



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PLUMA
TÉRMICA DE UNA FUENTE DE CALOR LINEAL EN
ESTADO ESTACIONARIO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Mecánico

PRESENTA:

Jassiel Enrique Hinojosa Ortiz

DIRECTOR DE TESIS :

Dr. Rafael Chávez Martínez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



Agradecimientos

A mis padres, Argelia y Enrique, por el apoyo, amor e inspiración a lo largo de todo el trayecto

A mis abuelos, Enrique y Odila, por darme una casa llena de cariño.

A mi abuela Félix, por todo el apoyo y fuerzas dadas.

A mis hermanos, Sofía, Zoe y Arath, por siempre demostrarme el valor de las pequeñas cosas.

A Sara por sus consejos, su ayuda y su cariño.

A Hugo por ser un pilar para lo que soy hoy.

A mi asesor el Dr. Rafael Chávez, por permitirme ser parte de la investigación, así como por su confianza en el desarrollo del mismo, alentandome y apoyándome con sus conocimientos.

A Joshua, Diana, Naomi, Erika por estar siempre para escucharme y confiar en ser escuchados.

A Liz, por su amor, por estar a mi lado, por regalarme una nueva perspectiva y por compartir tantos momentos conmigo.

A Arturo, Daniel R. y Eduardo R. por otorgarme una muy amena estancia en Ciudad Universitaria, compartiéndome un pedacito de ellos y de sus vidas.

A Mariana y Abril por no ayudar en el trabajo en equipo de Termodinámica Aplicada.

A Lalo y Lola por ser mis compañeros por tantos años, por aconsejarme y por acompañarme.
A Lalo y Lola por ser mis compañeros por tantos años, por aconsejarme y por acompañarme.

Simbología

Símbolo	Definición
g	Aceleración gravitacional
d	Diámetro del alambre de nicromel
l	Longitud de la fuente de calor
V	Volumen
T_S	Temperatura de la superficie
T_∞	Temperatura del fluido circundante
T_f	Temperatura de película
β	Coefficiente de expansión térmica
α	Difusividad térmica
ν	Viscosidad cinemática
λ	Amplitud
τ	Longitud de onda
Ra	Número Rayleigh

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Resumen	6
2. Marco teórico y antecedentes	9
2.0.1. Trabajos previos	12
2.1. Objetivos de la tesis	15
2.1.1. Objetivos particulares	15
3. Arreglo experimental	17
3.1. Simplificación del problema	17
3.1.1. Diseño y manufactura de las piezas	18
3.1.2. Suministro de energía eléctrica	22
3.1.3. Sistema de iluminación	23
3.1.4. Sistema de posicionamiento	23
3.1.5. Sistema de medición	23
3.2. Calibración	23
3.2.1. Escalamiento de las visualizaciones	26
4. Resultados	27
4.1. Efecto de la longitud de la fuente de calor	31
4.2. Efecto del calor generado en la fuente de calor	35

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
4.3. Resultados de variación de potencia y longitud	37
5. Conclusiones	42
5.0.1. Trabajo a futuro	44
A. Casos particulares	45
A.0.1. Casos especiales	45

Capítulo 1

Introducción

1.1. Resumen

La presente tesis tiene por objetivo estudiar experimentalmente la pluma térmica generada por una fuente de calor lineal. Se enfoca en la visualización del flujo convectivo utilizando la técnica *Smoke wire*.

La convección natural es un fenómeno que se presenta con regularidad en la naturaleza, ya sea por sí sola o como convección mixta, en ésta última interactúan tanto la convección forzada como la natural. Para analizar el proceso de transferencia de calor por convección entre la fuente de calor y el ambiente circundante se estudia la pluma térmica, ésta es una columna de fluido en movimiento que se da cuando hay un gradiente de densidad y es resultado del incremento de la temperatura del fluido.

El arreglo experimental en la presente tesis consiste en un alambre de nicromel sujetado en sus extremos a dos postes. Los extremos están sujetos por medio de un par de ronadanas y tuercas cada uno. La distancia entre postes o la longitud del alambre es el primer parámetro a considerar como variable.

El arreglo experimental se ubicó en un entorno controlado, en el que no hay corrientes de aire y la temperatura se mantiene estable a lo largo del tiempo. En la Figura 1.1 se presenta un diagrama del arreglo dentro de dicho espacio; los dispositivos de suministro de energía y de adquisición de imágenes (PC) se instalaron fuera de este espacio. También se utilizó una lámpara para iluminar

las partículas trazadas que permiten la visualización de la pluma térmica.

Para generar el humo se humectó un hilo de algodón con aceite, aprovechando la viscosidad de este fluido para unir el alambre con el hilo, quedando éste último en la parte superior. Al suministrar energía al alambre se calienta, convirtiéndose en la fuente de calor con geometría lineal, parte de este calor es utilizado para vaporizar el aceite. El segundo parámetro considerado como variable es la potencia suministrada a la fuente de calor.

Las variables mencionadas están relacionadas con el Número de Rayleigh, parámetro asociado a la transferencia de calor por convección natural. El número de Rayleigh es un número adimensional que relaciona las fuerzas de flotación de un fluido con las fuerzas viscosas que actúan sobre la capa límite de velocidad.

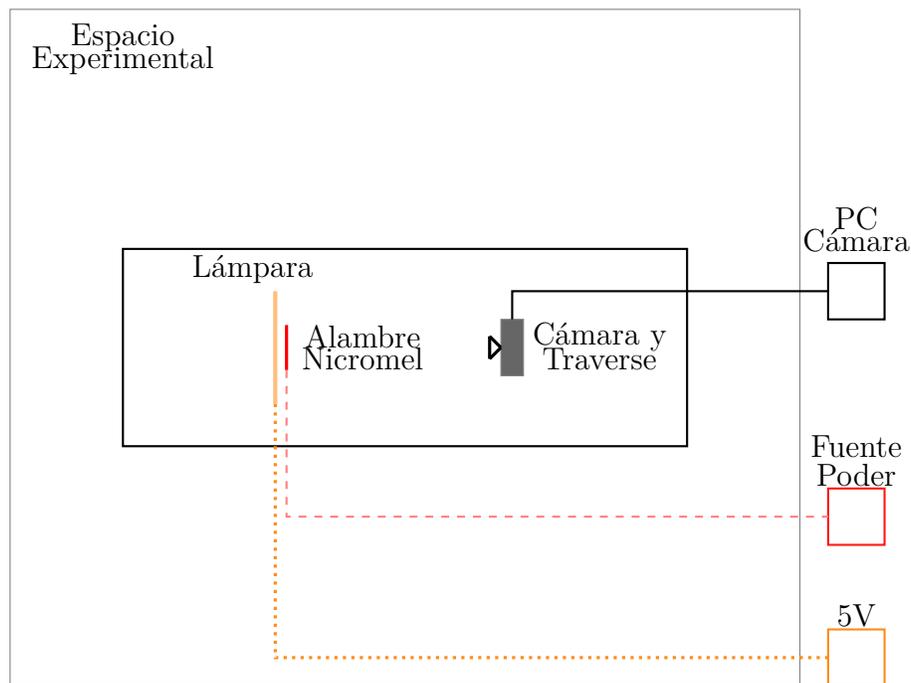


Figura 1.1: Entorno experimental, vista superior. Los componentes no están a escala.

En el primer capítulo se explica el fenómeno de la pluma térmica. Se revisan los trabajos más destacados acerca del tema, así como los objetivos generales y particulares de la tesis. En el segundo capítulo se describe el modelo experimental, el instrumental utilizado para realizar las visualizaciones y la metodología para estudiar los patrones de flujo. En el tercer capítulo se presentan los resultados experimentales y la discusión de los mismos. Finalmente en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones.

En general, para los casos de la longitud menor (2.54 cm) se aprecia que al aumentar la potencia, también se aumenta la estabilidad de la pluma térmica, sin embargo, al variar la longitud se aprecian diferentes comportamientos, en los casos de la segunda longitud (5.08 cm) el aumento de la potencia favorece la simetría de la pluma respecto al eje Z , finalmente, en los casos de la tercera longitud (7.62 cm) se observa un ensanchamiento de la pluma térmica cuando aumenta la potencia suministrada, esto es, la pluma térmica aumenta su ancho respecto a los 7.62 cm iniciales. Cuando se conserva la potencia suministrada y aumenta la longitud de la fuente de calor hay un aumento de estabilidad.

Capítulo 2

Marco teórico y antecedentes

La convección es uno de los tres modos en los que se puede transferir energía en forma de calor. Ésta se presenta cuando una superficie sólida a cierta temperatura (T_S) interactúa térmicamente con el fluido que lo circunda, que se encuentra a una temperatura T_∞ . El caso más estudiado es cuando $T_S > T_\infty$, es decir el calor se transfiere de la superficie al fluido, debido a un proceso conocido como difusión y también al movimiento del fluido sobre la superficie, conocido como advección.

La convección se puede subclasificar de acuerdo a como se activa el movimiento del fluido. Se conoce como convección forzada cuando existe un dispositivo que activa el movimiento del fluido, por ejemplo, los líquidos desplazados por una bomba o los gases desplazados por un ventilador. Por otro lado, cuando el movimiento del fluido es producido por fuerzas de flotación generadas por la variación de la densidad en el fluido que a su vez es provocada por gradientes de temperatura, se habla de convección natural y al flujo generado se le conoce como flujo convectivo.

El fenómeno conocido como pluma térmica involucra a un flujo convectivo generado por un cuerpo en un espacio abierto semi-infinito. Cuando el cuerpo tiene una temperatura superior a la del fluido que lo rodea, se presenta un flujo convectivo ascendente. Para su estudio, se considera a éste como una columna de fluido cuya temperatura es mayor a la del resto del fluido. Debido a la diferencia de velocidades entre el flujo convectivo y el fluido circundante que se considera estático, es decir v_∞ , se generan esfuerzos cortantes que afectan a la columna haciendo que esta comience

a oscilar.

Adicionalmente, en su viaje ascendente la columna de fluido transfiere calor a su entorno. Lo anterior tiene como consecuencia que las fuerzas de flotación, así como los esfuerzos cortantes, varían con el tiempo y con su desplazamiento, es decir, son una función multivariable $F(x, y, z, t)$.

Las características de la pluma térmica dependen principalmente de la geometría y temperatura del cuerpo, así como de las propiedades del fluido con el cual interactúa. Por lo que, para caracterizar este fenómeno se utiliza el parámetro adimensional conocido como *número de Rayleigh*, que se define como:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu\alpha} \quad (2.1)$$

donde g es la gravedad, β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, ΔT es la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el fluido ($T_S - T_\infty$), l es la longitud característica del cuerpo, α es la difusividad térmica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. De la Ecuación 2.1 se puede observar que a mayor sea la diferencia de temperaturas, será mayor la fuerza de flotación.

El movimiento del fluido por convección natural es de interés en aplicaciones de ventilación en espacios cerrados. Dada la situación de cuarentena que se presentó en el mundo, surgió la inquietud de comprender la interacción de la pluma térmica en un entorno cerrado.

Por otro lado, el uso de una fuente de calor lineal para producir el aumento de temperatura de las partículas está relacionado con aplicaciones como circuitos electrónicos, anemometría térmica y tratamientos térmicos. En anemometría, la cual se encarga de la medición de la velocidad del viento; existen diferentes tipos de anemómetros, uno de ellos es el de hilo caliente que consiste de un hilo por el que se hace circular una corriente eléctrica, cuando se mide el flujo de un fluido el hilo cede parte de su calor al aire, cambia su resistencia eléctrica y esto se relaciona con la velocidad del fluido.

Para determinar la cantidad de calor que se transfiere durante el proceso de convección se utiliza la Ley de enfriamiento de Newton que establece que el flujo de calor convectivo es proporcional a

la diferencia de la temperatura del fluido y de la superficie del cuerpo. La proporción está dada por un parámetro conocido como coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente convectivo; que está determinado por la interacción entre la superficie y el fluido.

Esta investigación experimental es complemento de muchos otros trabajos y sirve, además, para ligar esta área de la Transferencia de calor con otras áreas (i.e., Mecánica de Fluidos). El enfoque principal de la investigación consiste en analizar visualmente la pluma térmica, enfocándose en las perturbaciones que ésta presenta. A estas perturbaciones se les conoce como pandeo, ya que se asemejan al pandeo que presenta una columna sólida al someterla a esfuerzos axiales; también es conocido como **Pandeo de Euler** en honor a Leonhard Euler, quien fue de los primeros investigadores en estudiar este fenómeno, en la Figura 2.1 se presentan tres casos estudiados por Euler.

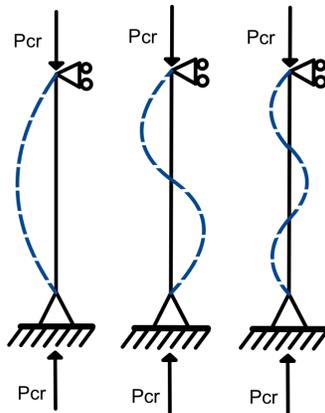


Figura 2.1: Pandeo de una columna sólida debido a esfuerzos críticos (P_{cr}).

Bejan [1] ha explicado que el campo de estudio del **pandeo** de la pluma térmica y el campo de la **Estabilidad Hidrodinámica** están muy relacionadas y sus fronteras son apenas perceptibles: ya que para observar el pandeo de un flujo es necesario que el flujo entre a su zona de inestabilidad.

El campo de la Estabilidad Hidrodinámica se enfoca en comprender el inicio y desarrollo de la deformación (inestabilidad) del flujo a lo largo del tiempo. El estudio del **pandeo** de flujos se enfoca en la geometría de la deformación y la interacción de la pluma con los objetos que la rodean. De tal forma, la Estabilidad Hidrodinámica sobrepasa al pandeo de flujos conforme aumenta la inestabilidad, ya que estudia a los flujos incluso después de que acaba el pandeo.

La técnica experimental para visualizar la pluma térmica en este estudio se conoce como *Smoke wire*, traducida al español como alambre o hilo de humo, la cual se utiliza de forma muy habitual para poder visualizar el comportamiento de flujos, generalmente de aire, en túneles de viento. En dicha técnica, un conductor eléctrico impregnado con un combustible se somete a una diferencia de potencial en sus extremos de tal manera incrementa su temperatura por efecto Joule, quemando el combustible y generando humo. El humo generado se introduce de manera poco invasiva al flujo que se quiere estudiar, esto nos permite visualizar su trayectoria sin modificar el flujo de interés.

2.0.1. Trabajos previos

Entre otras aplicaciones, Batchelor [2] menciona la importancia de analizar la transferencia de calor por convección natural, ya que permite conocer el comportamiento de ciertos fenómenos y ofrece la oportunidad de contrarrestar sus efectos negativos. Por ejemplo, es posible despejar la neblina de una pista de aterrizaje de aviones utilizando resistencias que calienten el aire para permitir que la neblina fluya.

Así, Batchelor estableció las soluciones analíticas en su forma general para la convección natural para diferentes geometrías de fuentes de calor constante: (a) puntual y constante para flujo laminar y turbulento, (b) lineal y constante para flujo turbulento, (c) puntual y constante, en un ambiente estratificado, (d) puntual e instantánea. También analizó el comportamiento de varias fuentes de calor distribuidas en una superficie, por ejemplo, experimentó con la relación entre dos fuentes lineales paralelas separadas a una distancia y la posibilidad de sustituirlas por una sola fuente lineal a mitad de esa distancia de separación.

En 1962, Fujii[3] realizó una investigación teórica de la convección natural en condiciones de flujo laminar estable sobre una fuente de calor lineal y una fuente de calor puntual. Obtuvo las soluciones tanto para el flujo laminar como para la distribución de temperaturas y velocidades como función del número de Prandtl. Concluyeron que la pluma térmica se ensancha al incrementar la potencia en una proporción $2/5$ de la distancia sobre la fuente de calor.

Por otra parte, Forstrom y Sparrow[4] realizaron experimentos en los que midieron el campo de temperaturas de una pluma térmica que nace en un hilo horizontal caliente. Realizaron las pruebas

en un entorno controlado para realizar mediciones de temperatura a diferentes alturas y distintas potencias. A partir del número de Grashof determinaron que los primeros indicios de turbulencia se presentan para $Gr = 5 \times 10^8$ y hay plena turbulencia para $Gr = 5 \times 10^9$. Sin embargo, no reportaron resultados visuales.

Yosinobu y su equipo[5], hicieron pruebas experimentales de la inestabilidad del flujo sobre una fuente de calor lineal horizontal en convección natural, para simular la convección natural fabricaron un entorno con madera y tiras de nylon. Se apoyaron en estudios teóricos de la estabilidad lineal hechos por Pera y Gebhart, así como un complemento hecho por Haaland y Sparrow, y sus resultados coincidieron con las predicciones en un gran rango del número de Grashof, éste último lo calcularon utilizando como parámetro el calor suministrado a la resistencia. No encontraron indicios de flujo turbulento en la pluma, por el contrario, apreciaron pequeñas fluctuaciones de la pluma laminar que llamaron “swaying motion” o movimiento de balanceo. Las fluctuaciones incrementaron conforme se incrementó el número de Grashof. Se presentaban brevemente y desaparecían, sin embargo, la conclusión fue que estas explosiones conducen a la turbulencia del flujo.

En 1986, Bejan[6] realizó un plenario de los trabajos efectuados sobre el pandeo de flujos, enfocándose en la relación que guardan con la transferencia de calor por convección. En este trabajo incluye investigaciones teóricas que él mismo realizó acerca de chorros, columnas y plumas térmicas de fluidos de estudio. En la parte experimental, por ejemplo, en 1983 en colaboración con Kimura[7] realizaron experimentos para estudiar la transición a la turbulencia de una pluma térmica que surge de una fuente de calor puntual del grosor de un alambre de nicromel y con una potencia de $50W$. De acuerdo a las conclusiones a las que llegaron, los principales factores que influyen en el desarrollo de la pluma térmica incluyen

1. La longitud y el diámetro de la fuente de calor
2. La longitud de onda de las primeras perturbaciones del flujo
3. La potencia suministrada a la fuente de calor
4. El Número de Prandtl.

En 1986 Wakitani y Yosinobu[8] exploraron el desarrollo de las perturbaciones que aparecen en la transición a la turbulencia en una pluma de convección natural sobre una fuente de calor lineal horizontal. Encontraron que hay dos modos fundamentales en el que ocurre la turbulencia. Sin embargo, utilizaron un cono de altavoz y una corriente pulsante para producir perturbaciones sinusoidales asimétricas y perturbaciones simétricas respectivamente. De tal forma, no se trata de un estudio puramente de convección natural.

Para 1987, Bejan[1] realizó una investigación en la que acentuó la relación que existe entre la **Termodinámica** y la **Mécanica de Fluidos**, resaltando la importancia de realizar una correcta visualización de los flujos, centrándose en su geometría y la examinación de las fotografías tomadas. Propuso utilizar fotografías como un antecedente del modelo analítico y numérico que describe la inestabilidad y transición de los flujos. Concluyó reafirmando la presencia de una estructura común en el pandeo (inestabilidad) de los flujos, y es que estos presentan una forma senoidal ya sean sistemas naturales o artificiales. Dicho pandeo ha sido estudiado en el campo de la Mecánica de Fluidos conocida como Campo de la Estabilidad Hidrodinámica, sin embargo, los únicos trabajos recientes que se encontraron analizan el comportamiento de la pluma térmica en interacción con otros fenómenos.

Naffouti y su equipo[9] realizaron experimentos para caracterizar la pluma térmica natural y turbulenta, así como su interacción con el entorno que consiste de un canal, para ello utilizaron una fuente de calor rectangular. En pruebas realizadas sin confinamiento encontraron dos secciones en la pluma térmica generada: la primera al inicio de la fuente de calor que llamaron zona de desarrollo; y una segunda en la que el flujo es básicamente turbulento. Concluyeron para la pluma térmica en un entorno libre e ilimitado, que la zona cerca de la fuente tiene un suministro de aire fresco por debajo y los costados, lo que representa una absorción de energía constante por parte del fluido. En cuanto a los vórtices, gracias al análisis del campo de temperatura se encontró un dominio de los vórtices grandes en comparación a los pequeños.

Para el 2014, Bejan et al.[10] realizaron una serie de simulaciones numéricas para demostrar que todas las plumas térmicas y chorros de fluidos se convierten en plumas redondas y en chorros redondos incluso cuando los chorros salieran de toberas con sección transversal plana. En todos los casos sigue ese orden, de sección plana a redondeada aguas abajo. Este comportamiento escala con

la longitud de la fuente de calor bidimensional y para el caso de los chorros escala con el diámetro y la velocidad que presenta el chorro en la boquilla de salida. Los experimentos realizados cubren rangos de Número de Reynolds de 10 a 10^4 , calculado con la velocidad de salida del chorro.

En 2018, Meunders y su equipo[11] realizaron experimentos para estudiar la pluma térmica generada sobre un bloque de cobre calentado por efecto Joule. Utilizaron la técnica de velocimetría por imágenes de partículas para medir los campos de velocidad. Registraron la temperatura dentro del entorno cerrado que construyeron para reportarlo como condiciones ambientales. Presentaron sus resultados en función del número de Grashof, explicando que conforme incrementa la potencia suministrada el punto de transición de flujo laminar a turbulento ocurre a una menor altura. De tal forma, registraron la transición a la turbulencia en el rango de $4 \times 10^8 < Gr < 2 \times 10^9$.

Como se aprecia, se han desarrollado diversas investigaciones teóricas y experimentales que abordan el estudio de la pluma térmica de determinadas geometrías; es un campo de estudio con muchas oportunidades de revisión debido a la gran cantidad de configuraciones que se pueden realizar. Si bien se han hecho estudios acerca de la pluma térmica de una fuente de calor, en todos se abordan diferentes casos específicos: fuentes bidimensionales, fuentes circulares, fuentes puntuales, chorros de flujo. En este trabajo se presenta el estudio experimental de la visualización de la pluma en condiciones de convección natural en un entorno controlado, es decir, sin perturbaciones exteriores. Así, se busca indagar en esta parte de la investigación de las plumas térmicas que no se ha apreciado concretamente.

2.1. Objetivos de la tesis

Estudiar experimentalmente la pluma térmica generada por una fuente de calor lineal en un entorno controlado y analizar su pandeo, utilizando para ello la técnica *Smoke wire*.

2.1.1. Objetivos particulares

1. Diseñar y manufacturar el dispositivo experimental para estudiar la pluma térmica generada por una fuente de calor lineal.

2. Implementar la técnica *Smoke wire* para la visualización de la pluma térmica de una fuente de calor lineal.
3. Analizar los vídeos del pandeo para las diferentes variables estudiadas de la pluma térmica de una fuente de calor lineal.
4. Identificar las zonas de desarrollo de una pluma térmica.

Capítulo 3

Arreglo experimental

3.1. Simplificación del problema

Este proyecto estudia la pluma térmica que se presenta en una fuente de calor lineal en estado estacionario bajo condiciones de convección natural en un ambiente controlado. A partir de este análisis se puede comprender el comportamiento ondulatorio que se presenta y la relación que guarda con la cantidad de calor suministrado y la longitud de la fuente de calor.

Dicho lo anterior, era necesario un modelo experimental que fuera capaz de producir la pluma térmica, y al mismo tiempo permitiera su visualización y caracterización. Con referencia a los trabajos académicos y científicos mencionados, se identificaron diferentes variables que influyen en el desarrollo de la pluma térmica, estas son:

1. Potencia eléctrica suministrada
2. Longitud de la fuente de calor
3. Geometría del conductor

El diseño del arreglo experimental se enfocó en estudiar el efecto de la longitud de la fuente de calor y la potencia que se le suministra. Para ello se utilizó un alambre de nicromel de 0.51 mm de diámetro, cuya longitud varía de 2.54 cm a 7.62 cm , con incrementos de 2.54 cm .

Respecto a la transferencia de calor con el ambiente, el espacio confinado debía ser capaz de aislar el arreglo experimental de perturbaciones externas como fuentes de calor y principalmente de las corrientes de aire. Por lo anterior, el entorno debe estar sellado completamente y facilitar la interacción de los parámetros específicos del experimento. Adicionalmente éste debe estar lejos de paredes o cuerpos que puedan influenciar su comportamiento.

Debido al tamaño del espacio confinado, su temperatura no es alterada por el calor generado por el modelo experimental.

3.1.1. Diseño y manufactura de las piezas

Los requerimientos del modelo variaron conforme se avanzó en la investigación, debido al proceso de diseño con el método iterativo. En la Figura 3.1 se muestra el esquema final del arreglo experimental para producir la pluma térmica, consiste en dos postes de acero con dos tornillos y dos rondanas que aprisionan el alambre de nicromel. Basado en este esquema se diseñaron las piezas que componen el arreglo experimental.

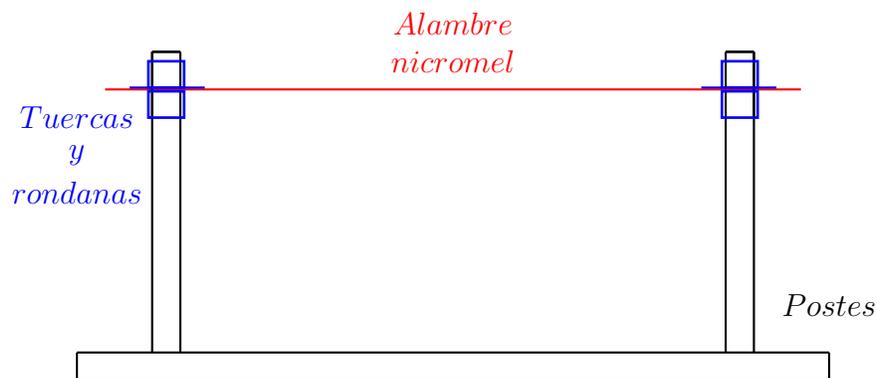


Figura 3.1: Esquema del arreglo general para producir la pluma térmica, la figura no se encuentra a escala.

Inicialmente se necesitaba de un modelo que se adecuara a un espacio confinado de aproximadamente 1 m^3 . Sin embargo, luego de una serie de iteraciones fue necesario trasladar el experimento a un cuarto confinado de 4.3 m de largo, 3 m de ancho y 3 m de altura. Dicho espacio fue utilizado en todos los experimentos.

Las paredes del espacio experimental se cubrieron con placas de foami de color negro mate para

aislar las paredes de vidrio tanto de fuentes de luz externa como de los cambios de la temperatura ambiental. Para aumentar el contraste entre la pluma térmica y el ambiente, se utilizó una cortina negra como fondo.

En complemento con la cortina, se utilizó un sistema de iluminación conformado por una lámpara de monitor que permitió resaltar las partículas de humo que indican el comportamiento de la pluma térmica.

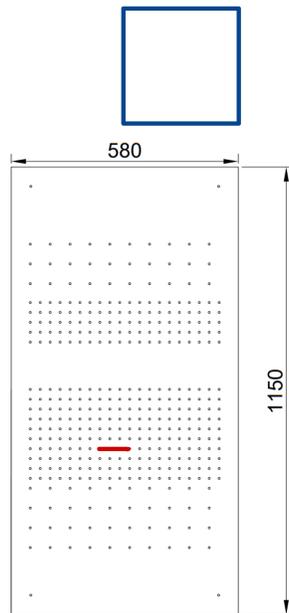
Basándonos en las restricciones y parámetros a modificar en los experimentos, se requería desarrollar un modelo en el cual fuese posible ajustar la posición de los diversos elementos que constituyen el experimento utilizando medidas fijas y predeterminadas. Esto último se logró a partir de diseñar una base en la que se instalaron el resto de las piezas. Ésta es una plataforma estable perforada con un patrón de orificios que permiten fijar los diferentes elementos que forman parte del experimento. Consiste en una placa de acrílico de $1.7\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, en la que se maquinaron por corte láser 374 orificios de 0.635 cm de diámetro repartidos en diferentes secciones a lo largo de la placa, como se muestra en la Figura 3.2a. Hay dos secciones a los extremos de la placa donde los orificios se encuentran separados a 5.08 cm de distancia con un total de 70 orificios. En la zona más cercana al centro los orificios se encuentran separados sólo por 2.54 cm , con un total de 300 orificios.

En la Figura 3.2a se aprecia en un cuadrado de color azul la posición del brazo Dantec en el que se sujetó la cámara y la línea de color rojo representa la posición que adoptó el alambre de nicromel durante los experimentos.

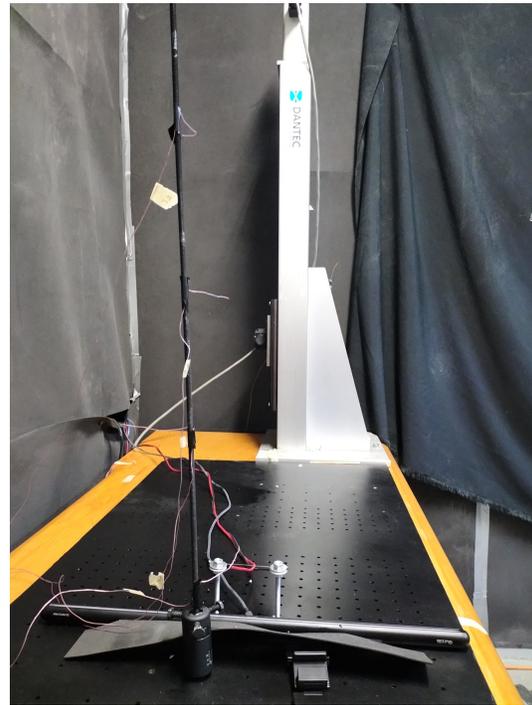
Teniendo los cortes realizados, se procedió a maquinar las cuerdas de los orificios con un machuelo de 0.635 cm . Posteriormente se recubrió el acrílico con pintura negra mate para evitar reflejos que pudieran afectar las visualizaciones.

La placa de acrílico se colocó sobre en un escritorio de madera de $150\text{ cm} \times 75\text{ cm}$ con 80 cm de altura. Se utilizó un *nivel láser* de la marca Bosch que se aprecia en la Figura 3.3a, para nivelar y asegurar la orientación de la mesa de madera, así como otros componentes que se colocaron sobre ésta.

El arreglo de la Figura 3.1 se adaptó a la mesa óptica utilizando tornillos de 0.635 cm de



(a) Mesa óptica, medidas en milímetros



(b) Arreglo sin hilo de algodón

Figura 3.2: Arreglo experimental

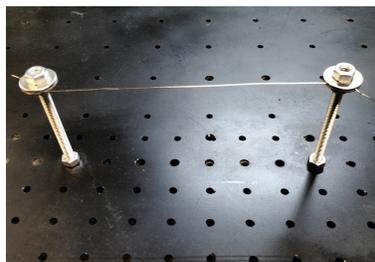
diámetro y 6.35 cm de largo como postes. Se utilizó un alambre de nicromel de 0.51 mm de diámetro como fuente de calor. Su temperatura se incrementa por efecto Joule, haciendo pasar una corriente eléctrica sobre éste. Para conectar el alambre de nicromel a la fuente de poder que suministra la corriente, se utilizaron puntas caimán en los extremos sobrandes que sobresalen de las rondanas, procurando que estos fueran lo más cortos posible. La fuente de calor tiene longitudes de 2.54 cm , 5.08 cm y 7.62 cm .

En la Figura 3.3b se observa una foto del arreglo en donde se aprecia el uso de rondanas y tuercas para sujetar el alambre de nicromel. Las rondanas se recubrieron con cemento térmico para minimizar su calentamiento así como proporcionar una capa de aislante eléctrico, como se muestra en la Figura 3.3c. Como ya se mencionó, se utilizó la técnica *Smoke wire* para visualizar la pluma térmica, para ello se prepararon hilos de algodón humectados con aceite, cuya longitud es similar a la fuente de calor, para garantizar una humectación uniforme, los hilos se introdujeron en una probeta de vidrio de 10 ml por al menos un día, ésta última se aprecia en la Figura 3.3d.

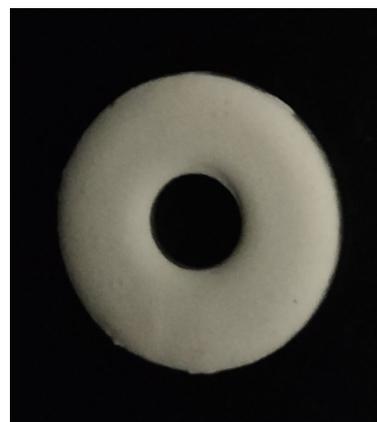
Se utilizó el aceite Mxl Tecnol C-100; que es incoloro e inoloro, así como de baja densidad. Se utiliza en diferentes procesos, por ejemplo, en la fabricación de productos químicos y en maquinaria



(a) Láser Bosch



(b) Arreglo en la mesa óptica



(c) Rondana



(d) Cilindro con aceite e hilos



(e) Cámara sujeta al brazo DANTEC



(f) Fuente de poder BKPRECISION



(g) Lámpara de monitor de computadora



(h) Sistema de posición DANTEC

Figura 3.3: Elementos del arreglo experimental

para procesamiento de alimentos, ya que el contacto accidental no implica un peligro para el humano. No tiene azufre corrosivo, así que no deja residuos carbonosos ni produce manchas.

Para realizar la adquisición de imágenes se utilizó una cámara Kiralux modelo *CS135MU* con

una tasa de adquisición de imágenes de 165.5 fps . Ésta tiene acoplado un lente Navitar de 12 mm , que permite enfocar manualmente y cuenta con un iris para controlar la cantidad de luz que entra al sensor de la cámara.

La cámara se acopló a un sistema de desplazamiento lineal de un sólo eje de la compañía Dantec Dynamics, que tiene una precisión de 0.01 mm . En la Figura 3.3e se aprecia la cámara ensamblada a dicho sistema. Lo anterior permitió posicionar la cámara a la altura necesaria y de esta forma visualizar la pluma térmica a diferentes alturas.

Para sujetar la cámara al travesero se utilizaron tornillos de $1/4 \text{ in}$. A dicho tornillo se le redujo la cuerda para ofrecer sólo la cantidad de hilos necesarios para que la cámara quedara posicionada correctamente.

La lente de la cámara se encuentra a 30 cm de altura de la mesa y a 90 cm del alambre de nicromel.

A un tornillo de 50 cm de largo se agregaron marcas cada 15 cm . Éste fue colocado en la parte posterior del arreglo y se utilizó para escalar las distancias reales de los vídeos, es decir, para determinar las distancias en las que ocurre el pandeo. En el mismo tornillo se colocaron 4 termopares para registrar la temperatura a diferentes alturas de la pluma térmica. El arreglo se aprecia en la Figura 3.2b, también se aprecian otras adecuaciones como el aislamiento lumínico. Se colocó un cuarto termopar en la base del sistema de desplazamiento para registrar la temperatura ambiente del espacio experimental.

3.1.2. Suministro de energía eléctrica

Para suministrar el voltaje a la fuente de calor se utilizó una fuente de poder de la marca BK PRECISION, modelo 1687B que se aprecia en la Figura 3.3f, que nos permite el uso de una corriente eléctrica de hasta 10 A . Se puede controlar de forma manual o a través de un software. Se posicionó en la parte exterior del cuarto confinado para evitar que el ventilador interfiriera en las pruebas.

3.1.3. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación consiste en una lámpara de escritorio de led, modelo PHX003-L5W, como se muestra en la Figura 3.3g. Tiene 52 *cm* de longitud y 2.5 *cm* de diámetro. Se alimenta con 5 *V*, tiene 285 *lm*. La lámpara se colocó sobre la base de acrílico, en la parte posterior del arreglo. En esa posición también fue posible minimizar los reflejos en los soportes del alambre.

3.1.4. Sistema de posicionamiento

El sistema de posicionamiento consiste en un sistema de desplazamiento lineal de un sólo eje, originalmente compuesto de 3 elementos que permitían un movimiento en las 3 dimensiones. Sin embargo, sólo se utilizó el elemento vertical para desplazar la cámara a diferentes alturas de la pluma térmica. El sistema es de la marca DANTEC, permite 80 pulsos por cada *mm*, tiene una velocidad máxima de 40 *mm/s* y un desplazamiento máximo de 1 *m*. En la Figura 3.3h se aprecia este sistema.

3.1.5. Sistema de medición

Para medir la temperatura ambiental dentro del espacio experimental se instaló un termopar sobre el brazo DANTEC, a una distancia de 15 *cm* por encima de la mesa de madera. El termopar es de tipo T, está conectado a un sistema de adquisición de datos de la compañía National Instruments. El sensor de temperatura tiene un diámetro aproximado de 0.7 *mm*.

3.2. Calibración

A continuación se detalla la serie de pasos que se realizaron en cada experimento. Estos se deben repetir cada vez que se requiera hacer un experimento.

1. Antes de todo se debe humectar el hilo de algodón en el aceite. Para ello, simplemente se corta el hilo según la longitud de la fuente de calor, se deposita en la probeta con aceite y se

- deja reposar por un día.
2. La longitud de la fuente de calor determina la ubicación de los postes de sujeción. Estos se instalan con la ayuda de tuercas y llaves inglesas.
 3. Una vez colocados los postes, se coloca el alambre de nicromel en el arreglo. Se utilizan llaves inglesas para maniobrar y tensar el alambre lo máximo posible. Es muy importante que el alambre quede completamente tenso y horizontal para evitar que éste se flexione durante el calentamiento.
 4. Se coloca el hilo de algodón sobre el alambre de nicromel. En este paso es muy importante minimizar el contacto del hilo con las manos, así como procurar mantener el hilo lo más recto y pegado al alambre para conservar la humedad del mismo.
 5. Se conecta el sistema de iluminación desde afuera del cuarto simplemente encendiendo un multicontactos.
 6. Se conecta el sistema de posicionamiento y se deja en modo espera.
 7. El sistema de medición de temperatura se enciende para monitorear la temperatura del espacio, así como la temperatura de la pluma térmica a diferentes alturas.
 8. Se activa la computadora que controla el sistema de posición y de la cámara cuando se estabilizan las condiciones el cuarto controlado, para ello se deja pasar al menos tres horas con el cuarto completamente cerrado. Esto permite que haya una distribución uniforme de temperaturas y se amortigua las corrientes de aire en este espacio. Para mejores resultados se recomienda esperar al menos 12 horas.
 9. Una vez encendidos todos los sistemas, se activa el suministro de energía eléctrica. Cada experimento tiene una duración de 30 minutos.
 10. Se procede a grabar la pluma térmica en intervalos de un minuto una vez alcanzado el estado estacionario. Se puede grabar un tiempo mayor, pero hay que considerar que los vídeos de aproximadamente 10 minutos ocupan 1 *GB* de almacenamiento.
 11. Al finalizar la prueba se retira el hilo de algodón, si aún posee buenas características (suavidad, absorción y color) se reinserta en el cilindro de aceite. De lo contrario, se elimina.

Tabla 3.1: Resultados del modelo utilizando líquido de humo como combustible

Caso	Longitud cm	Potencia W	T_S $^{\circ}C$
Caso 1	2.54	5.50	40.30
Caso 2	2.54	9.18	53.10
Caso 3	2.54	12.80	60.10
Caso 4	5.08	5.50	37.20
Caso 5	5.08	9.24	43.80
Caso 6	5.08	12.54	54.30
Caso 7	7.62	6.00	61.60
Caso 8	7.62	9.28	82.70
Caso 9	7.62	12.58	91.20

Se limpia el alambre de nicromel y se retiran las rondanas para permitir que se sequen correctamente.

Las pruebas se realizaron para 3 diferentes longitudes, cada una para 3 diferentes potencias, se hará referencia a cada uno de ellos con el número asignado en la Tabla 3.1. Con ayuda de una cámara termográfica se midió la temperatura que alcanzó el alambre de nicromel para cada caso, los resultados se muestran en la Tabla 3.1. Las mediciones de temperatura se realizaron una vez que la temperatura del alambre se estabilizó, se presenta en la Figura 3.4 una de las capturas termográficas tomadas del alambre de nicromel.

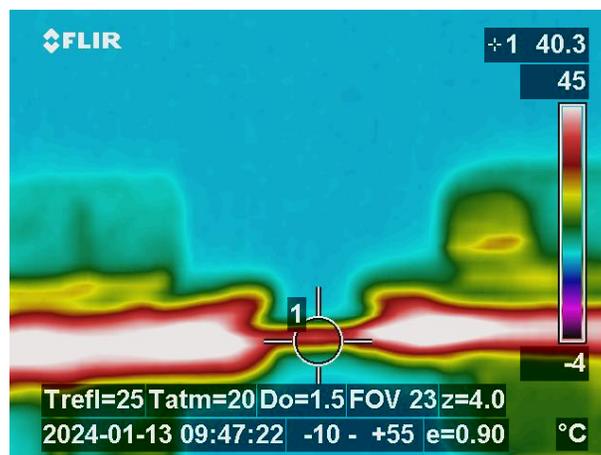


Figura 3.4: Captura termográfica del alambre de nicromel del Caso 1

3.2.1. Escalamiento de las visualizaciones

En la Figura 3.5 se aprecia la distancia entre termopares y la distancia entre postes que son medidas conocidas. A partir de éstas, se obtuvo la información de la amplitud (λ) y longitud de onda (τ) de la pluma térmica.

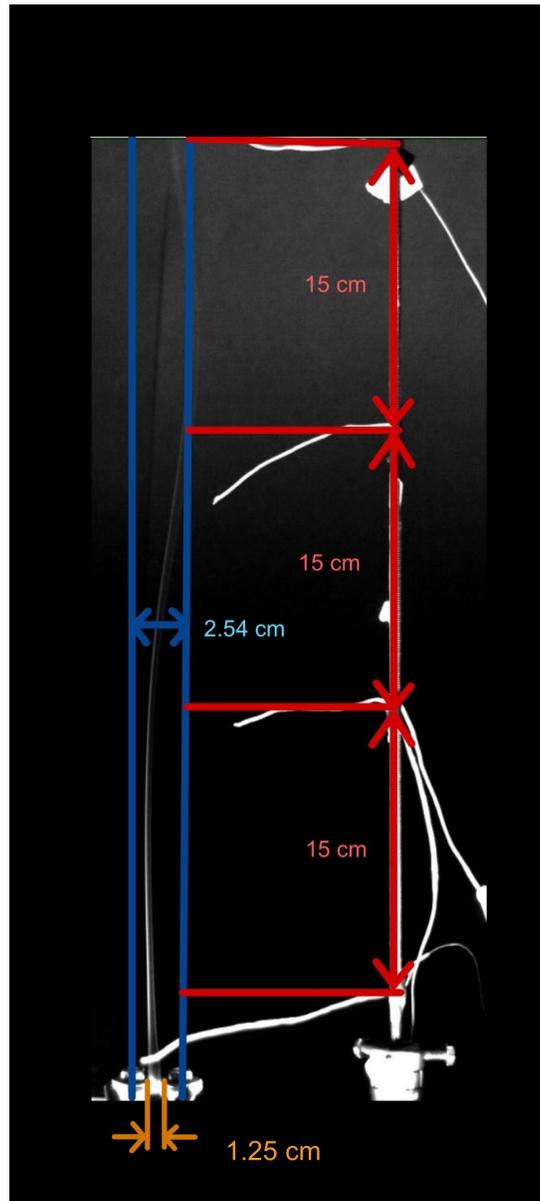


Figura 3.5: Pluma térmica Caso 1, imagen con referencias a las distancias principales

Capítulo 4

Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos realizados, resaltando el efecto de la potencia suministrada y la longitud de la fuente de calor. Para caracterizar los casos se utilizan 3 diferentes parámetros: número de Rayleigh (Ra), la amplitud (λ) y la longitud de onda (τ).

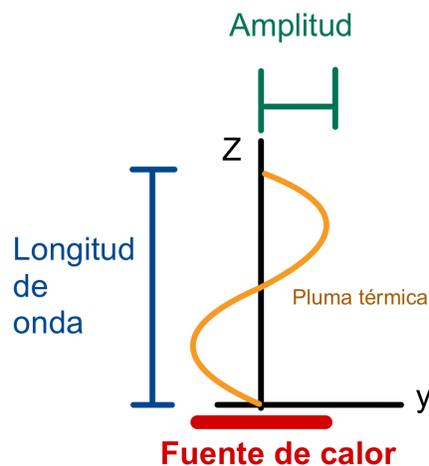


Figura 4.1: Amplitud y longitud de onda de la pluma térmica

Los resultados se toman de videos realizados del flujo convectivo una vez que éste alcanzó el estado permanente. La amplitud y longitud de onda se determinaron a partir de un análisis visual, como la Figura 3.5, considerando a la amplitud como el ancho de la pluma térmica y considerando como longitud de onda a la distancia que recorre una onda senoidal de la pluma convectiva, tal

como se muestra en la Figura 4.1. Estos parámetros están en unidades de longitud ya que se trata de un análisis puramente visual, el análisis se realizó de forma manual.

Para asegurar que la pluma alcanza un estado permanente se mantuvo el suministro de energía eléctrica durante 30 minutos continuos, tiempo similar en el que se genera humo de forma uniforme y en cantidad suficiente para que la pluma térmica sea visible. El alambre de nicromel tarda 10 minutos en alcanzar una temperatura estable. En todos los experimentos la temperatura ambiente fue de $16^{\circ}C \pm 0.97^{\circ}C$.

En la Figura 4.2 se esquematizan los diferentes tipos de pandeo que se presentaron en los casos estudiados. El inciso a) se presentó únicamente en el *caso base*, en el que se presentan dos secciones, dos pandeos diferentes en la misma pluma, resaltados en diferente color. El inciso b) en el que ambos lados de la pluma se pandean con las mismas características y sólo se presenta una sección, o pandeo. El inciso c) en el que un lado de la pluma térmica, permanece estable (recto) mientras el otro lado es estrangulado. El inciso d) es similar al anterior, ya que un lado permanece estable, pero el otro se ensancha más allá de la longitud de la fuente de calor. El último inciso, el e), es en el que se presenta un estrangulamiento en ambos lados de la pluma térmica. La presencia de dos secciones puede deberse a los esfuerzos cortantes que ejerce el aire ambiental sobre la pluma térmica, esto mismo evita la estabilización de la pluma térmica. Otro factor que se observa en los diferentes casos es la torsión de la pluma térmica: un giro alrededor del eje Z.

Primero se analizará lo que de ahora en adelante se conocerá como *caso base*, el experimento realizado con una fuente de calor de 2.54 cm de longitud y un suministro de energía eléctrica de 5.5 W .

La pluma térmica del *caso base* se presenta en la Figura 4.3a, en ésta se aprecian dos secciones, una BAJA y una ALTA, cada una cuenta con una amplitud y longitud de onda característica. La sección BAJA que comienza a la altura del alambre de nicromel y se extiende hasta 18 cm , que comprende la mitad de la pluma; posteriormente se encuentra la sección ALTA que se extiende hasta afuera del área de visualización.

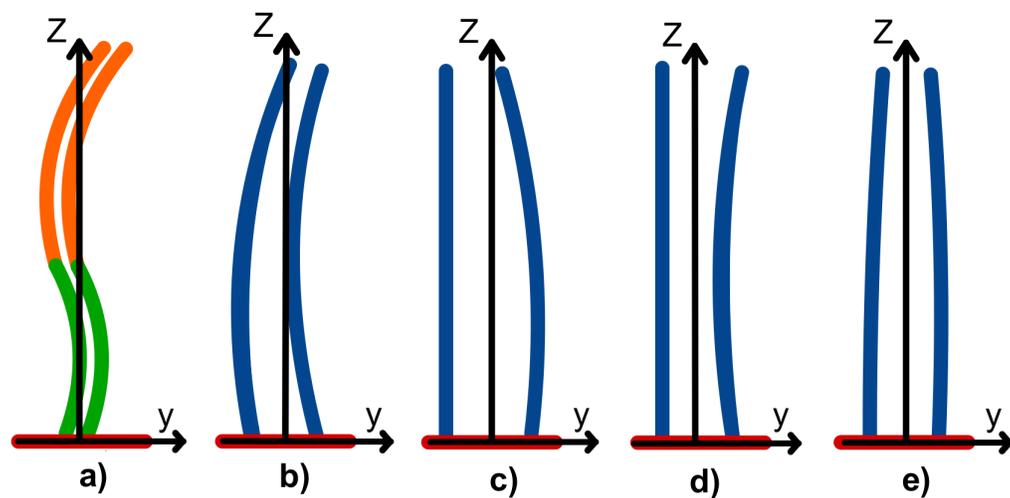
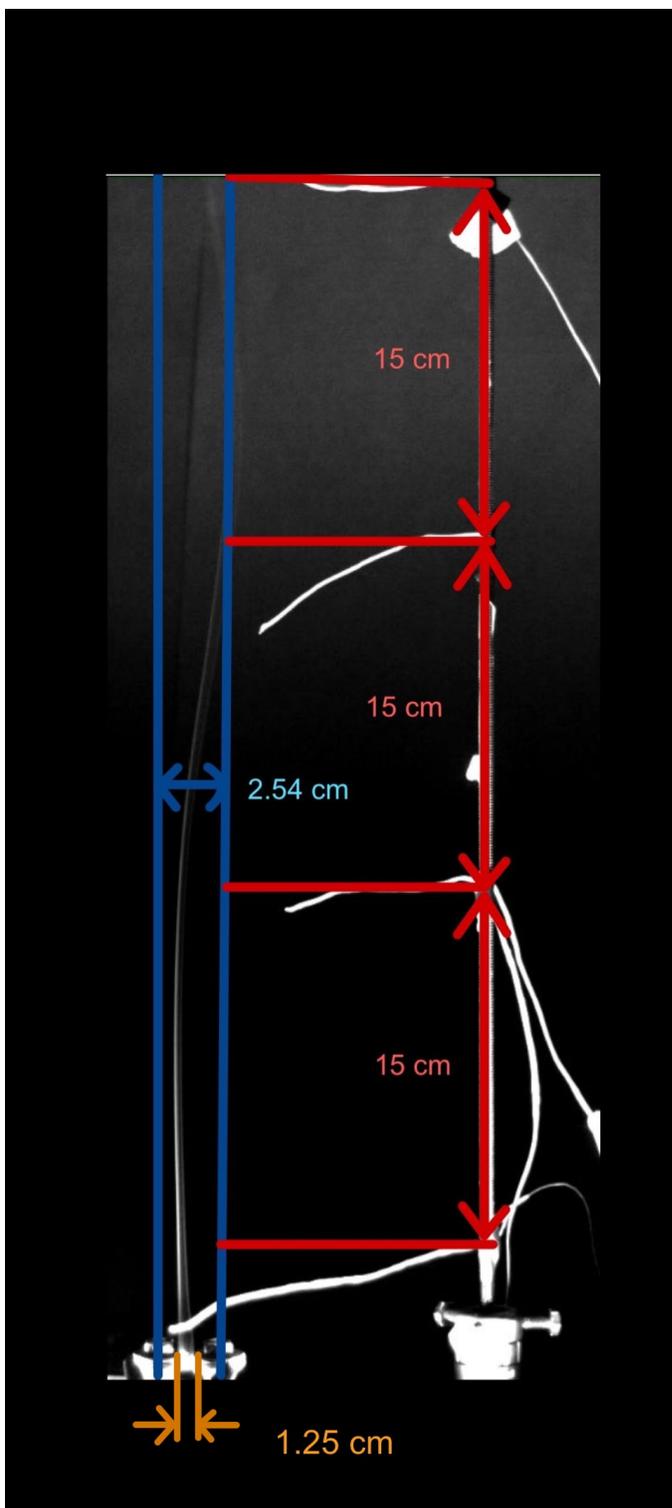


Figura 4.2: Tipos de pandeo que se presentaron en la pluma térmica: a) Dos secciones: ALTA y BAJA b) Única sección, un sólo sentido c) Única sección con un lado estrangulado y con un lado estable d) Única sección, con un lado más ancho que la fuente de calor y con un lado estable e) Única sección con ambos lados estrangulados.



(a) *Caso base* de la Pluma térmica



(b) *Caso base* de la pluma térmica, imagen con referencias a las distancias principales

Figura 4.3: *Caso base*, imagen original e imagen con referencias.

En la sección BAJA de la pluma térmica, el pandeo tiene una amplitud de 0.623 cm y una longitud de onda de 23.75 cm . En la sección ALTA de la pluma, correspondiente a la sección superior, se aprecia un pandeo más marcado con una amplitud de 2.5 cm y una longitud de onda de 56.27 cm .

Se observa una ligera torsión de la pluma térmica en sentido opuesto a las manecillas del reloj a 3 cm de la fuente de calor. En la Figura 4.3a se puede percibir esta torsión en los extremos derecho e izquierdo de la pluma térmica, ya que estos se conservan con mayor visibilidad que el resto de la pluma térmica, se aprecia que el extremo izquierdo parece ser más grueso pero se debe a que al girar queda más expuesto a la lámpara.

4.1. Efecto de la longitud de la fuente de calor

En esta sección se muestra el efecto de la variación de la longitud del alambre de nicromel, estos casos se suministran 5.5 W al alambre. En la Figura 4.4 se aprecian las tres fotos tomadas. La Figura 4.4a es el *Caso base*, las dos figuras restantes corresponden al caso 4 y caso 7, en éstas se observa una sola sección en toda la pluma térmica

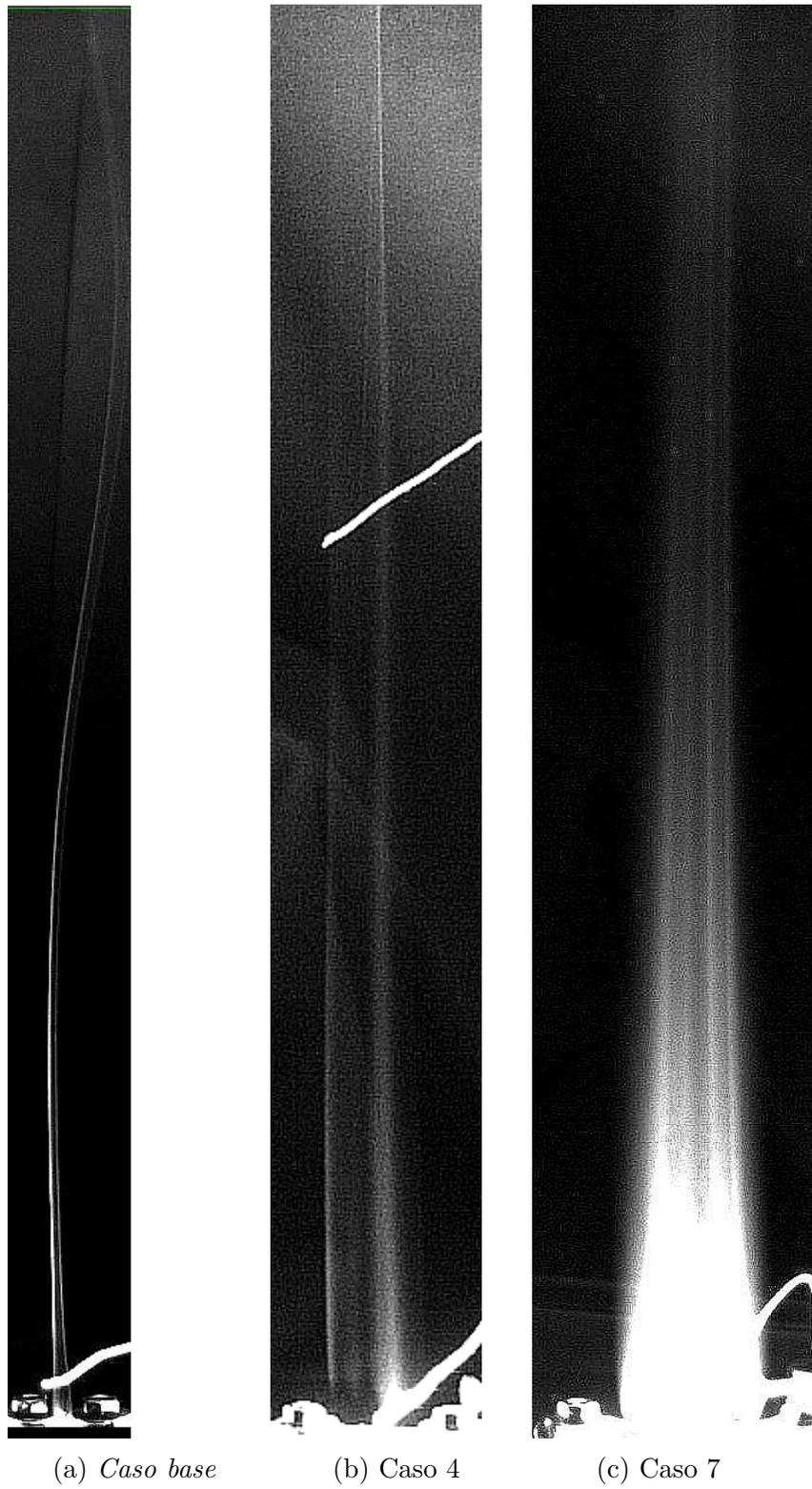


Figura 4.4: Pruebas con variación en la longitud y 5.5 W de potencia suministrada.

En el Caso 4, Figura 4.4b, se observa una pluma térmica con una sola sección, similar a la del inciso c) de la Figura 4.2. El lado izquierdo de la pluma térmica permanece sin pandeo durante casi toda el área de análisis, en los últimos centímetros de la pluma se pierde gran parte de la visibilidad de ésta, por lo que se asume como completamente estable del lado izquierdo. Mientras que, del lado derecho se observa un pandeo con una amplitud de 1.90 cm , que se desarrolla a lo largo de toda la pluma térmica del área de análisis y una longitud de onda $\tau=160\text{ cm}$. Ambas características son mucho más grandes que las vistas en el *caso base*.

Se presenta una torsión en la pluma térmica del lado derecho que se aprecia desde la fuente de calor, sin embargo, no hay un sentido en específico. Sólo se observa que una parte de la pluma térmica se sobrepone al resto con mayor claridad a una altura de 33.00 cm por encima de la pluma térmica.

El caso 4, en comparación con la sección BAJA del *caso base*, tiene una amplitud 306.00% mayor y una longitud de onda 400.00% mayor. Al comparar el caso 4 con la sección ALTA del *caso base* resulta tener una amplitud 76.00% menor y una longitud de onda 341.00% mayor.

En la Figura 4.4c se aprecia el Caso 7, en el que también se considera la presencia de una sola sección ya que se presenta un pandeo a lo largo de toda la pluma térmica. Pese a la aparente simetría de ésta respecto al centro del alambre, existe una diferencia de 0.46 cm en la amplitud entre el lado izquierdo y el lado derecho de la pluma. En adelante se hará mención a ellos como amplitud izquierda y amplitud derecha para las amplitudes correspondientes al lado izquierdo y derecho de la pluma, respectivamente.

Del lado izquierdo de la pluma la amplitud es de 2.06 cm y del lado derecho de 1.60 cm . En ambos lados el desarrollo es muy similar, la longitud de onda de cada lado se extiende más allá de la zona de análisis, siendo mayor a 192.00 cm .

En este caso no se presenta ninguna torsión. Sin embargo, se presenta la interesante situación de estabilidad que se aprecia en la imagen. Es decir, el pandeo de la pluma térmica se prolonga a lo largo del área de análisis y al tener una amplitud pequeña comparada con la longitud del alambre (la del lado izquierdo es 3.70 veces más pequeña, la del lado derecho es 4.76 veces más pequeña) genera una impresión de mantener el centro de la pluma totalmente estable.

Al comparar la amplitud del caso 7 con la del *caso base*, la amplitud izquierda es 332% mayor que la amplitud de la sección BAJA pero, comparándolo con la sección ALTA, resulta 82% menor. La amplitud derecha es 258% más grande que la amplitud de la sección BAJA del *caso base*, mientras que, al compararlo con la sección ALTA la amplitud derecha es 64% menor.

La longitud de onda en el caso 7 es mayor en más de 300% que las longitudes de onda del *caso base*. Para la sección BAJA es mayor por un 400% y para la sección ALTA es mayor por un 340%

En comparación con el *caso base*, la longitud de onda del caso 7 es mucho mayor que las presentadas en el *caso base*, por más de 40 *cm*.

4.2. Efecto del calor generado en la fuente de calor

En esta sección se muestran las pruebas realizadas con una variación en la potencia suministrada, conservando una longitud del alambre de nicromel de 2.54cm . Las potencias utilizadas son 5.5 W , 9.18 W (caso 2) y 12.80 W (caso 3). En los casos 2 y 3 se presenta sólo una sección en la pluma térmica en el área de análisis, es por ello que se habla de una sola amplitud y una sola longitud de onda.

En la Figura 4.5b se observa el caso 2, con una amplitud de 2.87 cm y una longitud de onda mayor a 192 cm . Adicional a esto, se presenta una ligera torsión de la pluma térmica, a 40 cm de la fuente de calor, en sentido opuesto a las manecillas del reloj. La amplitud es 460% mayor al compararla con la sección BAJA del *caso base* y en comparación con la sección ALTA es 115% mayor. Entonces, el Caso 2 tiene una amplitud mayor que el *caso base* en cualquiera de sus secciones, de manera similar ocurre con la longitud de onda, ya que para la sección BAJA la longitud de onda del Caso 2 es 400% mayor y para la sección ALTA es 340% mayor.

En la Figura 4.5c apreciamos la pluma térmica que desprende el alambre de nicromel en el Caso 3, es notable por la intensidad del humo que el aceite se quema con mayor velocidad para este mismo lapso de tiempo. La pluma térmica se pandea ligeramente a la izquierda con una amplitud de 1.53 cm y una longitud de onda de más de 192 cm . Se presenta una torsión a 18 cm de la fuente de calor sin embargo, su desarrollo es prolongado y sólo se aprecia hasta que la pluma adquiere una geometría pseudo circular.

Al compararlo con el *caso base*, el Caso 3 tiene una amplitud 246% mayor a la amplitud de la sección BAJA del *caso base* y 60% menor a la amplitud de la sección ALTA. La longitud de onda del caso 3, sobrepasa los valores de ambas secciones del *caso base*. Es 400% mayor para la sección BAJA y 340% mayor para la sección ALTA.



Figura 4.5: Pruebas con variación en la potencia, 2.54 cm, entorno controlado.

4.3. Resultados de variación de potencia y longitud

En esta sección se presentan los resultados de todos los experimentos realizados, incluyendo a aquellos de los que no se habló en la sección anterior. Para facilitar su análisis, se ha dispuesto una tabla con las características de cada pluma, Tabla 4.1, las fotografías de todos los casos se encuentran en el Apéndice A.

Tabla 4.1: Resultados de todos los experimentos.

Características de la Pluma Térmica			
Caso	Ra	Tipo	λ
1	1.833×10^4	a)	Sección baja: $\lambda = 0.62cm$, $\tau = 47.50cm$;sección alta: $\lambda = 2.50cm$, $\tau = 56.27cm$
2	4.489×10^4	b)	$\lambda = 2.87cm$, $\tau > 192.00cm$.
3	4.992×10^4	b)	$\lambda = 1.53cm$, $\tau > 192.00cm$.
4	2.257×10^5	c)	$\lambda = 1.90cm$, $\tau > 192.00cm$.
5	2.824×10^5	c)	$\lambda = 0.76cm$, $\tau > 192.00cm$.
6	3.736×10^5	e)	$\lambda_{izquierda} = 2.85cm$, $\lambda_{derecha} = 3.60cm$, $\tau > 96.00cm$.
7	1.394×10^6	e)	$\lambda_{izquierda} = 2.06cm$, $\lambda_{derecha} = 1.60cm$, $\tau > 192.00cm$
8	1.744×10^6	c)	$\lambda_{derecho1} = 0.32cm$, $\tau_{derecho1} = 12.00cm$, $\lambda_{derecho2} = 5.50cm$, $\tau_{derecho2} > 160.00cm$, $\lambda_{derecho3} = 0.19cm$, $\tau_{derecho3} = 20.00cm$
9	1.818×10^6	d)	$\lambda_{izquierdo1} = 0.65cm$, $\tau_{izquierdo1} = 42.00cm$, $\lambda_{izquierdo2} = 0.29cm$, $\tau_{izquierdo2} = 82.50cm$, $\lambda_{derecho} = 0.90cm$, $\tau_{derecho} = 12.00cm$

En resumen, el *caso base* es el único caso en el que se presentaron dos secciones, en el resto de caso sólo se presentó una sección. Esto sugiere que para números de Rayleigh de un orden mayor a de 2×10^4 se presenta la suficiente energía térmica para que el aire caliente desplace las capas de aire frío, mientras que, al ser menor la pluma térmica presenta dificultades para vencer los esfuerzos cortantes del aire que la rodean.

En los primeros tres casos se observa una disminución en la amplitud al aumentar la cantidad de energía eléctrica suministrada. El caso 2 presenta una amplitud muy similar a la amplitud de la sección ALTA del *caso base*, sin embargo, el caso 3 tiene una amplitud menor a éstos. Esto indica que al aumentar la energía calorífica de la fuente, mejora la estabilidad de la pluma. El número de Rayleigh de estos casos incrementa conforme se incrementa la energía suministrada lo que apoya esta hipótesis. Pese a ello, el cambio en la amplitud entre el caso 2 y caso 3 no corresponde al ligero cambio que hay en sus números de Rayleigh correspondientes.

En los casos 4 y 5, Figuras 4.6a y 4.6b respectivamente, se observa un comportamiento muy similar visualmente, del lado izquierdo de la pluma se queda estable y del lado derecho hay un estrangulamiento, sin embargo, la amplitud del caso 4 es 250% más grande. Para los casos 4, 5 y 6 no se aprecia un patrón específico, del caso 4 al 5 hay una disminución de la amplitud, del caso 5 al 6 hay un aumento de la amplitud.

Cabe mencionar, que el caso 6 es el único en el que se presenta una torsión completa de la pluma térmica, resaltando la diferencia que hay entre los casos 4, 5 y 6. El caso 6 muestra a la perfección el fenómeno del que habla Bejan[10] "todas las plumas térmicas y chorros se convierten en fenómenos con secciones redondas", en este caso, pese a tratarse de una fuente de calor lineal se observa el giro completo de la pluma térmica en la Figura 4.6c

En la Figura 4.7a se observa el caso 7 que tiene ambos lados de la pluma térmica estrangulados en una longitud de onda muy similar $\tau > 192.00cm$. Sin embargo, el lado izquierdo de la pluma térmica presenta una amplitud 28% mayor que el lado derecho, por ello la pluma no es totalmente simétrica aunque es el caso menos asimétrico ya que se visualiza una estabilidad a lo largo de la pluma térmica.

En la Figura 4.7b se vuelve a observar una disminución del ancho de un sólo lado de la pluma, sólo que ahora se trata del caso 8 que tiene una fuente de calor con una longitud de $7.62 cm$. El lado

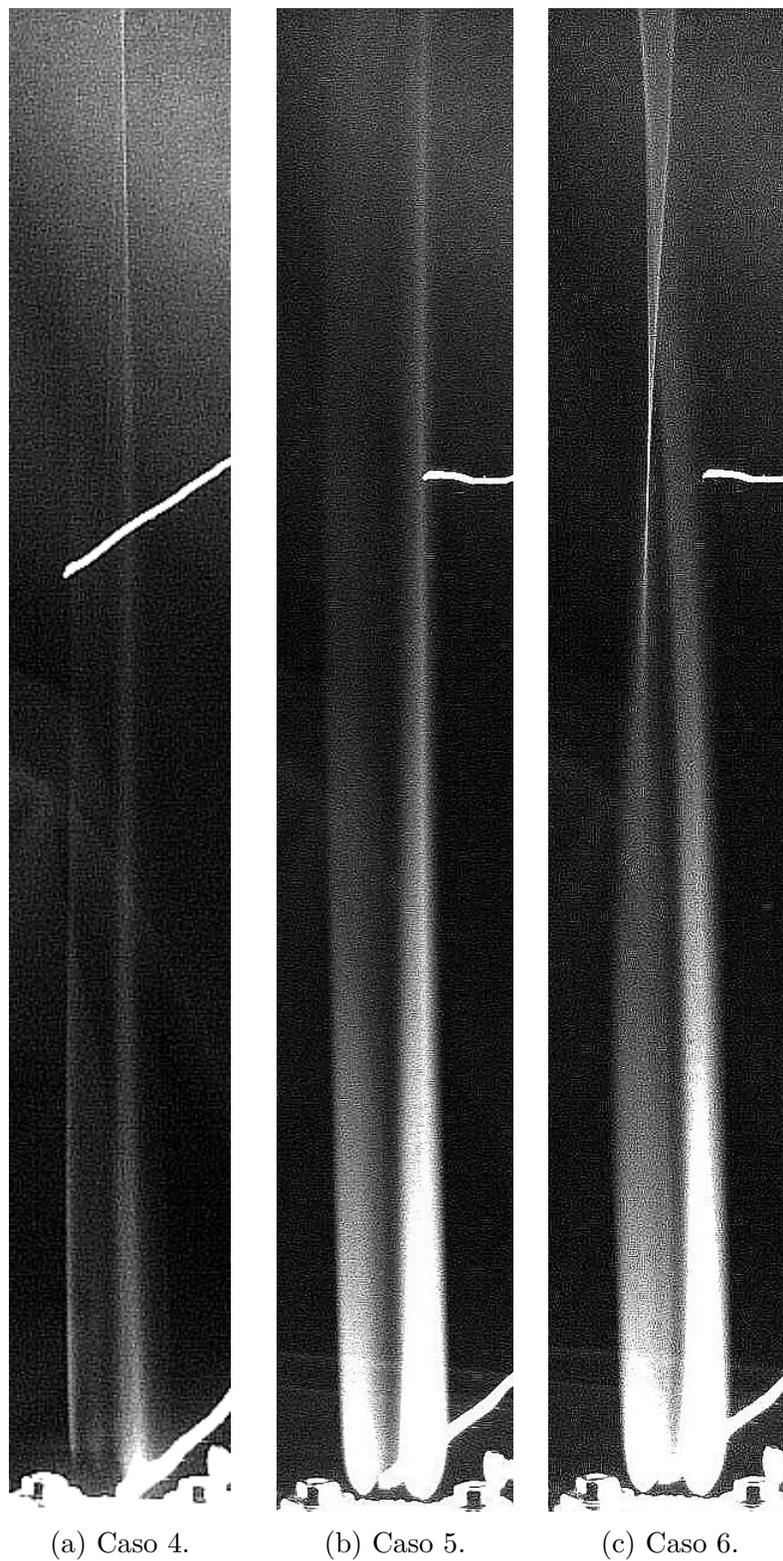


Figura 4.6: Pruebas con variación en la potencia, 5.08 cm, entorno controlado.

izquierdo de la pluma térmica se mantiene estable a lo largo de toda el área de análisis, en cuanto al lado derecho, se aprecia un ensanchamiento de la pluma, que procede a un estrangulamiento y

finalmente un pandeo con longitudes de onda más pequeñas que las observadas en los otros casos. Dicha zona de perturbaciones pequeñas tienen amplitudes del orden de 0.19 cm .

En el caso 9, que se observa en la Figura 4.7c, se presenta una apertura o ensanchamiento en ambos lados de la pluma térmica. Tal como se detalla en la Tabla 4.1 en ambos lados hay un primer ensanchamiento ligero, en el lado izquierdo la pluma se estrangula y a 23 cm del alambre de nicromel comienza a salir del área de estabilidad con pequeñas fluctuaciones, del lado derecho ya no se presenta un estrangulamiento posterior al ensanchamiento inicial, al contrario, se continua ensanchando hasta una altura de 30 cm sobre la fuente de calor.

En los últimos tres casos es más notoria la influencia del aumento de energía eléctrica suministrada, ya que se aprecia la disminución del estrangulamiento de la pluma térmica. Conforme aumenta el calor suministrado, así como el número Rayleigh, la pluma se ensancha a una menor altura respecto de la fuente de calor.

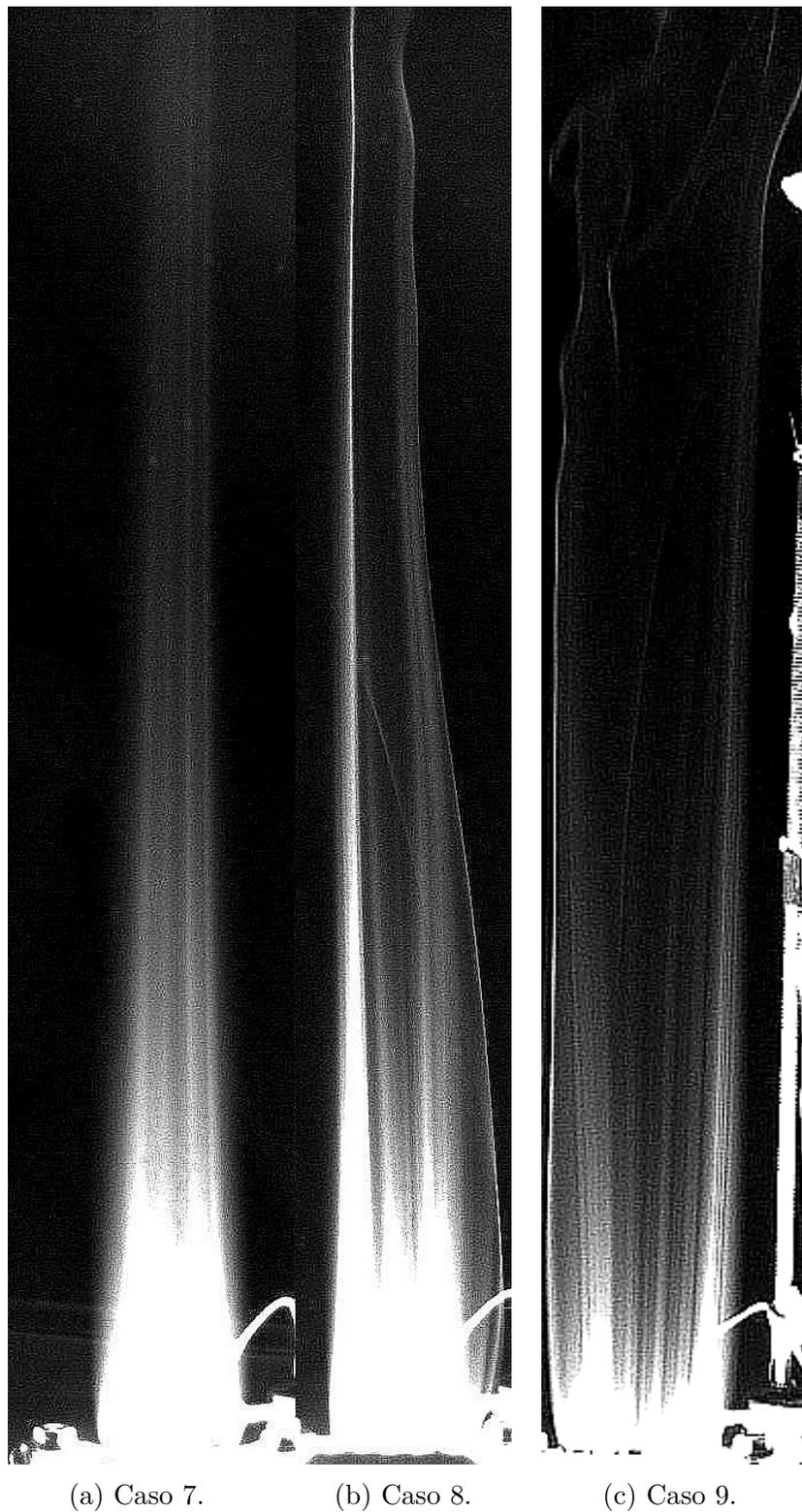


Figura 4.7: Pruebas con variación en la potencia, 7.62 *cm*, entorno controlado.

Capítulo 5

Conclusiones

Se logró construir el dispositivo experimental que permitió la observación del fenómeno pluma térmica sobre una fuente de calor lineal. En este dispositivo experimental se llevaron a cabo pruebas exitosas de visualización de la pluma térmica de una fuente de calor lineal utilizando la técnica *Smoke wire*; a partir de estas pruebas se obtuvieron las evidencias para realizar el estudio de la pluma térmica y proceder con el análisis. Todas las pruebas se realizaron con el mismo procedimiento, con las mismas precauciones y diligencias.

Se llevó a cabo el análisis presentado en la sección de resultados para examinar las diferencias entre cada uno de los casos presentados resaltando el efecto de la variación de la potencia suministrada a la fuente de calor y la variación de la longitud de la fuente de calor.

Se observó un patrón de aumento de estabilidad conforme se incrementa la potencia eléctrica suministrada. Tanto en el Caso 3 como en el Caso 7 las amplitudes del pandeo presentado se mantuvieron en valores por debajo de la amplitud de la sección ALTA del *caso base*.

Conforme aumentó la longitud de la fuente de calor, disminuyó la torsión en el área de análisis, mientras en el *caso base* se presenta una torsión completa, en el caso 4 se presenta una torsión pero no se aprecia su desarrollo por completo, finalmente en el caso 7 no se presenta ningún signo de torsión.

La formación del flujo axisimétrico (torsión) se debe a que el fluido exterior (aire ambiental) em-

puja a la pluma térmica, cuando la pluma tiene suficiente energía calorífica, ésta puede compensar el empuje y permanecer sin torsión hasta una mayor altura.

Al comparar los primeros tres casos: caso *base*, caso 2 y caso 3 se confirma que al aumentar la potencia eléctrica suministrada aumenta la estabilidad de la pluma térmica ya que se presenta un pandeo con menor amplitud en los casos con mayor energía calorífica.

También se puede extraer de las imágenes de la Figura 4.5 y de la Figura 4.6a que en los primeros tres casos, ambos lados de la pluma térmica se mueven juntos; mientras que, a partir del caso 4 cada lado de la pluma térmica tiene un comportamiento independiente. La separación entre los lados de la pluma térmica es un factor decisivo en el comportamiento de la misma.

A través de las múltiples pruebas fue posible encontrar diversos fenómenos que influyeron en el resultado de los experimentos. Uno muy importante fue la posición y humedad del hilo sobre el alambre. Hubo situaciones en las que el hilo se caía o se separaba del alambre, aportando interesantes evidencias visuales, como se puede observar en la Figura A.2 en el apéndice A, en ésta el hilo de algodón se desprende de la fuente de calor en el centro, generando dos pluma térmicas independientes.

En conclusión, se aprecia un menor pandeo conforme aumenta la potencia eléctrica suministrada. Suministrar una mayor potencia permite que haya una temperatura más alta que ayuda a las partículas de aire a desplazarse, ya que el movimiento de las partículas está dado por las fuerzas de flotación ascendentes, este mismo movimiento ascendente está acompañado de un efecto de la viscosidad: que desplaza las capas externas de aire para incorporarlas. De esta forma, con información de más experimentos el número de Rayleigh nos permitiría conocer en qué punto las fuerzas de flotación son suficientes para vencer los esfuerzos cortantes del aire frío circundante. En los primeros 3 casos, el aumento de la potencia favorece la estabilidad reduciendo directamente el pandeo de la pluma térmica, del caso 4 al caso 6 el aumento de la potencia favorece la simetría axial de la pluma respecto al eje Z, finalmente, en los últimos 3 casos el aumento de la potencia favorece el ensanchamiento de la pluma térmica, también permite un pequeño ángulo de divergencia que se aprecia a los lados de la pluma térmica.

5.0.1. Trabajo a futuro

A partir de las conclusiones obtenidas, se deja abierta esta área del pando de flujos para profundizar en las plumas y chorros que evolucionan hasta tener secciones circulares, así como en análisis más particulares: mejoras en la producción de las partículas que ayudan a visualizar la pluma térmica, comparación de los resultados con experimentos en los que la fuente de calor sea de una geometría diferente, finalmente, un estudio detallado del número de Rayleigh crítico para conseguir que la pluma térmica de un caso específico sea capaz de vencer el estrangulamiento del aire frío.

Si se comprobara que todos los flujos convectivos tienden a convertirse en flujos circulares, se podrían simular muchas situaciones utilizando fuentes de calor sencillas (puntuales, lineales, circulares, etcétera), permitiendo estudiar el comportamiento de las fuentes de calor de una manera más sencilla. Es de especial importancia comprender las oscilaciones o perturbaciones que se dan en la pluma térmica de una fuente de calor individual para que en un futuro sean posibles las investigaciones que involucren varias fuentes de calor y la forma en que interactúan sus plumas térmicas.

Apéndice A

Casos particulares

A.0.1. Casos especiales

Durante las primeras pruebas realizadas, se presentó un extraño fenómeno en la pluma térmica: una inclinación hacia una pared, esto se observa en la Fig. A.1. La hipótesis inicial fue que la superficie estaba más fría que el resto del ambiente y por ello el flujo se desplazó hacia esa zona. Sin embargo, es posible que dicho comportamiento se deba a la electrocinética y su influencia en el flujo, en la ausencia de más evidencias no se pudo profundizar en este área, se deja el tema abierto para que futuras investigaciones puedan estudiarlo.

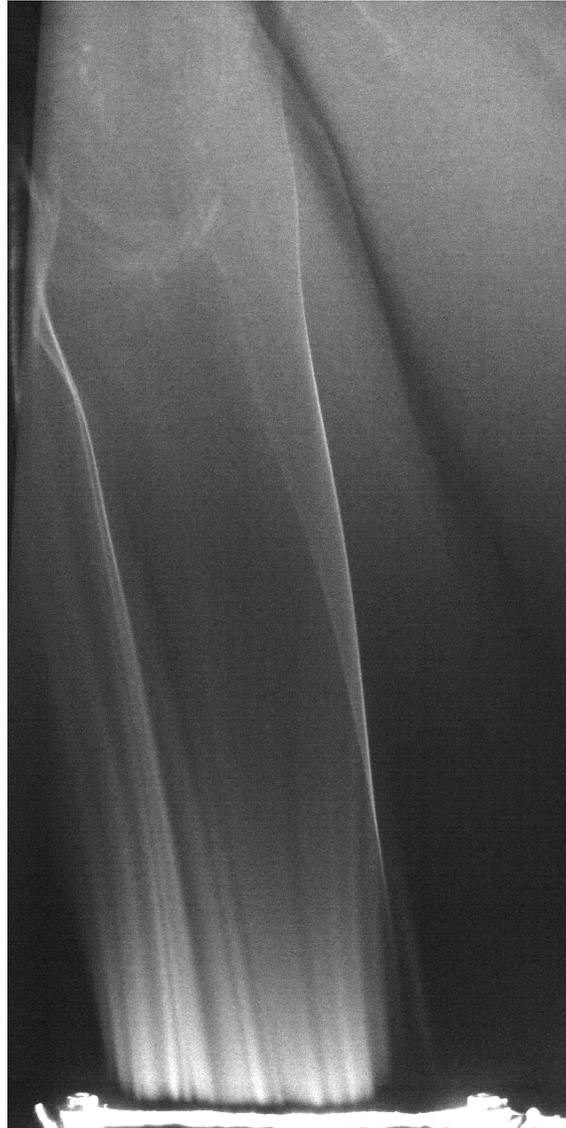


Figura A.1: Inclinación en la pluma térmica por una pared.

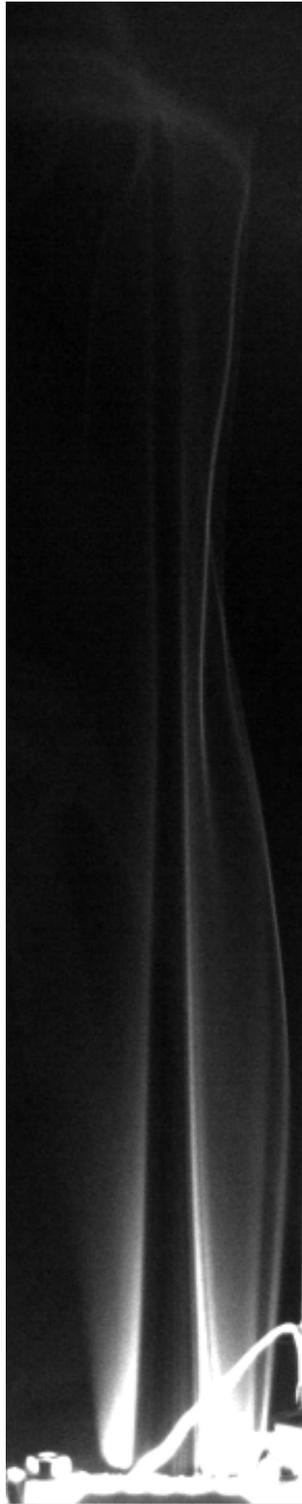


Figura A.2: Caso especial, prueba 3 in, 9 W, desprendimiento del hilo en la zona central de la fuente de calor.

Bibliografía

- [1] A. Bejan. Buckling flows: a new frontier in fluid mechanics. *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 1(5):262–304, 1987.
- [2] G. Batchelor. Heat convection and buoyancy effects in fluids. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80(345):339–358, 1954.
- [3] T. Fujii. Theory of the steady laminar natural convection above a horizontal line heat source and a point heat source. *Journal Heat Mass Transfer*, 6:597–605, 1962.
- [4] R. Forstrom and E. Sparrow. Experiments on the buoyant plume above a heated horizontal wire. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(3):321–331, 1967.
- [5] H. Yosinobu, Y. Onishi, S. Amano, S. Enyo, and S. Wakitani. Theory of the steady laminar natural convection above a horizontal line heat source and a point heat source. *Journal of the Physical Society of Japan*, 47(1), 1979.
- [6] A. Bejan. Buckling flows: a new frontier in convection heat transfer. *Revista latinoamericana de transferencia de calor y materia*, pages 83–103, 1986.
- [7] S. Kimura and A. Bejan. Mechanism for transition to turbulence in buoyant plume flow. *Journal of Heat Mass Transfer*, 26:1515–1532, 1983.
- [8] H. Yosinobu and S. Wakitani. Two fundamental modes of disturbances and their development in a plane plume above a horizontal heat source. *Fluid Dynamics Research*, 87(2), 1986.
- [9] T. Naffouti, J. Zinoubi, and R. Ben. Experimental characterization of a free thermal plume and in interaction with its material environment. *Applied Thermal Engineering*, 30(13):1632–1643, 2010.

- [10] A. Bejan, S. Ziaei, and S. Lorente. Evolution: Why all plumes and jets evolve to round cross sections. *Scientific Reports*, 4, 2014.
- [11] A. Meunders, L. Arnold, A. Belt, and A. Hundhausen. Velocity measurements of a bench scale buoyant plume applying particle image velocimetry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123:473–488, 2018.