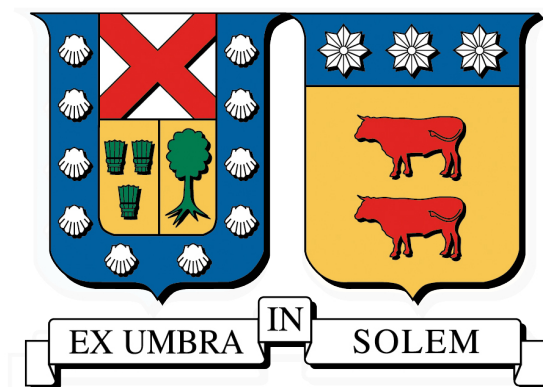


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
Valparaíso - CHILE



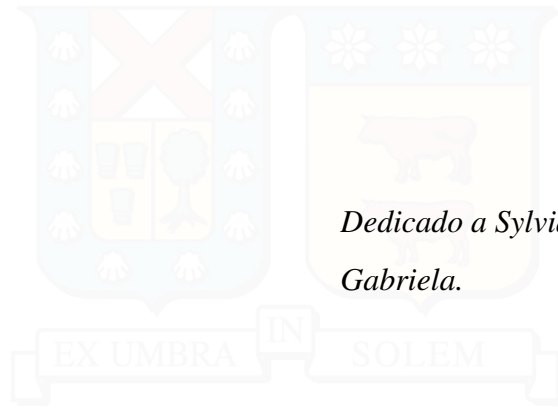
MODULACIÓN ACÚSTICA DE UNA LLAMA DE DIFUSIÓN LAMINAR AXISIMÉTRICA

Felipe Pineda Yunge

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : Andrés Fuentes C.
PROFESOR CORREFERENTE : Jorge Contreras R.

Octubre 2016



*Dedicado a Sylvia, Rolando, Sebastián y
Gabriela.*

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo consiste en el diseño e confección de un sistema que permita generar intermitencia en el flujo de combustible para una mesa de estudio de combustión en llamas laminares. Para ello se usó el concepto de *"forzamiento acústico"* a través de una cámara previa al quemador, llamado pulsador, por donde pasa el combustible y que, a través de una onda sonora, aplica variaciones de presión sobre el gas, lo cual se traduce en intermitencia a la salida del quemador. Este sistema es controlado por un software desde un computador el cual, a través de la tarjeta de sonido, envía una señal al amplificador y finalmente al pulsador.

Para corroborar la fidelidad del dispositivo se aplicaron pruebas acústicas y de llama. La primera consistió en registrar el choque de aire contra un micrófono a la salida inmediata del pulsador y contrastar esta información (frecuencia observada) con la frecuencia programada en el software. La segunda prueba contempla registrar videos de la llama intermitente y analizar la frecuencia de intermitencia para luego, al igual que en la prueba primera, contrastarlo con la frecuencia programada. Se exponen los resultados de ambas mediciones, donde las desviaciones resultaron ser pequeñas, menores al 1 % y atribuibles a errores de medición por no ser mediciones continuas sino discretas.

Por último, se caracterizaron llamas a distintas frecuencias e intensidades contrastando la altura de llama entre estas y llamas laminares sin intermitencia, donde se aprecia un aumento en la altura de llama promedio y claramente un gran aumento en la desviación estándar respecto a este mismo promedio. Además, se incluye una caracterización del comportamiento del sistema bajo distintos caudales de combustible, frecuencias de oscilación y niveles de variación de potencia.

Palabras Clave. Forzamiento acústico. Combustión. Llama intermitente. Llama laminar

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Pregunta de Investigación	2
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. Marco Teórico	5
3.1. Fuentes energéticas, producción y consumo	5
3.1.1. Contexto global	5
3.1.2. Contexto nacional	6
3.2. Combustión	9
3.2.1. Características del medio reactivo	10
3.2.2. Características de la combustión	12
3.2.3. Características de las llamas	13
3.3. Fluidos	14
3.4. Modelamiento de flujos turbulentos	16
3.4.1. Método LES	17
3.4.2. Métodos PDF	17
3.5. Estudios indirectos	18
3.6. Forzamiento Acústico	19
3.6.1. Altavoces dinámicos	20
3.6.1.1. Comportamiento eléctrico	20
3.6.1.2. Comportamiento mecánico	21
3.6.1.3. Comportamiento acústico	21
3.6.1.4. Parámetros de los parlantes	21
4. Metodología	23
4.1. Diseño y confección	23
4.1.1. Transmisión de gases	23
4.1.2. Forzador acústico	25
4.1.3. Generador de onda	26
4.2. Pruebas de Desempeño	27
4.2.1. Prueba acústica	27
4.2.2. Prueba frecuencia de llama	27
4.3. Caracterización de llama	29

5. Resultados	30
5.1. Pruebas de desempeño	30
5.1.1. Prueba acústica	30
5.1.2. Frecuencia de llama	31
5.2. Caracterización de llamas	32
5.2.1. Resultados bajo caudal de combustible fijo	32
5.2.2. Resultados bajo frecuencia fija	34
6. Conclusiones	39
6.1. Perspectiva	40
Bibliografía	42
A. ANEXOS	44
A.1. Códigos Matlab	44
A.1.1. Código de frecuencia acústica	44
A.1.2. Código de frecuencia de llama	46
A.1.3. Código de altura de llama	46
A.1.4. Código de imágenes de llamas	51
A.2. Imágenes para determinar continuidad de llama	53
A.3. Histogramas de alturas de llama para 10 % de potencia	55

Índice de Tablas

3.1. Rangos de Reynolds y comportamiento de fluidos	15
5.1. Frecuencias de pulsador registradas acústicamente con frecuencia de muestreo de 44.100 Hz	31
5.2. Resultados de frecuencia de llama. (*) <i>fps</i> : cuadros por segundo	31
5.3. Datos para caudal de etileno de 135 sscm. Los datos marcados (*) corresponden a la máxima potencia sin saturar el pulsador	33
5.4. Datos para caudal de etileno de 135 sscm. Los datos marcados (*) corresponden a la máxima potencia sin saturar el pulsador. Las columnas 4 y 5 muestran la altura promedio para los datos extremos	34
5.5. Datos para una frecuencia de 10Hz	35
5.6. Datos para una frecuencia de 10Hz.	35

Índice de Figuras

3.1. Evolución de consumo energético primario mundial. Unidades equivalentes a millones de toneladas de petróleo, Fuente:British Petroleum (2015)	6
3.2. Composición energética por zona geográfica, Fuente:British Petroleum (2015)	7
3.3. Evolución del consumo final en Chile en TCal, Fuente:CNE (2016)	7
3.4. Composición de generación primaria en Chile, Fuente:CNE (2016)	8
3.5. Clasificación de llamas. Fuente: Martinez (1992)	13
3.6. Comportamiento de fluido en distintos regímenes	15
3.7. Esquema de parlante	20
4.1. Esquema con y sin sistema de intermitencia. Fuente: Elaboración propia .	24
4.2. Modelación 3D de pulsador	25
4.3. Vista explosionada de modelo 3D	26
4.4. Curva de registro de micrófono a 5Hz sin suavizamiento	28
4.5. Curva de registro de micrófono a 5Hz con suavizamiento	28
5.1. Imágenes de llama intermitente. De izquierda a derecha: 10Hz a 20 % de potencia, 10Hz a 40 % de potencia y 30Hz a 30 % de potencia.	30
5.2. Potencias máximas (sin saturación) para distintas frecuencias	37
5.3. Altura de llama para 135 sscm, bajo distintas frecuencias y para distintas potencias	37
5.4. Regresiones lineales entre altura de llama (eje Y) v/s caudal de combustible (eje X), para distintos niveles de potencia	38
6.1. Perfil de velocidades	40
A.1. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 5 hertz, 40 % de potencia	53
A.2. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 5 hertz, 100 % de potencia	53
A.3. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 10 hertz, 40 % de potencia	53
A.4. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 10 hertz, 100 % de potencia	54
A.5. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 15 hertz, 52 % de potencia	54

A.6. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 135$ sscm, 20 hertz, 20 % de potencia	54
A.7. Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 125$ sscm, 10 hertz, 30 % de potencia	55
A.8. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno sin intermitencia .	55
A.9. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 5Hz con 10 % de potencia	56
A.10. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 10Hz con 10 % de potencia	56
A.11. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 15Hz con 10 % de potencia	57
A.12. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 20Hz con 10 % de potencia	57
A.13. Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 30Hz con 10 % de potencia	58

1 | Introducción

Hoy en día el mundo está forjado por la combustión. Seguramente el lector podrá notar cómo este proceso químico exotérmico facultó la confección de su vestuario, muebles a su alrededor, computador, celular, su transporte, entre muchos otros elementos: Los usos más comunes de la combustión son con fines de calefacción (o enfriamiento), producción de electricidad, propulsión, procesos de materiales o control de incendios. El mundo entero quema miles de toneladas de combustible anualmente, alcanzando cerca del 86 % de la producción total de energía; a través de la quema de petróleo y derivados, gas natural, carbón o biomasa. Así, otras fuentes como la hidráulica, nuclear y energías renovables no superan el 14 % de la energía que usted diariamente consume.

El trabajo que se expondrá a continuación consiste en un apoyo al estudio de este fenómeno que, como podrá imaginar por la información anterior, es de vital importancia para el ser humano tanto por el nivel de uso, como por los desafíos que plantea en materias de contaminación atmosférica, salud humana, emisión de gases de efecto invernadero, calentamiento global y sustentabilidad. El trabajo busca ampliar el estudio de combustión de llamas laminares que se lleva a cabo en el laboratorio de combustión del Departamento de Industrias de la UTFSM a través de un mecanismo de acercamiento a las llamas turbulentas; Interrumpir el flujo laminar continuo del combustible y transformarlo en un flujo laminar intermitente. Con esto se tiene intermitencia (presente en flujos turbulentos), pero controlada y bajo regímenes laminares.

Esto plantea su utilidad al aproximarse a la realidad del proceso de combustión; son pocos los eventos en los cuales se puede apreciar combustión laminar, por ello dirigir el estudio hacia la combustión turbulenta, parece ser el objetivo a alcanzar del conocimiento humano.

2 | Pregunta de Investigación

La combustión y el control de ésta es, sin lugar a duda, uno de los avances tecnológicos que más han cambiado a la humanidad y al mismo planeta tierra: no existe aspecto alguno en el plano material del hombre de hoy que no esté favorecido por ella. Esto ha generado un nivel de bienestar nunca antes observado en la historia, pues impulsa la generación de energía, transporte, fabricación de bienes y aplicación de servicios, pero al mismo tiempo ha generado desafíos; los recursos energéticos son limitados y el proceso de combustión contamina. Por ello el estudio del proceso de combustión es vital para el bienestar inmediato, de mediano y largo plazo de la sociedad, en búsqueda de solucionar o al menos mitigar los efectos adversos que ésta produce, pues su utilización junto con otros factores, han puesto en jaque el equilibrio de nuestro mundo.

La combustión consiste en la oxidación (asociación con oxígeno) de un combustible producto de la exposición a temperaturas sobre el punto de ignición. Este proceso tan cotidiano se trabaja intensamente en los laboratorios del mundo entero sobre dos ejes; el estudio de la combustión para flujos de régimen laminar y flujos en régimen turbulento.

El primero es mucho más sencillo y fácil de trabajar, pues demanda recursos teóricos y computacionales considerablemente menores dado que los gases se mueven de manera predecible, el problema con esto es que éste se da en un rango de parámetros (velocidad y características físicas principalmente) que en la práctica pocas veces se observa. Por otro lado, la combustión con flujos turbulentos es ampliamente observado en la práctica, pero su modelación requiere de grandes recursos teóricos y computacionales para poder aproximarse a una modelación satisfactoria. Un buen referente respecto al último punto es el trabajo de Jepherson Pope quien, con un extenso catálogo de publicaciones, plantea los problemas expuestos; su trabajo se ha direccionado en la modelación directa de los flujos

turbulentos, proceso que mezcla mecánica de fluidos con teoría estocástica para lograr la modelación; de este trabajo se destacan los métodos “large-eddy simulation” (LES) y “probability density function” (PDF) como puede observarse en [Pope \(1991\)](#).

Debido a lo anterior es que ha nacido la pregunta ¿cómo poder aproximar el estudio de combustión de gases en régimen turbulento sin los problemas de costosa modelación? Así nace la idea de trabajar con flujos laminares, pero intentando acercarse a uno turbulento, modificando el sistema de inyección de combustible de caudal constante, existente en el laboratorio de combustión del Departamento de Industrias, a uno de caudal intermitente a través de un forzamiento acústico, de modo de buscar una aproximación a un régimen turbulento, pero con las facilidades en modelación del régimen laminar. Esta idea ha sido trabajada desde varias décadas como puede apreciarse en [Chao y Ming-Shan \(1992\)](#), [Shaddix et al. \(1994\)](#) y [Shaddix y Smyth \(1996\)](#). Especialmente importante es el trabajo de Christopher Shaddix ([Shaddix et al. \(1994\)](#)) debido a la semejanza de su trabajo con las condiciones existentes en el laboratorio donde se implementará el sistema; éste trabaja con un quemador coanular axisimétrico y utiliza un sistema láser de medición llamado *Laser-Induced Incandescence Measurements (LII)*, al igual que en el laboratorio mencionado.

2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de inyección de combustibles intermitente de frecuencia controlable mediante un sistema de forzamiento acústico para la realización de pruebas de combustión en un quemador axisimétrico.

2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar en función de los recursos disponibles un sistema factible de inyección intermitente.
- Implementar el sistema en el laboratorio de combustión del Departamento de Industrias
- Lograr que el sistema permita fidelidad en cuanto a las mediciones y transporte de masa combustible.

3 | Marco Teórico

3.1. Fuentes energéticas, producción y consumo

3.1.1. Contexto global

El alcance de la globalización se presenta cada vez más fuerte con el tiempo, con lo cual los países del mundo han obtenido acceso a tecnologías que les han brindado herramientas de desarrollo. Esto ha generado un aumento acelerado y sostenido durante los últimos 50 años en el consumo energético como puede apreciarse en el gráfico 3.1, donde el consumo mundial de energía primaria creció desde 8.000 millones de toneladas de petróleo equivalentes en el año 1989 a 13.000 millones en 2014. El único año fuera de la regla fue el período 2013 - 2014 donde el crecimiento fue, en promedio, por debajo de 0,9 %, la tasa de crecimiento más lento desde 1998 que no sea secuela de una crisis financiera ([British Petroleum \(2015\)](#))).

Para entender el esquema mundial, se debe conocer las fuentes primarias de energía, las cuales se definen como las energías que provienen desde un recurso natural, así encontramos al petróleo, gas natural, carbón, nuclear, hidroeléctrica y energías renovables como fuentes primarias.

Respecto a la distribución de consumo energético y cómo ha variado este entre el 2013 y 2014 se observa que los países de la OCDE abarcan un 42,5 % del consumo mundial y los no OCDE un 57,5 % cada grupo con una variación en 2014 respecto de 2013 de -0,9 % y 2,4 % respectivamente. Por otro lado, es interesante conocer cómo se distribuye la matriz energética primaria por zona geográfica. El gráfico 3.2 muestra la composición del consumo energético primario, donde destaca la presencia de petróleo, gas natural y

carbón como las principales fuentes en todo el mundo, abarcando un 86,3 %. El grupo de América central y América del sur posee cerca del 73,8 % de su consumo energético a base de estos combustibles. Respecto a las proyecciones para el 2030, se espera un crecimiento de la demanda mundial de energía cercana al 1,8 % anual, dominando los combustibles fósiles como fuente de generación primaria. Esto conllevará a un aumento de las emisiones mundiales de dióxido de carbono de 2,1 % anual, llegando a ser el doble en 2030 respecto a las emisiones observadas en 1990 ([Comisión Europea \(2000\)](#)).

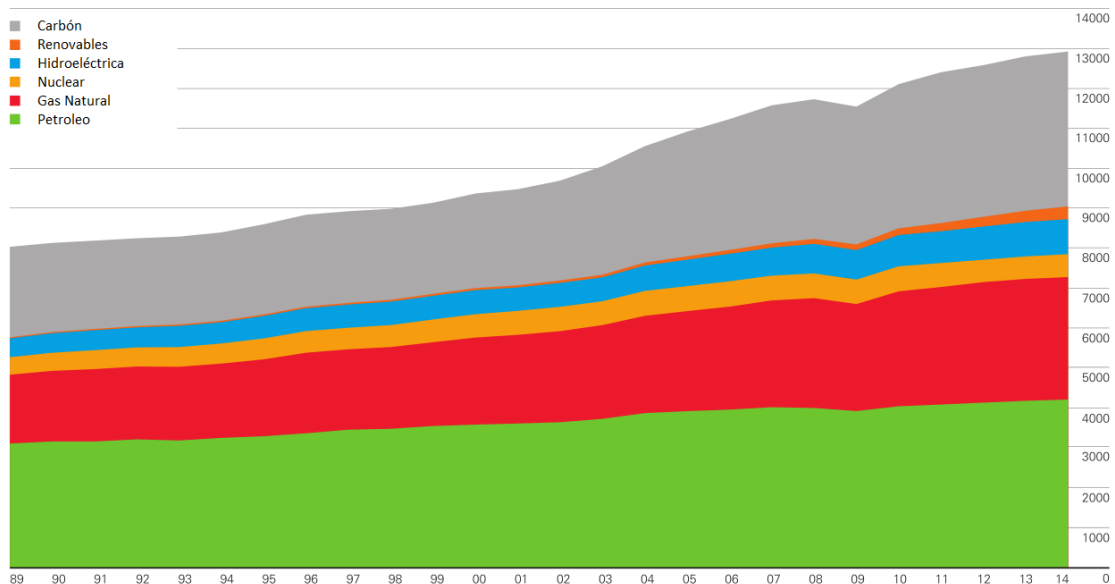


Figura 3.1: Evolución de consumo energético primario mundial. Unidades equivalentes a millones de toneladas de petróleo, Fuente: [British Petroleum \(2015\)](#)

3.1.2. Contexto nacional

El contexto nacional posee un comportamiento similar al mundial, salvo pequeñas variaciones.

La evolución del consumo energético chileno se puede visualizar en el esquema 3.3 del cual se extrae que, para los últimos 10 años, se observa una tasa de crecimiento promedio del 2,2 % anual, cercano al presupuestado globalmente de 1,8 %, considerando que Chile es miembro de la OCDE, pero aun así un país en vías de desarrollo.

Por otro lado, la composición de su consumo, según fuente de generación primaria está

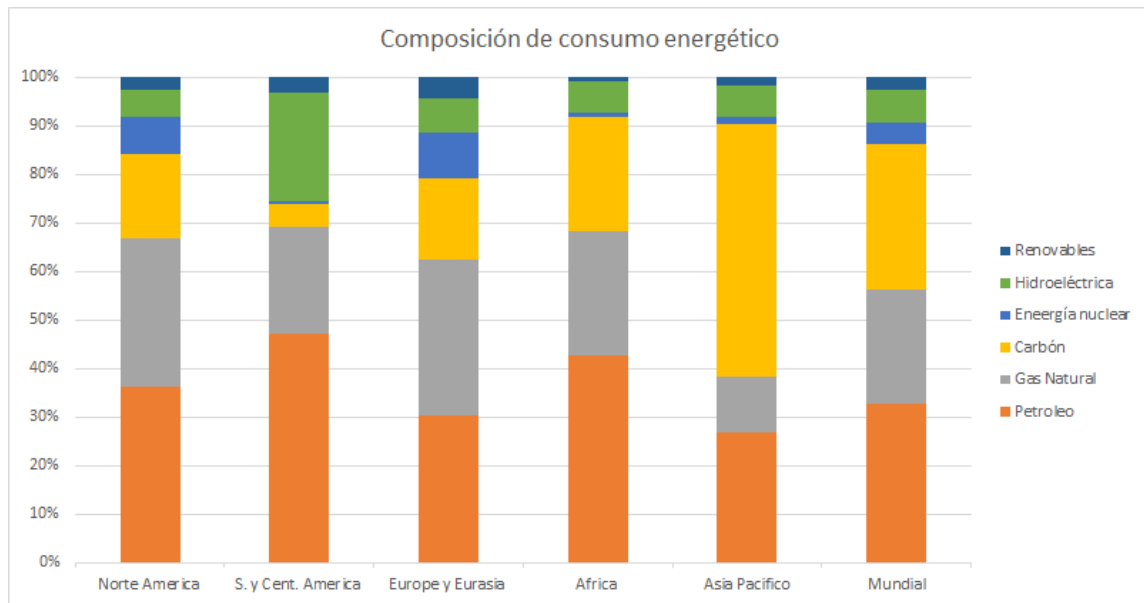


Figura 3.2: Composición energética por zona geográfica, Fuente: [British Petroleum \(2015\)](#)

dado en el gráfico 3.4, el cual nos muestra que aproximadamente el 69,4 % de la energía proviene de combustibles fósiles y al incluir biomasa, obtenemos que un 92,9 % de la energía producida en Chile es a través de procesos de combustión.

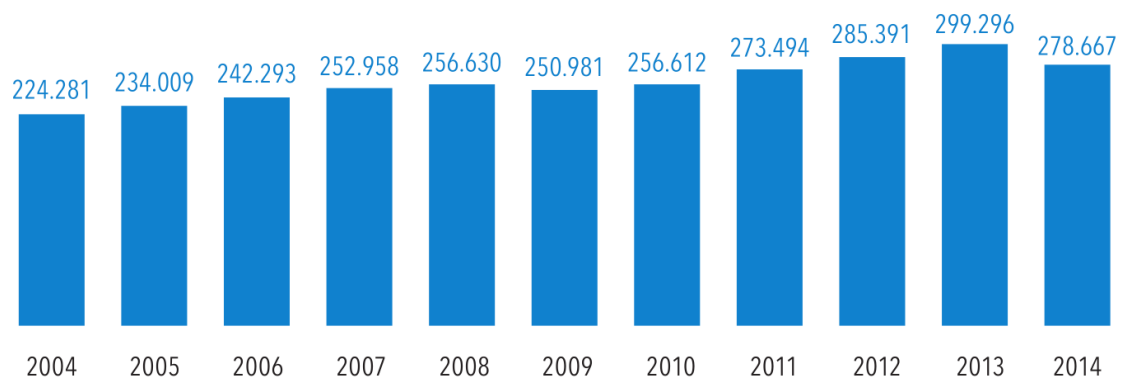


Figura 3.3: Evolución del consumo final en Chile en TCal, Fuente: [CNE \(2016\)](#)

Otro aspecto importante es la composición de los requerimientos energéticos del país según sector, donde para 2014 lidera el transporte con un 33,1 %, le sigue el sector industrial con un 24,5 %, minería con un 15,8 % y residencial abarcando un 15,0 % ([CNE \(2016\)](#)).

Con los datos observados extraemos que el proceso de combustión es por lejos el principal método de obtención de energía. Para el mundo significa el 87 % de la energía

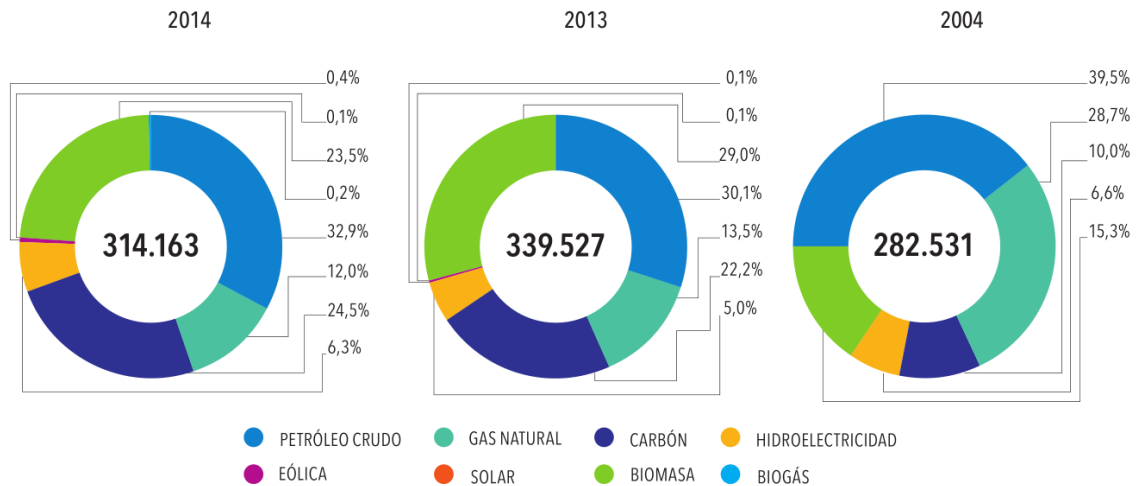


Figura 3.4: Composición de generación primaria en Chile, Fuente: CNE (2016)

utilizada y para el país un 93 %, energía que impacta en procesos críticos para el bienestar nacional como lo son la industria, transporte y consumo residencial. Las características de este método, son una oportuna respuesta a las curvas de demanda desde la perspectiva técnica y bajo costo desde la perspectiva financiera.

Uno de los principales problemas de la utilización de la combustión para obtención de energía es la alteración en la composición de reservas de carbono. Actualmente las reservas activas de carbono (donde queda fuera las reservas de carbono en rocas por presentar ciclos de entre 100 y 1000 años) se encuentra como dióxido de carbono atmosférico (2 %), como biomasa en plantas y suelo vegetal (5 %), como combustible fósil (8 %) y en mezcla iónica en los océanos (85 %). Es por esto que la quema de combustibles fósiles traspasa al carbono a la atmósfera y una vez ahí, parte es absorbido por los océanos (28 %) y la tierra (32 %). Quedando el 40 % restante en la atmósfera, desequilibrando el balance de carbono atmosférico; aumentando la concentración de este en la atmósfera e incrementando el efecto invernadero. 'Entre los años 2000-2008, la humanidad agregó a la atmósfera $9,1 \times 10^{15}$ (9.1 Teragramos o 9.1 miles de millones de toneladas) cada año, $7,7 \times 10^{15}$ anuales por el consumo de combustibles fósiles y $1,4 \times 10^{15}$ anuales por cambios en el uso de la tierra. Se han encontrado evidencias que sugieren que en la década de los 2000's el porcentaje de carbono almacenado en la atmósfera ha sido mayor' (McKinley (2016)).

Con lo anterior se argumenta que estudiar el proceso de combustión y así optimizar el

proceso en torno a mayor aprovechamiento energético o menor emisiones de carbono, es trascendental para el desarrollo sustentable en el tiempo de la sociedad humana, debido al desequilibrio que es el principal método de obtención de energía usado y desequilibra el balance de carbono atmosférico.

3.2. Combustión

Como queda en evidencia en las secciones anteriores, la combustión es el proceso térmico de mayor interés práctico por su volumen de uso a nivel mundial. Sus aplicaciones se pueden resumir en:

- Calefacción de habitáculos (hogueras, estufas, calderas)
- Producción de electricidad (centrales térmicas)
- Propulsión (motores alternativos, turbinas de vapor, turbinas de gas)
- Proceso de materiales (reducción de óxidos, fundición, cocción, secado)
- Eliminación de residuos (incineración de basura)
- Producción de frío (frigorífico de absorción)
- Control de incendios (barreras contrafuego, materiales ignífugos)
- Iluminación

Así, para la ingeniería el proceso es de interés tanto en un contexto de estudio de la combustión controlada (con fines de mejorar obtención de energía o minimizar contaminantes) como también en un contexto de combustión incontrolada (incendios) para tratar de prevenirla y luchar contra ella.

El estudio de la combustión es complejo debido a que es un proceso multidisciplinario (termoquímico-fluidomecánico) fuertemente acoplado, los procesos de transporte de especies y calor (fenómenos de no equilibrio) son dominantes, la fuerte exotermicidad da lugar a altas temperaturas, existen enormes gradientes (llama) e importantes fuerzas

de flotabilidad por dilatación diferencial y, por último, se trata con enormes gradientes espaciales con cortos tiempos de residencia, lo que provoca estados de no equilibrio local (quimioluminiscencia, ionización). En este contexto las ciencias básicas que entran en juego son:

- Termodinámica
- Ciencia química
- Transferencia de calor y masa
- Mecánica de fluidos

En el presente trabajo es de especial interés la última ciencia mencionada, pues son justamente los balances de flujos los que buscan alterarse y así simplificar el estudio de flujos turbulentos, lo cual se detallará más adelante.

3.2.1. Características del medio reactivo

En toda combustión intervienen tres elementos: combustible, comburente y dosado.

El *combustible* será el compuesto o mezcla de compuestos que se descompongan y oxiden, liberando en este proceso energía en forma de calor. A estos los podemos clasificar como:

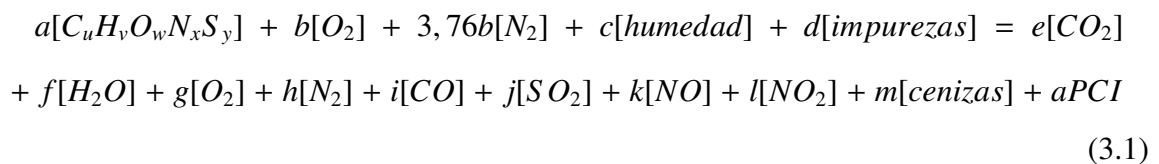
- Naturales o primarios
 - Sólidos: Carbón, madera y otros tipos de biomasa, pueden incluirse algunos metales.
 - Líquidos: Petróleos y derivados
 - Gaseosos: Gas natural y gases licuados del petróleo
- Artificiales o secundarios
 - Sólidos: Coque (destilado de la hulla), carbón vegetal, aglomerados de la hulla, biomasa residual (basura y desagües humanos, estiércol, paja, etc.)

- Líquidos: Alcoholes (destilados de biomasa), aceites de nafta y benzol (destilados del petróleo)
- Gaseosos: Destilados de la madera, destilado de la hulla, destilados de las naftas del petróleo y, potencialmente en el futuro, hidrógeno.

Las propiedades importantes de los combustibles son: la composición, la entalpía estándar de reacción (poder calorífico); la densidad, viscosidad y coeficiente de dilatación; la entalpía de vaporización; presión de vapor; límites de ignición, auto inflamación y extinción, la toxicidad y la compatibilidad con otros materiales.

Por otro lado, tenemos al *comburente* u oxidante, el cual por excelencia es el oxígeno del aire, aunque en algunas aplicaciones especiales se usa aire enriquecido e incluso oxígeno puro. Normalmente se aproxima a que el aire posee una composición molar de $0,21O_2 + 0,79N_2$. Las mezclas entre combustible y comburente pueden prepararse previamente (premezcla) o ir generándose a medida que avanza la combustión (difusión). Desde sus inicios, la combustión ha sido de esta última forma, y solo recientemente se viene utilizando la de premezcla. El caso de esta memoria también trabajará con una flama de difusión. Se le llama *dosado* a las proporciones en que se prepara o realiza la mezcla.

La reacción de combustión puede ponerse de una forma general, que sirve a la vez de balance másico y energético, como:



donde $a[C_uH_vO_wN_xS_y]$ se refiere a un mol de materia combustible (un compuesto o una mezcla de compuestos), aunque si no se sabe la estructura molecular se refiere a todo un kilo de combustible, y para gases se usan valores molares o volumétricos indistintamente. Se denomina combustión teórica a la que sólo diera como productos CO_2 y H_2O (y SO_2 si hay azufre); es decir en los productos no aparecen restos inquemados, ni disociados, ni oxidante sobrante. También se le llama combustión estequiométrica. Por último, se le llama combustión completa a la que sólo daría como productos CO_2 y H_2O y el oxidante y

materia inerte sobrantes.

Al cociente $A = b/(0,21a)$ en 3.1 se le llama relación aire combustible. Es fácil ver que el aire teórico A_0 necesario para la combustión completa de un combustible será $A_0 = (u + v/4 - w/2 + y)/0,21$ en valores molares o volumétricos. Otras formas de expresar la relación entre combustible y aire en la mezcla son a través de la riqueza ($\phi = A_0/A$); una mezcla con más aire del requerido teóricamente se le llamará una mezcla pobre ($\phi < 1$) y en caso contrario se le denomina mezcla rica ($\phi > 1$), o a través del exceso de aire ($e = 1/\phi - 1$) el cual expresa porcentualmente el porcentaje de aire real por sobre lo que la relación estequiométrica determina (Martinez, 1992).

3.2.2. Características de la combustión

La combustión posee distintos tipos de clasificación según el tipo o presencia de llama. Así encontramos llamas invisibles, llamas frías, llamas mortecinas, entre otras. En esta aplicación se estudiará la llama visible sin premezcla.

Las variables que influyen en el proceso de combustión son la composición; Así la cantidad de aire presente determinará la producción de hollín dentro de los gases de escape, temperatura; fluctuaciones en la temperatura es una de las causas que puede hacer inflamarse o extinguirse a una mezcla (también se podría mencionar aumentos localizados, como el caso de una chispa) y presión; variaciones de presión afectan la combustión, por ejemplo, los motores diesel generan ignición al aumentar la presión de la mezcla dentro de los cilindros o a bajas presiones, una mezcla puede hacerse prácticamente ininflamable. Además, tenemos otros factores como el campo de velocidades y presencia de catalizadores (Martinez, 1992).

Con lo anterior, se buscará tener control sobre distintos parámetros de la combustión:

- Eficiencia: que se libere la mayor cantidad de exergía posible
- Intensidad: Que la potencia liberada por el reactor sea grande por unidad de volumen
- Estabilidad: que no se apague con fluctuaciones normales de las variables antes mencionadas

- Contaminación: que no produzca inquemados (CO , hollín, aldehídos), ni óxidos de alta temperatura (NO_x), ni óxidos de impurezas (SO_2)

3.2.3. Características de las llamas

La llama es el frente de reacción, una estrecha zona (menor a 1 mm) en donde tiene lugar la descomposición y recombinación molecular, presentando las concentraciones y la temperatura gradientes enormes. Las llamas se pueden clasificar por el tipo de mezcla de los reactivos, por el tipo de flujo, por su posición relativa a las paredes, por el tipo de combustible, por la granulometría del combustible condensado, etc. A continuación, se presenta un esquema de clasificación:

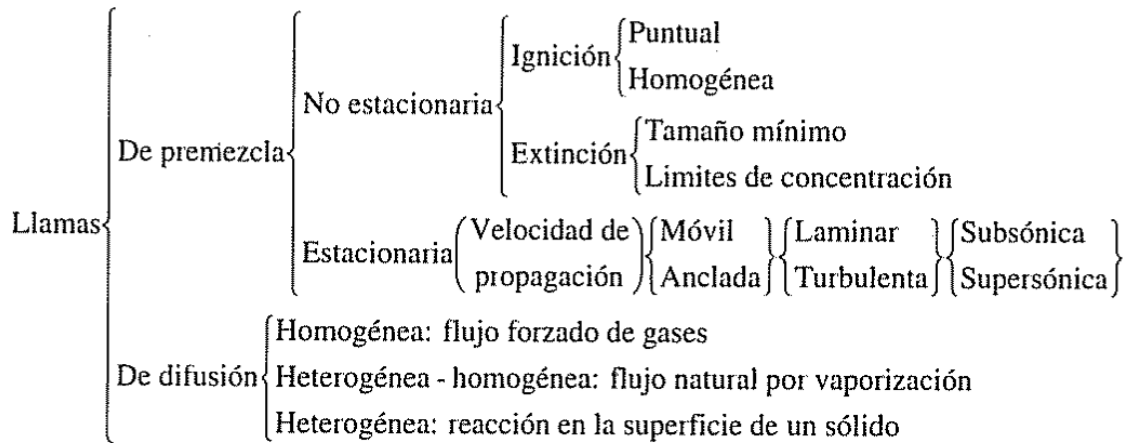


Figura 3.5: Clasificación de llamas. Fuente: [Martínez \(1992\)](#)

A este esquema se le debe agregar el régimen de difusión de gases para una llama de difusión homogénea, los cuales pueden ser laminares o turbulentos, y que justamente es el área donde indaga el presente trabajo.

Además, a través del esquema podría uno preguntarse respecto al estado de la materia en el cual se realiza la combustión; incluso cuando el combustible está en forma condensada, suele tener lugar en fase gaseosa debido a las altas temperaturas que vaporizan el combustible condensado. Existen excepciones a esto, pero no son casos de interés para este estudio.

Resumiendo lo expuesto, en lo concerniente al sistema de intermitencia, deberá estar orientado a trabajar con una combustión de difusión homogénea principalmente con los

combustibles etileno y acetileno, donde el dosel se dará según se requiera en cada experiencia. Los gases se presentan en estado laminar y a pesar de la intermitencia deberá mantenerse este régimen.

3.3. Fluidos

Considerando que la combustión se da esencialmente en estado gaseoso, debemos entender entonces el comportamiento de los gases bajo el concepto de la mecánica de fluidos.

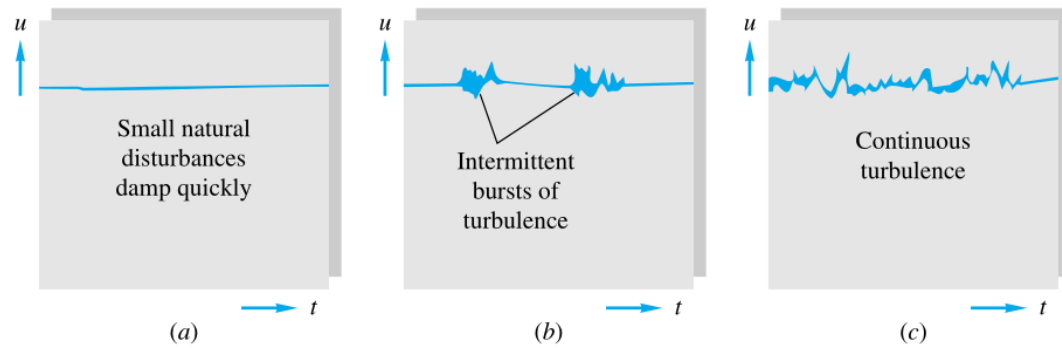
El comportamiento de los fluidos está extensamente estudiado. La teoría es poca en relación a la cantidad de experimentos y no existe una teoría única para explicar el comportamiento de los fluidos. El primer parámetro para la comprensión de los fluidos es el análisis adimensional, el cual consiste en generar funciones adimensionales a partir de las variables observadas (generalmente, longitud, masa, tiempo y temperatura). Uno de estas funciones o números es el *número de Reynolds* el cual se expresa como

$$\frac{VL}{\nu} \quad (3.2)$$

donde V es la velocidad del fluido, L representa el largo característico y ν la viscosidad cinemática del fluido. Este número permite clasificar el régimen de comportamiento del fluido según el valor de este número.

Un fluido se clasifica en tres regímenes dinámicos, según cómo se comporte el movimiento de las partículas en el fluido en contraste con el comportamiento promedio del fluido. El primer caso, cuando no existen desviaciones significativas, se denomina *régimen laminar* y el caso opuesto, cuando las fluctuaciones aleatorias oscilan entre el 1 y 20 % de la velocidad media, se denomina *régimen turbulento*. El caso medio, entre estos dos se denomina *de transición*.

La conexión entre estos dos parámetros, el tipo de régimen y el número de Reynolds, se da simplemente según el rango de valor de Reynolds. Las relaciones se exponen en la tabla 3.1:

**Figura 3.6:** Comportamiento de fluido en distintos regímenes**Tabla 3.1:** Rangos de Reynolds y comportamiento de fluidos

Reynolds entre	Característica
0 – 1	movimiento laminar lento, altamente viscoso
1 – 100	laminar, fuerte dependencia del número de Reynolds
100 – 10^3	laminar, es útil la teoría de capa límite
10^3 – 10^4	transición a la turbulencia
10^4 – 10^6	turbulento, moderada dependencia del número de Reynolds
10^6 – ∞	turbulento, débil dependencia del número de Reynolds

Respecto a las variables que determinan el número de Reynolds, la viscosidad cinemática representa características intrínsecas del fluido (diferentes para cada uno), lo cual además varía en función de la temperatura, mientras que la longitud característica es un parámetro espacial respecto de la 'forma' de lo que delimita el movimiento del fluido. Así, aumentos en la temperatura, en la velocidad o en la longitud característica (por ejemplo, para el caso de un cilindro sería el diámetro), generarán un aumento en el número de Reynolds y, por ende, tendencias a un comportamiento turbulento del fluido. Para profundizar respecto al tema, puede consultarse [White \(1998\)](#).

Claramente si el comportamiento de las partículas se acerca al comportamiento promedio, su modelación, entendimiento y predicción será mucho más sencilla, sin embargo, si se comporta diferente, se debe aplicar un trabajo "partícula a partícula" lo cual es costoso desde la perspectiva de cálculo y más aún, por el hecho de que el comportamiento es azaroso, generando un sistema no determinístico en el movimiento del fluido.

3.4. Modelamiento de flujos turbulentos

El modelamiento de flujos turbulentos no sería posible tal cómo hoy existe, si no fuese por el uso de computadores que faciliten el procesamiento numérico, lo cual ha dado origen a la *investigación computacional de la dinámica de fluidos* o *research in computational fluid dynamics (CFD)*. El estudio de los fluidos turbulentos ha sido ampliado al estudio de fluidos en combustión.

La turbulencia se da siempre en tres dimensiones y de manera inestable con una gran variedad de movimientos de escala, los cuales deben ser resueltos. Es por esto que el tamaño del problema computacional se ve incrementado enormemente por el nivel de detalle que requiere la modelación, la cual debe ser suficientemente fina para satisfacer los problemas en estudio. La forma más precisa de modelar es la *modelación directa* (*direct numerical simulation (DNS)*), en la cual todas las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas numéricamente usando un mallado fino para capturar correctamente el fluido y sus remolinos de pequeña y gran escala. Es por esto que el modelamiento por DNS es costoso computacionalmente hablando y solo es aplicable a bajos números de Reynolds y sobre geometrías simples.

En Pope (1991) se puede apreciar los progresos y retos que existe en torno al modelamiento de flujos turbulentos en combustión: Se revisan los importantes avances que se han logrado en el desarrollo y uso de modelos de combustión turbulenta aplicables de manera práctica a los dispositivos de combustión. El trabajo reciente se ha centrado en el desarrollo de métodos que pueden tratar la cinética de tasa finita de una manera realista y manejable. La simulación numérica directa no se puede utilizar para este propósito, ya que es computacionalmente intratable; así aparecen el método Large-eddy Simulation (LES), el cual mejora respecto a el método directo, pero está lejos de ser clara, porque las reacciones de combustión dan lugar a problemas sin resolución. Por otra parte, los métodos por funciones probabilísticas de densidad (PDF), superan las barreras dadas en LES, y que se han demostrado ser aplicables para los flujos complejos con cinética de tasa finita realistas. En el texto citado se presenta una explicación sencilla de los métodos PDF. En torno a la combustión, la reacción y la convección son tratados según su propia teoría,

mientras que el modelado se realiza en un entorno Lagrangiano, mediante la construcción de modelos determinísticos o estocástica para la evolución de las propiedades del fluido de partículas.

3.4.1. Método LES

Large-eddy simulation (LES) es un método de simulación propuesta inicialmente para simular flujos atmosféricos en la década de los 60' y se ha transformado en uno de los métodos más utilizados para simulación de flujos turbulentos gracias a los avances computacionales. Sin embargo, este método no está libre de desafíos por alcanzar niveles satisfactorios de simulación para requisitos de investigación o aplicación industrial. Se puede consultar *Large-eddy simulation: Past, present and the future* [Zhiyin \(2015\)](#) para una revisión de la formulación matemática, desarrollo histórico y estado actual del método LES.

3.4.2. Métodos PDF

Los métodos por funciones probabilísticas de densidad (PDF) proporciona un medio de cálculo de las propiedades de flujos turbulentos. Estos han sido aplicados a una amplia variedad de flujos turbulentos con y sin combustión. Para dichos flujos, las variables trabajadas son principalmente velocidades y composición (de oxígeno, por ejemplo), cada una en función del espacio y tiempo. Estas se abordan según diferentes aproximaciones estocásticas.

En los últimos 40 años, los métodos PDF han pasado de ser solo teoría a una herramienta práctica, ampliamente utilizada, en el entendimiento de los flujos turbulentos.

Para un mayor entendimiento de este método respecto a definición, métodos de solución numérica y aplicación a cálculos en flama turbulenta, revisar [Pope \(1990\)](#) o para mayor profundidad respecto a las aproximaciones estocásticas [James et al. \(2002\)](#). Y para los últimos avances respecto al tema [Pope \(2004\)](#).

Si el lector revisa la bibliografía citada, encontrará que, para poder entrar en el mundo del modelamiento directo, existen requisitos teóricos bastante específicos y complejos para

su entendimiento y posteriormente, si se quiere trabajar en ello, nace el requerimiento de sistemas de procesamiento de datos avanzados. Es así que nacen corrientes de estudio que intentan abordar problemas de combustión turbulento desde otra perspectiva.

3.5. Estudios indirectos

Con el fin de no ingresar al modelamiento de gases turbulentos, es que nace la metodología de intermitencia de llamas laminares para simular flujos turbulentos.

El estudio de la combustión a partir de gases laminares intermitentes, es una aproximación alternativa al modelamiento directo de combustión en régimen turbulento. Múltiples aplicaciones se han realizado de este método, donde el forzamiento acústico, es la forma más utilizada para generar intermitencia (Chao y Ming-Shan (1992), Cetegen y Ahmed (1993), Shaddix et al. (1994), Wang et al. (2013), Hou et al. (2015)). Un estudio importante para el presente trabajo es *"Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane and Ethylene Diffusion Flames"* de Shaddix y Smyth (1996). El estudio de llamas laminares estables, difiere de esta aproximación por el forzamiento acústico del combustible para obtener variaciones intermitentes en el caudal de éste. En comparación con el estudio de llama laminar estable, aquí encontramos un rango más amplio de posibilidades cualitativas y cuantitativas. El fundamento de este estudio se basa en que permite extender ideas y relaciones desde el estudio de llamas laminares hacia las llamas en flujo turbulento.

Shaddix utilizó la técnica de espectros según Laser-induced Incandescence (LII) para poder tener datos temporales y espaciales respecto a radiación emitida y formación de hollín en la llama; comparando sus resultados entre llama estable y distintos niveles de intermitencia en las llamas. Dentro de los resultados observados por Shaddix, están la variación espacial en las concentraciones de hollín, variaciones en niveles de propagación de radiación mayores en un factor de entre 10 y 20 veces, respecto al estudio sin intermitencia y mediciones de la fracción de volumen de hollín también presentaron variaciones respecto a la llama estable. En resumen, la comparación entregó diferencias respecto a radiación y concentración de hollín entre el método estable y el método intermitente y también encontró

respuestas diferentes del método intermitente según los combustibles utilizados; metano, propano y etileno.

De esta manera, se pretende recrear las condiciones experimentales realizadas por Shaddix, dada las ventajas que entrega frente a la modelación directa y teniendo conciencia de la importancia del estudio de la combustión.

3.6. Forzamiento Acústico

Al hablar de forzamiento acústico en los experimentos de estudio indirecto de la combustión gaseosa turbulenta, se busca generar variaciones controladas en la presión del gas que se traduzcan en una intermitencia controlada. La primera interrogante es cómo generar el forzamiento acústico.

Actualmente existen diversos modos de generar ondas sonoras, asociadas a distintos requerimientos (televisión, cine, música, comunicaciones, etc.), donde el modo más común es a través de altavoces dinámicos o parlantes. Existen otros tipos de generadores acústicos como las Bobinas Tesla, piezoeléctricos, electrostáticos, de cinta, planares, de plasma, etc, sin embargo, los altavoces dinámicos son por lejos los que poseen mejor relación precio-calidad.

Los altavoces dinámicos son el método más utilizado para reproducir cualquier tipo de sonido, ya sea en un teléfono celular, auriculares, mega conciertos o sirenas de emergencia. Por ello si se desea utilizar para forzar acústicamente tenemos que traducir qué significa una onda sonora.

Una onda sonora es una onda mecánica (que viaja a través de un medio físico) el cual no es más que variaciones de presión que se van propagando por el medio que lo transporta. Así observamos que lo que se debe alcanzar en el experimento, es una onda sonora de baja frecuencia (entre 5 y 30Hz) y cierto nivel de variación de presión que permita generar perturbaciones adecuadas en los gases combustibles. A continuación, se profundiza en el funcionamiento de los altavoces dinámicos.

3.6.1. Altavoces dinámicos

Se les define como un convertor de energía o transductor, dado que realiza conversión de energía en 2 pasos: de señal eléctrica a movimiento mecánico y de movimiento mecánico a onda acústica.

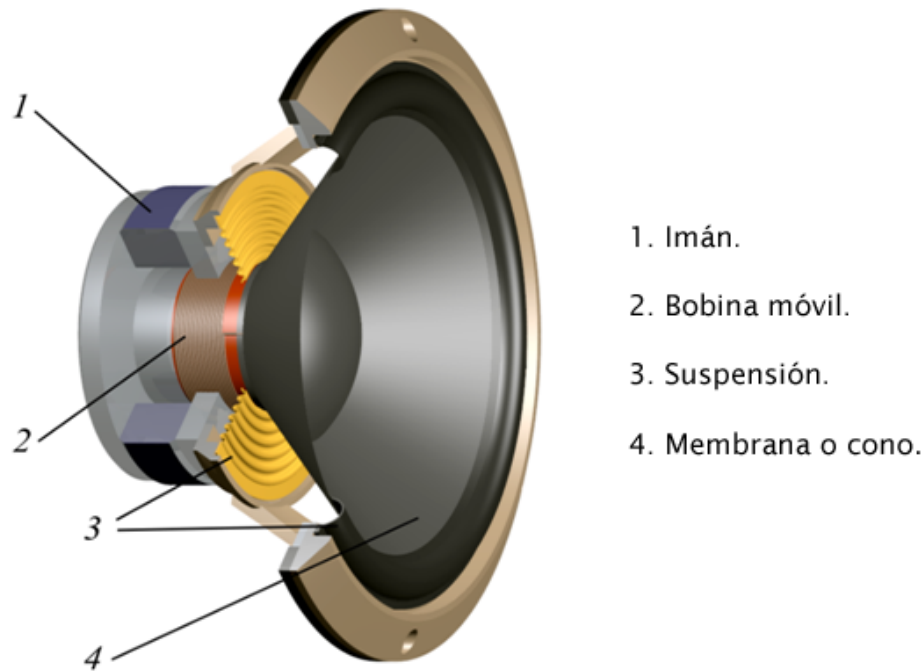


Figura 3.7: Esquema de parlante

3.6.1.1. Comportamiento eléctrico

La señal eléctrica proveniente del amplificador, llega por el cable conectado y circula por la bobina del altavoz. Al estar la bobina situada dentro del campo magnético de un imán, la circulación de la corriente eléctrica provoca que se creen fuerzas magnéticas de atracción y repulsión, lo que hará que la bobina se desplace hacia adelante o hacia atrás, según varía la señal eléctrica. Este movimiento será el principio básico de la función del altavoz.

Desde el punto de vista eléctrico de cara al amplificador, el altavoz no se comporta solamente como una bobina como sería de esperar, sino que, debido a la interacción de esta

etapa eléctrica con la etapa mecánica, presenta al amplificador una curva de impedancia característica más compleja

3.6.1.2. Comportamiento mecánico

El movimiento de la bobina adherida a la base del diafragma, hace que éste se mueva de manera solidaria según ordena la señal eléctrica. Debido a la masa de este conjunto móvil diafragma-bobina-suspensión y a la elasticidad y pérdidas de la suspensión, el conjunto se comporta como un sistema resonante, que acumulará inercia y oscilará más fácilmente a una frecuencia determinada, denominada frecuencia de resonancia, y que será uno de los parámetros importantes a la hora de diseñar la caja en la que irá instalado el altavoz.

3.6.1.3. Comportamiento acústico

Debido a ese movimiento de la bobina, solidaria a todo el conjunto mecánico, el diafragma o cono también oscila. Esta oscilación, comprime y descomprime el aire frontal al cono de manera exacta a como le indica la corriente eléctrica a la bobina. Es decir, por fin tenemos lo que buscábamos, se está reproduciendo el sonido, una variación de la presión del aire de manera análoga a como indicaba la señal eléctrica original proveniente del amplificador.

3.6.1.4. Parámetros de los parlantes

A continuación, se expondrán algunos parámetros de interés que describen el comportamiento de un parlante.

Impedancia nominal (Ω): impedancia representativa del altavoz dada por el fabricante. Muy importante a la hora de elegir el amplificador, que ha de ser compatible con dicho valor. La impedancia es un parámetro que varía con la frecuencia. Para frecuencias bajas, las impedancias son mucho mayores, dando como resultado corrientes de circulación menores.

Potencia (W): es la potencia, en valor promedio (R.M.S.) o de pico, que soporta el altavoz en su funcionamiento normal sin estropearse. Para la aplicación deberá coordinarse la potencia del parlante con la del amplificador; idealmente que ambos valores coincidan.

Excursión (mm): indica el desplazamiento que admite el cono en su oscilación, tanto sin romperse (Max.excursión), como el rango en el que se mantiene predecible (Linear excursion), menor que el anterior. Este parámetro se relaciona con la potencia eléctrica exigida en la bobina, por ello lo importante de la coordinación de potencia entre amplificador y parlante.

Respuesta en frecuencia: es la gráfica que representa la amplitud o nivel de presión sonora (SPL) que da el altavoz dependiendo de la frecuencia, para una misma potencia eléctrica de entrada a todas las frecuencias (normalmente 1 W). Indicará la zona de trabajo adecuada del altavoz, y es un valor muy representativo de la fidelidad del altavoz, ya que cuanto más plana sea en su zona de trabajo, más fiel será el altavoz reproduciendo las proporciones sonoras de la grabación original. Para la aplicación buscada, este es uno de los parámetros importantes a considerar, buscando parlantes que tengan la mejor respuesta a frecuencias bajas.

Información obtenida de [PCPAudio \(2016\)](#) y [CosasAudio \(2016\)](#).

4 | Metodología

La metodología para conseguir el sistema de inyección intermitente de gases para ensayos de combustión se dividió en:

1. Diseño y confección
2. Pruebas de desempeño
3. Caracterización de llama

Los dos primeros pasos fueron iterativos hasta alcanzar el sistema final, es decir, se siguió un esquema de ensayo y error para poder encontrar la mejor configuración del sistema. Finalmente se realizó la caracterización de llama, centrando el análisis en la altura de llama.

4.1. Diseño y confección

El sistema se compone de 3 elementos: *Transmisión de gases*, *Forzador acústico o pulsador* y *Generador de onda*, los cuales se detallan a continuación.

4.1.1. Transmisión de gases

La transmisión de los gases, específicamente del combustible, se mantuvo tal cual se realiza en la mesa de combustión a través del sistema *Swagelok* ¹, debido a que es un sistema fiable y de fácil acoplamiento. Como puede observarse en la figura 4.1, la configuración del sistema consiste en interrumpir la línea de combustible, insertando el

¹Puede consultarse la página del fabricante en <https://www.swagelok.com.mx/es-ES>

pulsador entre el flujómetro y el quemador; así el gas se desplaza de manera continua desde el regulador de flujo al pulsador, donde el primero controla el caudal de masa a combustionar y luego el pulsador altera el flujo continuo para llegar al quemador de manera intermitente. Considerando que no existen pérdidas ni inyección adicional de combustible, el caudal promedio a la salida del quemador, para intervalos de tiempo mayores a un segundo, es la misma que determina el flujómetro.

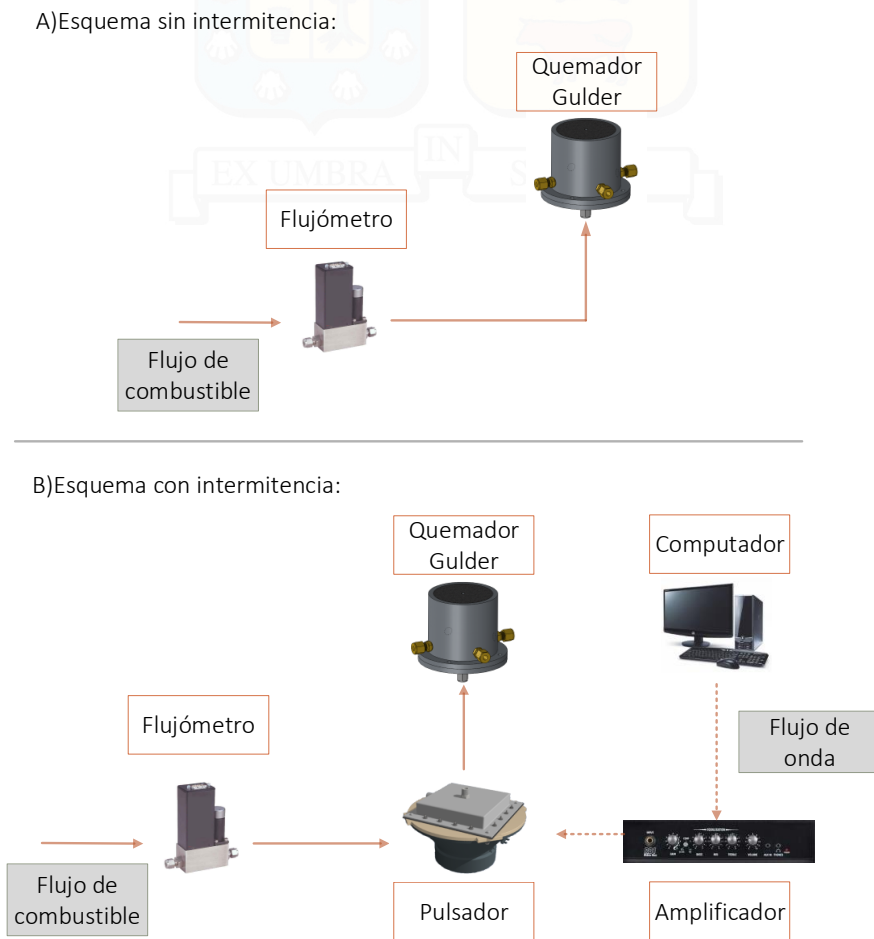


Figura 4.1: Esquema con y sin sistema de intermitencia. Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones de las mangueras de conexión fueron de 25 cm para el tramo entre el flujómetro y el pulsador y de 35 cm para el tramo pulsador-quemador. Cabe mencionar que, de modificarse la dimensión de esta última manguera, se puede alterar el efecto intermitente en el quemador, debido a la compresibilidad de los gases.

4.1.2. Forzador acústico

El forzador acústico tiene la función de inducir las variaciones de presión en el gas. En este punto convergen los flujos de combustible y el flujo de onda, obteniendo como salida un flujo de combustible intermitente. Para esto existen dos cámaras; la primera es la que se genera entre el cono del parlante y la lámina de caucho. La compresión en esta cámara está dirigida a que la presión se pueda aliviar en caso de llegar a puntos muy altos que puedan dañar la membrana del parlante y al mismo tiempo se dirija mayormente a la *membrana de intercambio* entre ambas cámaras. La segunda cámara es donde se mueve el gas combustible, hecha totalmente de acero inoxidable y con los terminales de conexión soldados a la misma. La única cara no metálica es donde se ubica la mencionada *membrana de intercambio*. Esta membrana es de caucho reforzado, de 1mm. de espesor, cuya función es mantener el hermetismo de la cámara de combustible y, al mismo tiempo, permitir que la onda de presión pase de una cámara a otra. Las cámaras están sujetas por un conjunto de 20 pernos y tuercas, de las cuales 16 se enfocan al hermetismo de la cámara combustible y 4 al hermetismo y a unir el parlante a la estructura. Pueden consultarse las figuras 4.2 y 4.3 para una mejor idea gráfica.

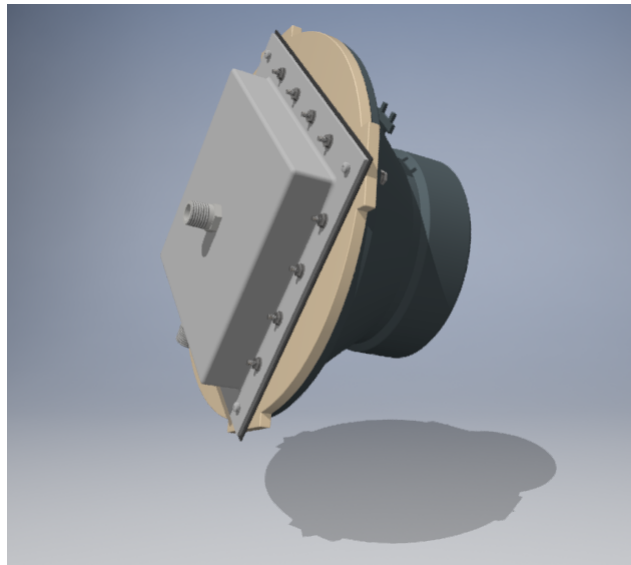


Figura 4.2: Modelación 3D de pulsador

La estructura metálica se encargó a un taller, mientras que la lámina plástica y membrana de intercambio se dimensionaron en el mismo laboratorio de combustión. Los pernos

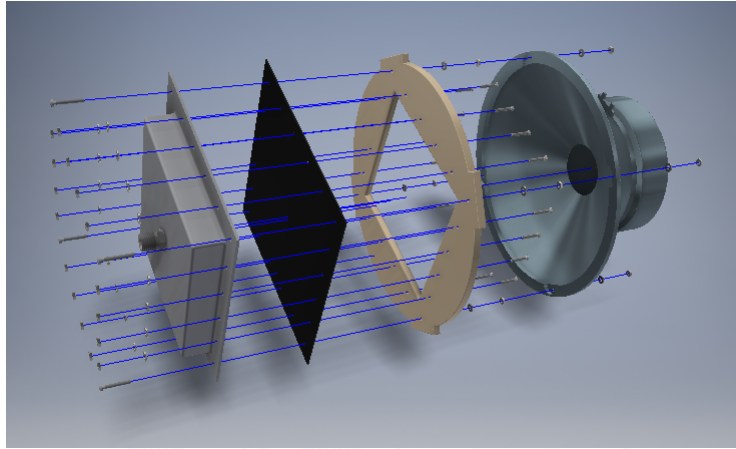


Figura 4.3: Vista explosionada de modelo 3D

corresponden a 16 pernos de cabeza avellanada de 2 cm de largo y 4 de cabeza binding de 4 cm de largo.

4.1.3. Generador de onda

Este sub-sistema tiene como función el generar y controlar las ondas acústicas que harán presión sobre el combustible. El proceso inicia desde un computador, el cual a través de del software *Audio SweepGen* genera una onda sinusoidal de audio a una frecuencia definida. Esta onda sale por la tarjeta de audio del computador hasta el amplificador y, posteriormente, la onda se dirige (amplificada) hasta el parlante de 8". La elección del parlante tuvo como principal parámetro el diámetro de este, pues se consideró que este diámetro movería una cantidad suficiente de aire para obtener la compresión necesaria para el sistema, además es el mismo diámetro utilizado por [Shaddix et al. \(1994\)](#). Para simplificar el trabajo y no tener que conjugar las capacidades de potencia e impedancia entre amplificador y parlante, se extrajeron ambos elementos de un amplificador de bajo eléctrico, amplificador Laney RB1 de 20 watts de potencia.

Durante los primeros ensayos se constató que la tarjeta de sonido que trae integrada el computador no entregaba una buena respuesta (mucho ruido y baja amplitud), por lo que esta fue reemplazada por una tarjeta *Creative® 5.1 PCI-E SB Audigy FX*².

²<http://us.creative.com/p/sound-blaster/sound-blaster-audigy-fx>

4.2. Pruebas de Desempeño

Para controlar el funcionamiento del sistema se realizaron dos pruebas diferentes:

4.2.1. Prueba acústica

Con esta prueba se buscó corroborar la fidelidad de la frecuencia de la onda generada. Sin instalar el sistema en la mesa, se cerró el terminal de ingreso de combustible en el pulsador y se instaló un micrófono Shure SM57 en el terminal de salida. Se hizo funcionar el sistema y se registró la señal del micrófono a través de un software de grabación, para analizar la frecuencia de salida del aire. El proceso se realizó con distintas frecuencias e intensidades, y se contrastaron los resultados teóricos (frecuencia de configuración) y los resultados experimentales (frecuencia de la onda de micrófono).

El análisis se llevó a cabo a través de códigos escritos en Matlab los cuales pueden consultarse en [A.1.1](#). Este código importa las pistas de audio generadas y les aplica, en primer lugar, un suavizamiento a través de media móvil. Esto se hizo debido a que el micrófono capta los choques del aire con la carcasa del mismo, generando ondas con mucho ruido como puede verse en las imágenes [4.4](#) y [4.5](#). Es importante notar que el suavizamiento acota la amplitud, pero este parámetro no es de importancia por el momento. Así, con el suavizamiento se elimina el problema del ruido y se hace más fácil el trabajo posterior. Luego, se selecciona el mayor dato por cada peak, se cuentan y finalmente se divide esta cantidad por el tiempo que comprenden.

4.2.2. Prueba frecuencia de llama

Esta prueba se realizó con el sistema instalado completamente en la mesa de combustión. Se encendió la llama y se registró con la cámara Manta G125 configurada para que entregue distintos niveles de cuadros por segundos (fps). Se registró la llama durante lapsos de tiempo con distintas frecuencias, contrastando los resultados teóricos (frecuencia de configuración) y los resultados experimentales (frecuencia de los videos). El análisis de los videos se realizó con códigos en lenguaje Matlab los cuales están en [A.1.2](#). Estos códigos importan

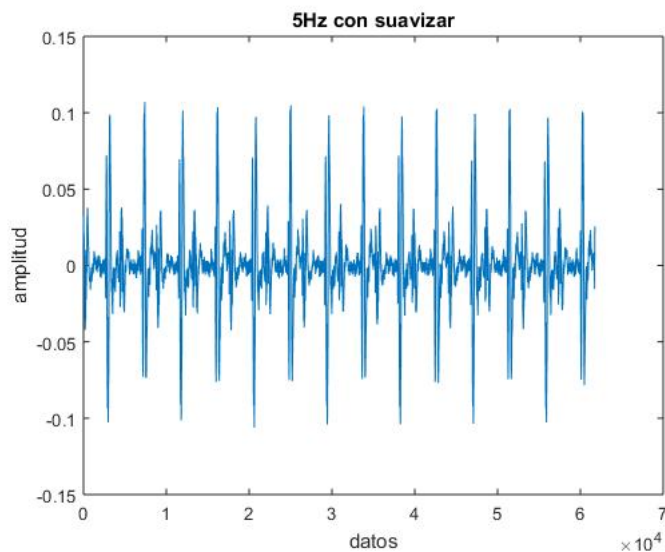


Figura 4.4: Curva de registro de micrófono a 5Hz sin suavizamiento

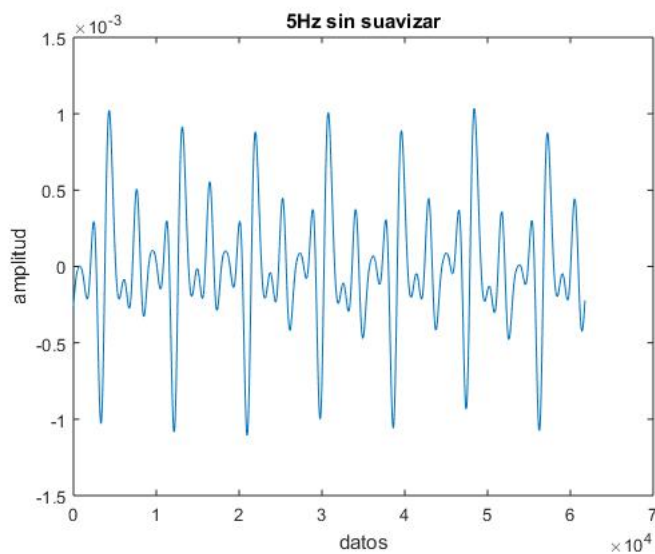


Figura 4.5: Curva de registro de micrófono a 5Hz con suavizamiento

los videos registrados, luego (de manera visual) se eliminan zonas donde la llama se pudo curvar por viento y finalmente se selecciona una fila de cuadros. Esta fila cambiará en el tiempo en función de la intermitencia, pues como la llama crece y decrece, esta sección horizontal observa que la llama se ensancha y enangosta, lo cual es el patrón que se usa para generar un histograma el cual es sometido a *transformada discreta de Fourier (DTF)* donde se determina la frecuencia de intermitencia.

4.3. Caracterización de llama

El objetivo aquí es obtener un contraste entre ensayos con y sin intermitencia y además conocer el comportamiento del sistema. Para eso se seleccionó el trabajo realizado por los alumnos de magíster [Jerez y Olivares \(2016\)](#) y se generó una réplica a este trabajo, pero con el sistema de intermitencia.

Se buscará comparar la altura de llama entre las dos modalidades. Para esto se registra la oscilación de la llama durante un lapso de 20s aproximadamente con la cámara Manta G125 y se analizaron los registros para obtener la altura de llama y extraer una curva de distribución de esta, bajo un índice de oxígeno de 21 % (OI21) con 20 slpm de oxígeno y 75,2 slpm de nitrógeno. De este modo, se realizaron dos ensayos: Uno manteniendo el caudal de combustible fijo a 135 sscm y variando la frecuencia y potencia combinados. El otro se realizó fijando la frecuencia en 10Hz y variando los caudales y potencias. Al hablar de potencia, se podrá constatar que es un valor porcentual. Este valor corresponde al nivel de volumen otorgado desde el computador, donde 0 % significa cero potencia y por ende nada de intermitencia y 100 % significa que el volumen está al máximo desde el computador. Los niveles para el amplificador durante los ensayos fueron en máximo para la ganancia, bajos y volumen, y mínimo para medios y agudos.

5 | Resultados

El resultado del diseño e implementación dieron el objetivo deseado de intermitencia en la llama. A continuación, algunas imágenes de la intermitencia:

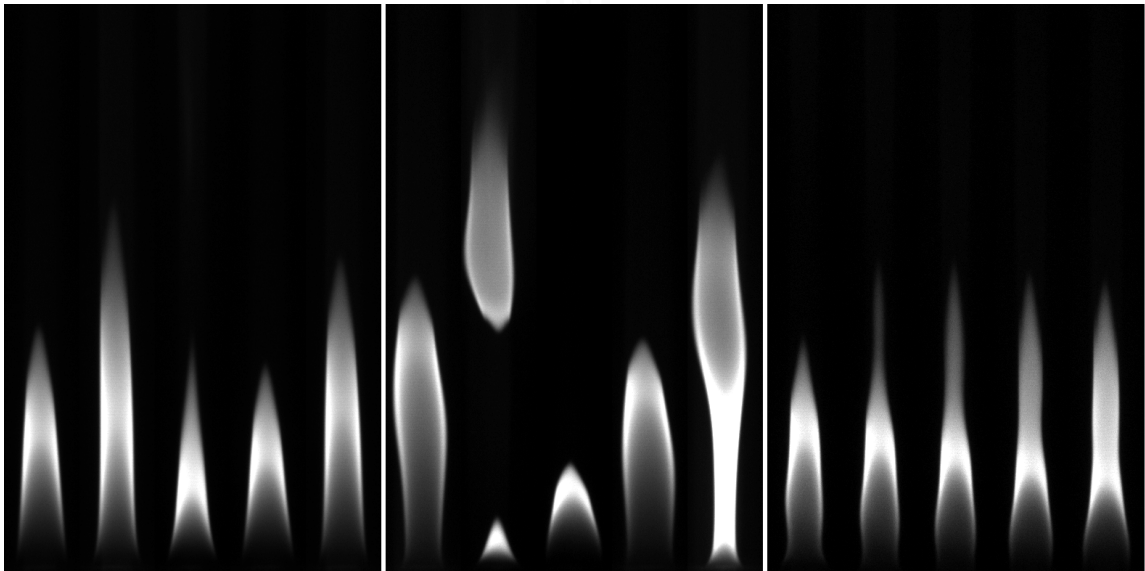


Figura 5.1: Imágenes de llama intermitente. De izquierda a derecha: 10Hz a 20 % de potencia, 10Hz a 40 % de potencia y 30Hz a 30 % de potencia.

5.1. Pruebas de desempeño

5.1.1. Prueba acústica

La prueba acústica entregó histogramas de los cuales se extrajo la frecuencia del muestreo. Los resultados se resumen en la tabla 5.1.

La *Frecuencia observada* es el dato obtenido con los códigos A.1.1, el cual funciona sobre la lógica de filtrar y contar solo los valores máximos o mínimos (según se configure)

Tabla 5.1: Frecuencias de pulsador registradas acústicamente con frecuencia de muestreo de 44.100 Hz

Muestra	Frec. programada (Hz)	Frec. observada (Hz)	variación (%)
1	5	5,000	0,004
2	10	10,000	0,000
3	20	20,000	0,000
4	30	30,002	0,005
5	50	50,000	0,000

en el histograma.

Se aprecia que las frecuencias son bastante cercanas entre observada y programada. De este modo, la prueba afirma la fidelidad del dispositivo en cuanto a frecuencia.

5.1.2. Frecuencia de llama

Los videos registrados se analizaron obteniendo los resultados expuestos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resultados de frecuencia de llama. (*)*fps*: cuadros por segundo

Muestra	<i>fps</i> *	Frec. programada (Hz)	Respuesta (Hz)	Desviación (%)
1	56,3	5	4,983	-0,34
2	56,3	6	5,937	-1,05
3	56,3	8	7,951	-0,61
4	102,7	10	9,945	-0,55
5	102,6	15	14,906	-0,62
6	102,6	20	19,862	-0,69
7	102,7	25	24,845	-0,62
8	102,6	30	29,784	-0,72

Los videos fueron analizados con los códigos A.1.2, donde se analiza una fila de píxeles y se mide el grosor de la zona que comprende la llama, para luego analizar a través de *Transformadas de Fourier*.

Al igual que en la *Prueba Acústica* se observan respuestas cercanas a la frecuencia programada. El error aquí aumentó, lo cual es atribuible a el menor muestreo por segundo realizado en video respecto al muestreo acústico. Es importante entender que ambas pruebas generan registros discretos y no continuos, donde el muestreo por unidad de tiempo para la prueba acústica es considerablemente mayor.

5.2. Caracterización de llamas

5.2.1. Resultados bajo caudal de combustible fijo

Los datos obtenidos tras medir la altura de llama se muestran en la tabla [5.3](#), donde se exponen los valores promedio de la altura de llama, medidos para distintas frecuencias y potencias, siempre para OI21.

Para determinar si la llama era continua, es decir, que no existían desprendimientos de llama, se realizaron esquemas gráficos para cada llama. Algunos de estos esquemas se han agregado a modo de ejemplo en los Anexos [A.2](#) y los códigos para generarlos están en [A.1.4](#).

En la tabla [5.4](#) se agregan las alturas promedio del 10 % de los mayores datos y 10 % de los datos menores para cada medición además del área promedio de cada medición.

Tabla 5.3: Datos para caudal de etileno de 135 sscm. Los datos marcados (*) corresponden a la máxima potencia sin saturar el pulsador

Frecuencia (Hz)	Potencia (%)	Altura (mm)	σ_h	Continua
5	10	49.9	0.2	Sí
	20	49.8	0.9	Sí
	40	50.3	2.6	Sí
	100*	61.0	8.1	Sí
10	10	50.2	6.9	Sí
	20	54.2	22.9	Sí
	40	68.9	37.6	No
	80*	49.2	17.9	No
15	10	51.3	11.0	Sí
	20	49.7	11.7	No
	40	61.5	15.8	No
	44*	64.7	16.3	No
20	10	49.9	1.3	Sí
	20	49.4	5.5	Sí
	40	-	-	-
	30*	50.9	8.1	No
30	10	50.1	1.8	Sí
	20	49.8	4.8	Sí
	40	49.7	5.7	Sí
	50*	50.3	6.1	Sí

Tabla 5.4: Datos para caudal de etileno de 135 sscm. Los datos marcados (*) corresponden a la máxima potencia sin saturar el pulsador. Las columnas 4 y 5 muestran la altura promedio para los datos extremos

Frecuencia(Hz)	Potencia(%)	Área(mm ²)	10 % menor(mm)	10 % mayor(mm)
5	10	243.5	48.6	51.2
	20	237.9	46.1	53.6
	40	243.3	39.5	62.2
	100*	286.0	10.9	145.4
10	10	242.9	41.2	60.7
	20	259.8	26.5	93.1
	40	280.5	22.9	141.8
	80*	207.3	22.1	77.9
15	10	249.8	38.9	70.5
	20	249.7	31.7	64.7
	40	261.2	37.0	84.8
	44*	264.3	39.7	88.8
20	10	239.2	47.6	51.8
	20	230.4	40.2	56.8
	40	-	-	-
	30*	217.4	37.7	61.6
30	10	239.5	47.3	52.6
	20	233.6	42.3	56.1
	40	229.0	40.2	56.7
	50*	231.8	39.8	57.4

5.2.2. Resultados bajo frecuencia fija

Al igual que en el ensayo anterior las alturas promedio, desviación estándar de ésta y características de continuidad, están en la tabla 5.5. Además, en la tabla 5.6 se encuentran los promedios para los datos extremos y área promedio.

Tabla 5.5: Datos para una frecuencia de 10Hz

Caudal (sscm)	Potencia (%)	Altura (mm)	σ_h	Continua
125	0	45.6	0.2	Sí
	10	45.7	6.4	Sí
	20	48.5	21.0	Sí
	30	51.6	26.9	No
135	0	50.2	0.2	Sí
	10	50.2	6.9	Sí
	20	54.2	22.9	Sí
	30	57.4	29.1	No
145	0	54.9	0.2	Sí
	10	55.1	7.9	Sí
	20	59.3	24.3	Sí
	30	61.1	34.3	No
155	0	59.8	0.3	Sí
	10	60.1	8.7	Sí
	20	63.9	25.0	Sí
	30	63.2	31.5	No

Tabla 5.6: Datos para una frecuencia de 10Hz.

Caudal(sscm)	Potencia(%)	Área(mm ²)	10 % menor(mm)	10 % mayor(mm)
125	0	212.0	45.2	45.9
	10	215.3	37.4	55.3
	20	232.8	24.0	85.2
	30	236.3	15.3	95.0
135	0	241.6	49.9	50.6
	10	242.9	41.2	60.7
	20	259.8	26.5	93.1
	30	261.9	17.6	103.4
145	0	271.4	54.5	55.3
	10	274.8	45.0	66.9
	20	293.9	28.9	99.8
	30	301.7	19.4	131.8
155	0	303.5	59.3	60.4
	10	307.4	48.8	73.1
	20	325.5	31.5	105.1
	30	321.2	21.4	118.5

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes observaciones:

- Existe un límite de potencia máxima dada por el pulsador y dicho parámetro es una función no lineal de la frecuencia. Esto puede apreciarse en el gráfico 5.2.
- Tampoco es lineal la respuesta de compresión. Esto queda en manifiesto al observar el gráfico 5.3, donde se ve un peak para la frecuencia de 10Hz.
- Para las frecuencias centrales, el pulsador abarca completamente el rango donde la llama es continua (sin desprendimiento). Esto no ocurre para las frecuencias extremas de 5 y 30Hz.
- Un comportamiento lineal explica de buen modo la relación entre la altura de llama y caudal de combustible con o sin intermitencia (ver gráfico 5.4). Al comparar los distintos niveles de potencia, se aprecia que al 10 % la variación en altura por variación de caudal es igual al caso sin intermitencia, sin embargo, para 20 % esta relación aumenta (mayor variación de altura de llama por variación unitaria de caudal de combustible) y para 30 % esta relación disminuye incluso por bajo el nivel del caso de no intermitencia. Además, la relación lineal empeora con el aumento de la potencia, como puede apreciarse en los índices 'R' en el gráfico 5.4.
- Al observar los histogramas (en anexo A.3 se agregan algunos ejemplos) no se encontró un patrón constante que insinúe una distribución uniforme. Para algunas muestras, de manera visual, se podría inferir que existe una curva de distribución donde los valores extremos de la llama poseen mayor frecuencia de observación respecto a los valores medios. Esta inferencia podría profundizarse con un muestreo más prolongado y con mayor cantidad de cuadros por segundo.

Se agrega que las mediciones fueron realizadas, en un comienzo, usando una interfaz de sonido *M-Audio Fast Track Pro*, y al utilizar la tarjeta de sonido integrada al computador respectivo del laboratorio se identificó que la tarjeta no cumplía los requisitos mínimos de calidad de señal. Así ésta fue reemplazada por una tarjeta *Creative® 5.1 PCI-E SB Audigy FX*, la cual sí cumplió los requisitos y con la cual se hicieron las mediciones expuestas.

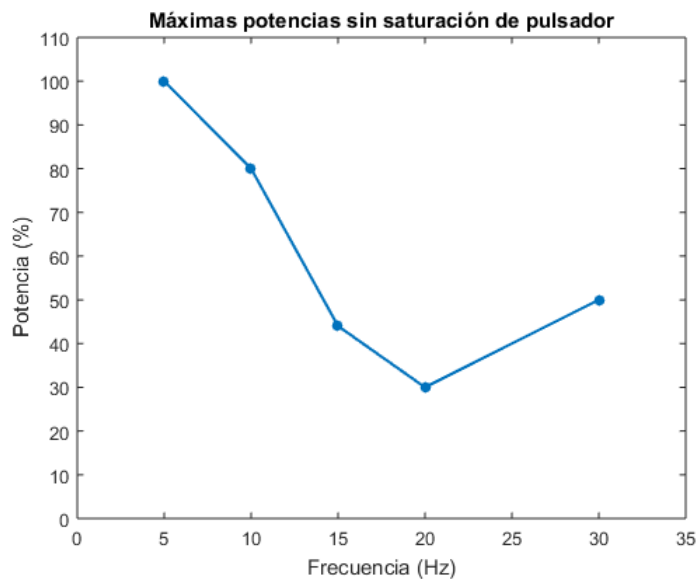


Figura 5.2: Potencias máximas (sin saturación) para distintas frecuencias

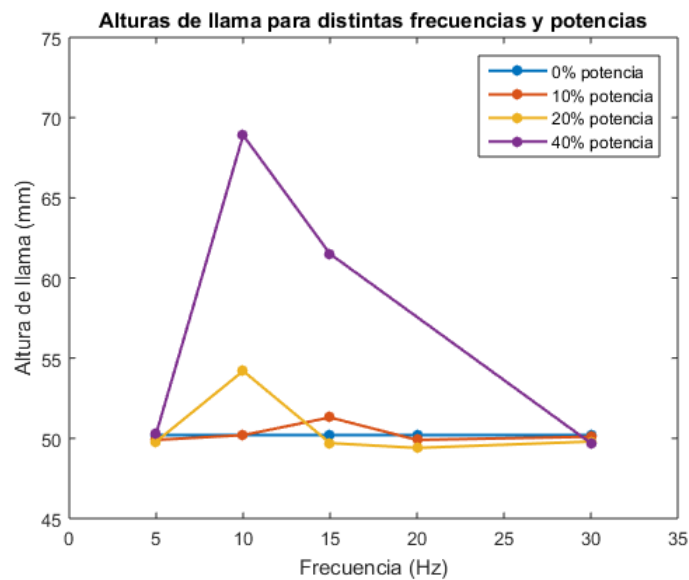


Figura 5.3: Altura de llama para 135 sscm, bajo distintas frecuencias y para distintas potencias

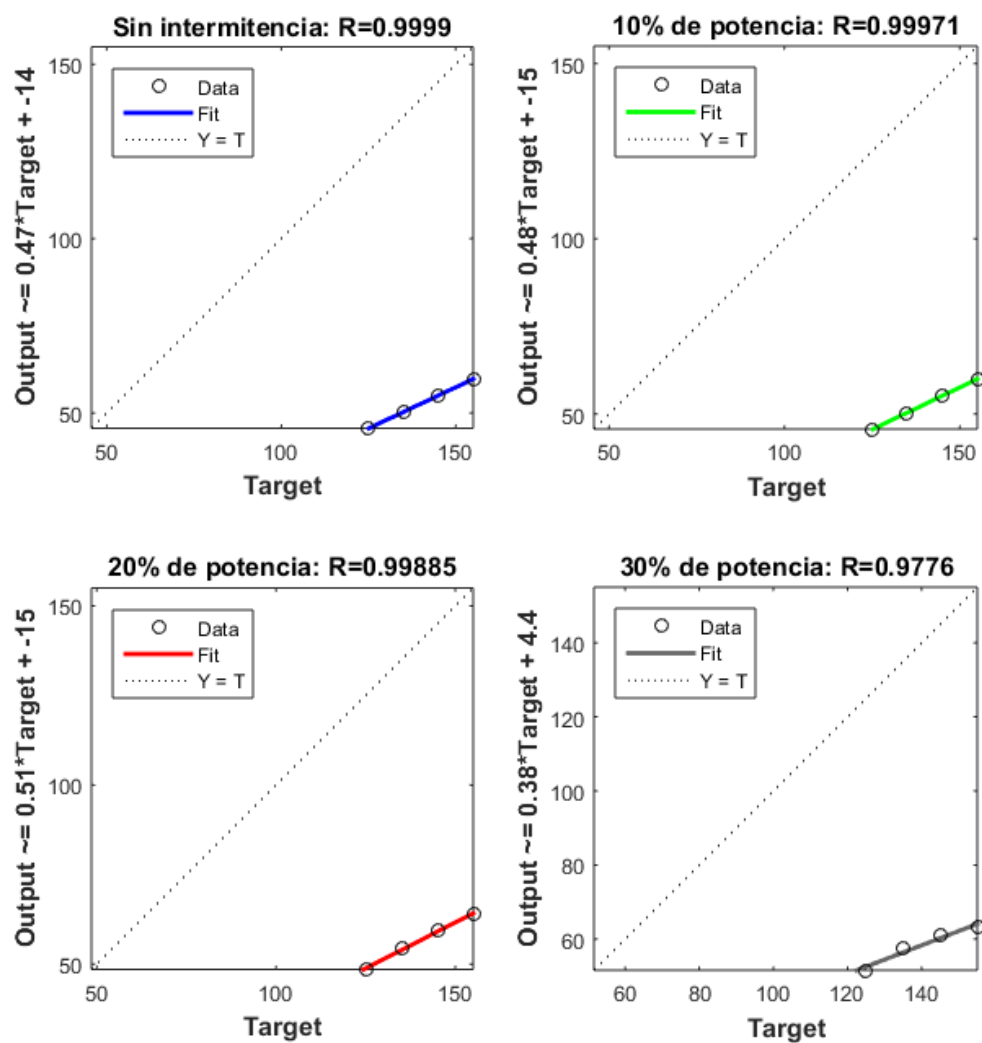


Figura 5.4: Regresiones lineales entre altura de llama (eje Y) v/s caudal de combustible (eje X), para distintos niveles de potencia

6 | Conclusiones

Lo primero a mencionar es un proceso exitoso tanto en diseño, implementación y fidelidad del dispositivo intermitente. Cómo se observó en las tablas 5.1 y 5.2 las desviaciones entre la frecuencia programada y la observada son pequeñas, sin repercusión en el desempeño del dispositivo y asignables a desviaciones en la medición. Recordar que, al momento de medir audio, existe un muestreo de 44.100 datos por segundo y para video están en 56 o 102 datos por segundo según la muestra. Es consecuente el mayor nivel de desviación en las pruebas de video, debido al menor número de tomas por segundo; la relación entre una frecuencia de oscilación de 30 Hz y 56 fps es muy distinta que la que existe entre esos mismo 30 Hz y 44.100 tomas por segundo.

Respecto a la compresibilidad del pulsador, encontramos que este abarca todo el rango de llama continua para la gran mayoría de frecuencias; solo para frecuencias cercanas a 5 Hz y luego cercanas a 30 Hz no sucede, sin embargo, el rango de compresión es alto, como puede observarse en la tabla 5.4 donde el rango de alturas supera los 130mm de diferencia entre mínimos y máximos para 5Hz y 17mm para 30Hz. Se destaca que el desprendimiento de llama se da de modo más prematuro para las frecuencias centrales, lo cual es atribuible a las curvas de impedancia que posiblemente posee el parlante (lamentablemente no se pudo encontrar sus curvas) y por otro lado a la dinámica de fluidos en respuesta a distintos niveles de frecuencia, tema que escapa a este estudio.

Otro tema a mencionar es el carácter de los datos numéricos en cuanto a altura de llama. Estos solo deben acogerse como una aproximación cualitativa, pues la técnica utilizada es insuficiente para este escenario, debido a que la intermitencia fuerza el smoke point, obligando a reducir la captación de luz en la cámara y consecuentemente dificultando la elección del umbral (threshold) para discriminar la altura de llama. En estricto rigor cada

video (e incluso cada frame) posee niveles de emisión de radiación que cambian el nivel óptimo de este parámetro.

6.1. Perspectiva

Un aspecto importante a considerar en este sistema es la modificación de los caudales instantáneos a la salida del quemador.

Un sistema no intermitente, posee un perfil de velocidades que se considera constante (como puede verse en 6.1), pues posee variaciones despreciables. Sin embargo, con intermitencia, el campo de velocidades del combustible a la salida del quemador se está modificando en función del tiempo según las características de la intermitencia que se fuerce, es

decir la función $u(r)$ pasa a ser $u(r, t)$, función del radio y además del tiempo. Todo esto a pesar de saber que el regulador de flujo entrega una cantidad de combustible constante. Considerando lo anterior, podemos analizar que ocurre con la velocidad de caudal promedio, parámetro que es función del perfil de velocidades como puede observarse en la ecuación 6.1 y que para casos de intermitencia está representado por la ecuación 6.2

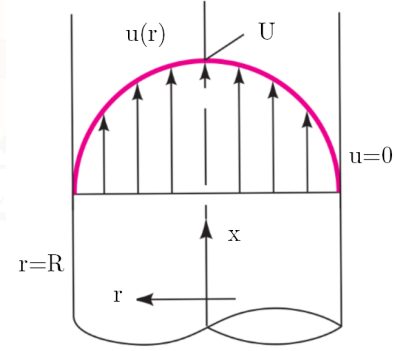


Figura 6.1: Perfil de velocidades

$$V_{prom} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u(r) 2\pi r dr \quad (6.1)$$

$$V_{prom}(t) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u(r, t) 2\pi r dr \quad (6.2)$$

Esta sutil diferencia, genera problemas, debido a que actualmente no existen las herramientas para modelar $u(r, t)$ y consecuentemente se desconoce la velocidad promedio, no siendo posible estimar la cantidad de combustible instantáneo que se quema, dato esencial en el modelamiento de cualquier experimento de combustión.

Es por ello que un siguiente paso en esta implementación es la caracterización del flujo a la salida del quemador. Este trabajo se ha realizado bajo distintas técnicas, como

lo es el trabajo de [Papadopoulos et al. \(2002\)](#) quien analiza un flujo de metano forzado acústicamente usando la técnica *Particle Image Velocimetry (PIV)*. Además, este artículo es interesante pues caracteriza distintos trabajos de forzamiento acústico, lo cual puede contrastarse con los resultados obtenidos en este documento. Otra vía para caracterizar el flujo es a través de la técnica *Laser Doppler Velocimetry (LDV)* (ver [Simon et al. \(2009\)](#)), técnica ampliamente usada para medir desplazamientos acústicos o flujos (en efecto es la que usan los mouse) la cual también permitiría conocer la función $u(r, t)$.

El objetivo de aplicar alguna de estas técnicas es, en primera instancia, encontrar un nivel de potencia en el pulsador que permita encontrar solución a la ecuación 6.3, es decir, que la velocidad promedio se mantenga constante en el tiempo o bien al menos poder caracterizar la función $V_{prom}(t)$ de manera explícita.

$$V_{prom}(t) = V_{prom} \quad (6.3)$$

Por otro lado, tenemos los distintos parámetros que en algún momento pueden significar limitaciones en el forzamiento acústico. Se mencionan y caracterizan los siguientes:

- Magnificar el nivel de compresión: Durante este trabajo se midió el nivel de compresión homologado por la potencia aplicada. Sin embargo, por lo observado en los resultados, el nivel de compresión no es función lineal de la potencia inducida, por lo cual, conocer este parámetro puede ser importante para estimar el punto anterior de flujo instantáneo a la salida del quemador.
- Aumentar el nivel de compresión y rango de trabajo. Para esto existen dos alternativas relacionadas con el parlante del pulsador: la primera es cambiar el parlante por otro de mayor diámetro, lo cual desplace mayor cantidad de aire, o bien, mejorar el mismo parlante (u otro del mismo diámetro) cuya bobina este diseñada para trabajar en bajas frecuencias. De este modo se puede mejorar la curva de impedancia y generar mayor compresión.

Bibliografía

- British Petroleum (2015). Primary energy consumption - leading countries 2014. *British Petroleum*, 1(June), 48. [\(document\)](#), [3.1.1](#), [3.1](#), [3.2](#)
- Cetegen, Baki M. y Ahmed, Tarek A. (1993). Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and pool fires. *Combustion and Flame*, 93(1-2), 157–184. [3.5](#)
- Chao, Yei Chin y Ming-Shan, Jeng (1992). Behavior of the lifted jet flame under acoustic excitation. *Symposium (International) on Combustion*, 24(1), 333–340. [2](#), [3.5](#)
- CNE (2016). *Reporte Mensual Sector Energético*. Technical Report 1. [\(document\)](#), [3.3](#), [3.1.2](#), [3.4](#)
- Comisión Europea (2000). *Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática*. Technical report. [3.1.1](#)
- CosasAudio (2016). CosasAudio. 2016-08-22. <http://cosasdeaudio.com/>. [3.6.1.4](#)
- Hou, Shuhn Shyurng; Chung, De Hua; y Lin, Ta Hui (2015). Experimental and numerical investigation of jet flow and flames with acoustic modulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 562–574. [3.5](#)
- James, S.; Anand, M. S.; y Pope, S. B. (2002). The lagrangian PDF transport method for simulations of gas turbine combustor flows. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1(July). [3.4.2](#)
- Jerez, Alejandro y Olivares, Gonzalo (2016). *Geometría de la zona reactiva : metodología de medición de altura de llama y smoke-point medición*. Technical report. [4.3](#)
- Martinez, Isidoro (1992). *Termodinamica Básica Y Aplicada*. [\(document\)](#), [3.2.1](#), [3.2.2](#), [3.5](#)
- McKinley, Galen A. (2016). Carbono y El Clima. 2016-08-22. <http://es.carboncycle.aos.wisc.edu/>. [3.1.2](#)
- Papadopoulos, G; Bryant, R A; y Pitts, W M (2002). Flow characterization of flickering methane / air diffusion flames using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 33(AUGUST 2002), 472–481. [6.1](#)
- PCPAudio (2016). PCP Audio. 2016-08-22. <http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/pcpfiles.html>. [3.6.1.4](#)

- Pope, S.B. (1990). The PDF Method for turbulent combustion. [3.4.2](#)
- Pope, S. B. (1991). Computations of turbulent combustion: Progress and challenges. [2](#), [3.4](#)
- Pope, Stephen B. (2004). Advances in PDF Methods for PDF Calculations of Turbulent Flames. *Advances in Turbulence X*, (pp. 529–536). [3.4.2](#)
- Shaddix, Christopher R.; Harrington, Joel E.; y Smyth, Kermit C. (1994). Quantitative measurements of enhanced soot production in a flickering methane/air diffusion flame. *Combustion and Flame*, 99(3-4), 723–732. [2](#), [3.5](#), [4.1.3](#)
- Shaddix, Christopher R. y Smyth, Kermit C. (1996). Laser-induced incandescence measurements of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flames. *Combustion and Flame*, 107(4), 418–452. [2](#), [3.5](#)
- Simon, Laurent; Richoux, Olivier; Degroot, Anne; y Lionet, Louis (2009). Laser Doppler Velocimetry for Joint Measurements of Acoustic and Mean Flow Velocities : LMS-based Algorithm and CRB Calculation. [6.1](#)
- Wang, Qian; Huang, Hua Wei; Tang, Hao Jie; Zhu, Min; y Zhang, Yang (2013). Nonlinear response of buoyant diffusion flame under acoustic excitation. *Fuel*, 103, 364–372. [3.5](#)
- White, Frank (1998). *Fluid Mechanics 4ed.*, volume 1. [3.3](#)
- Zhiyin, Yang (2015). Large-eddy simulation: Past, present and the future. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(1), 11–24. [3.4.1](#)

A | ANEXOS

A.1. Códigos Matlab

A.1.1. Código de frecuencia acústica

```
%% Importacion de audio al workspace
clc
clear all
close all
[C,Fs] = audioread('nombre_pista.wav');
F = ; % frecuencia teorica
LP = (Fs/F); % largo de periodo teorico
plot(C)
%% Seleccion de muestra
a = 1;
c = 30*LP;
b = a+c;
X = C(a:b);
l=round(0.05*LP);
n=20;
for i=1:n
    A=tsmovavg(X, 's', l, 1);
    X=A(1:end);
end
figure
hold on
```

```

plot(X)

%% Filtro segun minimo
h=0;q=0.7*min(X);I=-10000;
for i=1:c-l*n+1;
    if X(i)<q & i-I(end)>0.3*LP
        h=h+1;
        I(h)=i;
    elseif X(i)<q & i-I(end)<0.3*LP & X(i)<X(I(end))
        X(I(end))=0;
        I(h)=i;
    else
        X(i)=0;
    end
end
plot(X)
hold off

%% Filtro segun maximo
% h=0;q=0.9*max(X);I=-10000;
% for i=1:c-l*n;
%     if X(i)>q & i-I(end)>0.4*LP;
%         h=h+1;
%         I(h)=i;
%     elseif X(i)>q & i-I(end)<0.3*LP & X(i)>X(I(end))
%         X(I(end))=0;
%         I(h)=i;
%     else
%         X(i)=0;
%     end
% end
% plot(X)
% hold off
%%
Frecuencia = (h-1)*Fs/(I(end)-I(1))

```

A.1.2. Código de frecuencia de llama

```
% Importacion de video al workspace y lectura de todos los frames
v = VideoReader('nomrbre_archivo.avi');
fr=v.FrameRate;
f=read(v);
i=round(size(f,1)/2);
for k=1:size(f,4); %patron de discriminacion de frecuencia
    C(k)=sum(f(i, :, 1,k));
end
plot(C)
% Determinacion de frecuencia por DTF
a=1;
b=size(C,2);
X=C(a:b);
plot(X)
Y=fft(X);
Y(1) = [];
n = length(Y);
power = abs(Y(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period = 1./freq;
index = find(power == max(power));
P = (period(index));
Freceuencia=fr/P
```

A.1.3. Código de altura de llama

```
clear all
close all
clc
```

```

for i=1:33
clear altura area error fil_i fil_t filt_i filt_t
%% Importacion de video al workspace y lectura de todos los frames
v = VideoReader(strcat('videos\',num2str(i),'.avi'));
% Lectura y almacenamiento de frames en variable I(R,G,B,N frame)
I = read(v,[1 inf]);
%% Definicion de parametros relevantes
% OBS: cte de filtro de segmentacion tiene el mejor comportamiento ...
    global
%     para 0.1 , pero requiere una calibracion arbitraria para el ...
    analisis
%     de secuencias de imagenes de videos con filtro y/o en SP. ...
    (recordar
%     problema de punta de llama totalmente abierta para flujo muy ...
    sobre
%     el smoke point.
seg      = 0.08;      %Filtro de segmentacion.
pix2mm   = 0.1567;    %Equivalencia de mm/pix
M        = size(I,4); %Cantidad de frames para dimension de matrices
error    = 2;         %Cantidad de d.std para filtrar datos de alturas ...
    atipicas
altura   = zeros(M,1); %Pre-allocate de vector altura
%% Pre-Print de vista de un frame
% Permite evaluar efectividad del filtro de segmentacion y SmokePoint
G        = rgb2gray(I(:,:, :, round(M/2))); %Transformacion RGB->Grayscale
BW       = im2bw(G,seg); %Trans. Grayscale->Binario segun segmentacion
MI       = G; %Inicializacion de imagen original con segmentacion
MI(~BW) = 0;
BW       = gray2ind(BW,255); %Transformacion Bin->RGB para poder ...
    concatenar
G        = horzcat(G,BW,MI); %Imagenes concatenadas para mostrar por ...
    pantalla
%Visualizacion de figura en pantalla con las tres imagenes
figure
imshow(G);
print(strcat('resultados\',num2str(i),'-1'), '-dpng')

```

```

%% Calculo de altura de llama para cada frame
% Obs: ciclo for paralelizado, inicializa parallel pool de matlab.
%     primera ejecucion tarda mas ya que inicializa parallel pool de
%     matlab, las siguientes ejecuciones demoran menos.
% Funcion hflame retorna altura y area del g-esimo frame del video ...
%     que se
%     requiere estudiar su geometria.
parfor g = 1 : M
    [h a] = hflame(I(:,:,g),seg,pix2mm);
    % almacenamiento en vector de altura y area de cada frame
    altura(g) = h;
    area(g) = a;
end
area = area'; %Traspone vector de area.
%% Indicadores estadisticos y filtro de datos atipicos
% Datos Estadisticos :
%     ni      : Cantidad de elementos de la muestra original ...
%               procesada
%     rh      : Promedio de la muestra
%     dh      : Desviacion estandar de la muestra
%     fil_i   : Cota inferior para filtro de datos atipicos
%     fil_t   : Cota superior para filtro de datos atipicos

% Indicadores estadisticos de muestra inicial
ni = size(altura,1);
h_m = mean(altura);
h_d = std(altura);
% Cotas para filtro de datos atipicos
% OBS: Videos de muestra probados inicialmente verifican que ...
%     utilizar el
%     promedio como indicador de tendencia central es valido.
fil_i = h_m - error * h_d;
fil_t = h_m + error * h_d;
% Filtro de elementos bajo cota inferior
filt_i(:,1) = find(altura(:)<fil_i); % Almacena Nro fila con dato ...
%     atipico

```

```

filt_i(:,2) = altura(filt_i(:,1)); % Almacena valor del dato atipico
altura(filt_i(:,1))=[]; % Eliminar altura atipica
area(filt_i(:,1))=[]; % Eliminar area asociada a ...
    dato atipico
% Filtro de elementos sobre cota superior
filt_t(:,1) = find(altura(:)>fil_t); % Almacena Nro fila con dato ...
    atipico
filt_t(:,2) = altura(filt_t(:,1)); % Almacena valor del dato atipico
altura(filt_t(:,1))=[]; % Eliminar altura atipica
area(filt_t(:,1))=[]; % Eliminar area asociada a ...
    dato atipico
% Indicadores estadisticos Finales post-filtrado de datos atipicos
nf = size(altura,1);
ne = ni - nf;
h_m = mean(altura);
a_m = mean(area);
h_d = std(altura);
altura2=sort(altura);
h_m1=mean(altura2(1:round(0.1*size(altura2))));
h_m2=mean(altura2(round(0.9*size(altura2)):end));
datos(i,:)=[h_m h_d a_m h_m1 h_m2 ne];
%% Grafico de Histograma de alturas de la muestra
figure2 = figure; % Inicializacion de entorno de figura
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure2,'YGrid','on','XGrid','on');
box(axes1,'on');
% Create histogram
histogram(altura,'DisplayName','%rh','Parent',axes1,'EdgeColor',[0 ...
    0 0],...
    'FaceColor','auto',...
    'Normalization','count',...
    'BinMethod','auto');
% Create xlabel
xlabel('h_{flame} [mm]');
% Create ylabel
ylabel('Frecuencia');

```

```
% Create title
str = strcat('n=',num2str(nf),' | h_{prom}=',num2str(h_m),...
    'mm | a_{prom}=',num2str(a_m),'mm^2 | \sigma_{h}=',num2str(h_d));
title(str);
print(strcat('resultados\ ',num2str(i),'-2'),' -dpng')
close all
end
```

```
function [altura areaf] = hflame(I,seg,pix2mm)
%% Inputs
%      I      : Imagen en formato RGB.
%      seg     : Nivel de filtro de segmentacion.
%      pix2mm  : Escala de conversion de cant. de pixeles a mm.
%%
% Outputs
%      altura  : Altura de llama en mm de la imagen analizada.
%      areaf   : Area de la llama de la imagen analizada.

%% Transformacion de imagen RGB a binaria y calculo de area en pixeles

G      = mat2gray(I);
BW     = im2bw(G,seg);
areaf  = sum(sum(BW)); % Conteo de pixeles no nulos
areaf  = areaf*pix2mm^2; % Transformacion de pix->mm^2

%% Altura de llama
% Metodologia:
% 1. Encontrar la primera fila con valores no nulo, es decir, el ...
%    punto
%    mas alto del contorno definido anteriormente.
% 2. Contar la cantidad de pixeles que contienen a la llama.
% 3. Transformar cantidad de pixeles a mm equivalentes con factor de
%    de calibracion determinado al inicio.
% OBS: no considera reconocimiento de base, ya que la secuencia de ...
% video se
```

```

%      debe filtrar al momento de la captura en laboratorio.

% Inicializacion de valor de punta de llama.
punta    = 0;           % Almacena pixel correspondiente a punta de ...
                        llama.
BWaux     = any(BW,2);   % Genera vector de filas nulas (0) y no ...
                        nulas (1).
base      = size(BW,1);  % Almacena como base la fila del ultimo pixel.

for i = 1 : size(BWaux)
    if ((punta == 0) && (BWaux(i) == true))
        punta = i;
        break
    end
end
pixeles   = base - punta; % Cantidad de pixeles que contienen a ...
                        la llama.
altura    = pixeles * pix2mm; % Altura de llama en mm.

% Fin de funcion de hflame.
end

```

A.1.4. Código de imágenes de llamas

```

clear all
close all
clc
for k=1:33
    %% Lectura de video
    v = VideoReader(strcat('videos\',num2str(k),'.avi'));
    I = read(v,[1 inf]);
    reg = imread('regla1.png');
    %% Seleccion de frames
    d=200; % inicio superior de la imagen. Sirve para cortar

```

```
r=14;
close all
for s=[1 3 5] % saltos de frame entre cada foto contigua
    clear w1 w W
    w1(:, :, :, 1)=I(:, :, :, r);
    for i=2:19
        im(:, :, :, i)=I(:, :, :, r+(i-1)*s);
        w1=horzcat(w1, im(:, :, :, i));
        w=rgb2gray(w1);
    end
    % Filtro y contraste
    clear w2
    W=300*ones(size(w));
    for i=1:size(w,1)
        for j=1:size(w,2)
            if w(i,j)>20 % filtro
                W(i,j)=1*w(i,j); %contraste (si se modifica ...
                    el 1)
            end
        end
    end
    w=horzcat(reg,W);
    w2=w(d:964, :);
    % Generacion de imagen
    imwrite(w2, strcat('fotos\', num2str(k), '-', num2str(s), '.png'))
end
end
```

A.2. Imágenes para determinar continuidad de llama

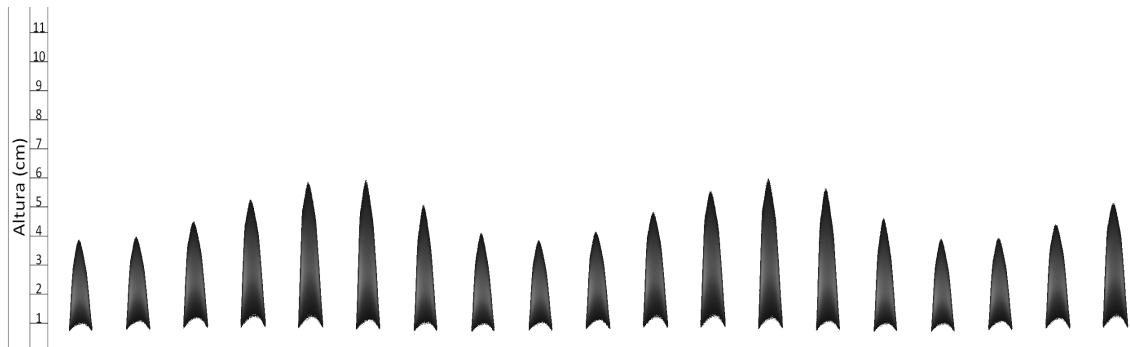


Figura A.1: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 135$ sscm, 5 hertz, 40 % de potencia

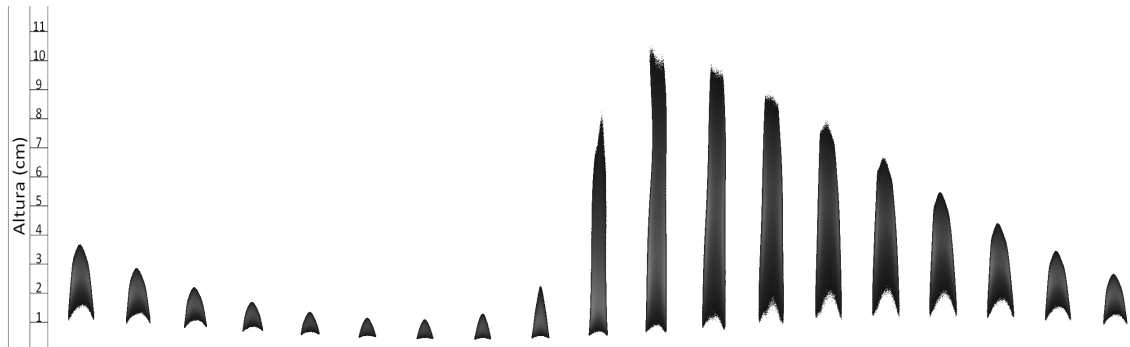


Figura A.2: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 135$ sscm, 5 hertz, 100 % de potencia



Figura A.3: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 135$ sscm, 10 hertz, 40 % de potencia

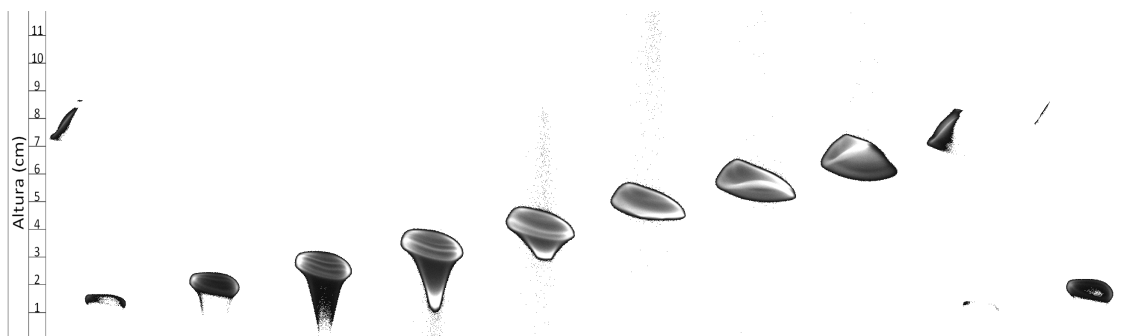


Figura A.4: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 10 hertz, 100 % de potencia



Figura A.5: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 15 hertz, 52 % de potencia

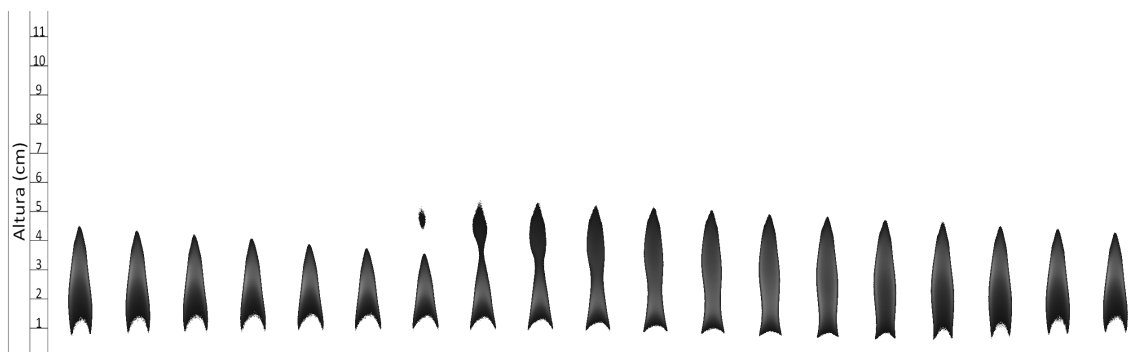


Figura A.6: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{etileno} = 135$ sscm, 20 hertz, 20 % de potencia

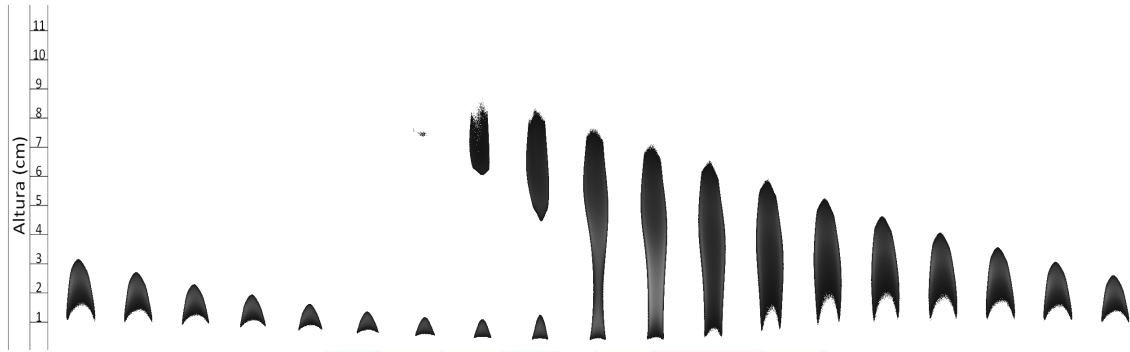


Figura A.7: Secuencia de imágenes de llama: $Q_{\text{etileno}} = 125$ sscm, 10 hertz, 30 % de potencia

A.3. Histogramas de alturas de llama para 10 % de potencia

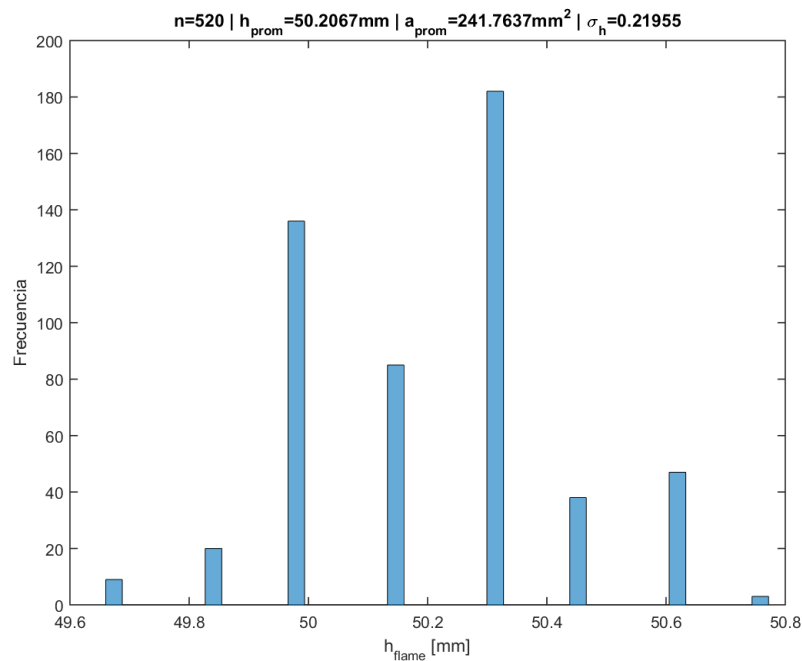


Figura A.8: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno sin intermitencia

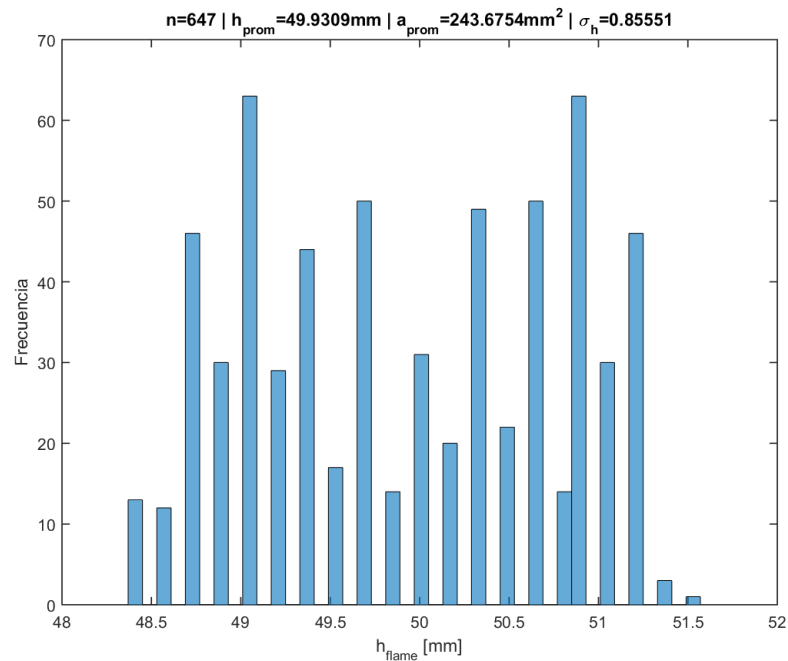


Figura A.9: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 5Hz con 10 % de potencia

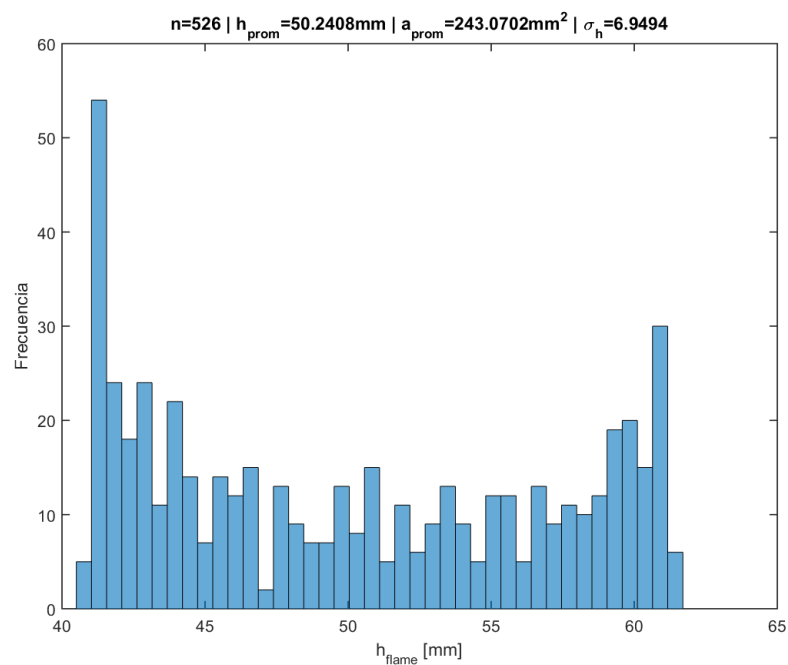


Figura A.10: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 10Hz con 10 % de potencia

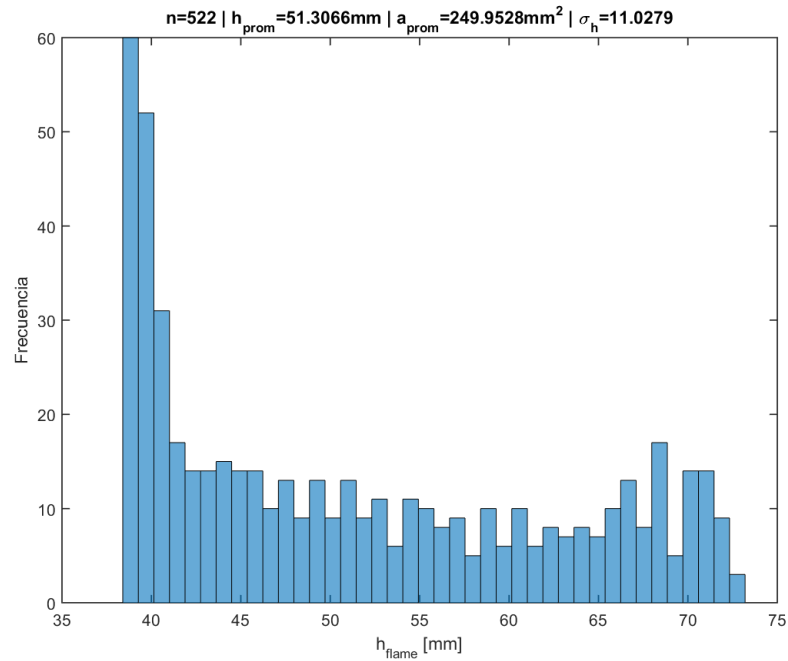


Figura A.11: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 15Hz con 10 % de potencia

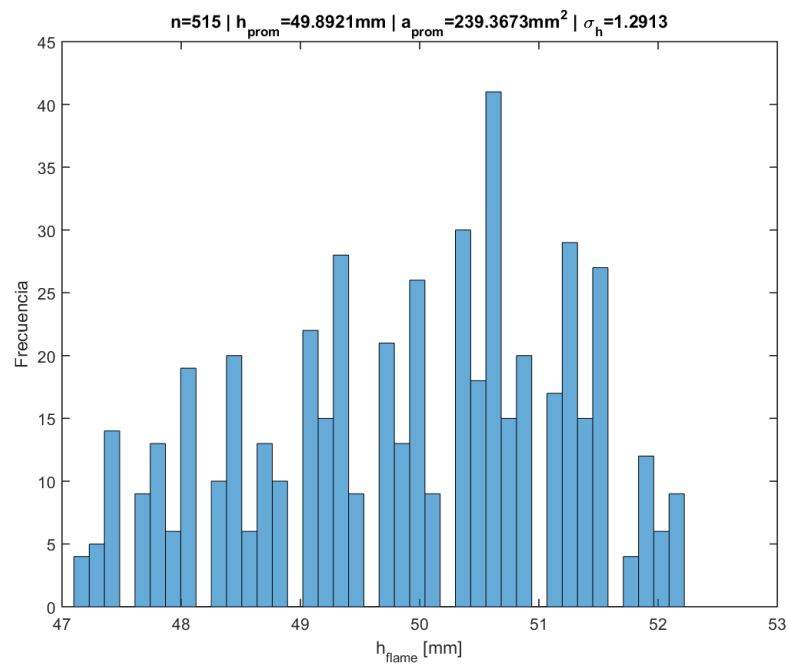


Figura A.12: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 20Hz con 10 % de potencia

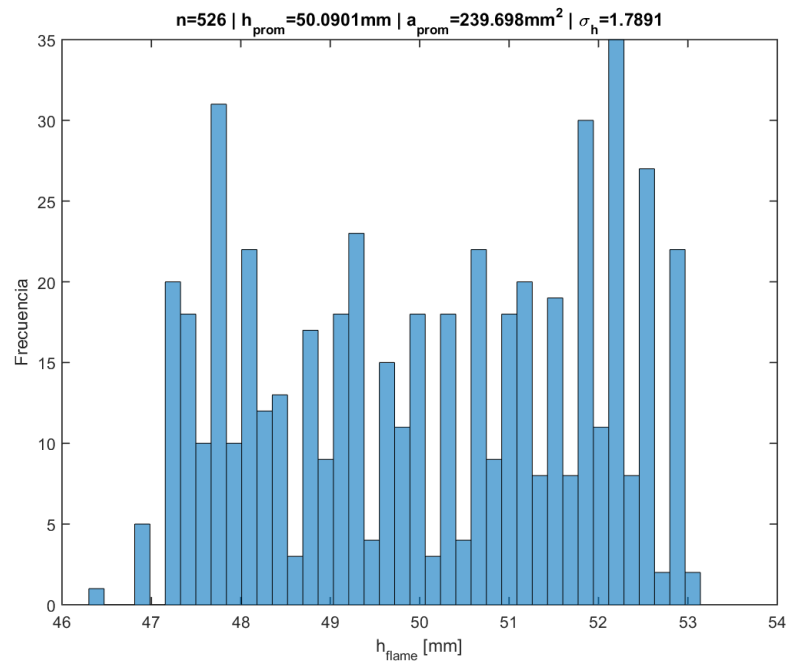


Figura A.13: Histograma de altura de llama para 135 sscm de etileno a 30Hz con 10 % de potencia