indeseada bajo ciertas condiciones. Por otro lado, las llamas de difusión tienen razones de quemado más bajas, es decir, el combustible se quema a velocidades más bajas. Otra característica de estas es que puede alcanzar temperaturas locales más elevadas, lo cual hace que genere mayor polución. Cabe resaltar que son más seguras porque los reactantes son almacenados por separado y solo

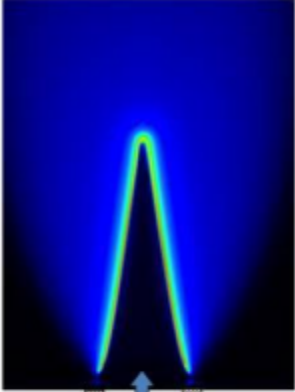
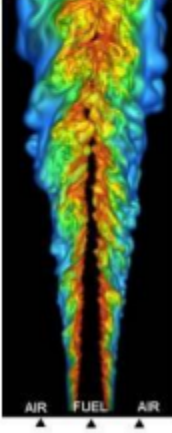
	Laminar	Turbulent
Premixed	 Bunsen flame [601] Chapter 2	 Dump-stabilized flame Chapters 4 and 5
Non premixed	 Lighter Chapter 3	 Jet flame [720] Chapters 4 and 6

Figura 1: Clasificación de llamas. Fuente [8].

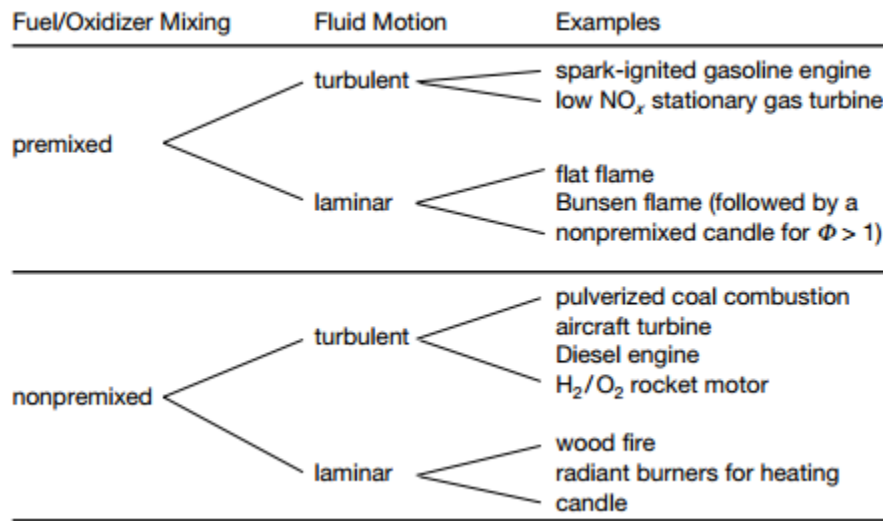


Figura 2: Ejemplo de sistemas de combustión ordenados con respecto a la premezcla y tipo de flujo. Fuente [3].

se mezclan cuando combustionan. Otra diferencia entre llamas premezcladas y difusivas es el límite de inflamabilidad: las llamas difusivas pueden combustionar a cualquier razón de flujos de combustible y oxidante, mientras que las llamas premezcladas están limitadas por las características de su mezcla, ya que las mezclas muy pobres o muy ricas no se propagan. La turbulencia es la segunda clasificación característica. Ya que todas las llamas son turbulentas cuando el número de Reynolds es lo suficientemente grande (es decir, a altas velocidades), las llamas también se vuelven turbulentas en condiciones prácticas de combustión.

5.3. Llamas difusivas

En muchos sistemas de combustión la configuración premezclada no puede usarse porque es muy peligrosa o es demasiado complicado mezclar los reactantes antes de ingresarlos a la cámara de combustión. Para estas situaciones deben usarse configuraciones no premezcladas o de difusión. Las llamas de difusión constituyen una clase específica de problemas en combustión donde el combustible y el oxidante no son mezclados antes de la combustión; para estas llamas, el proceso de mezcla debe llevar a los reactantes a una zona de reacción lo suficientemente rápido como para que la combustión proceda. En las llamas premezcladas al ser la mezcla de reactantes antes de la combustión este proceso no requiere mayor atención, a diferencia de las llamas no premezcladas, donde la mezcla llega a ser el tema principal. La Fig. 4 muestra estructura y configuración básica de llamas no premezcladas. En lugar de un estado como en llamas premezcladas (reactantes premezclados), las llamas de difusión tienen dos estados: combustible a un lado y oxidante al otro. Combustible y oxidante se difunden hacia la zona de reacción donde reaccionan liberando calor. La temperatura es máxima en esta zona y la difusión térmica la mueve fuera del frente de llama, hacia las corrientes de combustible y oxidante. Además, lejos a cada lado de la llama, el gas es demasiado rico o demasiado pobre para quemar. Las reacciones químicas pueden proceder solo en una región

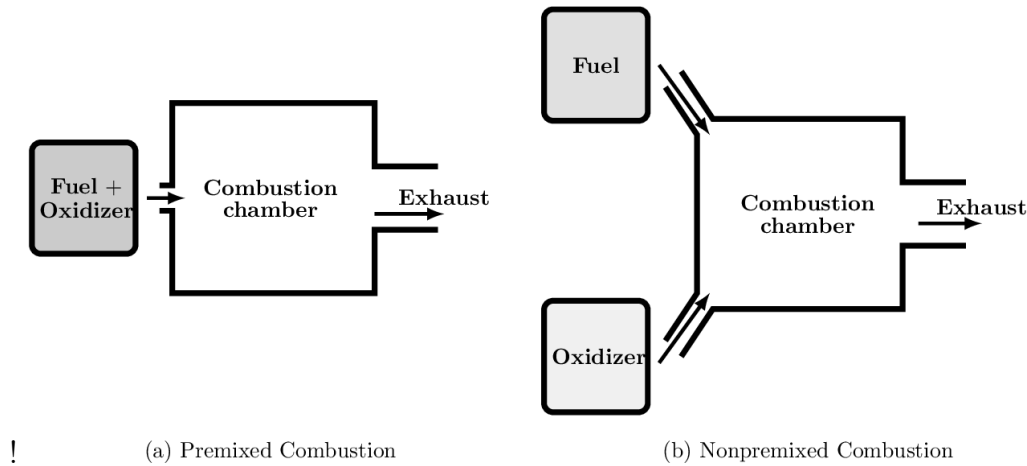


Figura 3: Esquema para combustión premezclada (a) y no premezclada (b). Fuente [8]

limitada, donde el combustible y el oxidante se mezclan adecuadamente. La mezcla más favorable se obtiene cuando el combustible y el oxidante están en proporciones estequiométricas: una llama de difusión generalmente se encuentra en los puntos donde la mezcla produce una mezcla estequiométrica. La estructura de la llama representada en la Fig. 4 es estacionaria solo cuando se aplica tensión a la llama, es decir, cuando las corrientes de combustible y oxidante se presionan mutuamente a velocidades dadas como se muestra en la Fig. 5b. Una llama de difusión no muestra una "velocidad de referencia" como las llamas premezcladas; la llama no puede propagarse hacia el combustible debido a la falta de oxidante y no puede propagarse hacia la corriente de oxidante debido a la falta de combustible. En consecuencia, la zona de reacción no se mueve significativamente en relación con el campo de flujo. Al no poder propagarse contra el flujo, las llamas de difusión son más sensibles a las perturbaciones de velocidad, que las llamas premezcladas, especialmente a la turbulencia. Una llama de difusión no tiene un "espesor" de referencia: la llama no estirada (unstretched) de la Fig. 5a crece indefinidamente con el tiempo mientras que el espesor de la llama estirada de la Fig. 5b depende esencialmente del estiramiento (stretch) y puede tomar un rango muy amplio de valores. Esto es muy diferente de las llamas premezcladas donde se puede introducir un espesor y depende de las propiedades del fluido y la velocidad de la llama. En términos de aplicaciones industriales, la mezcla es también la característica clave de las llamas de difusión. Estas llamas son más simples de diseñar y construir: no se requiere premezcla, con una relación de equivalencia dada. También son más seguras de operar porque no se propagan. Sin embargo, su eficiencia de combustión se reduce en comparación con las llamas premezcladas porque la mezcla reduce la velocidad a la que pueden proceder las reacciones químicas.

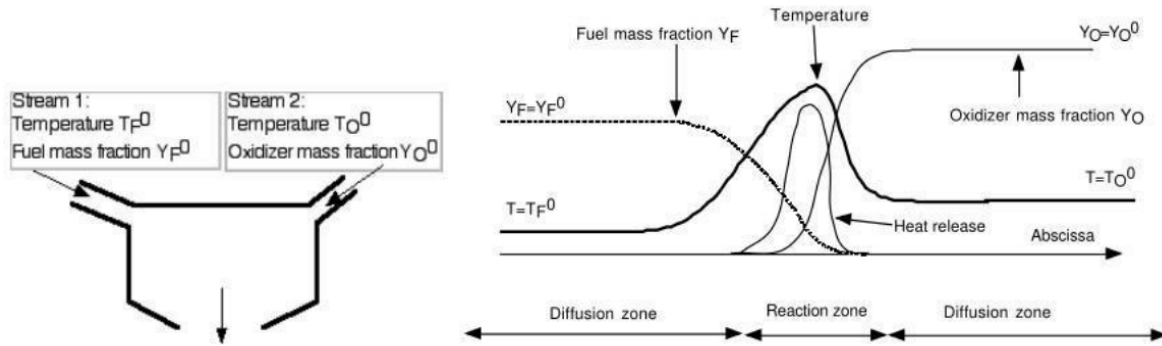


Figura 4: Configuración (izquierda) y estructura (derecha) básica de llamas no premezcladas. Fuente [8].

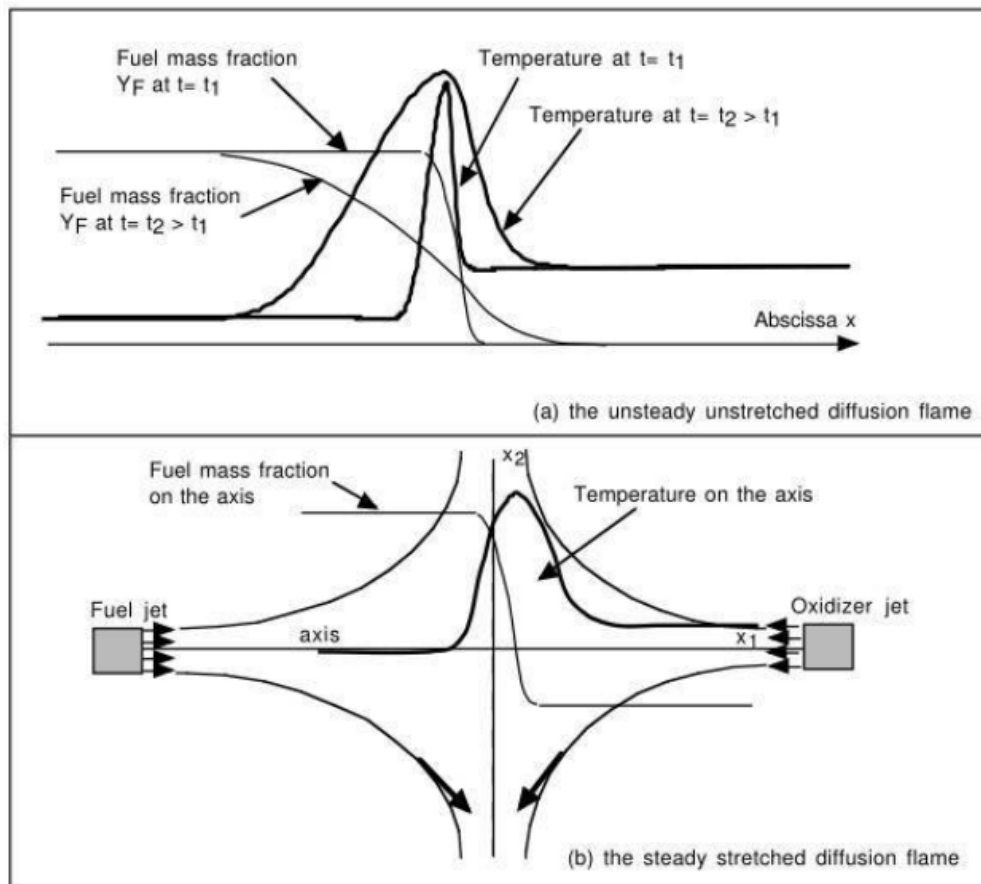


Figura 5: Llama de difusión no estacionario y no tensionado (a) y estacionaria y tensionada (b). Fuente [8].

5.3.1. Flame Stretch

En la combustión, el concepto de *flame stretch* o estiramiento de la llama (κ) es una cantidad que mide la cantidad de estiramiento de la superficie de la llama debido a la curvatura y a la velocidad externa del campo de deformación. El concepto inicial de estiramiento de la llama fue introducido por Karlovitz en 1953, aunque la definición correcta fue introducida dos décadas después por Forman A. Williams en 1975. George H. Markstein estudió el estiramiento de la llama tratando la superficie de la llama como una discontinuidad hidrodinámica (conocida como frente de llama). El estiramiento de la llama también fue discutido en el libro de Bernard Lewis y Guenther von Elbe. Todas estas discusiones trataron el estiramiento de la llama como un efecto de los gradientes de velocidad del flujo. El estiramiento se puede encontrar incluso si no hay un gradiente de velocidad; en ese caso, es solo debido a efectos de curvatura de la llama. Por lo tanto, la definición requería una formulación más general y su definición precisa fue introducida por primera vez por Forman A. Williams en 1975 como la relación de la tasa de cambio de la superficie de la llama con respecto al área en sí misma.

La ecuación 14 define estos cambios para efectos de deformación y curvatura conducen como la tasa fraccional de cambio de un elemento de superficie de llama A :

$$\kappa = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (14)$$

Una expresión general del *stretch* se desarrolla a partir de consideraciones cinemáticas y matemáticas:

$$\kappa = \nabla_t \cdot \vec{u} - s_d \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \nabla_t \cdot \vec{u} + s_d \nabla_t \cdot \vec{n} \quad (15)$$

Con la ecuación 15 se puede calcular el strain rate en cada punto de la llama. Esta ecuación se divide en la suma de dos términos. El primer término $\nabla_t \cdot \vec{u}$ corresponde al strain rate y el segundo término $s_d \nabla_t \cdot \vec{n}$ es un término debido a la curvatura del frente de reacción.

Algunos ejemplos de llamas estiradas que son usadas para estudios experimentales y numéricos se muestran en la Fig. 6. La primera (Fig.6a) es la llama individual en la que los productos de combustión caliente (generalmente producidos por otra llama) se envían contra un flujo de gases frescos. En este caso, la llama se estira porque la velocidad en el plano tangente de la llama cambia rápidamente (primer término del lado derecho de la Ec.15).

La segunda es la configuración de llama gemela (Figura 6b) que se forma al enfrentar dos flujos de gas combustible estableciéndose dos llamas. Similar al caso anterior, las llamas gemelas dependen solo de la deformación, y también de las condiciones termodinámicas del flujo de combustible.

Finalmente, la llama esférica (Fig. 6c) no tiene gradiente de velocidad en el plano tangente de la llama, pero está curvada. El estiramiento es producido por el segundo término del lado derecho de la Ec.15.

Resulta interesante notar que en las llamas con punto de estancamiento como las de las Figuras 6a y 6b, el strain rate (SR) y el stretch rate son iguales, ya que el término de curvatura de la ecuación 15 es despreciable. El *stretch* tiene una fuerte influencia en los frentes de llama. La teoría asintótica (williams), las mediciones (ishizuka) y las simulaciones

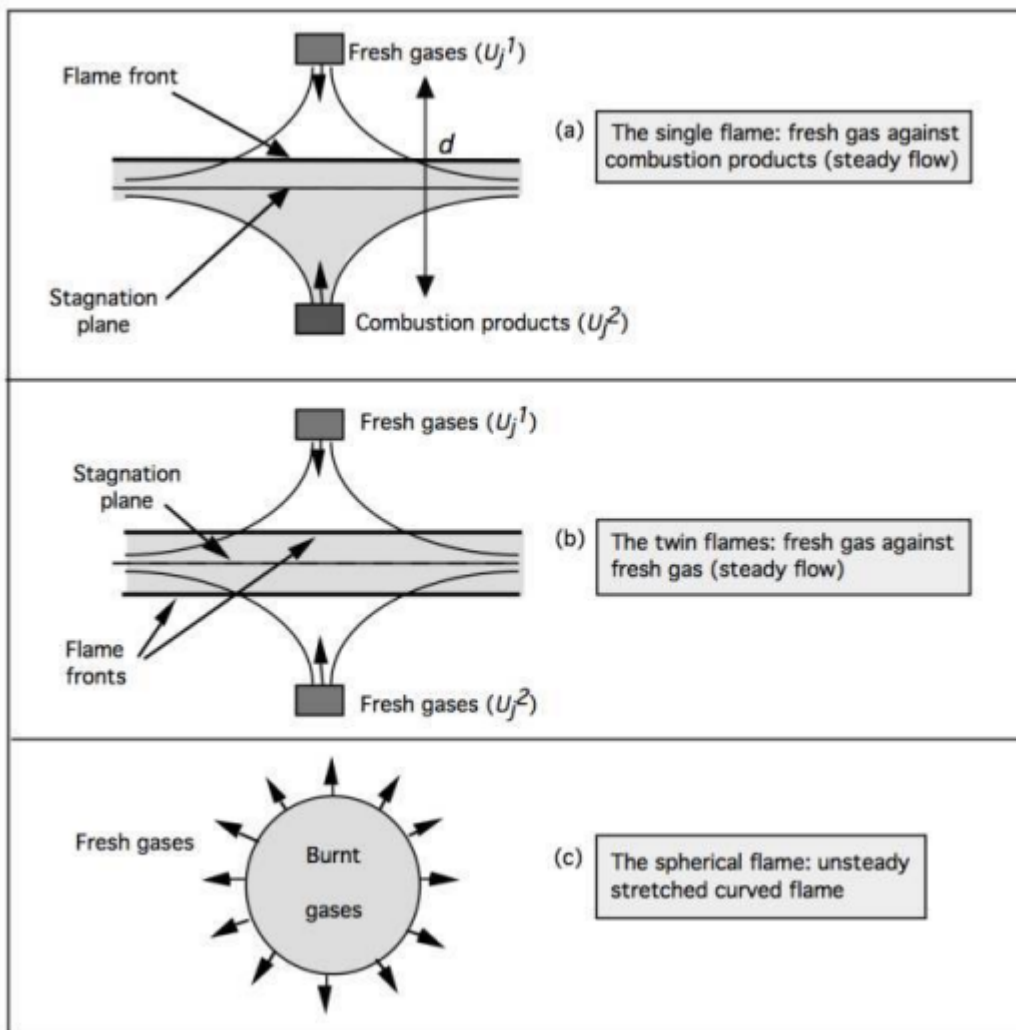


Figura 6: Ejemplos de llamas estiradas o stretched flames. Fuente [8]

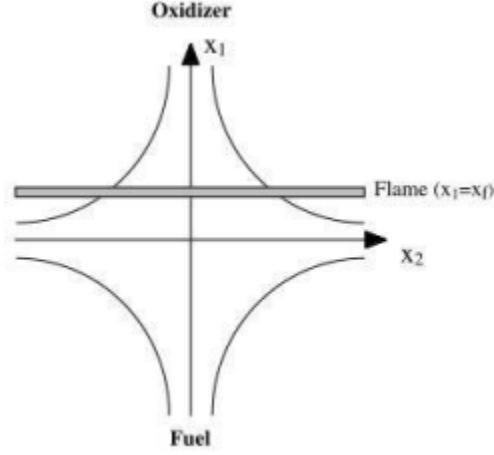


Figura 7: Llama difusiva unidimensional estirada constante. Fuente [8].

numéricas (Darabiha, giovangigli, smooke) proporcionan una descripción bastante completa de la respuesta de las llamas de punto de estancamiento a los efectos del estiramiento. A valores bajos de estiramiento, se observan comportamientos tipo Markstein. En estos, las velocidades de la llama cambian linealmente con el estiramiento. Sin embargo, para valores más altos de estiramiento, se necesitan teorías analíticas más sofisticadas, cálculos o experimentos.

5.3.2. Llama de difusión de contraflujo

La llama usada en este trabajo es una llama estirada como las presentadas en la Fig.6, pero con la diferencia de que la llama es del tipo no premezclada. La Fig.7 muestra un esquema simple de esta configuración con el oxidante entrando desde arriba y el oxidante desde abajo. Como se ha dicho, este trabajo pone énfasis en el parámetro SR . Para adquirir intuición sobre el significado físico de este parámetro, se suele considerar el caso cuando no hay combustión y solo se tienen dos flujos no reactivos chocando uno contra otro. En este caso, el comportamiento del flujo viene dado por la solución de flujo potencial con un punto de estancamiento cuya solución analítica es:

$$u = ax \quad y \quad v = -ay$$

donde a representa la tasa de deformación o SR (s^{-1}). En la Fig.7, $x_1 = 0$ representa el plano de estancamiento que se forma entre el choque de los flujos.

A bajos SR , las partículas tendrán un tiempo mayor de residencia en la zona de reacción comparado con SR mayores. Este análisis será importante más adelante ya que, cuando se considera el caso con combustión, los tiempos de residencia de las especies químicas en la zona de combustión varían junto con variaciones de SR .

Para un flujo entre dos inyectores, SR está determinado por las velocidades de flujo V_1 y V_2 y la distancia L entre las boquillas inyectoras. En flujos reactivos, el SR depende de la estructura de la llama en sí debido a la dilatación y es típicamente del orden de $(V_1 + V_2)/L$.

En un comienzo, se medía el SR experimentalmente mapeando el campo de velocidad del flujo utilizando técnicas como la anemometría Láser-Doppler (LDV) y tomando la derivada de la velocidad a lo largo de la línea central del chorro. Estas eran operaciones tediosas y complicadas. Actualmente, cuando se requiere calcular este parámetro, se trabaja con un valor proporcional conocido como *strain rate global* (SRG), que se calcula fácilmente en base a parámetros operacionales. Aun así, el método de seguimiento de partículas dejó imágenes bastante interesantes de la visualización real de las líneas de flujo cerca del punto de estancamiento. Pandya en su trabajo de tesis doctoral “An optical study of the structure of diffusion flames” en 1963 obtuvo una imagen (Fig. 8) donde se observan claramente las líneas de corriente del flujo.

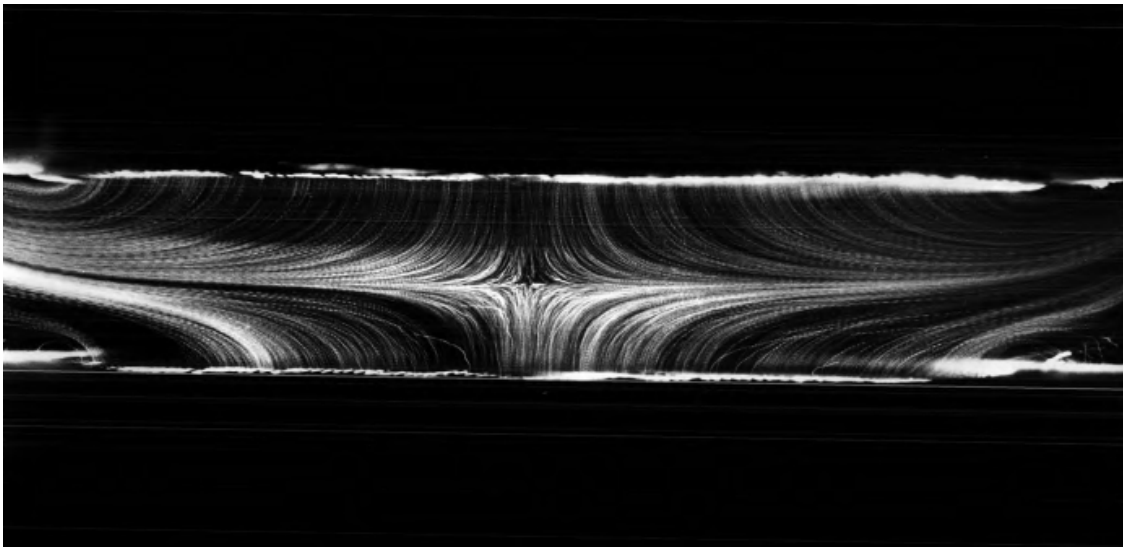


Figura 8: Imagen de las líneas de corriente del flujo cerca de la superficie de estancamiento obtenida por Pandya en 1963. Fuente (Pandya).

El *strain rate global* (SRG) se calcula con la siguiente fórmula (niemann2012):

$$SRG = \frac{2V_1}{L} \left(1 + \frac{V_2\sqrt{\rho_2}}{V_1\sqrt{\rho_1}} \right) \quad (16)$$

donde ρ_1 y V_1 son la densidad del combustible y su velocidad a la salida de la boquilla. De forma similar ρ_2 y V_2 se refieren al lado del oxidante.

En el libro de Poinso se dedica una sección a la modelación matemática de la llama que se forma específicamente en el quemador de flujo opuesto asumiendo una química infinitamente rápida y densidad constante. Además de dichos supuestos, también hay otros supuestos en relación a la termodinámica que es pertinente tener presentes:

1. La presión termodinámica es constante y el número de Mach son pequeños.
2. Todos los coeficientes de difusión D_k de las especies químicas son iguales.
3. Las capacidades caloríficas C_{p_k} de las especies químicas son iguales e independientes de la temperatura.

Algunas de las herramientas teóricas descritas en dicha sección se describen a continuación. A grandes rasgos, cuando se quiere resolver el problema de combustión de llamas difusivas, se trabaja con la variable z llamada fracción de mezcla, que define el valor de la mezcla combustible en el espacio. Esta variable sigue las leyes de conservación de masa, energía y transporte.

La ecuación de conservación para z en esta llama es:

$$\frac{\partial \rho z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 z) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 z) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_2} \right) \quad (17)$$

Aunque el campo z es unidimensional, el término $\partial(\rho u^2 z)/\partial x^2$ debe mantenerse porque u_2 depende de x_2 . Usando la ecuación de continuidad, la ecuación z puede reescribirse en una forma no conservativa:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \rho u_1 \frac{\partial z}{\partial x_1} + \rho u_2 \frac{\partial z}{\partial x_2} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\rho D \frac{\partial z}{\partial x_2} \right) \quad (18)$$

En el eje normal a una llama tensada estacionaria, asumiendo como constante la densidad y el coeficiente de difusión, la ecuación para z se reduce a:

$$-a x_1 \frac{\partial z}{\partial x_1} = D \frac{\partial^2 z}{\partial x_1^2} \quad (19)$$

Reemplazando x_1 por $\xi = x_1 \sqrt{a/2D}$ da:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} + 2\xi \frac{\partial z}{\partial \xi} = 0 \quad (20)$$

La solución es entonces:

$$z = \frac{1}{2}(1 - \text{erf}(\xi)) \quad \text{con} \quad \xi = \frac{x_1}{\sqrt{2D}} \quad (21)$$

Se define ξ_f como la ubicación de la llama y está dado por:

$$\xi_f = x_1 \frac{a}{2D} = \text{erf}^{-1}(1 - 2z_f) = \text{erf}^{-1} \left(\frac{\phi - 1}{\phi + 1} \right) \quad (22)$$

Desde donde se desprende que para $\phi < 1$ o $z_{st} > 0,5$, la llama se encuentra en el lado del combustible ($\xi_{1f} < 0$) del plano de estancamiento $x_1 = 0$. Para $\phi > 1$ ($z_{st} < 0,5$), $\xi_{1f} > 0$ y la llama se encuentra en el lado del oxidante del plano de estancamiento. El frente de la llama siempre está ubicado en el lado deficiente del reactivo y se encuentra en el plano de estancamiento solo cuando $\phi = 1$ ($z_{st} = 0,5$), es decir, cuando los reactivos están en proporciones estequiométricas.

La tasa de disipación escalar de la fracción de mezcla, χ , es una cantidad clave en las descripciones de la llama de difusión. Para una llama estirada unidimensional con densidad constante, la tasa de disipación escalar χ está dada por la Ec.23 como:

$$\chi = 2D \left(\frac{\partial u}{\partial x_1} \right)^2 = \frac{a}{\pi} \exp \left(-\frac{a}{D^2} x_1^2 \right) \quad (23)$$

Las ecuaciones 23 muestran que la tasa de disipación escalar y el SR están estrechamente relacionados. En una llama de contraflujo estable, la tasa de deformación a es constante, mientras que la tasa de disipación escalar χ depende de la ubicación espacial x . Por otro lado, las tasas de deformación solo están vinculadas a las características del campo de flujo (gradientes de velocidad local), mientras que las tasas de disipación escalar miden propiedades de mezcla (de hecho, gradientes de fracción de mezcla), incorporan valores de fracción de masa a través de z y son capaces de manejar situaciones parcialmente premezcladas.

5.3.3. Strain rate y extinción de llama

Las llamas de difusión de flujos opuestos han sido utilizadas durante mucho tiempo para probar la inflamabilidad de varios sistemas de combustible/oxidante. Una configuración experimental de contraflujo de combustible chocando con aire al cual se ha añadido un agente supresor es una buena aproximación de la mayoría de los tipos de supresión de fuego.

Las llamas de flujos opuestos constituyen una de las configuraciones experimentales más simples en las que se puede medir la extinción de llamas no premezcladas. La extinción ocurre cuando las tasas de flujo de combustible y oxidante se incrementan por encima de ciertos valores. Una interpretación intuitiva de este fenómeno es que la llama se apaga cuando las reacciones químicas no pueden ocurrir lo suficientemente rápido como para mantener un pool suficiente de especies reactivas contra el flujo de reactantes entrantes. El cambio en la condición de extinción cuando se añade un agente de supresión de fuego indica el grado en que el agente ralentiza la tasa de reacción de la llama, por ejemplo, enfriando la llama o agotando el pool de radicales necesarios para la combustión.

La condición de extinción puede caracterizarse por las tasas de flujo de combustible y oxidante que causan la extinción de la llama. Sin embargo, tales parámetros no son propiedades intrínsecas del sistema de combustible/oxidante en estudio, sino que son particulares de un aparato experimental dado.

Una cantidad más fundamental en este aspecto es el *stretch flame*; este se utiliza para facilitar comparaciones entre diferentes laboratorios que utilizan diferentes configuraciones experimentales. El inverso del *stretch flame* es una escala de tiempo natural del flujo en esta configuración y, bajo diversas suposiciones, el *stretch flame* en la extinción de la llama puede mostrarse proporcional a la tasa de reacción global. Así, por ejemplo, la efectividad de un aditivo supresor para reducir la tasa de reacción global puede determinarse simplemente observando los cambios correspondientes en el *stretch flame* de extinción.

El *stretch flame* que se cita típicamente para una llama de flujo opuesto es el gradiente de velocidad máxima a lo largo del eje del flujo en el lado del aire del plano de estancamiento, que generalmente ocurre justo aguas arriba de la llama. Las expresiones como la ecuación 23 provienen de diversas suposiciones sobre las condiciones de velocidad de salida del flujo con la cual se puede estimar el *stretch flame* basado en las composiciones y tasas de flujo de las dos corrientes de reactantes. Sin embargo, hay que tener presente que tales ecuaciones descuidan los efectos de la química y la variación de temperatura y se denominan "global *stretch flames*".

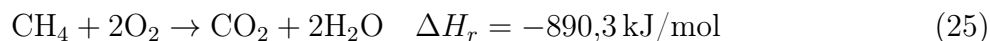
Se encuentran típicamente dos casos para la geometría del flujo experimentalmente. Si los dos flujos se forman a partir de tubos largos y rectos sin obstrucciones, el perfil de velocidad axial en la salida del tubo como función de la posición radial sigue un perfil parabólico,

que produce un flujo que se diverge radialmente aguas abajo de la salida del tubo. Esta configuración a menudo es modelada imponiendo una solución de flujo potencial como la condición límite. Si, por otro lado, el perfil de velocidad axial es radialmente uniforme a través de la salida del tubo (generalmente logrado experimentalmente por pantallas o por toberas convergentes), el flujo no diverge aguas abajo de la salida del tubo y es modelado como flujo tapón (*Plug flow*).

5.4. Combustión de metano e hidrógeno

El hidrógeno es apreciado por su potencial como un portador de energía limpio. El uso de mezclas de metano e hidrógeno es considerado un paso en la dirección de combustibles libres de contaminación. Sin embargo, dada la alta reactividad y difusividad de hidrógeno, presentan desafíos únicos en la contención y control de la llama.

La combustión del hidrógeno, de metano y de ambos mezclados están dadas por las siguientes ecuaciones estequiométricas:



En la tabla 2 se indican los límites de inflamabilidad. Para el caso de llamas difusivas no es tan relevante como lo es en llamas premezcladas, donde estas solo pueden combustionar en un determinado rango de mezclas.

Reactivos	Límites de inflamabilidad (% en volumen)
H ₂ + aire	4.0 – 75
CH ₄ + aire	5.3 – 15

Tabla 2: Poder calorífico y límites de inflamabilidad de reacciones de hidrógeno y metano con aire.

El cálculo de la temperatura adiabática es un ejercicio típico en combustión. La máxima temperatura que podría alcanzar la mezcla de aire con hidrógeno en condiciones estequiométricas sin exceso de aire es de 2483 K y para el caso de metano es de 2236 K.

Para un mejor análisis de los resultados de este trabajo, es útil manejar el concepto de mecanismos de reacción. El mecanismo de reacción es el paso a paso detallado de cómo ocurre la reacción a nivel molecular. En una ecuación química general puede haber varios pasos intermedios no representados en la ecuación global. Estos pasos intermedios constituyen el mecanismo de reacción.

Los mecanismos de reacción son especialmente útiles para comprender cómo ocurren las reacciones a nivel molecular y para prever qué productos se pueden esperar en diferentes condiciones. A menudo, estos mecanismos implican la ruptura y formación de enlaces químicos, así como la movilidad de electrones.

La tasa de reacción en una reacción química nos proporciona información sobre la velocidad a la que se forman los productos y la velocidad a la que se consumen los reactantes. La velocidad de una reacción química se puede expresar en función de cómo cambian las concentraciones de los reactivos y productos con respecto al tiempo. Cuando se trata de la combustión de un combustible, la complejidad del mecanismo de reacción depende de la naturaleza del combustible. Combustibles más complejos o variados, como los hidrocarburos presentes en los combustibles fósiles, pueden tener mecanismos de reacción más elaborados debido a la diversidad de especies químicas involucradas. Es importante tener en cuenta que, a veces, para describir completamente el comportamiento de la combustión de un combustible, es necesario considerar diversas etapas y reacciones intermedias que pueden ocurrir en el proceso global. Estos mecanismos detallados pueden incluir pasos como la iniciación, la propagación y la terminación de la reacción.

En un mecanismo de reacción típico, se describen las siguientes partes:

1. Paso Inicial (Iniciación): Indica cómo comienza la reacción. Puede ser la ruptura de un enlace o la formación de un nuevo enlace.
2. Pasos Intermedios (Propagación): Describen la transformación de los reactivos en productos a través de una serie de eventos. En estos pasos, los intermedios formados se consumen en el siguiente paso.
3. Paso Final (Terminación): Indica cómo se completa la reacción, y los productos finales se forman a partir de los intermedios.

La tasa de liberación de calor (HRR, por sus siglas en inglés) se refiere a la cantidad de calor liberada por unidad de tiempo durante un proceso de combustión. Según Oh et al. (2007) en condiciones de bajo SR la zona de liberación de calor se vuelve más gruesa en comparación con altos SR; esto tiene sentido si el tiempo de residencia de los reactantes es mayor a altos bajos SR, lo que permite que estas reacciones ocurran en zonas de reacción más grandes. Como observación, la Figura 9 muestra la estructura que obtuvo para una llama de difusión de contraflujo de metano en su trabajo, teniendo zonas de liberación de calor entre 1.7 y 2.0 mm de ancho.

Las reacciones globales que suelen presentarse para representar un proceso de combustión, como la reacción de hidrógeno con aire $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$, nunca ocurren en realidad; más bien, existen una cadena de múltiples reacciones que ocurren muy rápidamente. Cuántas especies y reacciones químicas se consideran lo define el mecanismo de reacción. Este último se determina según el grado de precisión que se requiera. Existen combustibles tan complejos (desde cientos hasta miles de especies generadas durante la combustión) que para su estudio numérico se usan técnicas para simplificar la química del problema, por ejemplo, usando análisis de trayectoria de reacción (reaction path analysis) y análisis de sensibilidad.

A continuación, se presenta la estructura química de una llama difusiva de hidrógeno no premezclada de contraflujo a presión atmosférica con un SR de 300 s^{-1} . Específicamente, la Fig. 10 muestra los perfiles de las especies principales (H , O_2 y H_2O) y secundarias (H , O , OH , HO_2 y H_2O_2).

La Fig.11a muestra las tasas de producción de las especies químicas más importantes (H , O , OH , H_2 , O_2 , y H_2O). En la Fig. 11b y 12a, por otro lado, se muestran las tasas de reacción

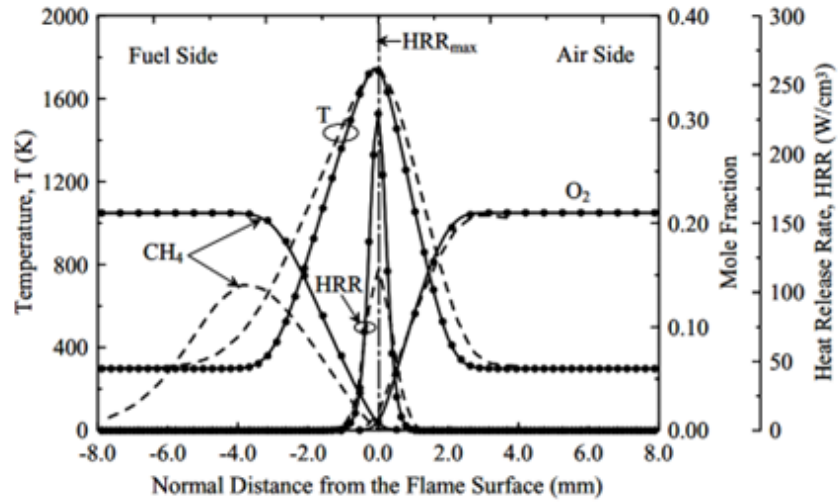


Figura 9: Temperatura de la llama. Concentraciones de reactivos (CH_4 y O_2) y tasa de liberación de calor en coordenadas normales a la superficie de la llama difusiva a contraflujo con un SR de 60 s1. Fuente (Oh2007).

clave en el consumo de H_2 y O_2 , respectivamente. El perfil de temperatura se agrega para relacionar los parámetros reactivos relevantes en el entorno de alta temperatura. La Fig. 11a muestra el perfil global de temperatura ubicado del lado del oxidante con respecto a la superficie de estancamiento; esta última es indicada por una flecha en la parte superior del gráfico. La superficie de estancamiento en la llama de puro hidrógeno se ubica en este caso a aproximadamente 5 mm de la boca inyectora de combustible. Este resultado se basa en la estequiometría de la reacción entre hidrógeno y aire. Aumentar la concentración de oxígeno moverá la llama hacia el lado del combustible. En esta figura también se muestra que, inicialmente, H_2 y O_2 están separados; existe una zona interfacial (entre los 0.7 y 0.8 cm) donde coexisten y se alcanza aquí la máxima tasa de liberación de calor (véase Fig. 12b). Además, los picos de temperatura y producción de H_2O se encuentran ligeramente hacia el lado del combustible de esta zona.

Comparando los perfiles de los gráficos a y b de la Fig. 10 se muestra que la estructura química de la llama, representada por la extensión de los perfiles de los radicales, es mucho más amplia (de 0.5 a 0.85 cm) que la zona donde se mezclan los flujos principales y que es donde sucede principalmente la liberación de calor y se alcanza la máxima temperatura. De hecho, la estructura química básicamente se superpone a la estructura térmica dada por el perfil de temperatura. Por otra parte, los perfiles de tasa de reacción en las figuras 11 y 12 están ligeramente más extendidos que la región interfacial de H_2 y O_2 . La tasa de reacciones llega a abarcar la zona de 0.65 a 0.85 cm, mientras que la zona interfacial es entre los 0.7 y 0.8 cm. Aun así, la mayor parte de las reacciones tienen lugar en la zona interfacial. Consecuentemente, se puede identificar esta región como una zona activa de reacciones.

Sobre la visibilidad de la llama de hidrógeno existe aún cierto desconocimiento. Schefer et al. indican en su artículo sobre emisión visible de llamas de hidrógeno que el espectro de luz visible por el humano está presente en las llamas difusivas y premezcladas de hidrógeno.

Usualmente se asocia la luminiscencia química a especies tales como OH , CH y C_2 . En sus resultados indican que, en llamas de hidrógeno y aire, las emisiones características provienen de moléculas con OH en el rango ultravioleta, mientras que las moléculas de H_2O son excitadas vibrando y emitiendo en zonas infrarrojas. En las llamas premezcladas indican la existencia de una zona de emisión continua en casi todo el espectro de luz visible. Concluyen que la emisión azul se debe principalmente a especies químicas tales como H y O .

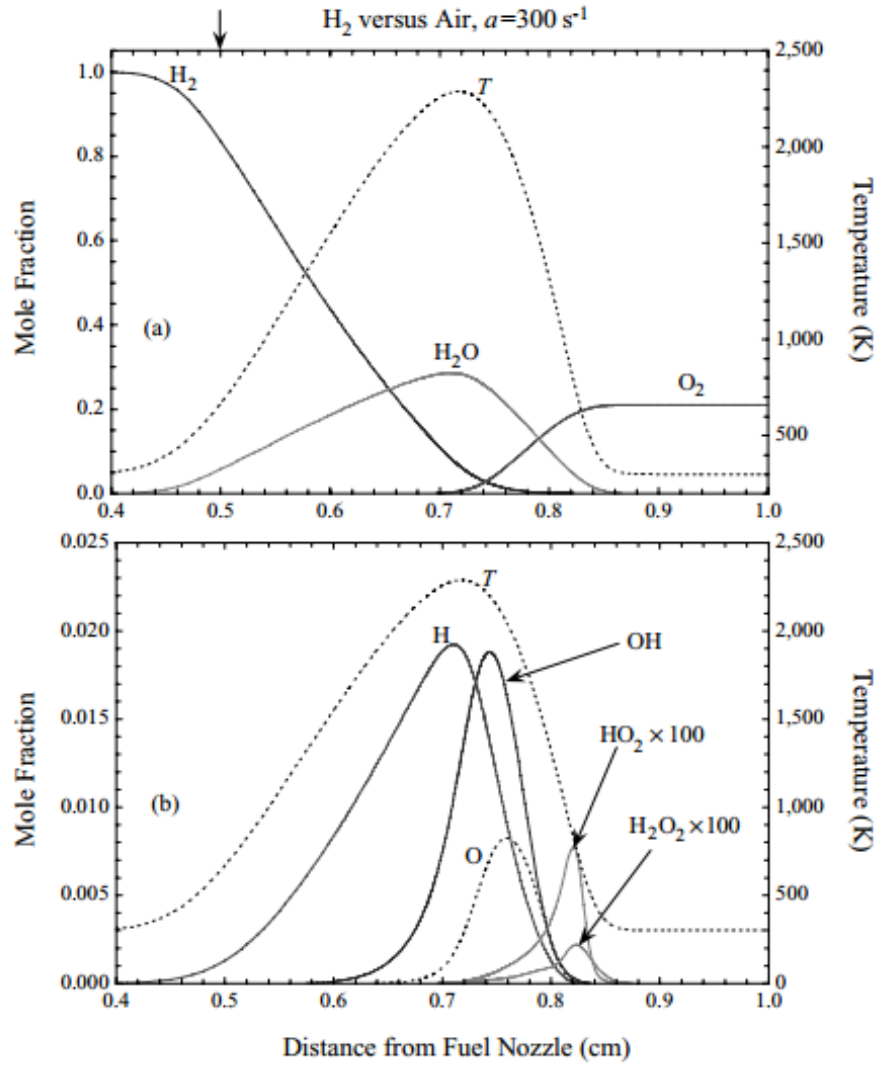


Figura 10: Estructura química de una llama no premezclada en contracorriente de hidrógeno versus aire en condiciones estándar: (a) especies principales, y (b) especies menores; perfil de temperatura superpuesto. La flecha vertical indica la ubicación de la superficie de estancamiento. Fuente [4].

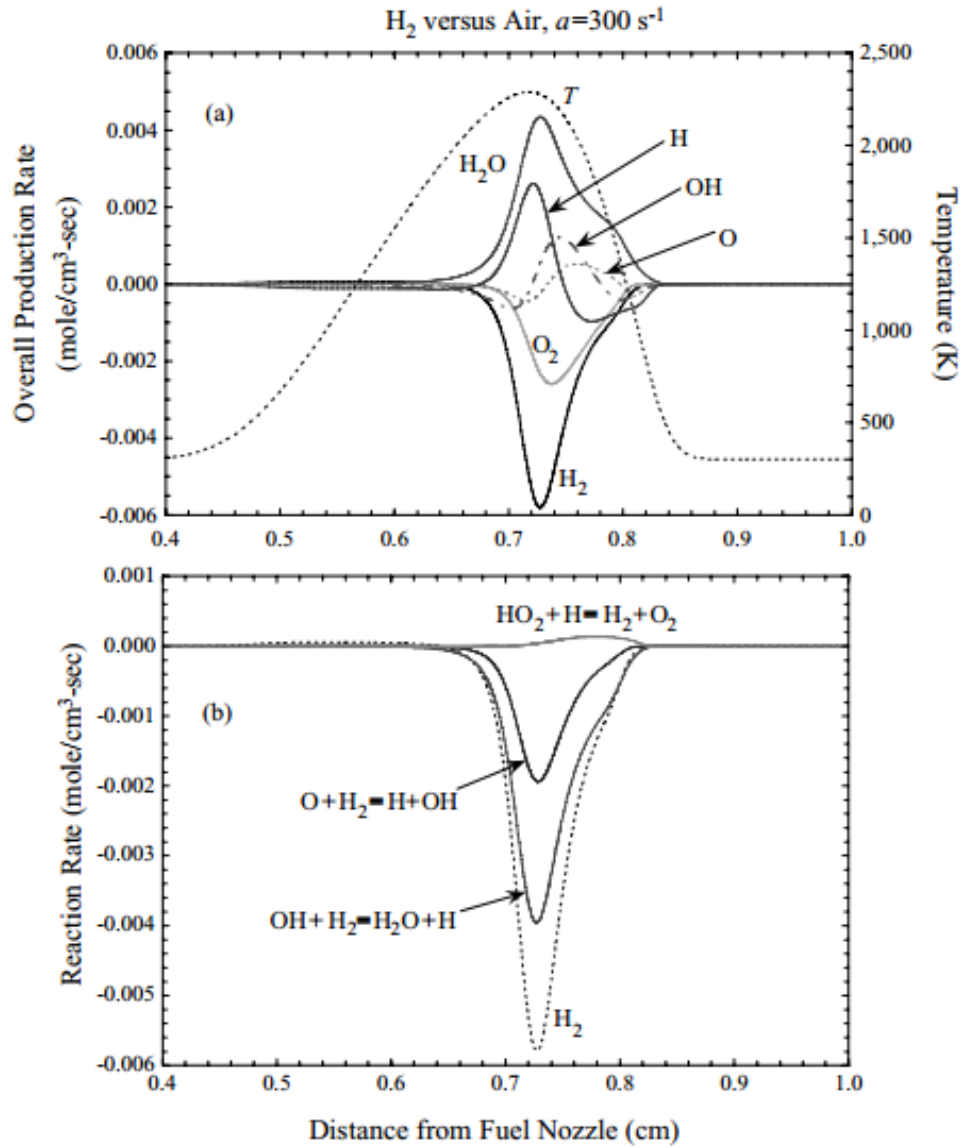


Figura 11: Estructura química de una llama no premezclada en contracorriente de hidrógeno versus aire en condiciones estándar: (a) tasas de producción de las especies importantes (H , O , OH , H_2 , O_2 y H_2O), y (b) tasas de algunas reacciones clave para el consumo de H_2 . Fuente [4].

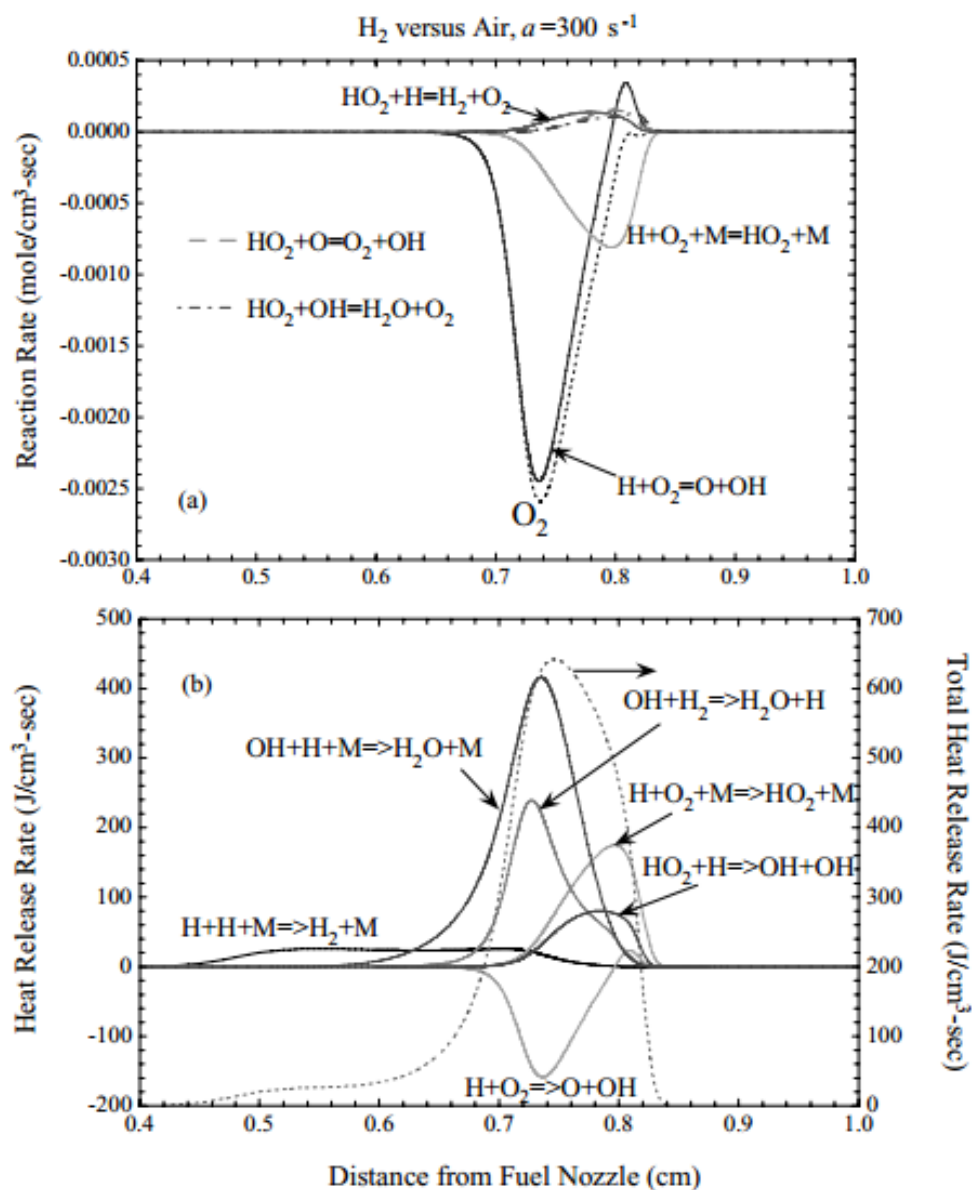


Figura 12: Estructura química de una llama difusiva a contraflujo de hidrógeno frente al aire en condiciones estándar: (a) tasas de algunas reacciones clave que explican el consumo de O_2 , y (b) tasas de producción de calor de las reacciones clave exotérmicas y endotérmicas.

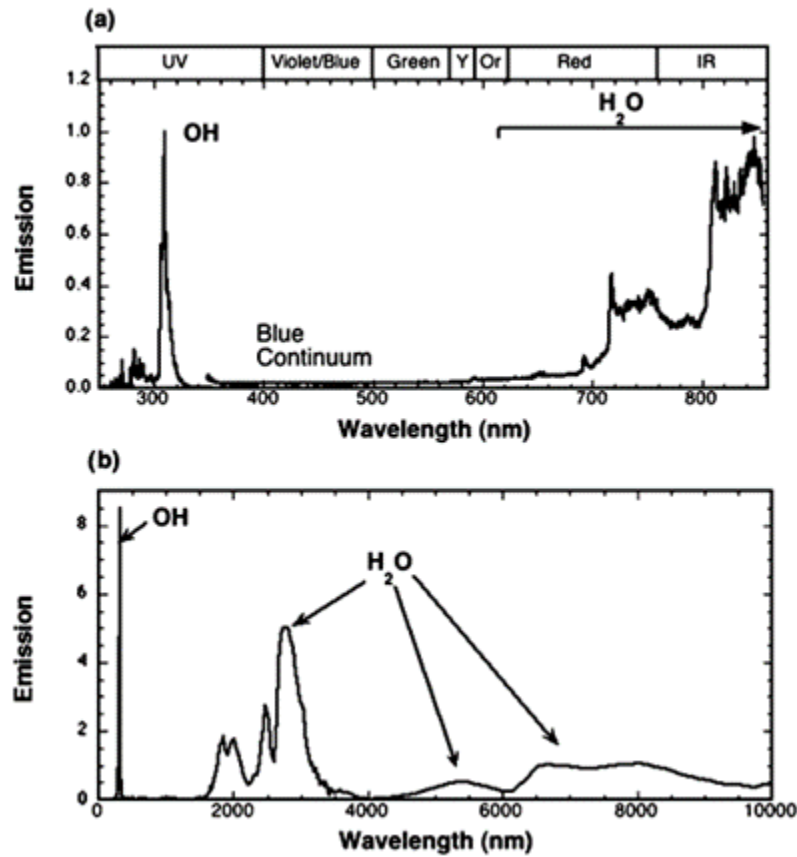


Figura 13: Espectros de emisión en llamas típicas de hidrógeno-aire: (a) llama de chorro de H_2 -aire premezclado que muestra picos espectrales medidos desde ultravioleta hasta el infrarrojo cercano; (b) llama de chorro de H_2 -aire por difusión que muestra características espectrales calculadas en la gama de longitudes de onda infrarrojas. Fuente Schefer et al.

5.5. Investigaciones de llamas difusivas de contraflujo

En esta sección se presenta una visión general de la literatura relacionada a las llamas difusivas de flujo de metano e hidrógeno con variaciones del SR. Para lograr ello se expone contenido de los principales textos e investigaciones recopilados para realizar este trabajo. Para comenzar se habla del paper de Hiroshi Tsuji titulado “Counterflow difusión flames” (1982), en el cual se realiza una revisión del conocimiento logrado hasta la fecha sobre llamas de difusión de contraflujo. Este es un buen punto de partida para comprender los aspectos generales de este tipo de llamas. En la llama de difusión, el combustible y el oxidante están inicialmente separados y los reactivos se mezclan en la misma región donde tiene lugar la reacción. Por lo tanto, la combustión ocurre en la interfaz entre el gas combustible y el gas oxidante, y el proceso de combustión depende más de la velocidad de mezcla que de las velocidades de los procesos químicos involucrados. Por esta razón, las características de las llamas de difusión dependen marcadamente de la aerodinámica de la situación de flujo particular, y el espectro completo del comportamiento de la llama de difusión no puede discutirse sin tener en cuenta consideraciones aerodinámicas. La llama de difusión no se propaga y, por lo tanto, no se puede definir la velocidad de la combustión. Además, Hiroshi Tsuji (1982) señala que, en la llama de difusión, la velocidad de reacción química generalmente es mucho más rápida que la velocidad de difusión del gas, es decir, el tiempo químico característico t_c es mucho menor que el tiempo de difusión característico t_d . En consecuencia:

1. La reacción química ocurre en una zona estrecha entre el gas combustible y el oxidante,
2. Las concentraciones de combustible y oxidante son muy bajas en la zona de reacción, y
3. La velocidad de combustión está controlada por la velocidad a la que el combustible y el oxidante fluyen hacia la zona de reacción a través de los productos de combustión.

Por lo tanto, en el caso límite donde se considera que la velocidad de reacción química es infinitamente rápida, es decir, donde la relación entre el tiempo de difusión característico t_d y el tiempo químico característico t_c es infinitamente grande se tiene que:

1. La zona de reacción se vuelve infinitesimalmente delgada, es decir, la zona de combustión se convierte en una lámina de llama.
2. Las concentraciones de combustible y oxidante se vuelven cero en la superficie de la llama, y no hay oxidante en el lado del combustible de la llama y no hay combustible en el lado del oxidante de la llama.
3. Las tasas de difusión del transporte de combustible y oxidante hacia la superficie de la llama deben estar en proporciones estequiométricas y estas proporciones definen la ubicación de la superficie de la llama.

El primer análisis detallado exitoso de una llama de difusión mediante el modelo de lámina de llama fue realizado por Burke y Schumann en 1928. Analizaron el problema del combustible que emana de un tubo cilíndrico hacia el flujo de aire en un conducto cilíndrico concéntrico más amplio, y de una llama de difusión laminar que se establece en la boca del tubo. En este

caso, la llama se extiende hasta la pared del conducto (caso de subventilación) o converge hacia el eje (caso de sobreventilación), y la altura de la llama (la distancia axial desde la boca del tubo hasta el punto en el que la llama alcanza la pared del conducto o el eje) puede definirse. De esta manera, Burke y Schumann obtuvieron predicciones bastante precisas de la altura y forma de la llama. Así, el modelo de lámina de llama demostró ser muy útil para el estudio de una llama de difusión laminar. Desde entonces, muchos problemas de combustión con una llama de difusión laminar se han estudiado mediante el modelo de lámina de llama, asumiendo que la velocidad de reacción química en la llama de difusión es infinitamente rápida. De hecho, este modelo de lámina de llama se ha utilizado ampliamente para estudios teóricos sobre la combustión de una gota de combustible y sobre problemas de flujo y transferencia de calor con una llama de difusión laminar (por ejemplo, la combustión en capa límite). Esta técnica ha permitido a los investigadores calcular la ubicación y forma de la llama, la tasa de transferencia de calor a una superficie sólida o líquida, y a su vez, la tasa de combustión del combustible sólido o líquido, proporcionando información importante sobre la llama de difusión laminar. Sin embargo, existen varios problemas importantes relacionados con la llama de difusión que no pueden elucidarse mediante el modelo de lámina de llama. En la llama de difusión, la velocidad de combustión está controlada por la velocidad a la que el combustible y el oxidante difunden hacia la zona de reacción, y esta velocidad de combustión aumenta con la velocidad de difusión, que depende fuertemente de la aerodinámica de la situación de flujo particular, especialmente de la velocidad de flujo convectivo. Sin embargo, a medida que se aumenta la velocidad de flujo, el tiempo aerodinámico característico t_a y, en consecuencia, el tiempo de difusión característico t_d , se vuelven más cortos. Por esta razón, el tiempo de reacción química no puede ser despreciado en comparación con el tiempo de difusión. Si los flujos de combustible y oxidante hacia la zona de reacción de una llama de difusión aumentan aún más y superan un valor crítico, entonces, debido a que la reacción química no puede mantener el ritmo del suministro de combustible y oxidante, la reacción se detiene abruptamente. La extinción de la llama de difusión ocurre inevitablemente. Por ejemplo, si la velocidad del flujo de aire supera un valor crítico, entonces la llama de difusión, por ejemplo, alrededor de la cara frontal de una esfera de combustible líquido suspendida en un flujo de aire se apaga, y la llama pasa de ser envolvente a ser repentinamente una conocida como llama de estela. La extinción de la llama de difusión observada con frecuencia al aumentar la velocidad del flujo de aire parece ser el resultado de limitaciones químicas en la tasa de combustión. Esta extinción de la llama no puede explicarse mediante el modelo de lámina de llama que asume una velocidad de reacción infinitamente rápida. Esto indica que es necesario considerar la estructura de la llama con una zona de reacción finita para la llama de difusión en un flujo de aire de alta velocidad, y la velocidad crítica del flujo de aire correspondiente a la extinción de la llama puede considerarse como una medida de la tasa de reacción general en la zona de la llama. Por lo tanto, para combinaciones de combustible-oxidante altamente reactivas que son tan reactivas que se pueden mezclar solo con dificultad y peligro, resulta especialmente útil estimar la tasa de reacción general a partir de la velocidad crítica de flujo. La estructura de la llama de difusión se ha estudiado principalmente en la llama de flujo de combustible establecida cuando un gas combustible es expulsado de un tubo cilíndrico hacia un oxidante en reposo o un flujo de oxidante, y en una llama de difusión plana establecida en la región límite entre flujos paralelos de combustible y oxidante (quemador de Wolfhard-Parker). En estos estudios, no solo se midieron la temperatura y la

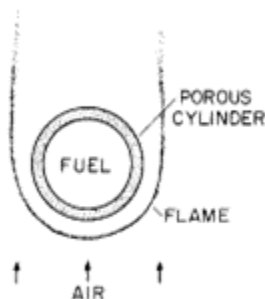


Figura 14: Quemador contraflujo de tipo cilíndrico.

concentración de especies estables, sino que también se realizó un estudio detallado de la estructura de la zona de reacción de una llama de difusión plana con la ayuda de mediciones de los espectros de emisión y absorción de la zona. Estos resultados experimentales detallados han proporcionado información valiosa sobre la estructura de una llama de difusión laminar. Es bien sabido, sin embargo, que hay un espacio muerto cerca del borde del quemador donde la llama no se establece debido a las pérdidas de calor y radicales activos hacia la pared. Por lo tanto, la interdifusión directa de combustible y oxígeno ocurre en este espacio muerto, produciendo una pequeña región de gases premezclados en la base, y esto sirve como de sustento y retención para la llama. En consecuencia, las características y la estructura de este tipo de llama de difusión se ven afectadas tanto por esta llama premezclada como por la cuña de productos de combustión que se vuelve más gruesa a medida que subimos más arriba del borde del quemador. Por lo tanto, se piensa que la llama de difusión laminar en el puerto del quemador no es adecuada para el estudio de ciertos procesos fundamentales de la llama. Una llama de difusión pura se puede establecer en la zona de impacto de dos flujos gaseosos opuestos de combustible y oxidante. Esta llama de difusión contracorriente ha sido observada 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 tasa de reacción general para combinaciones de combustible y oxidante, y una forma importante de examinar la efectividad de los inhibidores. La estructura de una llama difusiva de contraflujo de metano se obtuvo en un quemador de contraflujo. En la Fig.15 se puede ver una distribución espacial donde el CH_4 llega a la zona de reacción y comienza a reaccionar, lo cual se refleja en la disminución de su fracción molar. Lo mismo se puede decir del lado del aire en donde la concentración de oxígeno disminuye al acercarse a la zona de reacción. Se aprecia también cómo el nitrógeno del aire también disminuye en cuanto a su concentración molar. También se presentan las concentraciones de los principales productos, donde se puede ver claramente la distribución espacial del H_2O , CO_2 , CO y H_2 . De estas curvas se puede reconocer que especies están más cerca del lado del aire, es decir, que pueden extenderse más allá de la zona de reacción. Las figuras 15,16,17 y 18 muestran algunos ejemplos de la estructura de una llama de contraflujo de metano en un quemador con superficie de estancamiento cilíndrica (véase Fig.14), sin embargo, para fines explicativos y de comprensión la estructura vista en estos gráficos es bastante similar a la estructura que se genera en la llama plana del quemador usado en los ensayos experimentales de este trabajo.

En la Fig.16 se indican la zona de estancamiento. Para este caso la zona de estancamiento

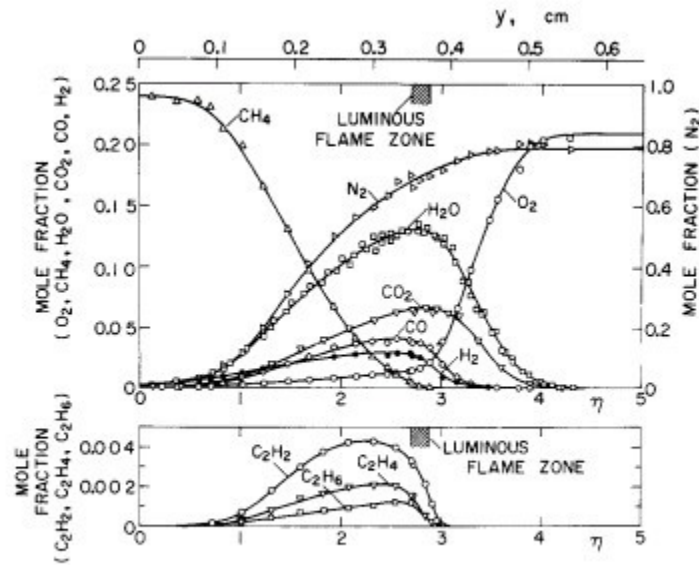


FIG. 14. Concentration profiles of various stable species in the methane flame ($2V/R = 100 \text{ s}^{-1}$, $-f_\infty = 1.5$) (Refs. 8 and 47).

Figura 15: Fracciones molares de las principales especies químicas de una llama de difusión de metano de contraflujo

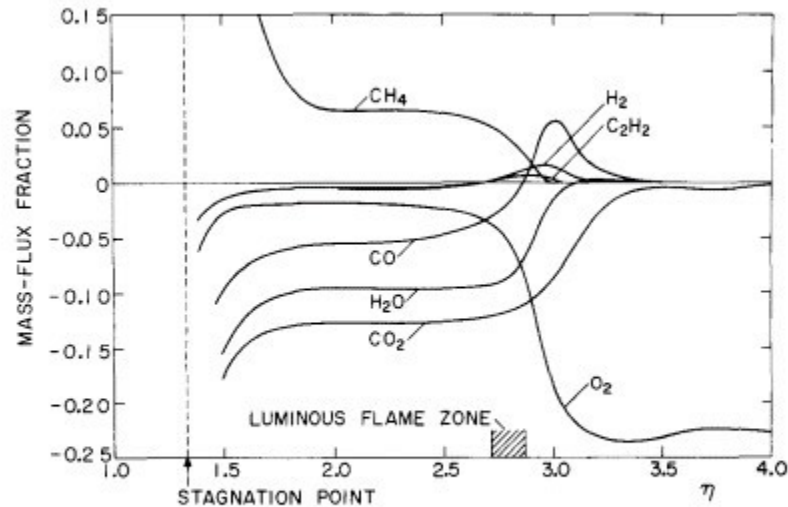


FIG. 17. Profiles of mass-flux fraction of various stable species across the methane flame ($2V/R = 100 \text{ s}^{-1}$, $-f_\infty = 1.5$) (Refs. 8 and 47).

Figura 16: Flujo masicos de las principales especies químicas de una llama de difusión de metano de contraflujo.

se haya del lado del combustible. La zona de radiación o de luminosidad cuando el metano está pronto a consumirse. En esta zona luminosa también se aprecia la presencia de especies como H_2 y C_2H_2 hacia el lado del oxidante. Productos como H_2O y CO_2 aparecen después de la zona luminosa. Se observa también un alto flujo de CO hacia el lado del oxidante.

En la Fig.17 se observan las tasas de reacción de las principales especies. La máxima tasa de consumo de CH_4 y el O_2 ocurre a un lado de la zona luminosa. Especies como el H_2 y el CO están presentes en la zona luminosa. El H_2O se produce a un lado de la zona luminosa, cerca del CO . El CO_2 se produce más alejado hacia la zona del oxidante.

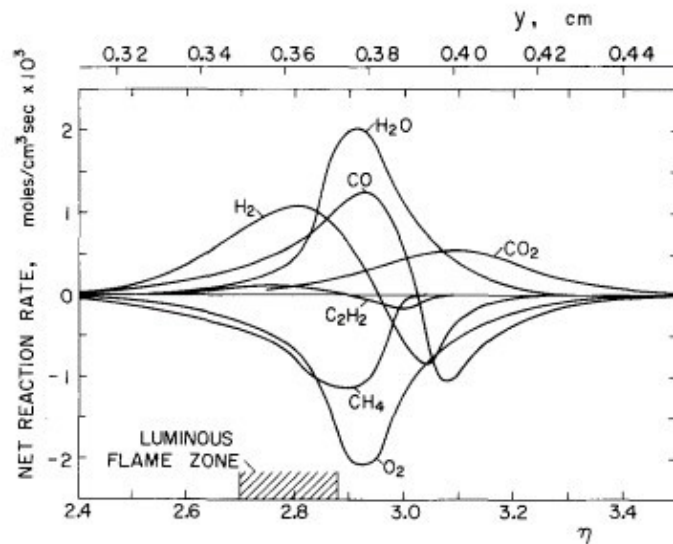


FIG. 18. Net reaction-rate profiles of various stable species in the methane flame ($2V/R = 100 \text{ s}^{-1}$, $-f_w = 1.5$) (Ref. 47).

Figura 17: Tasa de reacción neta de las principales especies químicas de una llama de difusión de metano de contraflujo.

En la Fig.18 se observa la curva de la temperatura global. La temperatura máxima se alcanza en la zona de luminosidad cercana también a la máxima liberación de calor.

Investigaciones más actuales continúan profundizando en la modelación más precisa en diferentes regímenes de operaciones de la llama de contraflujo. A continuación, se presentan extractos de investigaciones que amplían aún más la comprensión en el contexto de llamas de contraflujo.

En “Flames Edge dynamics in counterflow nonpremixed flames of CH_4/He versus air at low strain rates: an experimental and numerical study“ (2021) señalan que las aproximaciones de una llama de contraflujo son válidas solo cuando el largo de la llama es mucho más grande que el espesor de la llama. Por lo tanto, las soluciones de contraflujo 1D basadas en soluciones de similitud no predicen de forma precisa las características de las llamas difusivas con un diámetro de inyector finito, en el cual el largo de la llama usualmente llega a ser comparable al espesor de la llama a bajos SR. Al igual que otras investigaciones aquí también indican que las llamas de contraflujo a bajo SR muestran una estructura bidimensional tal que las soluciones unidimensionales fallan al intentar predecir su estructura. También en dicha

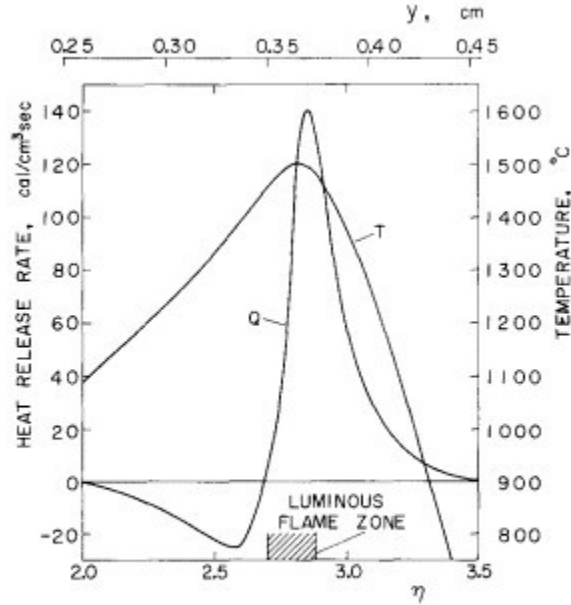


FIG. 19. Heat-release-rate profile in the methane flame
($2V/R = 100 \text{ s}^{-1}$, $-f_{\infty} = 1.5$) (Ref. 47).

Figura 18: Tasa de liberación de calor de una llama de difusión de metano de contraflujo

investigación citan a Oh et al. quienes llevaron a cabo un estudio numérico bidimensional de llamas difusivas de CH_4/N_2 contra un flujo de aire en un quemador con un diámetro de inyector de 23.4 mm. Con ello encontraron que el efecto de pérdida de calor hacia la cortina de N_2 llega a ser comparable a la pérdida de calor por radiación a bajos SR y la llama se extingue por la contracción desde el borde de la llama hacia el interior. La dinámica de la extinción a altos SR se extingue desde el centro hacia el borde de la llama. Mientras que bajos SR la llama la extinción ocurre desde el borde hacia el centro de la llama.

En relación con los quemadores de llamas de contraflujo, estos siguen siendo utilizados para investigaciones con diferentes mezclas combustibles. En el trabajo de Eckart et al. (2022) denominado “Combined experimental and numerical study on the extinction limits of non-premixed CH_4/H_2 counterflow flames with varying oxidizer composition” se investigan llamas de difusión de contraflujo de CH_4 , H_2 , y CH_4/H_2 . En este trabajo experimentan distintos contenidos de oxígeno en la corriente de oxidante, desde 13,4 % hasta 21 %. Además, replican las tendencias cualitativas observadas en sus mediciones experimentales. También se centran en observar desviaciones cuantitativas significativas entre diferentes mecanismos de reacción y cómo la tasa de extinción por deformación es un objetivo de optimización adecuado para el desarrollo de mecanismos. También señalan cómo la adición de hidrógeno aumenta el SR de extinción, y a su vez, una disminución en el contenido de oxígeno en la corriente de oxidante disminuye el SR de extinción. Concluyen que existe una desviación cuantitativa importante en los valores para SR en la extinción. Señalan que, en comparación con valores reportados para otras características de llama importante, como la velocidad laminar de quemado (laminar burning velocity). Las desviaciones para el SR de extinción son mucho mayores.

En relación con la polución, la única relevante de una llama de hidrógeno puro es la generación de NO_x debido a las altas temperaturas que alcanza. Respecto a esto, Eckart et al. señalan que, junto con la dilución del oxidante, otro método para disminuir los NO_x es la recirculación de gases de escape. La investigación de Eckart tiene su razón de ser en que no se conocen mediciones de strain rate de extinción para llamas difusivas de contraflujo H_2 , CH_4/H_2 y CH_4 .

5.5.1. Quemador de contraflujo

Desde un contexto histórico, el primer quemador para producir una llama de difusión plana fue diseñado principalmente como una herramienta para estudios espectroscópicos. En la Fig. 7 se presenta el quemador que consiste esencialmente en dos tubos adyacentes de sección transversal rectangular que comparten una interfaz larga. Cada tubo lleva el flujo de un reactivo y el conjunto está envuelto por un flujo de gas inerte como el nitrógeno. Los resultados de los estudios de estructura espectroscópica en las llamas verticales aproximadamente planas han sido resumidos en detalle por Gaydon y Wolfhard.

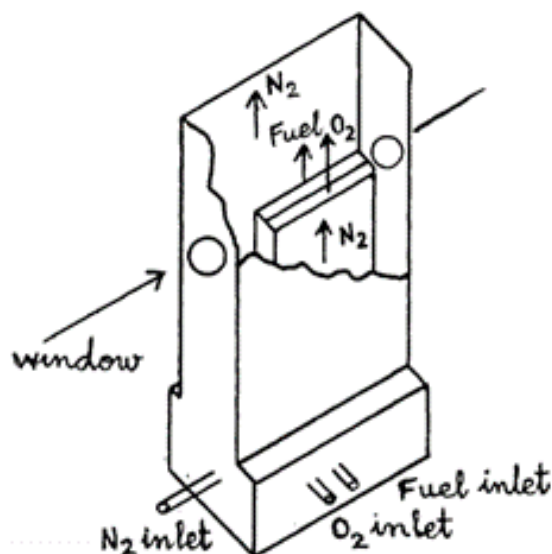


Figura 19: Primer quemador de llamas difusivas, Wolfhard-Parker burner. Fuente: Pandya

Posterior a este se desarrolló el quemador para llamas de difusión plana en un régimen de contraflujo a partir de un método para establecer condiciones de extinción como una medida de las tasas de reacción. Con este nuevo método se descubrió una nueva manera de estudiar la cinética de la llama de forma efectiva. El quemador original consistía esencialmente en dos tubos cilíndricos opuestos coaxialmente que llevaban los dos flujos de reactivo. Dado que se establece una distribución de velocidad normal en cada tubo, la extinción tiende a establecerse primero en el eje de la llama, donde la velocidad del flujo es más alta, es decir, la llama desarrolla un agujero en el centro. El deseo de hacer llamas de difusión de contraflujo planas surgió de su idoneidad potencial para estudios de estructura, particularmente por métodos ópticos. Pandya y Weinberg en 1963 señalan el potencial de estos quemadores

para extender considerablemente el rango de aplicabilidad de la química cinética de las llamas. Este quemador se ilustra en la Fig. 6. Su operación depende de dos principios, el primero de los cuales es la rectificación de la distribución de la velocidad, haciendo que la velocidad sea uniforme en las bocas del quemador mediante matrices o entramados de metal. Así, el combustible que emerge simétricamente en la atmósfera arderá como una llama aproximadamente plana.

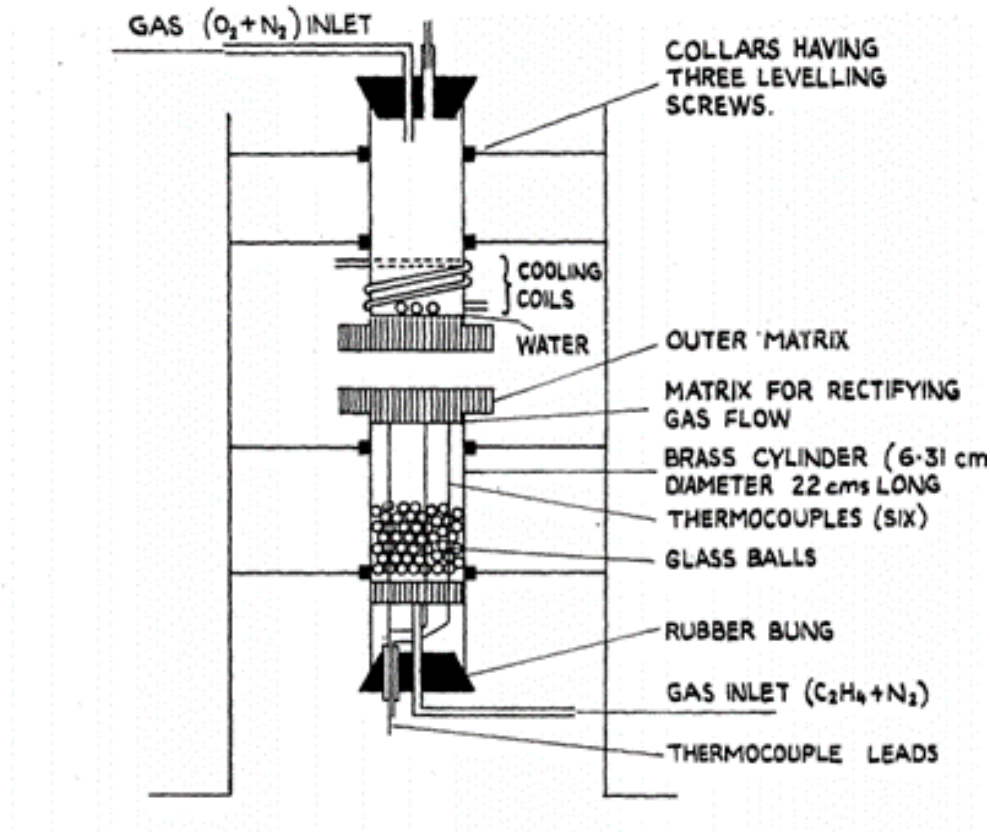


Figura 20: Quemador para llama de difusión plana a contraflujo. Fuente: Pandya

La geometría de contraflujo es una configuración conveniente para el control del strain rate del campo de flujo así como también la posición de la llama. Desde el punto de vista experimental, la configuración de contraflujo ha sido usada para adquirir data bien definida de la estructura y la extinción de llamas. Además, esta configuración es amena para el análisis matemático y numérico, debido a esto ha provisto útiles enfoques sobre la estructura local de los flamelet.

6. 7. Desarrollo y Metodología Experimental

En la Fig. X se presenta el esquema detallado de sistema de combustión de llamas difusivas de contraflujo. El quemador de contraflujo gaseoso consta de dos boquillas opuestas verticalmente. La distancia que las separa es $L = 15 \text{ mm}$ y los diámetros del quemador son $D_1 = D_2 = 36 \text{ mm}$ para todas las mediciones. Los conductos están rodeados por una cortina de N_2 para minimizar la influencia del aire circundante en la zona de reacción, es decir, se previenen combustiones secundarias del combustible. Se colocan mallas de alambre fino en la salida de los conductos para rectificar el flujo y asegurar que el flujo laminar axialmente simétrico sea estable con solo componentes tangenciales insignificantes. Las boquillas inferior y superior están alineadas axialmente. Se aplica una ligera presión negativa en el escape con el objetivo de eliminar de manera confiable los productos de combustión fuera del quemador. Todas las mediciones se realizan a presión atmosférica, $p_{\text{gas}} = 1 \text{ bar}$, y una temperatura de reactivo no quemado $T_{\text{gas}} = 293 \text{ K}$. El equipo posee una camisa enfriada por agua en el cuerpo superior previniendo que el cuerpo de metal se caliente y precaliente el flujo de gases de mezcla de combustible que pasan a través de él. Los flujos de hidrógeno, metano, nitrógeno y aire son regulados y medidos individualmente por controladores de flujo.

Un esquema de la instalación del quemador se muestra en la siguiente figura.

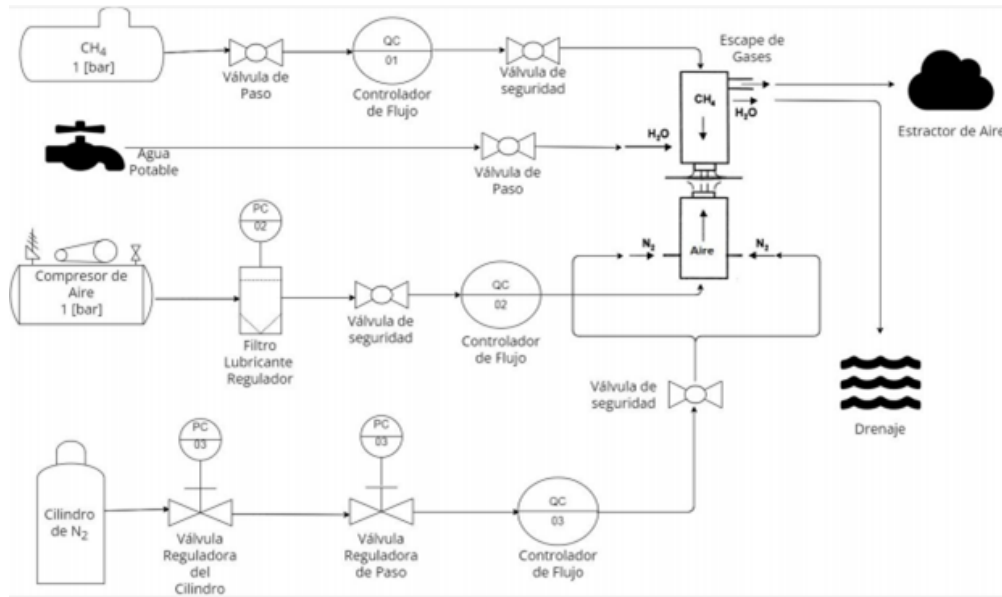


Figura 21: esquema de la instalación del quemador. Fuente (Gabriel Nahuelhual)

Toda la magia ocurre en una pequeña zona llamada zona de reacción, la Figura 23 es una muestra de un diseño CAD del quemador y un zoom en corte de la zona donde se forma la llama.

En la Figura 24 se muestra un bosquejo con las líneas de flujo de todos los gases que participan en el proceso.

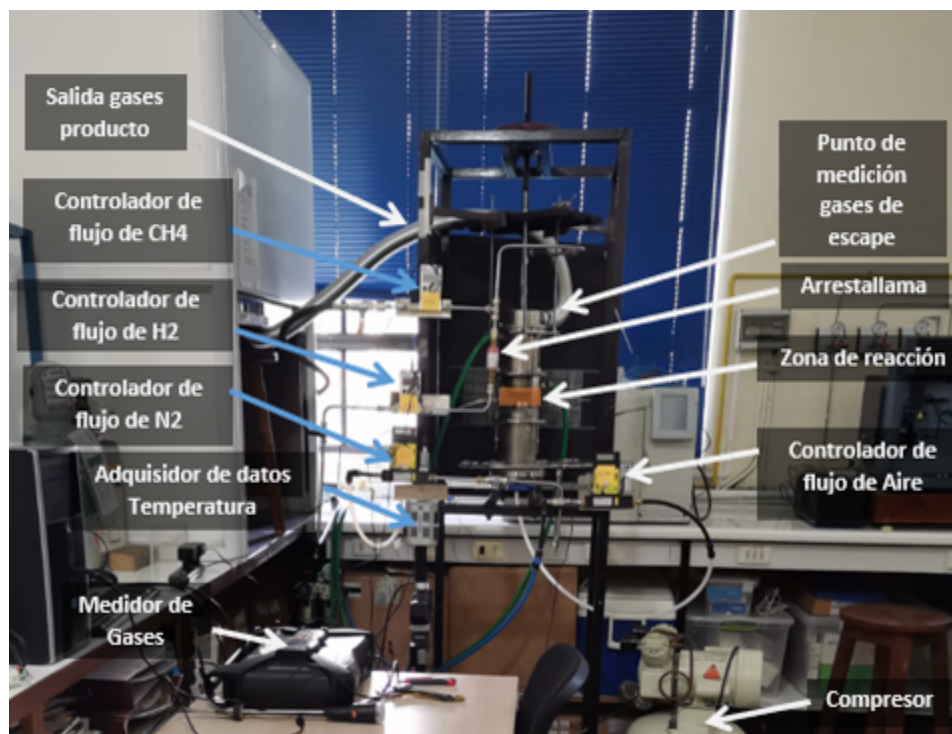


Figura 22: Componentes principales de la instalación

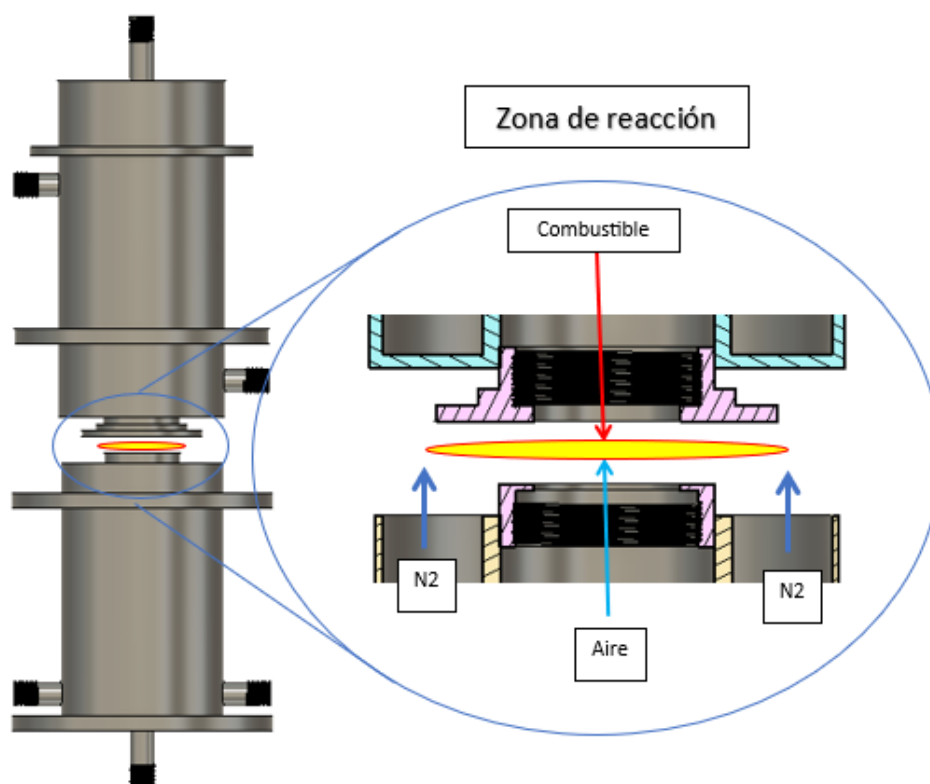


Figura 23: Diseño CAD del quemador y zoom en la zona de reacción.

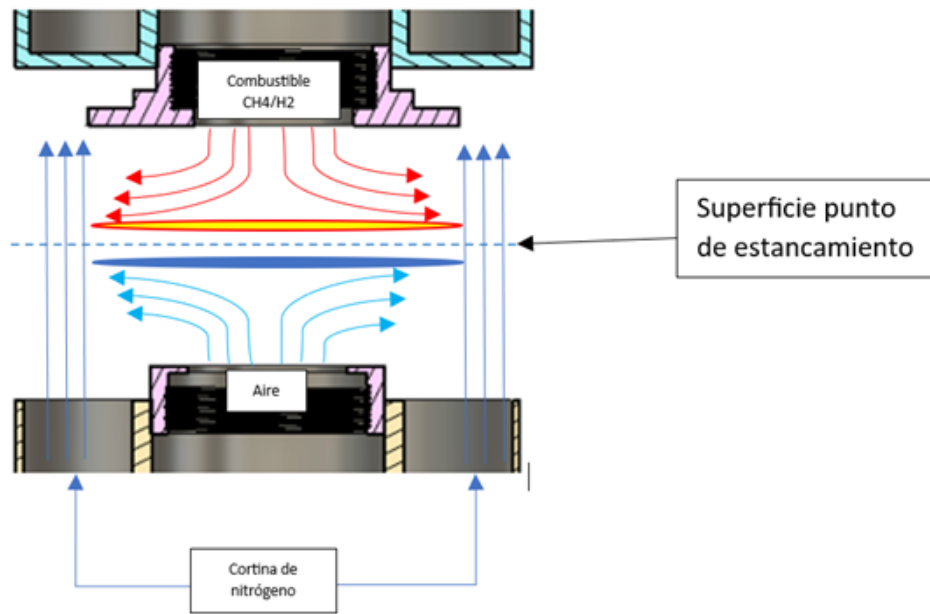


Figura 24: Bosquejo de las líneas de flujo y llamas en la zona de interés.

6.0.1. Metodología de cálculo de parámetros operacionales

Las propiedades como el peso molecular y densidad de los gases utilizadas en los cálculos se presentan en la Tabla 3. Las unidades se trabajan según el sistema internacional (SI), salvo algunos datos de los ensayos. Las condiciones ambientales promedio del laboratorio eran de 20°C y 1 atm.

Compuesto	Peso Molecular (g/mol)	Densidad (kg/m ³)
Aire	28.97	1.20
Oxígeno	32.00	1.33
Nitrógeno	28.02	1.17
Metano	16.04	0.68
Hidrógeno	2.02	0.08

Tabla 3: Pesos moleculares y densidades de varios compuestos a 20°C y 1 atm (TPN).

La Tabla 4 presenta los datos principales de los ensayos realizados. Para todos los ensayos, el caudal volumétrico tanto de gas como de combustible se mantuvo constante en 3,6 L/min. Es decir, como se ve en la Tabla 4, los valores que deben configurarse en los respectivos controladores de flujo están dados en las columnas V_{CH_4} y V_{H_2} de la tabla. Los caudales de nitrógeno se fijan constantes igual a 22 L/min para todos los ensayos. Este valor responde netamente a un criterio visual de estabilidad de llama. El caudal de agua de refrigeración no es calculado y solo se deja fluir una cantidad razonable de agua. Cabe destacar que el equipo no mostraba ningún efecto de sobrecalentamiento durante los ensayos.

Ensayo	Llama	%H ₂	%CH ₄	$\dot{V}_F$	$\dot{V}_{CH_4}$	$\dot{V}_{H_2}$	SRG
1	A	0	100	3.6	3.60	0.00	18.03
2	B	10	90	3.6	3.24	0.36	18.09
3	C	20	80	3.6	2.88	0.72	18.16
4	D	30	70	3.6	2.52	1.08	18.25
5	E	40	60	3.6	2.16	1.44	18.37
6	F	50	50	3.6	1.80	1.80	18.53
7	G	60	40	3.6	1.44	2.16	18.77
8	H	70	30	3.6	1.08	2.52	19.15
9	I	80	20	3.6	0.72	2.88	19.85
10	J	90	10	3.6	0.36	3.24	21.60
11	K	100	0	3.6	0.00	3.60	37.61

Tabla 4: Datos experimentales

Se requiere calcular el SR según la ecuación 16, para ello se tienen todos los datos excepto la densidad de la mezcla combustible. Para obtenerla es necesario conocer los flujos másicos, las fracciones másicas y las densidades, luego usar la Ec. 4 para obtener la densidad de la especie y finalmente la Ec.3 para llegar a la densidad de la mezcla.

Para calcular la fracción de masa del combustible debemos convertir los flujos volumétricos a flujos másicos. Recordando que el flujo másico se calcula como $\dot{m}_{CH_4} = \dot{V}_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4}$

y $\dot{m}_{H_2} = \dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2}$. Sus resultados se muestran en la tabla 5.

Las fracciones másicas de los gases combustibles se calculan usando la ec. 1 de la siguiente manera:

$$Y_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{CH_4}}{\dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{H_2}} \quad (27)$$

$$Y_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{H_2}} \quad (28)$$

Y la fracción másica de la mezcla combustible seria igual a:

$$Y_F = Y_{CH_4} + Y_{H_2} \quad (29)$$

La fracción másica de oxidante también será requerida más adelante y se calcula despejando Y_k de la ec.6 conociendo que la fracción molar del oxígeno en aire es $X_O = 0,21$ y los pesos moleculares dados en la tabla 5. Como la composición de oxidante se mantiene constante, la fracción másica de oxidante es igual para todos los ensayos $Y_O = 0,232$.

$\dot{m}_{CH_4}$	$\dot{m}_{H_2}$	$\dot{m}_F$	Y_{CH_4}	Y_{H_2}	ρ_F
2.58	0.00	2.58	1.00	0.00	0.72
2.32	0.03	2.35	0.99	0.01	0.71
2.07	0.06	2.13	0.97	0.03	0.70
1.81	0.09	1.90	0.95	0.05	0.69
1.55	0.12	1.67	0.93	0.07	0.67
1.29	0.15	1.44	0.90	0.11	0.65
1.03	0.18	1.21	0.85	0.15	0.62
0.77	0.21	0.99	0.79	0.21	0.58
0.52	0.24	0.76	0.68	0.32	0.52
0.26	0.27	0.53	0.49	0.51	0.39
0.00	0.30	0.30	0.00	1.00	0.08

Tabla 5: Densidad, flujos y fracciones másicas de la mezcla combustible de los 11 ensayos.

6.0.2. Instrumentación y materiales

Para llevar a cabo los ensayos con hidrógeno fue necesario instalar líneas aptas para aquello. La instalación de estas líneas fue llevada a cabo en conjunto con el trabajo de puesta en marcha. Es por ello que la construcción de todo el equipo usa el mismo tipo de tubería y componentes. Por lo tanto, la línea de hidrógeno es de tuberías de acero inoxidable al igual que las líneas dispuestas para metano y nitrógeno. Como medida de seguridad se agregó un componente conocido como arrestallama. Este componente evita que la llama se propague a través de las tuberías hacia los estanques. Las conexiones para unir las tuberías son los mismos fittings que se usan en el trabajo previo.

Para las mediciones de caudal volumétrico y ajuste de caudal se usaron controladores de flujo como el que se muestra en la Figura 25.



Figura 25: Medidores de flujo másico y controladores marca Aalborg.

Este instrumento muestra el caudal volumétrico en litros por minuto y permite ajustar manualmente el caudal. Para las mediciones de temperatura se usó una termocupla tipo K, la cual se ubicó aproximadamente en el borde de la llama. La posición aproximada de la punta de medición de la termocupla es de 52 mm respecto del centro de la llama y a 7,5 mm respecto de la boquilla inferior; como puede verse en la Figura 26.

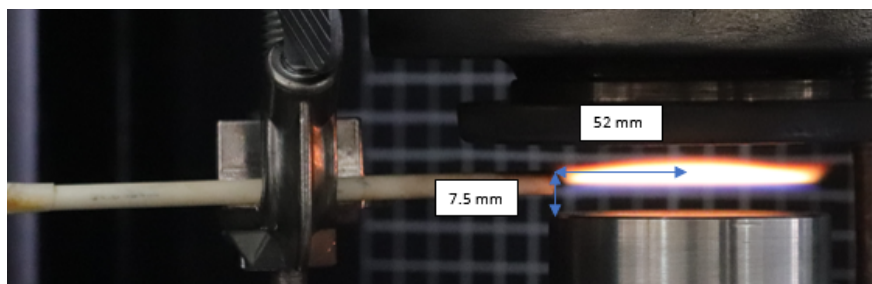


Figura 26: Posición de la termocupla.

En la Fig. 27 se muestra el punto de medición de los gases de escape. En la imagen puede verse la sonda que se introduce en el tubo de salida de gases de escape.

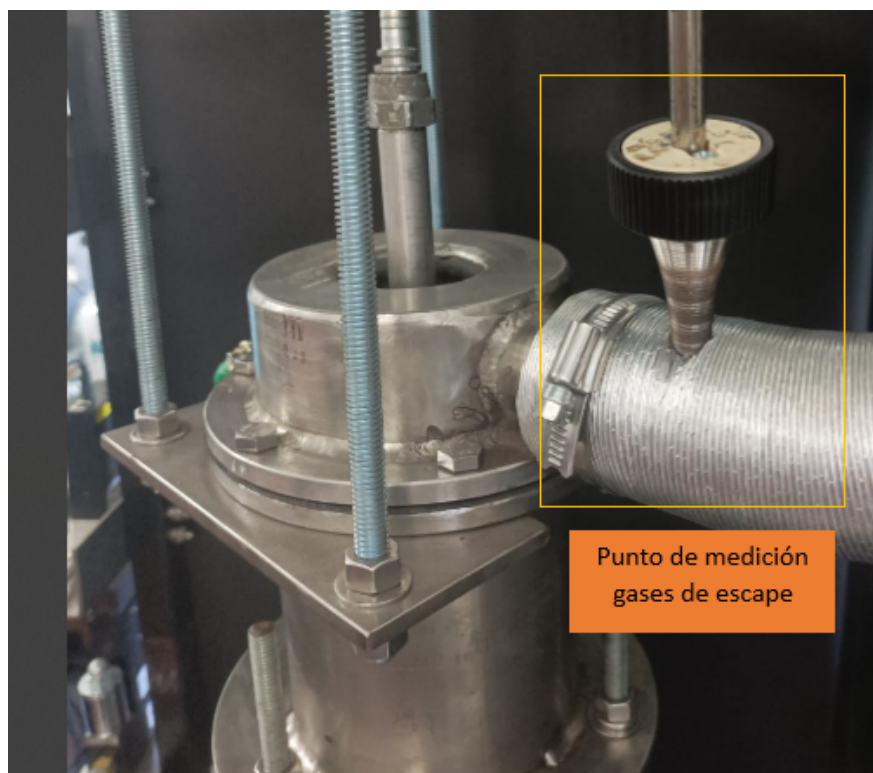


Figura 27: Punto de medición de gases de escape.

Una imagen referencial del analizador de combustión Testo 350 se muestra en la Figura 28.

Los datos para emisiones en ppm de HC están ajustados para metano a través del sensor C_xH_y según señala el fabricante; el rango de medición de HC es de 100 hasta 40000 ppm. También se mide monóxido de carbono (CO) con un rango de medición de 0 hasta +10000 ppm y NO de 0 hasta +4000 ppm. Las mediciones de H_2 son de carácter indicativo según se señala en las especificaciones técnicas del equipo, es decir, no tiene un sensor dedicado a la medición de H_2 .



Figura 28: Analizador de combustión Testo 350.

7. Presentación y análisis de resultados

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Los gráficos de temperatura, las concentraciones de gases de escape y las imágenes visuales ofrecen ideas cruciales sobre el comportamiento de las llamas difusivas de contraflujo en las condiciones experimentales establecidas.

7.1. Temperatura

La Figura 29 muestra el desarrollo del ensayo 1 en función de la temperatura registrada al borde de la llama. Dos eventos vistos como alzas o bajas repentinas de temperatura tienen explicación. El primero en suceder se debe a un apagón inesperado del compresor de aire. Sin embargo, se solucionó enseguida y la llama no alcanzó a apagarse. El ensayo continuó y cerca del final del ensayo, con la llama K operando, se acercó manualmente la termocupla al centro de la llama registrando el pico de la gráfica. Esto corrobora que la temperatura mayor ocurre cerca del eje de simetría. El ensayo terminó cuando la temperatura cayó abruptamente.

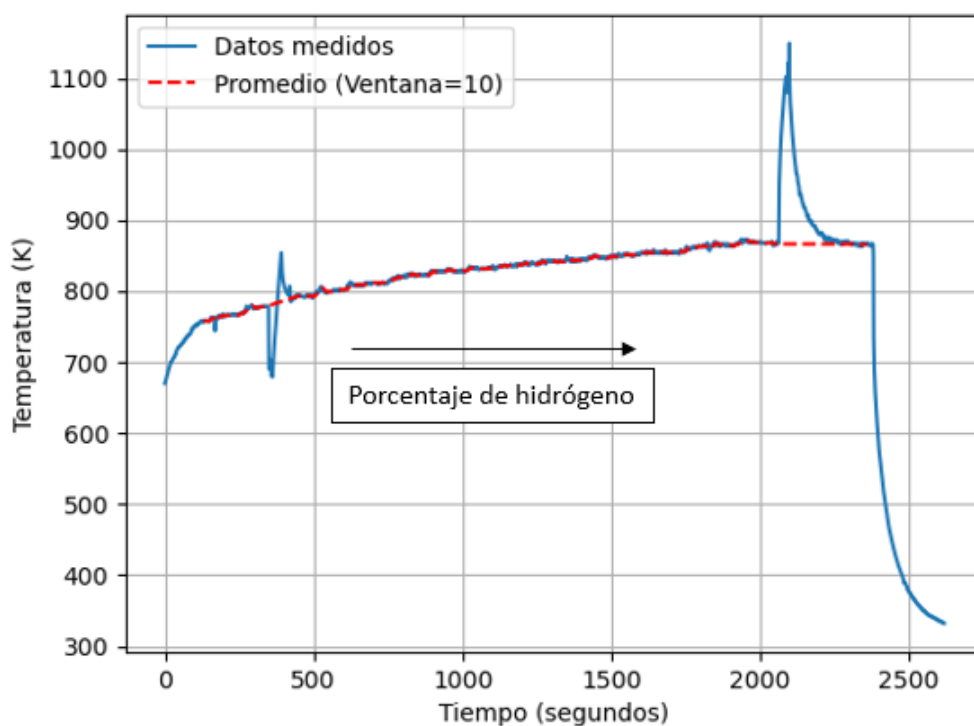


Figura 29: Perfil de temperaturas ensayo 1.

La Figura 31 muestra el desarrollo del ensayo 2. Se puede ver al inicio de la gráfica un encendido fallido. Este ocurrió porque cayó la presión en la línea de nitrógeno debido a una obstrucción y, en consecuencia, la cortina de nitrógeno dejó de funcionar. La temperatura alcanzada en ese momento sin cortina de nitrógeno operando fue mayor a la temperatura que se alcanza luego con la cortina, a pesar de los mismos flujos de reactivos. Esto se debe a que cuando no está presente la cortina de nitrógeno, la llama dispone del aire ambiental,

deja de estar confinada a una zona determinada y se expande a una mayor zona. La llama se curva alrededor del equipo como se puede ver en la imagen de la Figura 30.



Figura 30: Quemador operando sin cortina de nitrógeno.

Se seleccionó solo el rango en donde transcurre el cambio de mezcla y se promediaron las temperaturas en dichos tramos para poder trabajar en base a un promedio que se indica en la Figura 32. Los instantes específicos cuando fueron configurados los cambios de combustibles no fueron registrados de forma precisa, dado que se registró el tiempo en minutos, perdiendo así la exactitud del cambio en unidades de segundo. No obstante, es posible trazar aproximadamente los tramos en donde se mantiene cada mezcla. Sin embargo, si se tiene en cuenta que los cambios se hicieron más o menos cada 3 minutos se puede segmentar en 11 tramos correspondientes a cada llama del experimento. De esta manera, los datos de la temperatura promedio de los dos ensayos se dividen en 11 partes y dentro de cada segmento se promedian las temperaturas para tener una temperatura representativa de cada llama. Estos valores promedio son para cada llama [765, 782, 797, 809, 818, 827, 834, 842, 851, 856, 865] respectivamente. Por lo tanto, la primera llama de 100 % metano alcanzó en el borde 765 K, mientras que la llama de 100

En la Figura 33 se muestra la variación de SR con respecto a la temperatura alcanzada por cada llama.

Es interesante el aumento significativo que hay en el SR cuando se pasa de J a K. Este cambio se debe a que el metano tiene una densidad casi 6 veces mayor al hidrógeno. Es decir, la mayor parte de la densidad de la mezcla es debida al metano. Por ello, cuando se retira el último 10 % de volumen de metano, se retira también el componente que aportaba la mayor parte de la densidad a la mezcla. Esta es la razón del aumento repentino de SR. En este mismo gráfico se puede notar como al principio el aumento de temperatura en el borde fue mayor al comienzo y fue disminuyendo progresivamente hasta el final de la experiencia. Esto puede ocurrir dado que a bajos SR el tiempo de residencia de las especies es mayor, lo cual permitiría una combustión más completa. Así, si bien se tiene mayor poder calorífico disponible, lo cual podría justificar el aumento de temperatura, este aumento no es consistente con el aumento de hidrógeno. En otras palabras, si el aumento de hidrógeno fuera la razón del aumento de temperatura, esta última debería seguir aumentando a medida que se dispone de más hidrógeno.

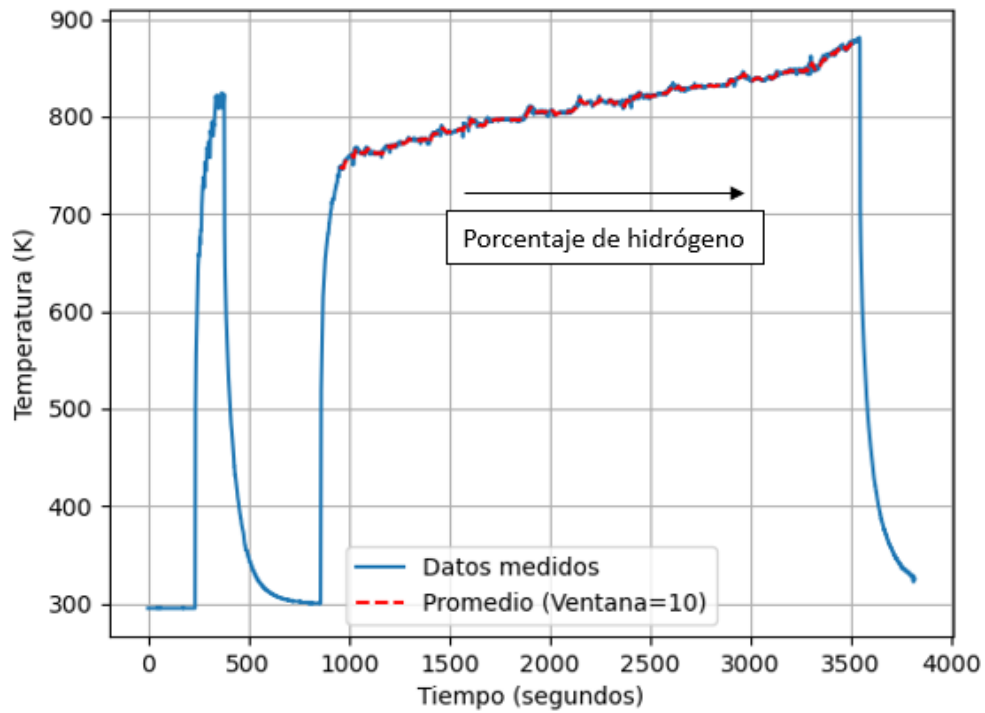


Figura 31: Perfil de temperaturas ensayo 2.

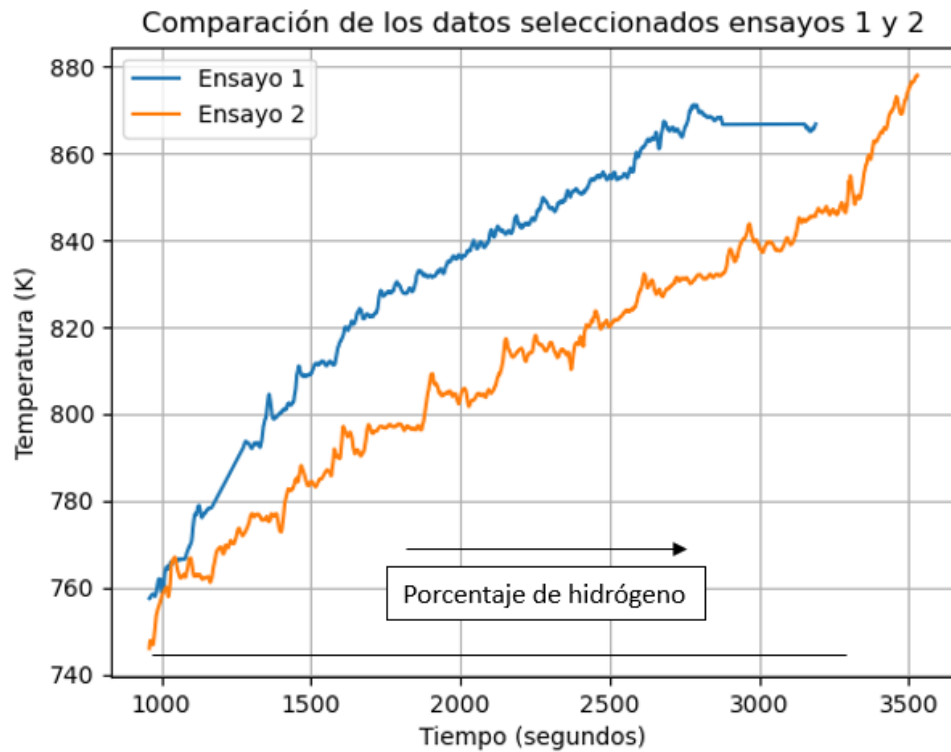


Figura 32: Comparación de datos seleccionados en el periodo en que ocurren los cambios de mezcla de combustible.

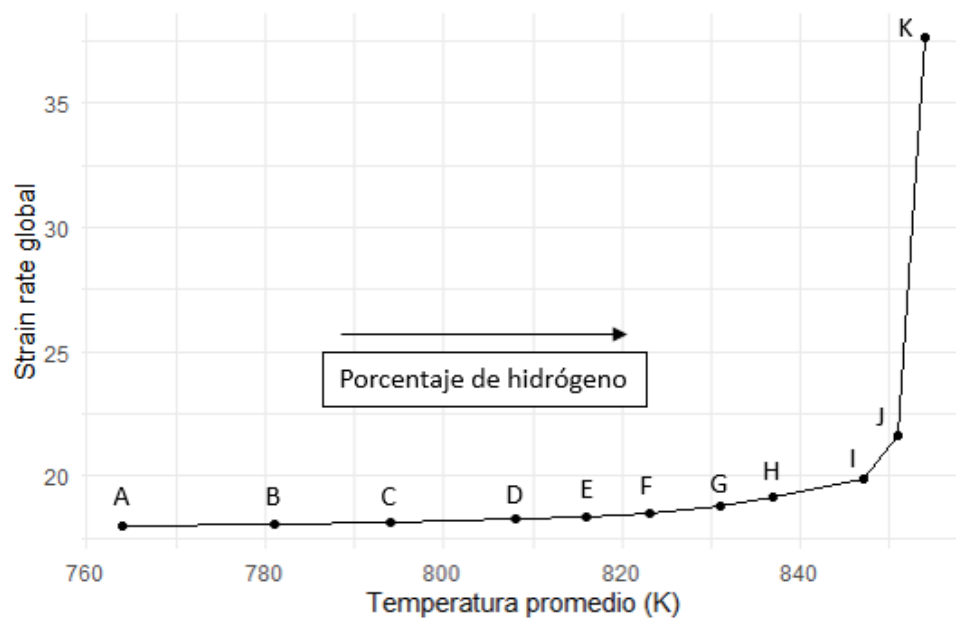


Figura 33: Variación del strain rate global con respecto a la temperatura promedio de cada llama lograda en los dos ensayos.

7.2. Concentración de gases de escape

La Figura 34 muestra el registro completo a lo largo del ensayo 2. La Figura 35 muestra el tramo donde efectivamente se llevaron a cabo los cambios de mezcla.

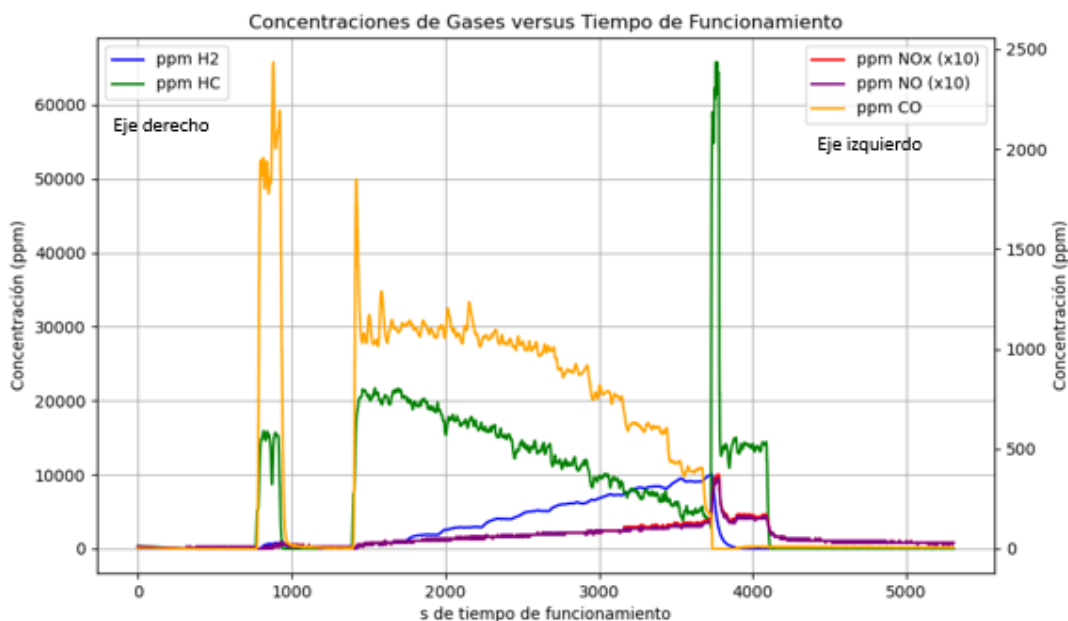


Figura 34: Registro de las concentraciones a lo largo de todo el ensayo 2.

Se observa en el eje izquierdo como en un inicio se tiene altas concentraciones de hidrocarburos, asociado al metano. En este mismo eje se indica el hidrógeno que comienza en concentraciones muy bajas. En concordancia con los cambios de mezcla se observa como a medida que se reemplazaba el metano por hidrógeno las concentraciones de hidrocarburos bajan mientras que las de hidrógeno aumentan. La curva de hidrógeno llega a captar cualitativamente los instantes en donde se hicieron los cambios del combustible, lo cual se nota en repentinas pendientes a lo largo de la curva. Entre la llama H e I, correspondientes al paso de 70 % a 80 % hidrógeno, se observa que la concentración de hidrógeno sobrepasa a las concentraciones de hidrocarburo. Estas últimas continúan disminuyendo hasta casi desaparecer durante la llama K.

Las concentraciones de NOx están amplificadas para captar la tendencia. Se puede ver que aumentan ligeramente a medida que avanza el ensayo. Esto concuerda con el hecho de que la temperatura está aumentando.

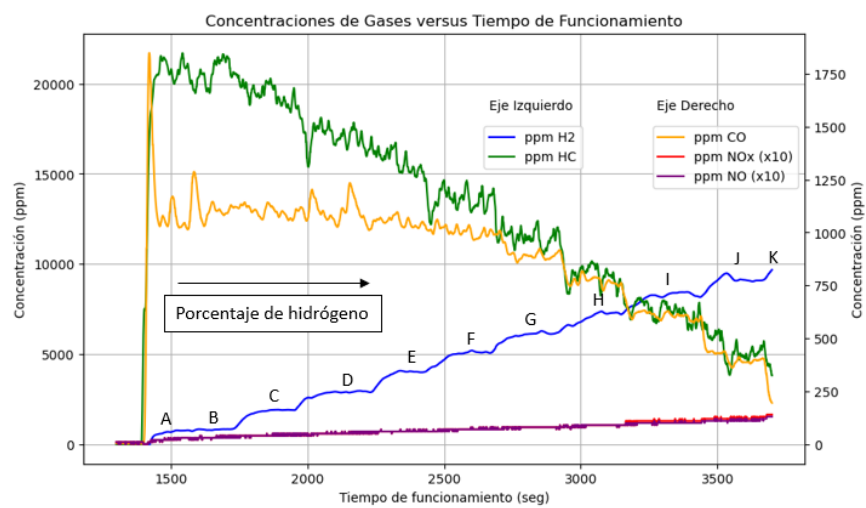


Figura 35: Concentración de gases de escape ensayo 2.

7.3. Registros visuales

De las imágenes presentadas en esta sección se puede observar cómo la llama cambia su posición y morfología según se cambian las composiciones del combustible. Las llamas se nombran según lo indicado en la Tabla 6. La llama A se refiere a la llama 100 % metano y la llama K es la llama 100 % hidrógeno.

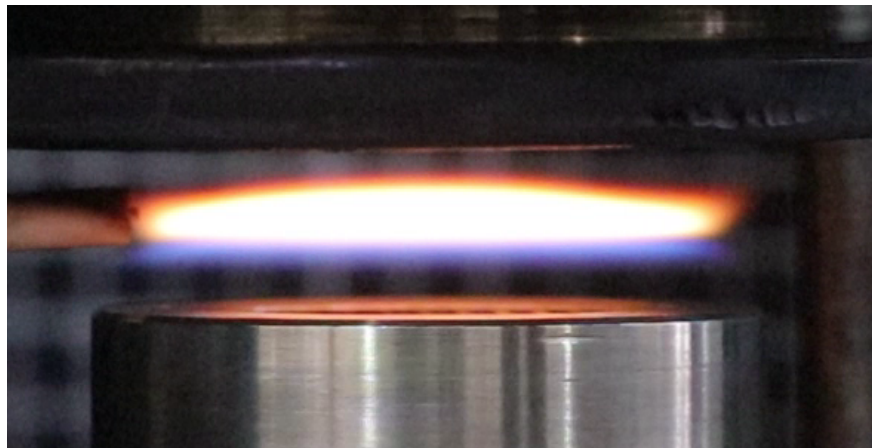


Figura 36: Llama 1, 100 % metano.

En la llama A se distinguen claramente dos zonas. Una zona amarilla con bordes anaranjados y una zona azul con bordes ligeramente más oscuros. En medio de las dos zonas se observa (presencialmente era notoria) una zona translúcida sin radiación visible. Las causas para estos fenómenos no llegaron a ser clarificadas en base a la literatura consultada. La hipótesis es que en esa zona está la superficie de estancamiento que se crea entre los dos flujos. Por definición en esta zona no hay velocidad global del flujo. Los movimientos de especies a través de la zona de estancamiento son causados principalmente por difusión molecular. Mediante este mecanismo se mezclan las especies químicas (por esto es conocida como llama puramente difusiva). Las moléculas reactivas podrían cruzar la superficie de estancamiento y desplazarse de un lado a otro, o desde una concentración alta en combustible a una alta en oxidante. Sin embargo, ¿por qué no hay radiación visible de las especies químicas que atraviesan esta zona? Hay moléculas de oxígeno que pasan hacia la zona amarilla pues en esa zona está quemándose la mayoría del carbono. Por otro lado, hay especies ligeras que pasan de lado del combustible al lado del oxidante a través de esta zona de estancamiento.

En términos de difusividad, el hidrógeno es más difusivo y, en consecuencia, podría lograr penetrar más que otras partículas. Por un lado, el oxígeno intenta difundirse hacia el lado del combustible, y por otro lado, el combustible se difunde al lado del oxidante, creando zonas de premezcla. Ha de existir una fina parte de la llama donde la combustión es completa, es decir, la estequiometría de la reacción global se cumple. Esta zona estequiométrica se ubica en la zona de mayor temperatura. Cerca de ella se ubica también la zona de mayor tasa de reacción, es decir, donde se forma la mayor parte de las especies químicas durante la combustión.

El espesor de llama aumenta a bajos SR, esto se explica porque el tiempo de residencia característico de las especies químicas es aproximadamente el inverso del SR. En este aspecto,

los resultados de los experimentos concuerdan. Si se presta atención solo a la zona amarilla cerca del eje central, se observa que el ancho de la llama disminuye al ver la secuencia pasar de llamas de A-B-C-D. Esto muestra un cambio de forma, pasando de ser ovalada a algo mayormente plano. Si se observa la llama D con un 70/30 de CH_4/H_2 , la zona amarilla tiene un contorno a su alrededor de un tono más anaranjado, lo mismo puede empezar a notarse de la llama azul, la cual un contorno de un azul más oscuro. Si se considera solo una vecindad alrededor del eje central se puede hablar de una llama plana sin efectos de curvatura aparentes. Sin embargo, a medida que se mueve hacia los bordes, la llama comienza a curvarse.



Figura 37: Llama D. 70 % metano y 30 % hidrógeno.

La zona muerta donde no hay emisiones de luz visible y termina siendo una zona translúcida que separa dos zonas visiblemente diferentes. Esta zona es una zona que podría presentar las más bajas concentraciones o fracciones de mezcla, ya que se supone que al no verse nada, es porque hay una falta de reactivos; en esa zona no hay combustión.

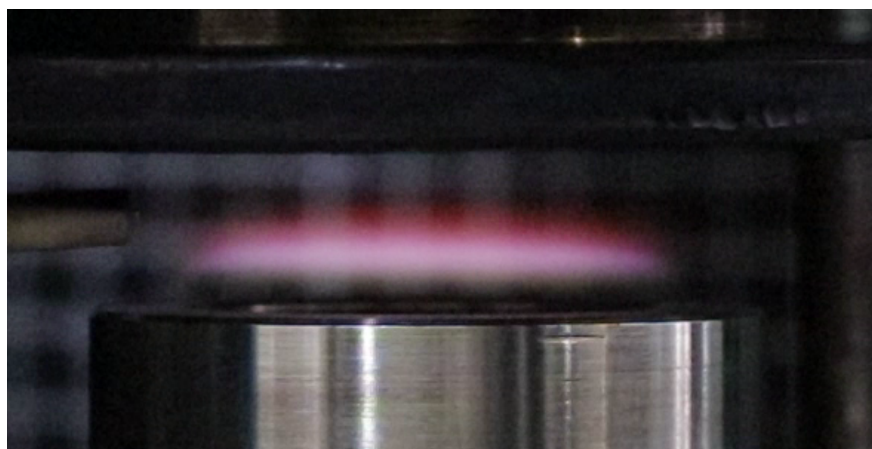


Figura 38: Llama 100 % hidrógeno.

En la Figura 38 se muestra la llama de puro hidrógeno, la cual se diferencia de todas las demás en que la zona intermedia que separaba los colores ya no se observa. Más bien, es una

sola zona la que muestra variaciones de colores. Basado en la investigación de Schefer et al., se busca dar una explicación a los colores de esta llama. Del lado del combustible hacia el oxidante, se observa primero un blanco que puede deberse a la zona de emisión continua. Luego viene una zona de tonos violeta o azul, la cual, según también indica este mismo autor, se debe principalmente a especies químicas como el O y H. Por último, el color anaranjado o rojizo, podría deberse a la excitación vibratoria de la molécula de H_2O .

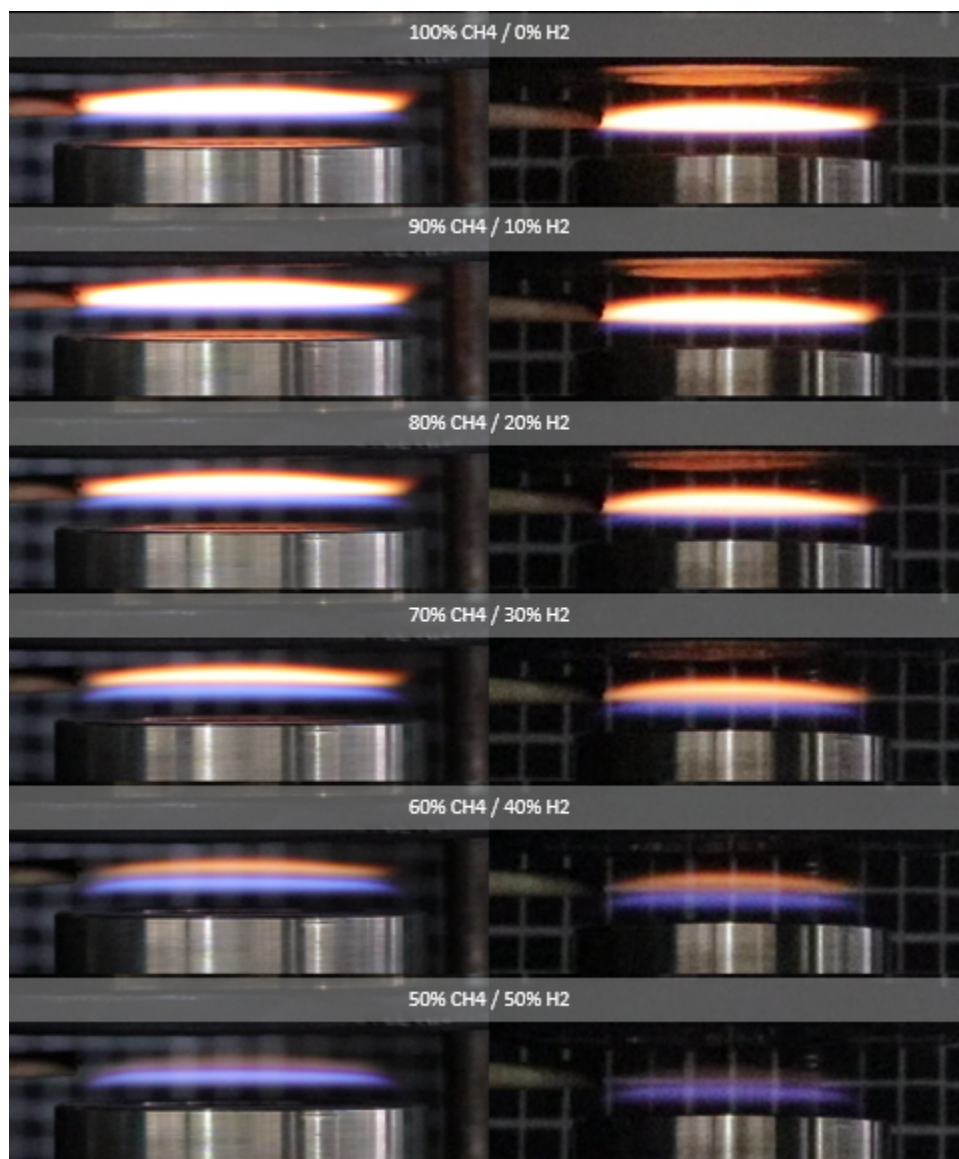


Figura 39: Llama de difusión a contraflujo variando la composición del combustible. Inicialmente se tiene puro metano, luego se pasan por mezclas de metano e hidrogeno, hasta llegar a una llama de puro hidrógeno. En el lado izquierdo se presentan las imágenes correspondientes al ensayo 1, mientras que en el lado derecho se muestran las imágenes del mismo caso correspondientes al ensayo 2.

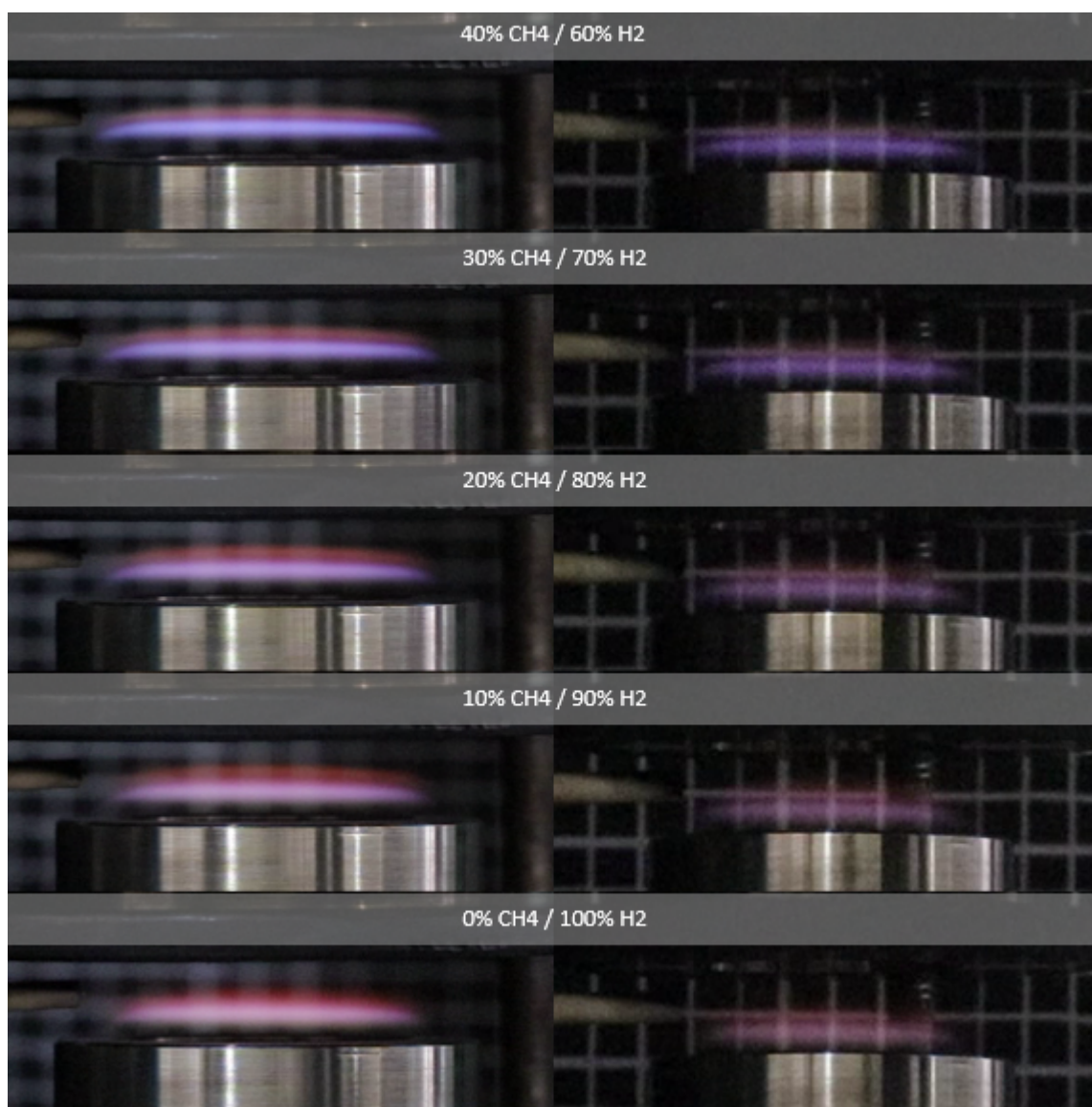


Figura 40: Continuación de la llama de difusión a contraflujo variando la composición del combustible. Inicialmente se tiene puro metano, luego se pasan por mezclas de metano e hidrogeno, hasta llegar a una llama de puro hidrógeno. En el lado izquierdo se presentan las imágenes correspondientes al ensayo 1, mientras que en el lado derecho se muestran las imágenes del mismo caso correspondientes al ensayo 2.

8. Conclusiones

Se llevó a cabo una investigación experimental sobre llamas difusivas de metano e hidrógeno en un quemador de flujos opuestos, de la cual se derivan las siguientes conclusiones:

1. La información sobre la combustión de hidrógeno o mezclas ricas en hidrógeno es limitada. Actualmente se está investigando sobre la extinción de la llama, considerando su relación con el *strain rate*.
2. La configuración de llama difusiva de contraflujo demostró ser segura de operar, logrando estabilidad para hidrógeno puro y sus mezclas con metano.
3. En la literatura, los datos para temperatura y concentraciones se dan con respecto al eje de simetría. Las mediciones de este trabajo no tienen una comparación directa con los datos encontrados; sin embargo, cualitativamente hay correlación.
4. La sustitución volumétrica de metano por hidrógeno condujo a un aumento de la temperatura y a la disminución de gases como el CO. Sin embargo, debido al aumento de temperatura, se observó un ligero aumento en los NO_x.
5. Se establecieron datos experimentales para diferentes mezclas de metano e hidrógeno relacionadas con el *strain rate*.
6. Las llamas presentaron dos zonas distintas al inicio, a excepción de la llama de hidrógeno puro. Del lado del combustible se observó una intensa llama amarilla, y otra azul en el lado del oxidante. En el medio se observó una zona translúcida sin emisión, que delimita las dos zonas mencionadas.
7. Se verificó la visibilidad de la llama de hidrógeno puro, que mostró tonalidades blancas, violetas y rojizas.
8. Al variar la composición de hidrógeno en el combustible, la llama modificó su tamaño haciéndose más pequeña y desplazando su ubicación hacia el lado del oxidante. Este desplazamiento puede atribuirse al aumento en la difusividad.

Como recomendación se proponen nuevas experimentaciones, tales como:

1. Usar el hidrógeno diluido en nitrógeno para probar a que concentraciones ocurre la extinción de la llama de hidrógeno a bajos *strain rate*.
2. Implementar mediciones de concentraciones de especies químicas en la llama para poder trabajar en validaciones de mecanismos de reacción.

Además, es necesario tener precaución con la cantidad de hidrógeno que puede estar quedando sin quemar en los gases de escape.

Referencias

- [1] IEA. (2019). *Total primary energy supply by fuel, 1971 and 2019*. Paris: IEA. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-primary-energy-supply-by-fuel-1971-and-2019>. Licencia: CC BY 4.0.
- [2] Williams, F. A. (1985). *Combustion Theory* (2nd ed.).
- [3] J Warnatz, U Maas, & Dibble, R. W. (2006). *Combustion : physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation* (4th ed.). Springer.
- [4] Griffiths, J. F., & Barnard, J. A. (1995). *Flame and Combustion* (3rd ed.). CRC Press.
- [5] W C Gardiner, Jr. (1999). *Combustion Chemistry*. Springer.
- [6] Murty, K. A. (1975). *Introduction to Combustion Phenomena*. CRC Press.
- [7] Lawton, J., & Felix Jiri Weinberg. (1969). *Electrical Aspects of Combustion [by] James Lawton and Felix J. Weinberg*.
- [8] Thierry Poinso, & D Veynante. (2005). *Theoretical and Numerical Combustion* (3rd ed.).
- [9] Law, C. K. (2006). *Combustion Physics*. Cambridge University Press.
- [10] Lopez, Luis; Giusti, Andrea; Gutheil, Eva; & Olgun, Hernan. (2022). *On the effects of the fuel injection phase on heat release and soot formation in counterflow flames*. Energy, 254, 124306. Elsevier.
- [11] Merchan-Merchan, W., Saveliev, A., Kennedy, L. A., & Fridman, A. (2002). Formation of carbon nanotubes in counter-flow, oxy-methane diffusion flames without catalysts. *Chemical Physics Letters*, 354(1-2), 20–24. [https://doi.org/10.1016/s0009-2614\(02\)00027-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2614(02)00027-1)
- [12] Eckart, S., Rong, F. Z., Hasse, C., Krause, H., Scholtissek, A. (2023). *Combined experimental and numerical study on the extinction limits of non-premixed H₂/CH₄ counterflow flames with varying oxidizer composition*. Institute of Thermal Engineering, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany; Technical University of Darmstadt, Department of Mechanical Engineering, Simulation of Reactive Thermo-Fluid Systems, Darmstadt, Germany.
- [13] Niemann, U., Seshadri, K., & Williams, F.A. (2012). *Effect of pressure on structure and extinction of near-limit hydrogen counterflow diffusion flames*. University of California, San Diego, Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Available online 19 July 2012.
- [14] Nahuelhual, G. Implementación y Ensayos de Puesta en Marcha de Quemador de Flujos Opuestos para el Estudio de Llamas Difusivas. Valparaiso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2023.