



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CONFINAMIENTO DE LLAMA DE DIFUSIÓN EN  
TÚNELES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN MECÁNICA  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍO CIVIL MECÁNICO

SERGIO RAFAEL FICA CABRERA

PROFESOR GUÍA:  
JUAN CARLOS ELICER CORTÉS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS FUENTES CASTILLO  
GONZALO SEVERINO LÓPEZ

CONICYT-PCHA/MAGÍSTER NACIONAL/AÑO 2013 – FOLIO 22131888

SANTIAGO DE CHILE  
AÑO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico y grado de Magíster  
en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica  
POR: Sergio Rafael Fica Cabrera  
Fecha: 25/04/2014  
Profesor guía: Juan Carlos Elicer Cortés

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CONFINAMIENTO DE LLAMA DE DIFUSIÓN EN TÚNELES

Este trabajo tiene por objetivo el estudio experimental del comportamiento de una llama de difusión bajo la acción de cortinas de aire del tipo doble jet – doble flujo (DJ – DF), y así determinar la efectividad de estas cortinas como sistema de protección contra incendios.

Las mediciones se llevaron a cabo en un modelo de un túnel vial de escala 1:34, el cual cuenta con un quemador de difusión como fuente térmica para simular un incendio dentro de éste. El quemador consta con un circuito de gas, el cual provee el combustible, en este caso etileno, además de poseer un circuito de enfriamiento y un sistema de ignición remota. Por otro lado las variables relevantes a medir en el estudio fueron la altura de llama, medida a través de una cámara CCD, y la radiación emitida, medida a través de un radiómetro.

El estudio fue llevado a cabo primero midiendo la radiación incidente sobre el radiómetro, dada una combinación de caudal de gas (tasa de liberación de calor), con velocidades en las cortinas, dando origen a 20 mediciones en total, cada una con 10 puntos de medición. Posteriormente se midió mediante la cámara CCD la altura de la llama para cada una de estas 20 mediciones, obteniendo así por un lado curvas de radiación en función de la distancia para distintas velocidades de las cortinas, desde donde se puede obtener un gráfico de la radiación promedio por medición en función de las velocidades promedio de las cortinas, y por otro lado se tiene una curva de la altura de llama en función de las velocidades promedio de las cortinas. En forma paralela, se realizan mediciones de la altura de la llama en función de la tasa adimensionalizada de calor, para tres casos: el primero sin la presencia de cortinas, mientras que los otros dos con la presencia de dos configuraciones distintas.

Los resultados obtenidos permiten concluir que efectivamente las cortinas pueden utilizarse como sistema de protección contra incendios, al crear una barrera que efectivamente reduce la eficacia de la combustión, esto se puede apreciar tanto en la reducción de la radiación emitida, como en la reducción de la altura de la llama. También los resultados obtenidos para la altura de llama en función de la tasa de liberación de calor sugieren el mismo resultado, más aún, en los tres se sugiere que en la medida que se incrementa la velocidad de las cortinas, el confinamiento aumenta.

Finalmente se dejan propuestos trabajos futuros, tales como variar el tipo de combustible, variación de las relaciones entre los jets frío y caliente, entre otros.

## **Dedicatoria**

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que, de una u otra forma, permitieron que este proyecto pudiera realizarse. En primer lugar quisiera agradecer a toda la comisión de este proyecto de tesis, a Gonzalo Severino por su apoyo durante la fase de mediciones, y a los profesores Juan Carlos Elicer y Andrés Fuentes, por su constante guía y por confiar en mí para la realización de este trabajo.

Quisiera agradecer también a mi familia por el incondicional apoyo entregado a lo largo de los años. Su incentivo y persistente preocupación por mi formación profesional me permiten hoy finalizar esta etapa de la vida.

Por otro lado, agradezco a mis compañeros y amigos que me acompañaron durante todos estos años en la escuela de ingeniería y especialmente en el departamento de Ingeniería Mecánica, sin duda que gracias a ellos el camino se hizo mucho más ameno.

También le doy a las gracias a Javiera, quien gracias a su constante apoyo y motivación pude terminar este proyecto.

Finalmente, agradezco a Dios y a la Mater por todo lo vivido durante la realización de este estudio.

## Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	iii
Tabla de Contenido.....	iv
Índice de Tablas.....	vi
Índice de figuras .....	vii
Nomenclatura.....	ix
1 Introducción .....	1
2 Objetivos .....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivo Específico.....	3
2.3 Alcances.....	3
3 Antecedentes .....	4
3.1 Trabajos Previos .....	4
3.2 Llama de Difusión .....	6
3.3 Altura de llama.....	7
3.4 Temperatura de llama .....	9
3.5 Propiedades del etileno .....	10
3.6 Radiación emitida por una llama de difusión .....	11
3.7 Escalamiento térmico.....	13
4 Metodología Experimental.....	15
4.1 Descripción Montaje.....	15
4.2 Medidor de flujo de gas .....	18
4.3 Métodos Medición a utilizar .....	20
4.3.1 Altura de llama .....	20
4.3.2 Radiación de la llama .....	21
4.4 Metodología de trabajo .....	22
4.4.1 Altura de la llama en función de la velocidad de las cortinas .....	23
4.4.2 Radiación de la llama .....	24
4.4.3 Altura de llama en función de la liberación de calor.....	24
5 Discusión de Resultados.....	26
5.1 Radiación de la llama.....	27
5.2 Altura de la llama en función de la velocidad media de las cortinas.....	32

5.3	Altura de llama en función de la liberación de calor .....	39
6	Conclusiones .....	47
7	Bibliografía.....	50
A	Anexo 1: Resultados Radiación .....	53
A.1	Radiación Incidente Mediciones 11 – 20 .....	53
A.2	Curvas teóricas y experimentales radiación en función de la distancia. ....	57
B	Anexo 2: Altura de llama en función de la velocidad de las cortinas .....	69
B.1	Cuadros comparativos.....	69
B.2	Tabla comparativa métodos estimación de altura de llama .....	70

## Indice de Tablas

Tabla 3.1: Propiedades del etileno (7).....	11
Tabla 3.2: Expresiones para el escalamiento térmico (22).....	13
Tabla 4.1: Esquema de mediciones realizadas. ....	23
Tabla 5.1: Comparación de Resultados entre el método de Severino y el propio.....	36
Tabla 5.2: Resultados para altura de llama en función de $Q^*$ .....	40
Tabla 5.3: Equivalencias entre $Q^*$ y $Q_{25D}$ , para los valores usados en las mediciones .....	43
Tabla 5.4: Configuraciones cortinas usadas. ....	44
Tabla B.1: Resultados de altura de llama para ambos métodos, para un caudal de 0,74 [l/min]. .	70

## Índice de figuras

Figura 1.1: Esquema de un sistema de cortinas, tipo DJ – DF (6) .....	1
Figura 3.1: Montaje Experimental (Elaboración propia).....	4
Figura 3.2: perfiles de velocidad U para uno de los casos modelados por Rojas (6).....	6
Figura 3.3: Características de la llama de difusión (7).....	7
Figura 3.4: Fluctuaciones de la altura de llama (19). .....	7
Figura 3.5: Zonas de una llama de difusión (7).....	8
Figura 3.6: Intermitencia en función de la altura (7).....	9
Figura 3.7: Perfiles de temperaturas y velocidad para una llama de difusión (7). .....	10
Figura 3.8: Esquema básico del método de llama sólida de Dayan y Tien (21) .....	12
Figura 4.1: a) Vena de ensayo. b) Suelo de la vena de ensayo (7). .....	15
Figura 4.2: Circuitos de aire montaje experimental. ....	16
Figura 4.3: esquema de cortinas DJ – DF (7).....	16
Figura 4.4: Plano del quemador utilizado en el estudio (7).....	17
Figura 4.5: Quemador de llama de difusión, previo a su montaje (7) .....	17
Figura 4.6: Quemador montado en la superficie del túnel. ....	18
Figura 4.7: Quemador montado en el túnel, poniendo énfasis en el montaje de los electrodos sobre éste. ....	18
Figura 4.8: Flujómetro usado en este estudio. ....	19
Figura 4.9: Cámara <i>Manta G145B</i> , como la utilizada en el estudio (7).....	20
Figura 4.10: curva de transmisividad del filtro pasabanda.....	20
Figura 4.11: radiómetro utilizado en el estudio, incluyendo pieza de aluminio de acople (7).....	21
Figura 4.12: Certificado calibración radiómetro (7).....	22
Figura 5.1: Evolución de la concentración de oxígeno en el tiempo, durante una combustión en un compartimiento sub ventilado (24).....	26
Figura 5.2: Evolución en el tiempo de eficiencia de combustión y la tasa de liberación de calor para una combustión en un compartimiento sub ventilado (24).....	27
Figura 5.3: radiación en función de la distancia, mediciones 1 – 5.....	28
Figura 5.4: Radiación en función de la distancia, mediciones 6 – 10. ....	28
Figura 5.5: Radiación promedio en función de la velocidad media de las cortinas. ....	29
Figura 5.6: Curvas teórica y experimental para la radiación generada por la llama, caso sin cortinas. ....	31
Figura 5.7: Temperatura representativa de la llama. ....	32
Figura 5.8: (a) Medición sin cortinas, cuadro 50. (b) cuadro 200. ....	33
Figura 5.9: Histograma del cuadro n° 100, para la medición sin cortinas.....	34
Figura 5.10: Acercamiento al histograma del cuadro n° 100, de la medición sin cortinas. ....	34
Figura 5.11: Cuadro original con su par segmentado. Cuadro n° 100, caudal 0,58 [l/min], sin cortinas. ....	35
Figura 5.12: Distribución normal de las diferencias entre ambos métodos. ....	37
Figura 5.13: Altura media de la llama en función de la velocidad media de las cortinas, para un caudal de 0,58 [l/min] (Mediciones 1 – 10).....	37

Figura 5.14: Altura media de la llama en función de la velocidad media de las cortinas, para un caudal de 0,74 [l/min] (Mediciones 11 – 20).....	38
Figura 5.15: Altura de llama en función del tiempo, Medición 10. ....	39
Figura 5.16: Resultado para altura de llama en función de $Q^*$ .....	41
Figura 5.17: gráfico esquemático que muestra la existencia de diversas zonas o regiones para la altura de llama en función de $Q^*$ . (28).....	42
Figura 5.18: diferentes correlaciones para la altura de llama para valores bajos de $Q^*$ , representados en este caso por $Q_{25D}$ . (29) .....	42
Figura 5.19: resultados obtenidos en las mediciones comparados con diversas correlaciones. ....	43
Figura 5.20: Altura normalizada de llama en función de la tasa adimensional de liberación de calor, (a) Cortina 1 y (b) Cortina 2. ....	45
Figura A.1: Radiación en función de la distancia, mediciones 11 – 15. ....	53
Figura A.2: Radiación en función de la distancia, mediciones 16 – 20. ....	54
Figura A.3: Radiación promedio en función de la velocidad media de las cortinas .....	55
Figura A.4: Temperatura representativa de la llama. ....	56
Figura A.5: Medición sin cortinas. ....	57
Figura A.6: Medición 1 .....	58
Figura A.7: Medición 2. ....	58
Figura A.8: Medición 3. ....	59
Figura A.9: Medición 4. ....	59
Figura A.10: Medición 5. ....	60
Figura A.11: Medición 6. ....	60
Figura A.12: Medición 7. ....	61
Figura A.13: Medición 8. ....	61
Figura A.14: Medición 9. ....	62
Figura A.15: Medición 10. ....	62
Figura A.16: Sin cortinas.....	63
Figura A.17: Medición 11. ....	63
Figura A.18: Medición 12. ....	64
Figura A.19: Medición 13. ....	64
Figura A.20: Medición 14. ....	65
Figura A.21: Medición 15. ....	65
Figura A.22: Medición 16. ....	66
Figura A.23: Medición 17. ....	66
Figura A.24: Medición 18. ....	67
Figura A.25: Medición 19. ....	67
Figura A.26: Medición 20. ....	68

## Nomenclatura

### Símbolos latinos

$(A/F)$ : Relación aire – combustible [ $\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ ].

$c_p$ : Calor específico [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ].

$D$ : Diámetro quemador [m].

$E$ : Energía [kJ].

$F$ : Factor de forma (radiación).

$g$ : Aceleración de gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

$I$ : Intermitencia de la llama.

$L$ : Longitud o distancia [m].

$LHV$ : Poder calorífico inferior [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ].

$m$ : Masa [kg].

$N$ : Parámetro no dimensional usado para estimar la altura de llama normalizada por la fuente.

$n$ : Vector normal a una superficie.

$PM$ : Peso molecular [ $\text{kmol}/\text{kg}$ ].

$Q$ : Calor [kJ].

$q$ : Calor por unidad de área [ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ].

$r$ : Radio quemador [m].

$T$ : Temperatura [K].

$t$ : Tiempo [s].

$u$ : Velocidad [m/s].

$z$ : Altura vertical [m].

### Símbolos griegos

$\chi$ : Fracción radiativa.

$\Delta T$ : Diferencia de Temperatura [K].

$\epsilon$ : Emisividad.

$\gamma$ : Fracción volumétrica.

$\kappa$ : Coeficiente medio absorción [ $\text{m}^{-1}$ ].

$\theta_0$ : Ángulo polar [rad].

$\rho$ : Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzmann [ $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}^4$ ].

### Subíndices:

$f$ : Llama.

$r$ : Radiación.

$s$ : Hollín.

$\infty$ : Condiciones ambientales.  
 $st$ : Estequiometría.  
 $x$ : Dirección horizontal.  
 $y$ : Dirección horizontal.  
 $z$ : Dirección vertical.  
 $F$ : Escala real.  
 $M$ : Modelo.  
 $p$ : Productos de combustión.  
0: Variables con respecto al eje central de la llama.

### Superíndices

$\dot{()}$ : Tasa de cambio en el tiempo.  
 $()^*$ : Variable adimensionalizada.

# 1 Introducción

Chile se ha visto enfrentado a un aumento en el último tiempo de su parque automotriz, aumento que ha ido de la mano con el desarrollo de la infraestructura vial necesaria para hacer frente a este escenario. Como parte de la solución, se ha contemplado la incorporación de túneles a estas nuevas carreteras, por lo que se hace necesario contemplar los efectos de un accidente al interior de éstos. En particular, interesa tratar el problema de incendios que pudiesen ocurrir, esto debido a que los gases nocivos y el calor generado por las llamas al interior de este espacio confinado, pueden alcanzar lugares lejanos y con esto poner en riesgo la seguridad e integridad física de las personas que se encuentren en su lugar.

Afortunadamente en Chile no existe gran experiencia en torno a este tipo de accidentes, sin embargo en otros países en donde existe un mayor desarrollo de carreteras y de túneles, se han dado incendios con consecuencias lamentables. Quizás uno de los más notorios es aquel ocurrido en el túnel Mont Blanc (1999), en donde un camión se incendió en medio de éste, provocando la muerte de 39 personas (1).

Dado lo anterior, es necesario estudiar formas para confinar el calor y poder controlar las llamas de manera remota, ya sea disminuyendo su altura, lo que trae consigo una disminución de la temperatura y la potencia calorífica emitida, o eventualmente extinguiéndolas.

Diversos estudios avalan la utilización de cortinas de aire para separar dos espacios, y limitar el transporte de calor y masa entre éstos, como en los trabajos de Luo (2), Guyonnaud (3) y Hu (4). Estas cortinas pueden tener diversas configuraciones, sin embargo, la que ha demostrado tener mayores capacidades de confinamiento es la conocida como de Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF) (5). Ésta consiste en dos cortinas de aire, una a cada extremo del espacio que se desea confinar (en este caso el siniestro en cuestión), y cada una de éstas consta de dos jets, uno que toma aire desde el exterior (aire frío), y otro que toma aire desde el espacio confinado y lo reinyecta a éste (aire caliente). La Figura 1.1, muestra un esquema de este sistema.

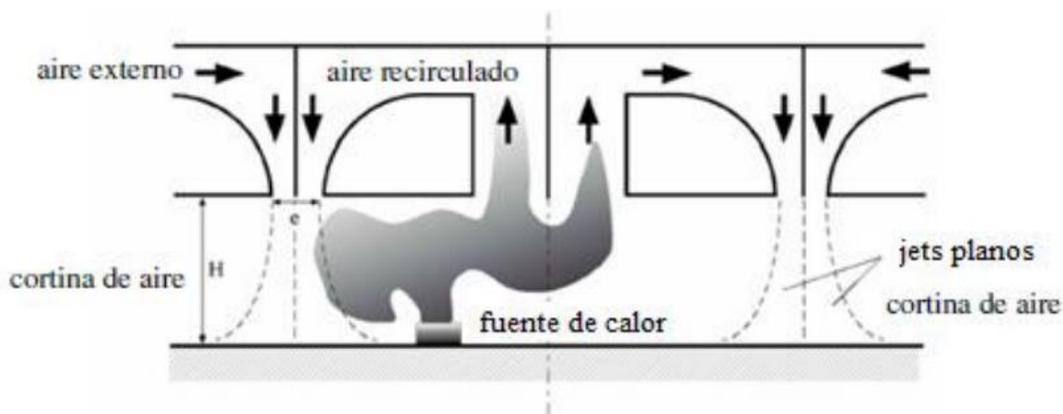


Figura 1.1: Esquema de un sistema de cortinas, tipo DJ – DF (6)

Este sistema permite la creación de dos zonas: la primera conocida como celda de confinamiento, que es el espacio que se encuentra entre cortinas, y una zona de seguridad, zona en donde las temperaturas son inferiores a aquella de la celda de confinamiento.

Es importante tratar el tema de los incendios al interior de túneles, debido a que la propagación de calor y gases tóxicos pone en peligro directo la seguridad de las personas que se encuentran en su interior, además de las posibles consecuencias económicas que puede traer debido a los daños a la infraestructura y a la posible inutilización de ésta. Es por esto que se estudia la llama generada por un incendio, dentro de un modelo a escala de un túnel vial, y en particular, cómo se comporta ante la acción de las cortinas de aire propuestas (DJ – DF), ante diversas velocidades de salida de los distintos jets, es decir, distintas configuraciones.

Tal como se detallará más adelante, se han realizado diversos estudios tendientes a caracterizar las cortinas de aire y sus capacidades para limitar el transporte de calor y masa entre la celda de confinamiento y su exterior, sin embargo siempre se realizaron utilizando como fuente térmica (simulando el incendio) una resistencia eléctrica, y no fue sino hasta el trabajo de Severino (4), en que se instaló finalmente un quemador con el que se puede simular de mejor manera una llama real dentro del túnel, y se realizaron algunas mediciones para caracterizar la llama bajo el efecto de la acción de las cortinas de aire. Sin embargo, se hacía necesario realizar mediciones para distintas configuraciones de las cortinas, y así distinguir de mejor manera la capacidad de las cortinas para controlar incendios, en particular, poder identificar si es que existe una configuración de funcionamiento óptima de las cortinas.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es el estudio experimental de la efectividad de las cortinas de aire del tipo DJ – DF para confinar una llama de difusión, en un modelo a escala de un túnel vial, y comprobar la capacidad de éstas para controlar, y en última instancia extinguir una llama, como representación de un incendio real en su interior.

### **2.2 Objetivo Específico**

Se plantean los siguientes objetivos específicos para el siguiente trabajo:

- Realizar mediciones de la altura de la llama mediante técnicas ópticas, para distintas combinaciones de potencia térmica del quemador, y con diversas configuraciones de los jets, obteniéndose la altura de la llama en función de la velocidad promedio de las cortinas.
- Realizar mediciones de la radiación emitida por la llama para cada una de las combinaciones de potencia quemador – configuración cortinas, para medir el efecto de las cortinas sobre esta variable. Por otro lado, a partir de estas mediciones se estimará la temperatura de la llama.
- Finalmente, realizar mediciones de la altura de llama en función de la tasa de liberación de calor y contrastar con la literatura existente.

### **2.3 Alcances**

Los alcances de este trabajo consideran las mediciones de la altura de la llama, y de la radiación generada por ésta, además del registro de la tasa de liberación de calor, a través del registro del caudal de gas. Además, contempla el registro de las velocidades generadas por las cortinas.

Quedan fuera de los alcances de este trabajo analizar la producción de especies, y la de hollín, y mediciones al exterior del túnel, así como las mediciones de las temperaturas, tanto dentro como fuera de la celda de confinamiento..

### 3 Antecedentes

En el siguiente capítulo se darán antecedentes teóricos sobre los distintos aspectos involucrados en el estudio, los cuales permitirán realizar un adecuado análisis de los resultados obtenidos.

#### 3.1 Trabajos Previos

Diversos trabajos se han realizado en torno al tema del confinamiento mediante cortinas de aire del tipo Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF). En primer lugar, y gracias al proyecto FONDECYT 1040498, González (8) y Celis (9), diseñaron y construyeron el aparato experimental, que representa el túnel vial de escala 1:34, como se muestra en la Figura 3.1, en donde se pueden ver las estructuras que generan las cortinas DJ – DF que producen la celda de confinamiento que se busca estudiar. El montaje se encuentra en el Laboratorio de Estudios en Fluidodinámica (LEF) del departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.



Figura 3.1: Montaje Experimental (Elaboración propia)

Por otra parte, Fernández (10) estudió numéricamente las cortinas, utilizando los modelos  $k - \epsilon$  standard,  $k - \epsilon$  realizable y  $k - \omega$  standard. Uno de sus resultados principales indican que cuando existe una diferencia de temperaturas entre la celda de confinamiento y su exterior, se deben ajustar las velocidades de las cortinas a valores diferentes entre las corrientes fría y caliente, con tal de impactar de forma vertical el suelo del túnel.

Por su parte, Elicer et al. (11) efectuaron simulaciones numéricas en 2D y 3D, concluyendo finalmente luego de comparar con mediciones experimentales, que el flujo es esencialmente

plano, simplificando en gran medida el flujo. En dicho estudio se usó el modelo de Reynolds Stress Model (RSM).

Luego, y gracias al proyecto FONDECYT (1085015), se equipó al laboratorio con una instalación de una termocupla fina y otro de anemometría Laser Doppler (LDV), con lo que a partir de ese momento fue posible medir en forma simultánea los campos de velocidad y temperatura en la cortina DJ – DF y sus alrededores, gracias a lo cual se realizaron diversos trabajos, los cuales apuntan a poder cuantificar la capacidad de las cortinas para confinar calor. El primero de estos trabajos fue el de Felis et al. (12), en donde se identificó que la zona más eficiente de las cortinas era la superior. Cecchi (13) concluyó a partir de sus mediciones que la fuente de calor tiene un rol importante en el campo de velocidades de la cortina, mientras que Schneider (14) incrementó el número de puntos de medición para profundizar el estudio de Cecchi.

Casi en forma paralela a estos trabajos, se realizaron diversos estudios numéricos, como el realizado por Lecaros et al. (15), usando el código Fire Dynamics Simulator (FDS), en donde se encontraron remolinos cerca de la zona de impacto, lo que provocaría pérdidas del confinamiento producto de la mezcla entre los flujos de aire frío y caliente. Rivera et al. (16) estudia más a fondo estas inestabilidades usando el método LES (Large Eddy Simulation), encontrando que existen inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz, las que contribuyen a mejorar la transferencia de calor y masa a través de la cortina, perjudicando su capacidad de confinamiento. Mientras que Castro (17), estudia más a fondo estas inestabilidades usando el mismo método LES, concluyendo además que el jet rápido se encuentre hacia la zona protegida con tal optimizar el confinamiento. Sin embargo Rojas (6), mediante el código FDS, concluye que el jet rápido es el que se dirige hacia la zona confinada, por lo menos dentro del rango de velocidades estudiadas por él. Por lo tanto existe una discordancia en cuanto a cual debiese ser el jet rápido.

Haciendo una comparación entre los diversos modelos considerados para simular el comportamiento de las cortinas con los valores experimentales obtenidos por Cecchi (13), se puede ver que en general coinciden en que para los perfiles de velocidad (por citar un ejemplo), en la zona más cercana a la salida de los jets los perfiles están muy definidos, con marcadas diferencias entre sus mínimos y máximos, y que en la media que se desarrollan los jets, estos perfiles tienden a aplanarse, tal como lo muestra la Figura 3.2.

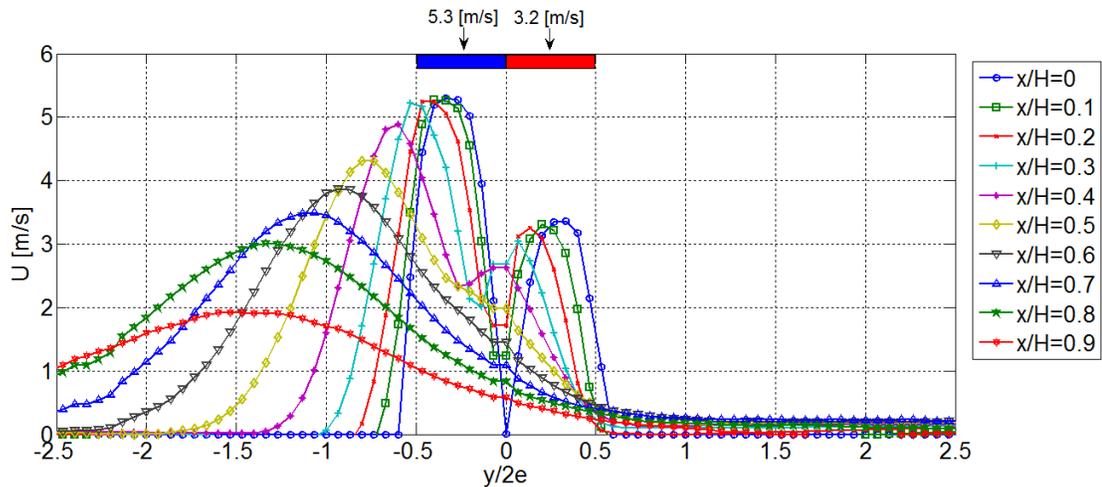


Figura 3.2: perfiles de velocidad  $U$  para uno de los casos modelados por Rojas (6).

En particular resulta que el modelo de Rojas (6) tiene grandes similitudes con los resultados obtenidos por Cecchi (13), tanto por la forma inicial de los perfiles de velocidad como por la evolución de éstos en la medida que se desarrolla hacia la zona de impacto en el suelo del túnel.

Es así que luego se realizó el trabajo de Severino (7), cuyo objetivo era poder medir el efecto de una fuente de calor más cercana a la realidad de un incendio, por lo que se diseñó y construyó un quemador estándar de llama de difusión, para luego evaluar su comportamiento midiendo su altura comparándola con modelos existentes y la radiación emitida por ésta, para luego comparar estos resultados con una simulación numérica. En su trabajo se concluye que efectivamente para un rango de velocidades de las cortinas de aire efectivamente existe confinamiento.

Es por esto que surge la motivación de ahondar más en este tema, teniendo en cuenta los trabajos anteriores que muestran que las cortinas de aire ofrecen propiedades interesantes para el confinamiento de llamas de difusión, sin embargo hacía falta un estudio más exhaustivo para medir hasta qué punto, y con una llama real, se puede confinar la llama producida por un incendio en túneles.

### 3.2 Llama de Difusión

La llama de difusión corresponde a aquella en donde el combustible y el comburente se encuentran inicialmente separados, y la combustión se genera por la difusión de estas dos especies desde zonas de mayor concentración a otras de menor concentración. La reacción, que es prácticamente isobárica, se genera en una región relativamente delgada, pudiendo aproximarse para algunos casos como una superficie, utilizando la solución de Burke – Schumann, y si se considera que prácticamente no existe penetración de oxígeno y combustible a través de la zona de reacción, es posible suponer que ésta ocurre cuando combustible y oxidante alcanzan la estequiometría.

Dado que la combinación de las especies de debe a la difusión de éstas, el tiempo característico de mezcla es mayor que el tiempo característico para la reacción química, correspondiente con altos valores del número de Damköhler, que corresponde al cociente entre estos dos valores (18).

La llama de difusión corresponde a uno de los más comunes tipos de llamas existentes. Este tipo de llama es el que caracteriza a la producida por la combustión de material sólido, por lo tanto, es la que corresponde reproducir en este estudio, y puede lograrse por ejemplo, inyectando combustible gaseoso directamente en un ambiente estático, considerando incluso que el combustible atraviesa una superficie circular porosa.

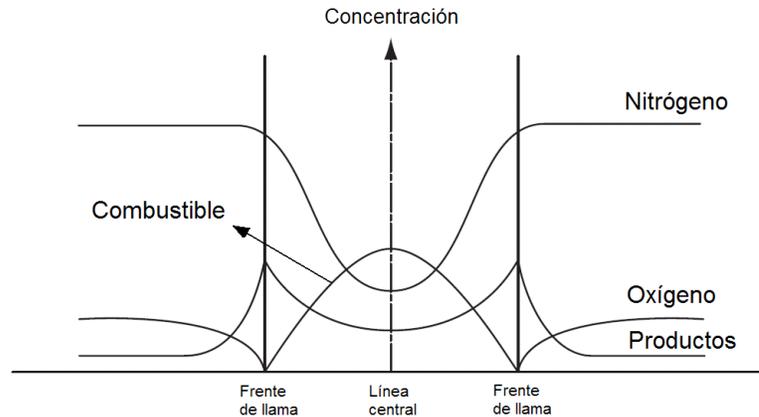


Figura 3.3: Características de la llama de difusión (7).

Este caso da como resultado una estructura alargada y una concentración de especies para una altura fija que tienen la forma de la Figura 3.3.

### 3.3 Altura de llama

La llama visible es donde ocurre la reacción de combustión, y al ser de naturaleza turbulenta la altura de la llama tiende a variar en el tiempo, fluctuando entre valores máximos y mínimos, tal como muestra la Figura 3.4.

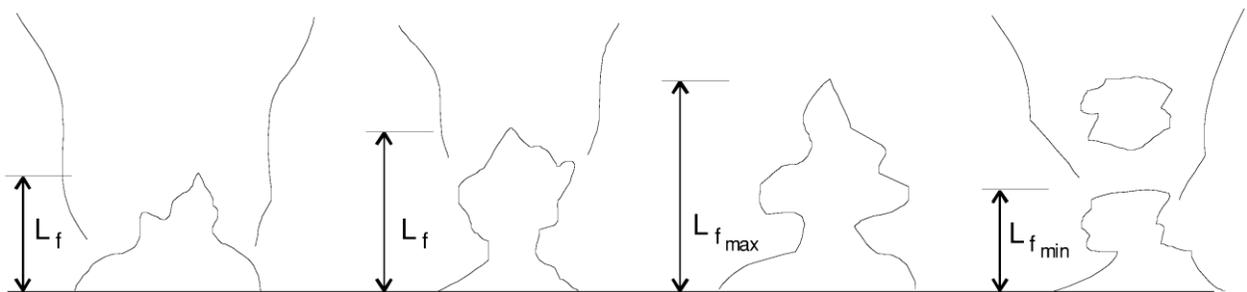


Figura 3.4: Fluctuaciones de la altura de llama (19).

Típicamente se identifican tres zonas para caracterizar la llama de difusión, tal como muestra la Figura 3.5, en donde la primera es la llama continua, que representa la zona en que la llama no

presenta fluctuaciones y la velocidad de los gases es cercana a cero en la base y se incrementa con la altura, luego la segunda que corresponde a la llama intermitente, en donde la llama si presenta fluctuaciones y la velocidad de ascensión de los gases se mantiene relativamente constante, y finalmente la zona de empuje, en donde la velocidad disminuye con la altura (19).

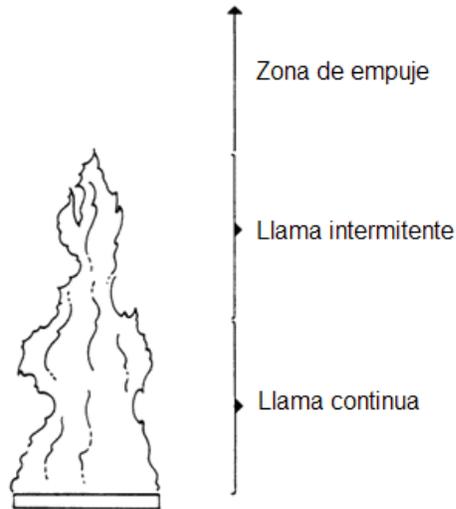


Figura 3.5: Zonas de una llama de difusión (7).

Considerando que la llama presenta esta turbulencia, y la altura varía constantemente con el tiempo, se hace necesario considerar la altura de llama promedio. Para esto se puede promediar la altura medida, pero también se puede hacer mediante el cálculo de la intermitencia. La intermitencia de la llama  $I(z)$  corresponde a la fracción de tiempo en que se detecta llama, como función de la altura  $z$  medida desde la base y a través de la línea central de la fuente térmica.

La intermitencia vale uno en la zona continua, y decrece gradualmente hasta alcanzar un valor de cero en la zona de empuje. Así, es posible tener una definición para la altura de llama experimental, como la altura en donde la intermitencia toma un valor de 0,5 (50%) (20), como se muestra en la Figura 3.6.

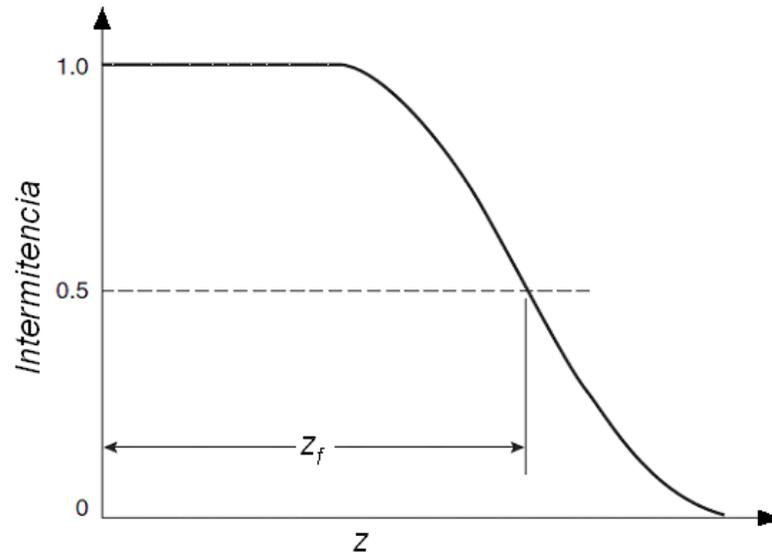


Figura 3.6: Intermitencia en función de la altura (7).

Sin embargo, en otros casos se hace necesario considerar otra definición de la altura media de llama. Por ejemplo se puede calcular la altura media simplemente como la posición promedio de la punta de la llama, a través del procesamiento de la luminosidad de la llama, captada de los registros en vídeo (7).

### 3.4 Temperatura de llama

La temperatura más alta en una llama se da en su línea central, esto debido principalmente a que las fuerzas de empuje producen el ascenso vertical del aire en zonas particularmente calientes en los alrededores de la llama, provocando a su vez la incorporación de masas de aire más frío desde. Para esto es necesario suponer que la llama tiene una geometría axisimétrica, al igual que el desplazamiento de aire. En la Figura 3.7, se puede apreciar por un lado como es la incorporación de aire a la zona de llama (*entrainment*), además de los perfiles de velocidad y temperatura a lo largo de la línea central (7).

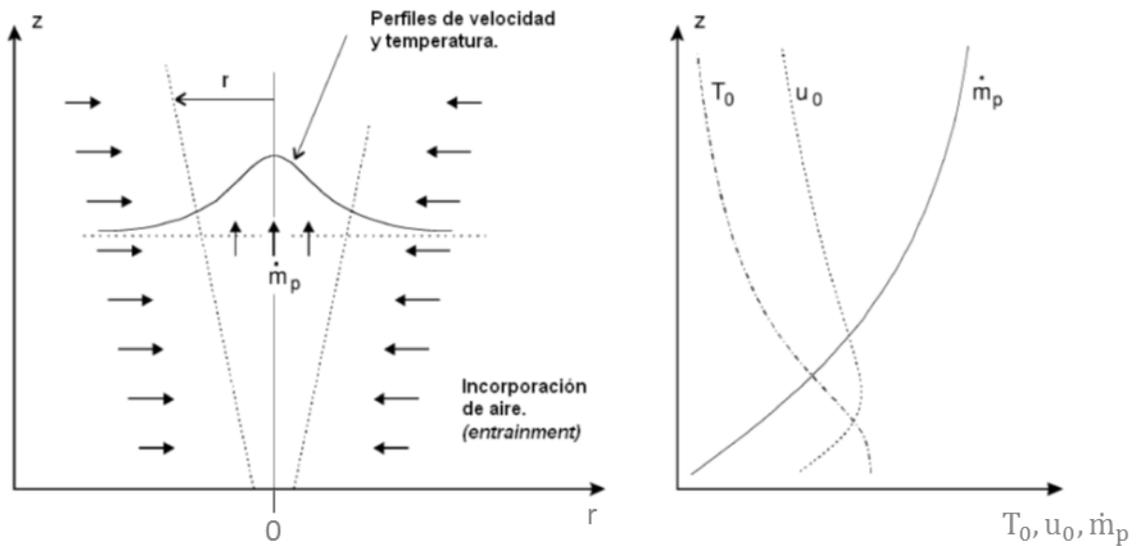


Figura 3.7: Perfiles de temperaturas y velocidad para una llama de difusión (7).

Algunos autores han propuesto correlaciones para esta máxima alza en las temperaturas, siendo uno de ellos el método de penacho ideal, cuya expresión es:

$$\Delta T_0(z) = 5 \cdot \left( \frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \cdot \left( (1 - \chi_r) \dot{Q} \right)^{2/3} \cdot z^{-5/3} \quad (3.1)$$

Sin embargo y como se mostrará más adelante, se usará el método de llama sólida como modelo de radiación para estimar la temperatura que tendrá la estructura de llama, en vez de considerar esta correlación (o alguna otra), para estimar la temperatura de llama, como se realizó en el trabajo de Severino.

### 3.5 Propiedades del etileno

El combustible seleccionado fue el etileno, dado que presenta propiedades que hacen que su combustión sea similar a la combustión de material sólido, debido a la alta producción de hollín que caracteriza al etileno, tal como lo argumenta Severino (7). Algunas propiedades relevantes del etileno se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Propiedades del etileno (7).

Propiedad	Valor
Peso Molecular: $PM_{gas}$ [kmol/kg]	28,054
Poder calorífico inferior: LHV [kJ/kg]	47.158
Densidad (15 °C, 1 atm): $\rho_{gas}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,19
Temperatura de llama adiabática: $T_{ad}$ [K]	2.523
Coefficiente medio absorción: $\kappa_s$ [m <sup>-1</sup> ]	11,92
Fracción volumétrica hollín: $\gamma_s$	$5,55 \cdot 10^{-6}$
Temperatura de emisión: $T_s$ [K]	1.722

Por otro lado, un balance másico de la reacción de combustión estequiométrica, da como resultado una relación de aire combustible  $(A/F)_{st} = 14,68$  [kg<sub>aire</sub>/kg<sub>fuel</sub>].

### 3.6 Radiación emitida por una llama de difusión

Cuando se considera una combustión real, esta no es homogénea, es decir, existen zonas donde puede ser estequiométrica, mientras que en otras puede ser una combustión con exceso de aire y en otras con defecto de aire. Es este último caso de particular interés, considerando que es cuando hay una mezcla rica ( $(A/F) < (A/F)_{st}$ ), en donde se genera el hollín, y a temperaturas elevadas, éste emitirá radiación térmica, particularmente en el rango del amarillo, por lo tanto, en una llama de difusión como la que se considera en este estudio tendrá una llama visible, liberando su energía tanto por mecanismos de convección como de radiación. La porción de energía que es liberada por mecanismos radiativos se caracteriza por el factor  $\chi_r$ , conocido como fracción radiativa.

Según lo reportado por Severino (7), para llamas producidas en régimen convectivo, la fracción radiativa está entre 0,3 y 0,4, y para hidrocarburos simples como el etileno varía entre 0,25 y 0,38, aunque se explica que puede variar entre 0,15 (combustión limpia) hasta 0,6 (alta generación de hollín).

Por otro lado, es necesario estimar la radiación emitida por la llama que incide sobre un receptor puntual, que servirá para las mediciones de la radiación de la llama sometidas a la acción de las cortinas de aire. Para esto se presenta un modelo teórico que se usó para modelar a la llama.

#### Método de llama sólida

Este método fue desarrollado por Dayan y Tien (21), y en este se modela la llama como un cilindro dividido en dos partes, ambos de propiedades uniformes, de radio  $r_f$  y alturas  $H_1$  y  $H_2$ .  $H_1$  (inferior) tiene una altura igual a la del receptor con respecto al suelo del túnel, y  $H_2$  (cilindro superior), representa la porción del cilindro que va desde  $H_1$  hasta la altura de la llama. Con esto es que se obtiene finalmente como resultado la radiación incidente sobre un elemento diferencial  $dA$ , a una distancia  $L$  del cilindro, de vector unitario  $\hat{n} = (n_x, n_y, n_z)$  y que se encuentra a una

altura  $H_1$  desde el suelo. La Figura 3.8 muestra un esquema donde se ilustra el método. Cabe destacar que en este se muestra un solo cilindro, por lo que para este método se deben considerar dos, el superior será análogo al mostrado en la figura, mientras que el inferior será similar, pero el ángulo  $\theta_0$  será igual a  $\pi/2$ .

La radiación incidente sobre el elemento diferencial, tendrá una contribución por cada cilindro, dada por las siguientes expresiones, y luego la radiación total será la suma de ambas contribuciones:

$$\dot{q}_{r1} = \epsilon \sigma T_f^4 (F_1 + F_2 + F_3) \quad (3.2)$$

$$\dot{q}_{r2} = \epsilon \sigma T_f^4 (F'_1 + F'_2 + F'_3) \quad (3.3)$$

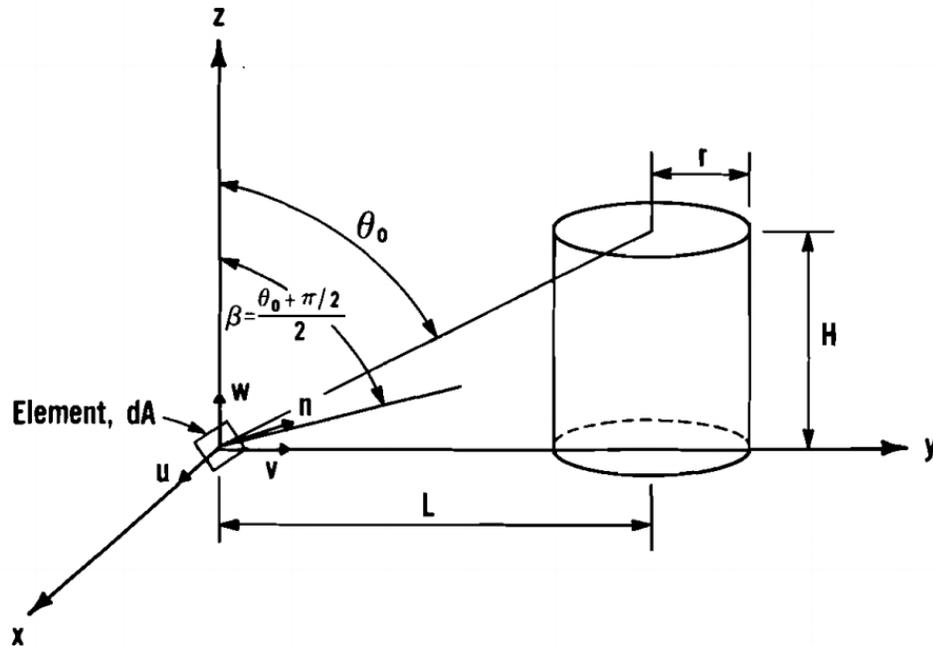


Figura 3.8: Esquema básico del método de llama sólida de Dayan y Tien (21)

En donde  $\epsilon$  es la emisividad,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_f$  la temperatura de llama, y  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  son los factores de forma en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ . La emisividad se calcula como:

$$\epsilon \cong 1 - \exp\left(-0,7 \left(\frac{2r_f \kappa_s}{\sin(\theta_0/2 + \pi/4)}\right)\right) \quad (3.4)$$

En donde  $\kappa_s$  es el factor de absorción del hollín.

Los factores de forma tienen la siguiente expresión:

$$F_1 = \frac{n_x}{4\pi} \left(\frac{r_f}{L}\right)^2 (\pi - 2\theta_0 + \sin(2\theta_0)) \quad (3.5)$$

$$F_2 = \frac{n_y}{2\pi} \left(\frac{r_f}{L}\right)^2 (\pi - 2\theta_0 + \sin(2\theta_0)) \quad (3.6)$$

$$F_3 = \frac{n_y}{\pi} \left(\frac{r_f}{L}\right) \cos^2(\theta_0) \quad (3.7)$$

La diferencia entre las radiaciones emitidas por cada cilindro radica en la distinta posición que tienen respecto al receptor, lo que se ve reflejado en los factores de forma, pero dado que el material se considera homogéneo, las otras constantes son las mismas.

En esta sección no se hace mayor mención sobre la temperatura de la llama, ya que será un parámetro de ajuste para calzar las curvas teóricas y experimentales, y de esta forma tener una medida alternativa para estimar la temperatura de la llama, aunque cabe destacar que esta temperatura corresponde a la temperatura que posee el cilindro, por lo tanto es una temperatura representativa de la superficie, y no de la temperatura máxima que se alcanza al centro de la llama.

### 3.7 Escalamiento térmico

Cuando se trata de reproducir un fenómeno como un incendio real dentro de un túnel a escala, para que los resultados tengan un sentido de representatividad, es necesario poder escalar de forma adecuada las variables claves del fenómeno, por un lado para poder llevar ciertos casos desde el incendio real al modelo, y por otro, para poder llevar los resultados obtenidos en el modelo a la escala real, y darle un sentido físico a éstos. Variables que deben ser escaladas adecuadamente son por ejemplo, la tasa de liberación de calor, la altura de la llama, el tiempo, la temperatura, etc.

Hansen (22) calcula estos factores, en función de la escala geométrica, para relacionar las variables del modelo con la escala real. La técnica para el escalamiento térmico usa como base la teoría de los grupos adimensionales.

Así, en la Tabla 3.2 quedan establecidas estas relaciones para poder escalar los valores desde la escala real hacia el modelo, y viceversa.

Tabla 3.2: Expresiones para el escalamiento térmico (22).

Variable	Valor	
Tasa de liberación de calor [kW]	$\dot{Q}_F = \dot{Q}_M \cdot \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{5/2}$	(3.8)
Velocidad [m/s]	$u_F = u_M \cdot \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{5/2}$	(3.9)

Tiempo [s]	$t_F = t_M \cdot \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^{5/2}$	(3.10)
Energía [kJ]	$E_F = E_M \cdot \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^3 \cdot \frac{LHV_M}{LHV_F}$	(3.11)
Masa [kg]	$m_F = m_M \cdot \left(\frac{L_F}{L_M}\right)^3$	(3.12)
Temperatura [K]	$T_F = T_M$	(3.13)

En las ecuaciones, el subíndice  $F$  representa el valor de la escala real, mientras que  $M$  es el valor para las variables en el modelo. En la tabla, las variables son:

- $LHV$ : poder calorífico inferior.
- $L$ : longitud característica. Entonces la fracción  $L_F/L_M$  será igual a 34/1.

Así, por ejemplo se estima que la combustión de un vehículo pequeño, como un Renault Laguna, libera unos 8,9 [MW] (23). Esto implica que en el laboratorio, para poder estimar la potencia necesaria para representar la combustión de este auto el quemador montado en el túnel de escala 1:34 debiese liberar una potencia de:

$$\dot{Q}_M = \dot{Q}_F \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \quad (3.14)$$

$$\dot{Q}_M = 8,9 \left(\frac{1}{34}\right)^{5/2} = 1,32 \text{ [kW]} \quad (3.15)$$

## 4 Metodología Experimental

### 4.1 Descripción Montaje

En esta sección se describirá el montaje utilizado para la realización de este trabajo, incluyendo en él tanto el túnel vial a escala, como el quemador requerido para la generación de la llama de difusión.

El montaje consta en primer lugar de un modelo de túnel vial, a una escala de 1:34, tal como se muestra en la Figura 3.1.

El túnel a escala consta de una vena de ensayo, de 3 [m] de largo, de sección rectangular de 300 [mm] de ancho por 150 [mm] de alto (Figura 4.1a). El suelo de la vena consta de 5 aberturas equidistantes (Figura 4.1b), permitiendo la instalación de diversas fuentes térmicas.

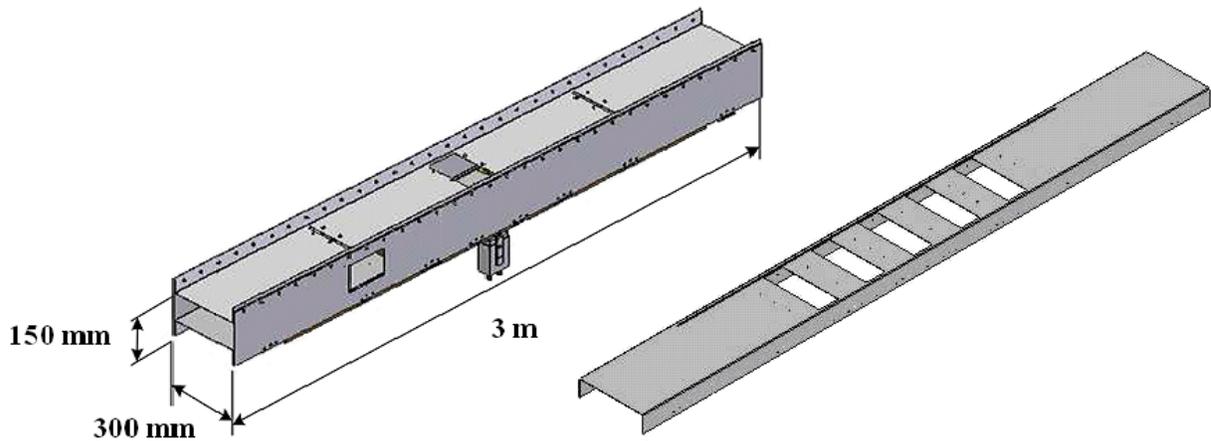


Figura 4.1: a) Vena de ensayo. b) Suelo de la vena de ensayo (7).

Además, el túnel consta de los circuitos de aire frío y caliente para la aplicación de las cortinas de aire DJ – DF, generándose así la celda de confinamiento, como se muestra en las Figura 4.2 y Figura 4.3. El circuito de aire frío capta aire desde el ambiente, mientras que el circuito de aire caliente consiste en un sistema de recirculación de aire desde la celda de confinamiento, como se muestra esquemáticamente y en forma más específica en la Figura 4.3.

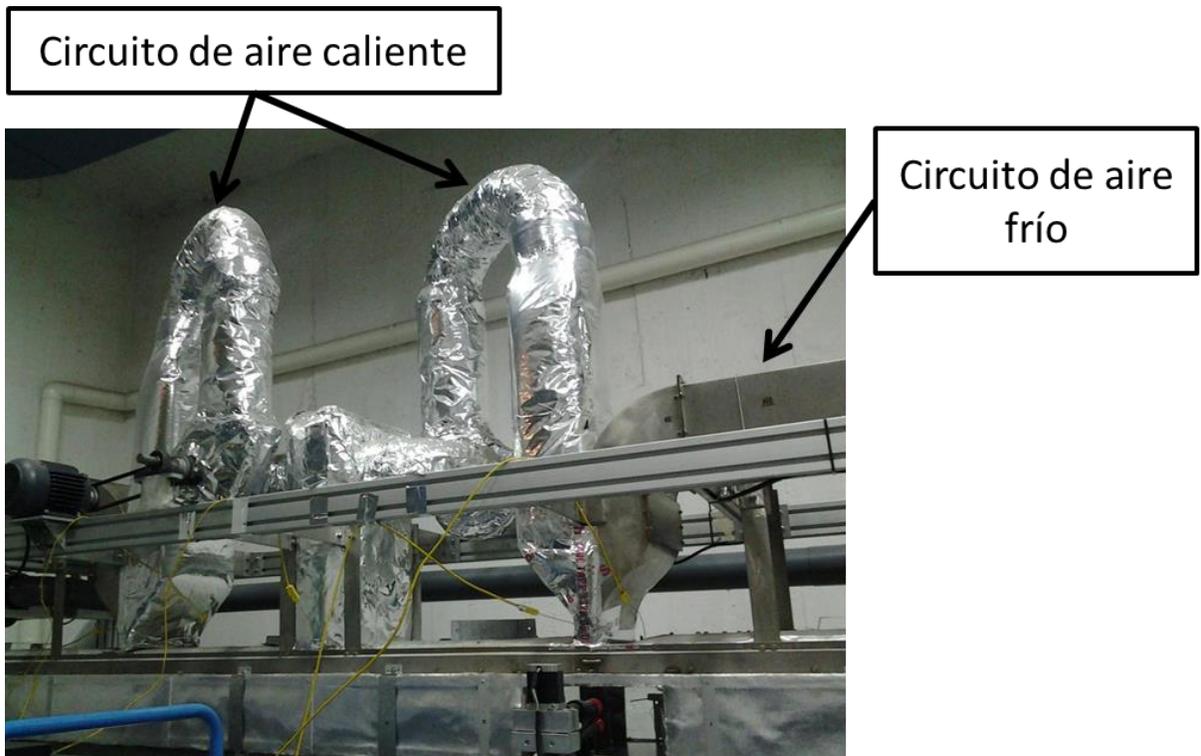


Figura 4.2: Circuitos de aire montaje experimental.

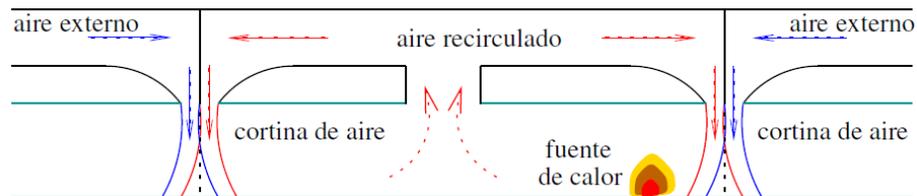


Figura 4.3: esquema de cortinas DJ – DF (7).

Por otra parte, para la generación de la llama se cuenta con un quemador estándar de llama de difusión, diseñado y construido por Severino (4). El quemador está basado en el diseño del quemador McKenna, el cual se modificó para cumplir con los requerimientos del estudio, es decir, la inyección de solamente combustible, sin inyección de gas inerte, para no alterar las mediciones. La Figura 4.4 muestra un plano en corte del diseño del quemador usado, y tal como se muestra, éste está fabricado en aluminio, y consta de una base, dos piezas de sujeción y un disco poroso que permite la homogeneización del flujo de gas.

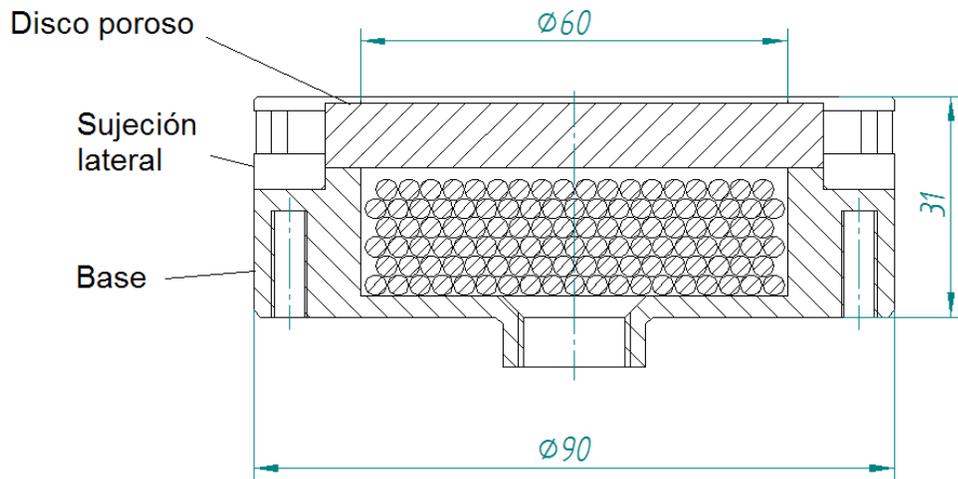


Figura 4.4: Plano del quemador utilizado en el estudio (7).

Además, se completa el diseño con una recámara de gas que está llena de esferas de acero de 6[mm] de diámetro contenidas en una malla de acero, esto con el objetivo de llenar con gas la recámara antes de descargarlo a través del disco poroso y así asegurar la homogeneización del flujo de gas. Por otra parte posee un circuito de refrigeración, y el quemador se conecta con el circuito de gas mediante un adaptador de bronce, y finalmente las distintas partes están selladas con pegamento refractario.

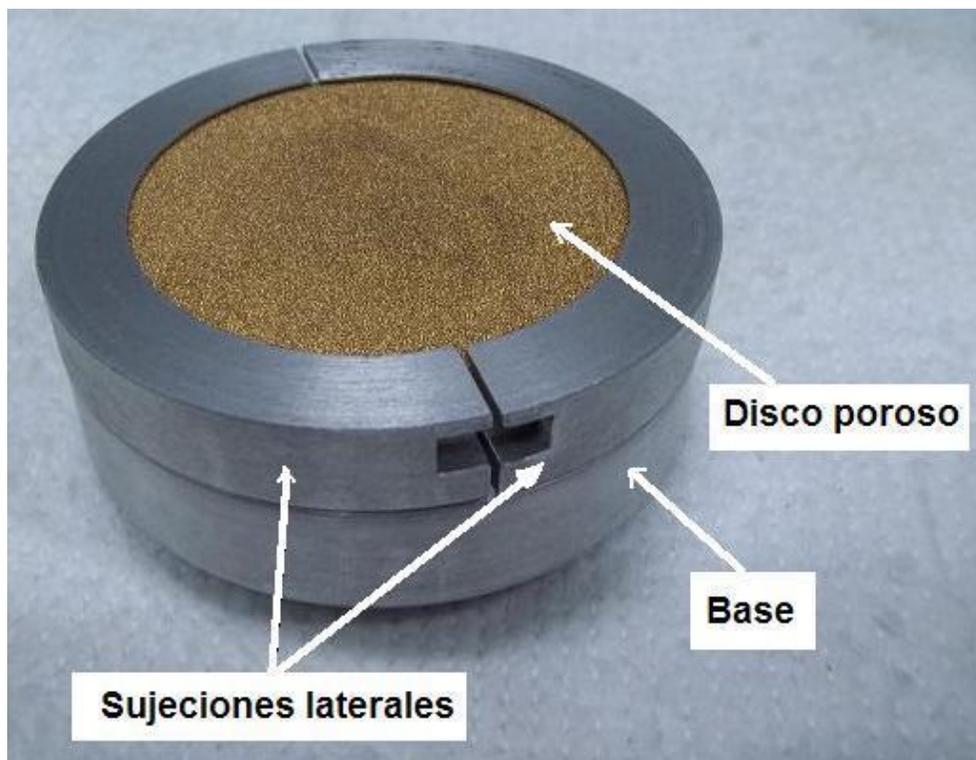


Figura 4.5: Quemador de llama de difusión, previo a su montaje (7)



Figura 4.6: Quemador montado en la superficie del túnel.

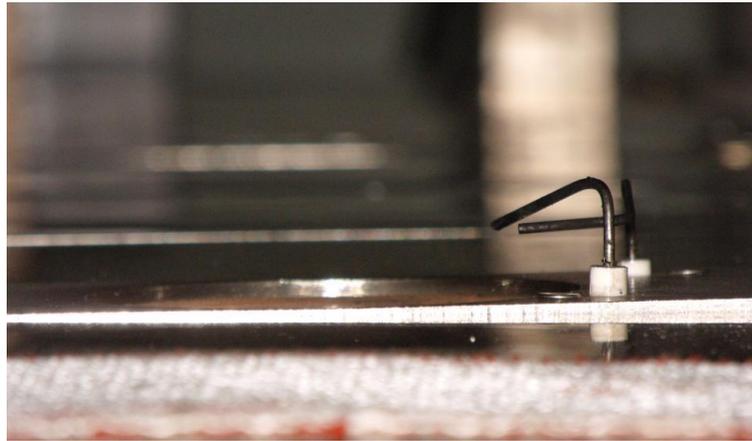


Figura 4.7: Quemador montado en el túnel, poniendo énfasis en el montaje de los electrodos sobre éste.

## 4.2 Medidor de flujo de gas

Para la medición del flujo de gas se tiene a disposición un flujómetro que posee las siguientes características, y el cual se muestra en la Figura 4.8:

- Caudal máximo de 10 L/min.
- Presión máxima de 69 [bar].
- Rango de temperatura entre 0 y 50 [°C].
- Humedad relativa máxima de 70%.

- Precisión del 3% si opera entre el 0 y el 20% de la escala de medición



Figura 4.8: Flujómetro usado en este estudio.

### 4.3 Métodos Medición a utilizar

Las variables a medir son principalmente dos: por una parte la altura de la llama, y por otro la radiación emitida por ésta. Y cada una de éstas tiene un método de medición diferente.

#### 4.3.1 Altura de llama

Para la medición de la altura de llama se utilizó una cámara monocromática, como la mostrada en la Figura 4.9, equipada con un CCD. Esta cámara tiene una resolución máxima de  $1.388 \times 1.038$  píxeles y una tasa de adquisición máxima de 16 cuadros por segundo. Adicionalmente se dotó de la cámara con un filtro pasabanda, cuya curva de transmisividad maximiza la recepción de luz en torno a los 430 [nm], que coincide con la longitud de onda de la llama visible.



Figura 4.9: Cámara *Manta GI45B*, como la utilizada en el estudio (7).

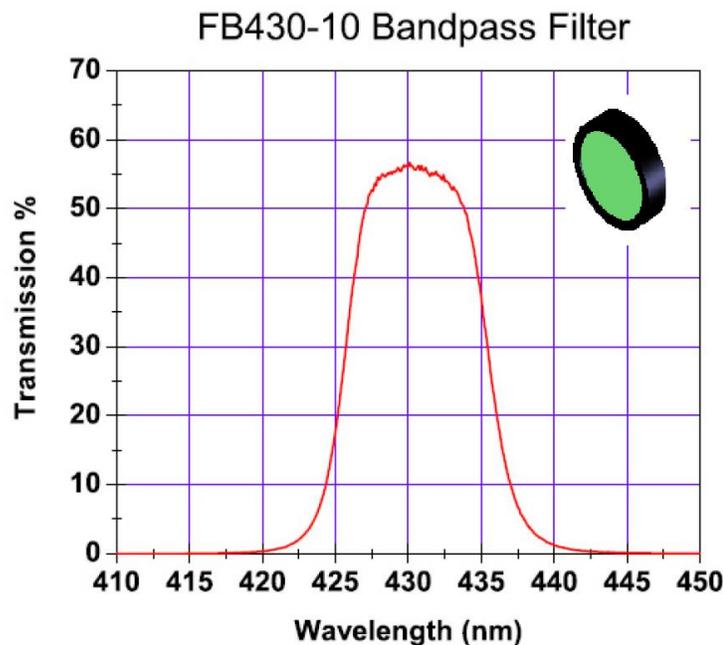


Figura 4.10: curva de transmisividad del filtro pasabanda.

Para realizar las mediciones, la cámara se conecta directamente al computador equipado con una tarjeta tipo GigE, mediante un cable de transmisión de datos (capacidad de transmisión de 1

gigabyte por segundo). La adquisición de los datos se efectúa mediante el programa *AVT Unicam Viewer*, donde se obtienen registros monocromáticos en vídeo (formato AVI).

### 4.3.2 Radiación de la llama

Para la medición de esta variable se utiliza un radiómetro del tipo *Schmidt-Boelter*, sin refrigeración. El radiómetro tiene un hilo, lo que permite acoplarlo a una pieza de aluminio, la que luego se fija a un perfil de aluminio para ajustar la distancia del sensor a la llama, como se muestra en la Figura 4.11.

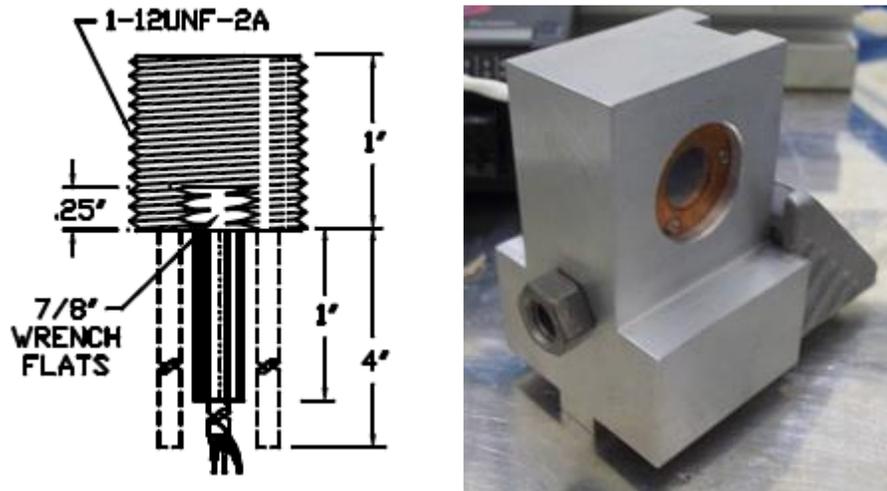


Figura 4.11: radiómetro utilizado en el estudio, incluyendo pieza de aluminio de acople (7).

De acuerdo a las especificaciones del fabricante, el sensor obtiene registros para un rango entre 0 y 0,2 Btu/ft<sup>2</sup>s. El flujo de calor incidente sobre el sensor genera un gradiente de temperaturas sobre el cuerpo del sensor, que es medido por un conjunto de termocuplas en serie, conocido como termopila. Este gradiente entrega finalmente un voltaje, el cual es proporcional al flujo de calor incidente, y la constante de proporcionalidad corresponde a 260,1 [W/m<sup>2</sup>V] (0,2601 [kW/m<sup>2</sup>V]), tal como consta en el certificado de calibración que se muestra en la Figura 4.12

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

DATE 2/3/11  
 CUSTOMER Univ. of Santa María  
CHILE  
 P.O. NO. 130/2010  
 CERTIFICATE NO. 16948-1  
 MODEL NO. 64-0.2-15/SW-2C-150

SERIAL NO. 169481  
 SENSOR TYPE Schmidt-Boelter  
 ABSORPTANCE 0.94  
 WINDOW Sapphire, 150°VA  
 REFERENCE STANDARD 587025A2  
 CALIBRATED BY 13

**CALIBRATION RESULTS SUMMARY:**  
 FULL SCALE OUTPUT LEVEL:  
7.69 mV at 2 kW/m<sup>2</sup>  
 RESPONSIVITY:  
3.845 mV per (kW/m<sup>2</sup>), or  
 the inverse: 0.2601 kW/m<sup>2</sup> per mV  
 Water: 10.5 °C 12 mL/s

**UNLESS NOTED, CALIBRATION CONDITIONS:**  
 Non-condensing Ambient Air at 23 ±3 °C  
 Relative Humidity Less Than 70%  
 Expanded uncertainty ±3% of responsivity.  
 Coverage factor k=2, ~95% confidence level.  
 Test uncertainty ratio (TUR) is less than 4:1.

Calibration was performed in compliance with ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540-1 and MIL-STD-45662A to MEDTHERM PI-20 with traceability to the National Institute of Standards and Technology.

This certificate applies only to the item described above. It is not to be reproduced, except in its entirety, without written permission from MEDTHERM Corporation.

ATTEST: *Samy Jones*  
 QA Manager / President

**MEDTHERM CORPORATION**

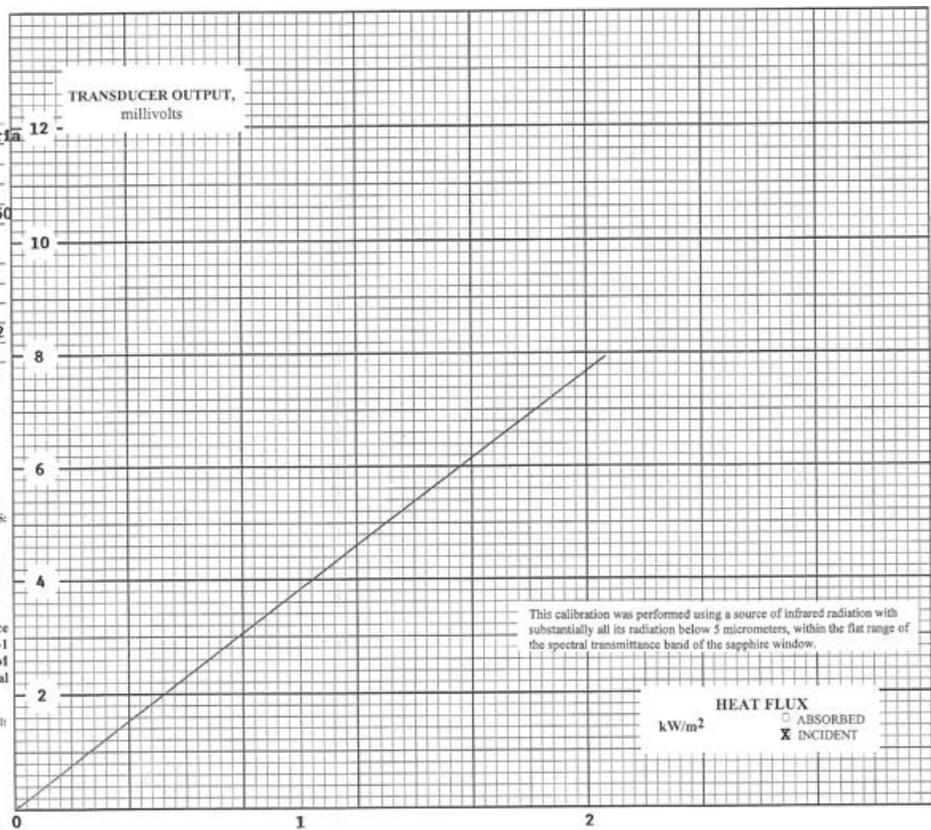


Figura 4.12: Certificado calibración radiómetro (7).

#### 4.4 Metodología de trabajo

En este capítulo se mostrará la metodología seguida para la realización de las mediciones, y así poder medir las variables necesarias para cumplir con los objetivos planteados.

A grandes rasgos, se busca medir la radiación y la altura media de la llama bajo diversos escenarios, caracterizados por una combinación entre caudal de gas (o tasa de calor liberado), y velocidades impuestas en las cortinas.

Por una parte se midió en forma paralela la altura de la llama y la radiación, para cada configuración considerada, y por otro lado, la altura en función de la tasa de liberación de calor.

Cabe destacar que se escogió utilizar dos caudales distintos de gas, 0,58 [l/min] y 0,74 [l/min]. El primer valor equivale a unos 3,6 [MW] en la escala real, lo que equivale a la potencia liberada por un *Fiat 127*, bajo ciertas condiciones de acuerdo a Ingason (23), mientras que el segundo corresponde al valor más alto escogido por Severino en su estudio, que coincide con que si se usase un valor mayor para el caudal de gas, la llama comienza a propagarse por el techo del túnel, haciendo imposible obtener una medición para la altura de la llama para el método de medición usado; por otro lado este flujo de gas equivale a 4,6 [MW], coincidiendo con la combustión de un auto *Citröen BX* (23).

Para cada caudal de gas se definió un total de 10 configuraciones de las cortinas de aire, pero en la práctica se escogieron 5 pares de velocidades (baja – alta), en donde para una configuración se definió al jet caliente como el rápido y el frío como el jet de velocidad más lenta, mientras que para otra configuración se realizó a la inversa; así es posible comprobar cuál de los dos casos es el que entrega mejores características de confinamiento, si el jet rápido frío o el caliente.

Luego, como primera configuración se decide usar la más efectiva en términos de confinamiento de Castro (17), que consiste en 5,15 [m/s] para el jet frío, y 3,65 [m/s] para el jet caliente. A partir de aquí y para asegurar el correcto funcionamiento de las cortinas se decide aumentar las velocidades de los chorros de aire pero manteniendo la misma relación entre las dos velocidades (1,41 aproximadamente).

Con lo recientemente expuesto se definió entonces el esquema de mediciones de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Esquema de mediciones realizadas.

Medición	Caudal de gas [l/min]	Velocidad jet frío [m/s]	Velocidad jet caliente [m/s]
1	0,58	3,65	5,15
2	0,58	4,25	6
3	0,58	5,67	8
4	0,58	7,09	10
5	0,58	8,5	12
6	0,58	5,15	3,65
7	0,58	6	4,25
8	0,58	8	5,67
9	0,58	10	7,09
10	0,58	12	8,5
11	0,74	3,65	5,15
12	0,74	4,25	6
13	0,74	5,67	8
14	0,74	7,09	10
15	0,74	8,5	12
16	0,74	5,15	3,65
17	0,74	6	4,25
18	0,74	8	5,67
19	0,74	10	7,09
20	0,74	12	8,5

#### 4.4.1 Altura de la llama en función de la velocidad de las cortinas

En primer lugar, se realizaba el protocolo de encendido, definido por Severino (7), y una vez fijado cada caudal, se configuraban las velocidades de las cortinas de acuerdo a las establecidas en la Tabla 4.1, pero sin encenderlas aún. Se comienza el registro de la altura de llama, y a los 10 segundos de registro, se encienden las cortinas y se continúa midiendo la alturas hasta completar el minuto, con el objetivo de visualizar la transición entre la situación sin cortinas y con cortinas,

abarcando de forma completa esta transición, gracias a observaciones realizadas durante una fase de pruebas previa a la realización de las mediciones.

Posteriormente se realizaba las mediciones de la radiación, y una vez concluidas éstas se medía por última vez la altura de llama durante 30 segundos, para obtener la altura media de llama.

Se realizó, para las configuraciones 5 y 15, adicionalmente a lo anterior un registro de tres minutos (lo más largo que permitió el software), siguiendo el mismo procedimiento anterior, es decir comenzando con las cortinas apagadas y encendiéndolas a los 10 segundos, para seguir grabando hasta completar los tres minutos. Los resultados de esta medición se detallarán más adelante, sin embargo se puede mencionar que finalmente la llama no se extingue para las configuraciones usadas, y que la llama se estabiliza en torno a una altura promedio.

Estos archivos de video fueron procesados mediante el software *Matlab*, en donde se separó el video en su secuencia de cuadros (o imágenes), y luego cada una de esas imágenes fue convertida en una matriz de dimensiones iguales al cuadro (562 x 365 pixeles), en donde cada valor de la matriz representa la luminosidad de aquel pixel.

#### **4.4.2 Radiación de la llama**

Esta medición se realizó después de la primera parte del registro de la altura de llama, tal como se mencionó anteriormente. Para cada una de las 20 mediciones definidas, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se registró durante 30 segundos la radiación emitida desde la llama, a una distancia de 25 [cm].
2. Se desplazó consecutivamente el radiómetro cada 4 [cm] en dirección contraria a la fuente (alejándose), y se tomó nuevamente el registro de la radiación emitida por la llama. Este procedimiento se repitió hasta completar 10 puntos de medición.
3. Una vez finalizada la secuencia completa, se continuó con la segunda parte de la altura de llama.

Con esto, para cada medición se obtuvieron 10 series de datos, una por cada punto definido anteriormente, las cuales están expresadas en voltaje. Para obtener un solo valor en  $[\text{kW}/\text{m}^2]$ , se promedian los datos para cada punto, y se multiplica por el factor de conversión de 260,1  $[\text{kW}/\text{m}^2\text{V}]$ . Gracias a una rutina programada en *Matlab*, el procesamiento de los datos se hace más expedito, al leer de forma automática los archivos con los datos obtenidos, promediarlos y multiplicarlos por la constante de proporcionalidad.

#### **4.4.3 Altura de llama en función de la liberación de calor**

Esta medición se realizó en forma totalmente independiente a las mediciones previas. Primero se definió que los caudales de calor a imponer serían entre los 0,54 a los 0,74 [l/min] con incrementos de 0,04 [l/min] entre cada caudal, dando cinco puntos de medición. Este rango se

obtuvo al considerar los incrementos usados por Severino (7) en su trabajo, que se consideraron razonables dada la sensibilidad de la válvula aguja del flujómetro, y los valores máximos y mínimos usados responden al hecho de tomar el caudal más alto usado en este estudio y a la decisión de tener cinco caudales distintos para construir la curva de altura de llama versus la tasa de liberación de calor.

Para realizar las mediciones se realizó primero el protocolo de encendido según Severino (7), fijando el caudal en 0,54 [l/min], luego se registró la altura de llama durante 30 segundos para obtener su altura media. Luego incrementó el caudal en 0,04 [l/min] para realizar la siguiente medición, hasta alcanzar los 0,74 [l/min].

Los datos posteriormente fueron procesados de forma análoga que para la altura de llama en función de las cortinas (Sección 4.4.1)

## 5 Discusión de Resultados

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo; junto con esto se realizará la discusión pertinente, para contrastar los resultados obtenidos con la bibliografía existente.

Antes de continuar con la discusión de los resultados, es importante realizar algunos comentarios respecto al uso de las cortinas y al confinamiento.

Se tenía de trabajos previos que el uso de cortinas generaba gradientes de temperatura y de velocidad a través de estas, por lo que se tenían indicaciones del potencial de las cortinas para controlar incendios. Sin embargo y debido a que los trabajos anteriores se concentraban usando una resistencia eléctrica como fuente térmica, se hace necesario incorporar mayores antecedentes para asociar el uso de las cortinas con un menor grado de reacción en la combustión al interior de la celda de confinamiento.

Para esto se tiene el trabajo realizado por Yuan (24), en donde se midió y estimó de forma paralela la razón de riqueza, la eficiencia en la combustión y la tasa de liberación de calor, en un pool fire encerrado en un compartimiento sub ventilado. Los resultados mostraron que en la medida que transcurría el tiempo, la tasa de riqueza crecía (la concentración de oxígeno disminuía, Figura 5.1), al tiempo que la eficiencia en la combustión disminuía, al igual que la tasa de liberación de calor (Figura 5.2). Por lo tanto, se tiene que hay una directa relación entre la tasa de liberación de calor y la eficiencia en la combustión, con el agotamiento del oxígeno en el compartimiento.

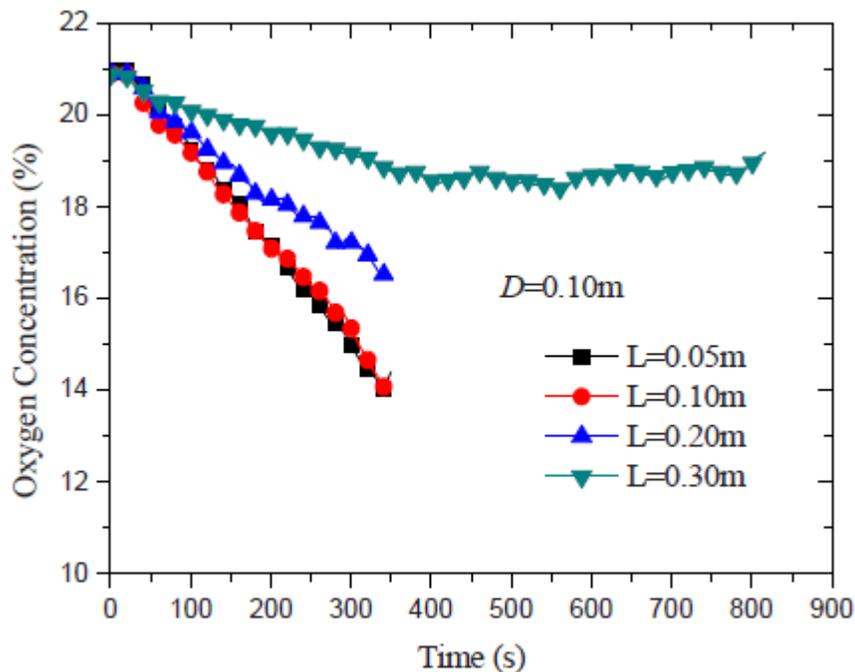


Figura 5.1: Evolución de la concentración de oxígeno en el tiempo, durante una combustión en un compartimiento sub ventilado (24).

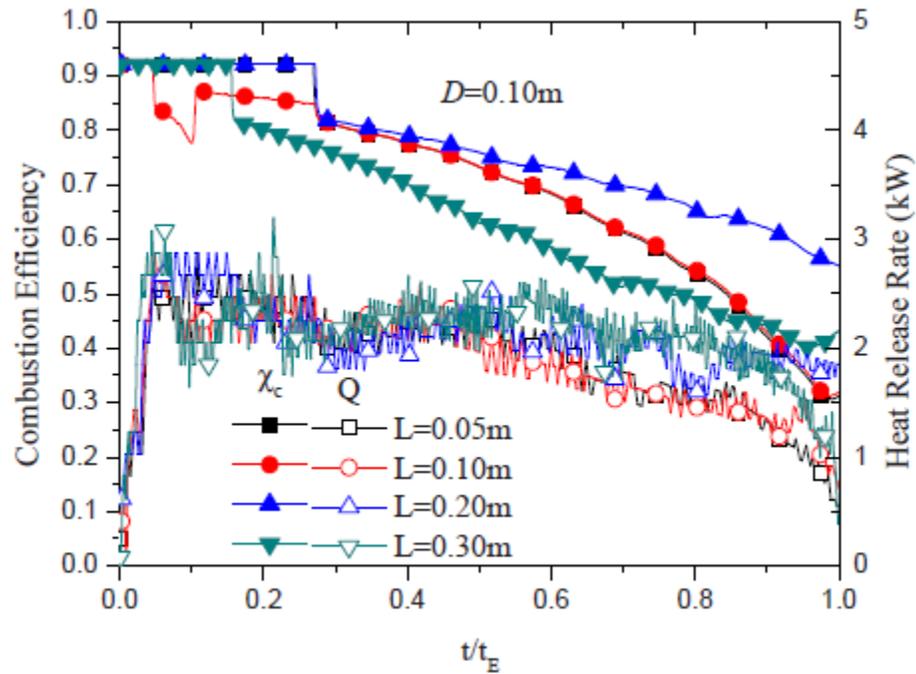


Figura 5.2: Evolución en el tiempo de eficiencia de combustión y la tasa de liberación de calor para una combustión en un compartimento sub ventilado (24).

### 5.1 Radiación de la llama

Se realizaron las mediciones de la radiación de acuerdo al procedimiento definido en la sección anterior. Una vez obtenidos los datos y procesados en *Matlab*, se obtuvo la radiación en cada punto, con lo cual se obtuvieron las Figura 5.3 y Figura 5.4, con lo cual se puede comparar como decaen las curvas de radiación en la medida que se incrementan las velocidades de las cortinas. Los resultados se grafican en función de la distancia normalizada  $L/r_f$ , en donde  $L$  es la distancia a la fuente térmica (el quemador), y  $r_f$  es el radio de la fuente, entonces se puede interpretar la como la cantidad de radios que separan a la llama del receptor.

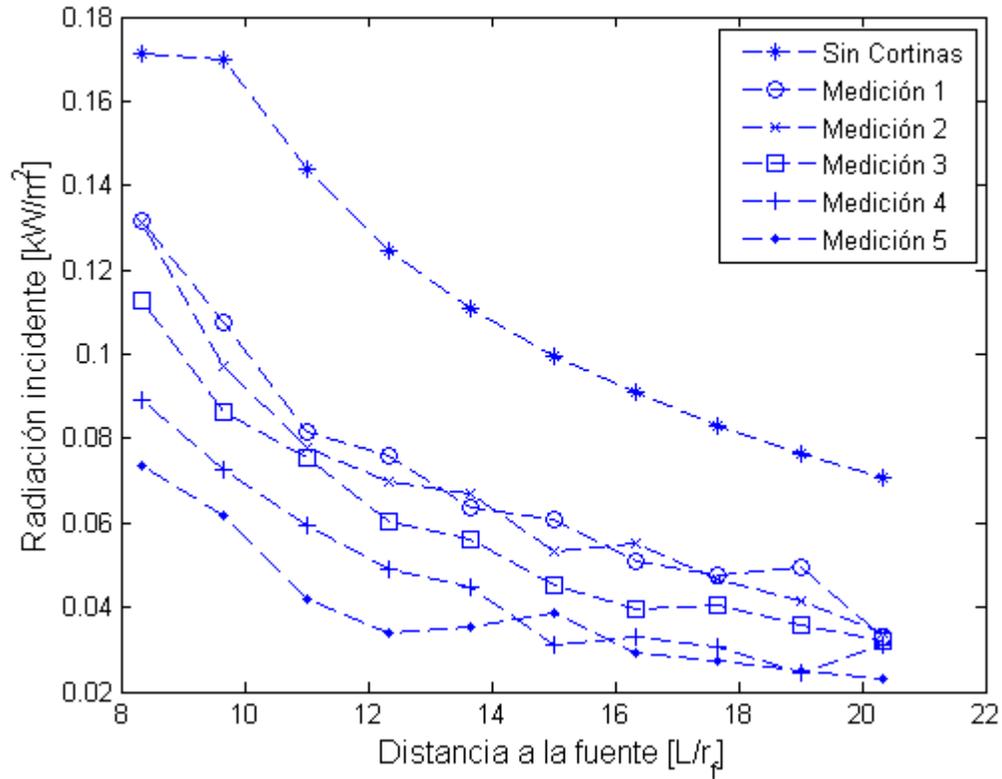


Figura 5.3: radiación en función de la distancia, mediciones 1 – 5.

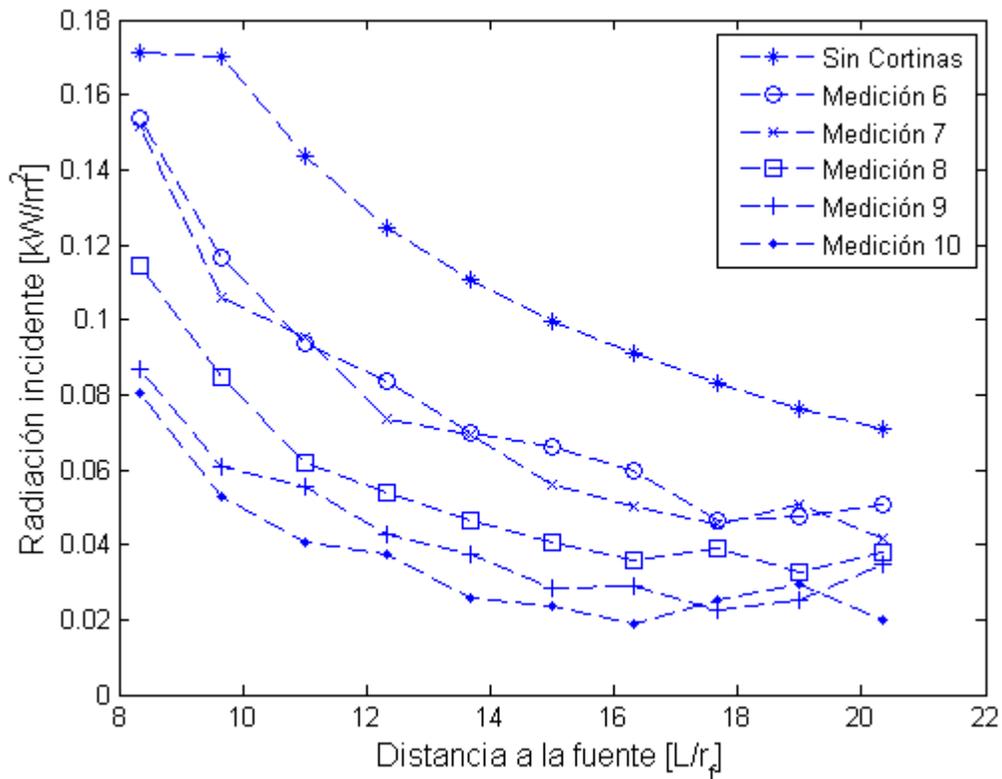


Figura 5.4: Radiación en función de la distancia, mediciones 6 – 10.

En segundo lugar, para cada medición se obtuvo un valor promedio, obteniéndose un valor único para tener un gráfico de la radiación de cada medición versus la velocidad media de las cortinas, y así visualizar como afecta a la radiación de la llama la presencia de éstas.

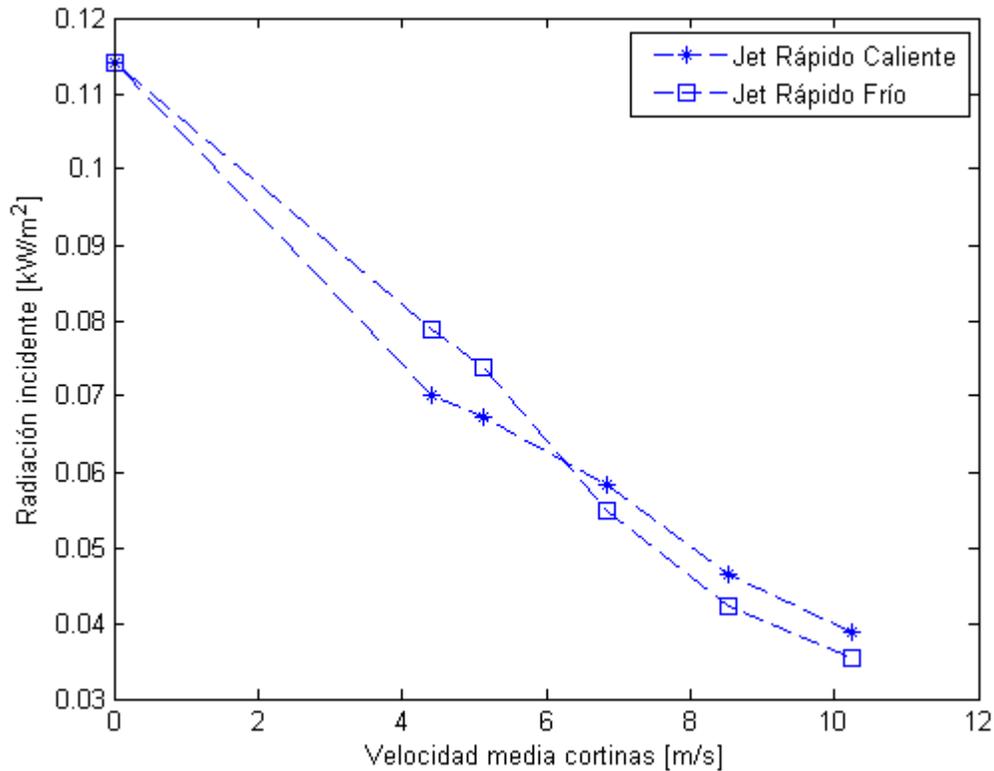


Figura 5.5: Radiación promedio en función de la velocidad media de las cortinas.

En la Figura 5.5, se puede apreciar que existe una relación directa entre la radiación incidente promedio para cada medición (Tabla 4.1), con la velocidad promedio de las cortinas de aire, en particular la radiación generada por la llama decrece. Las figuras correspondientes a las mediciones 11 – 20 (Caudal de gas de 0,74 [l/min]), se encuentran en el Anexo A.

Según el trabajo de Yuan (24), cuando en un compartimento semi cerrado se quema una cierta cantidad de combustible (pool fire), la cual es un caso típico de llama de difusión, debido al confinamiento se observa que a medida que avanza el tiempo la combustión pasa rápidamente a ser combustión rica (déficit de aire), y su condición empeora continuamente, y junto con esto la eficiencia de la combustión, al tiempo que la tasa de liberación de calor disminuye. Es decir, se tiene que una disminución en la tasa de liberación de calor de una llama de difusión se puede asociar al efecto de un agotamiento en la cantidad de aire que reacciona con el combustible, ya que una combustión incompleta implica una menor cantidad de calor liberado, por lo tanto en este caso es posible asociar la disminución en la radiación con un mayor confinamiento de las cortinas DJ – DF.

## Curva Teórica

Usando el método de la llama sólida, se puede obtener una curva teórica de la radiación generada por la llama, incidente sobre un receptor puntual, en este caso el sensor, en función de la distancia del sensor a la fuente. Para esto se requieren de varios datos, como la altura de la llama, el radio, la temperatura de la llama, entre otros. En el trabajo de Severino (7) se usaron modelos para estimar la temperatura de llama y así obtener la curva, en cambio en este caso se optó buscar la temperatura que haga que se ajuste la curva de mejor manera a los datos experimentales, así obteniendo una estimación de la temperatura de la llama. Para esto se realiza el modelo de llama sólida, dejando la radiación incidente en función de  $T_f$  (temperatura de la llama), y luego resolviendo el problema de minimización del error cuadrático medio entre los datos experimentales y los teóricos en función de  $T_f$ , y con esto se obtiene la temperatura que mejor ajusta las curvas, que será una temperatura representativa de la llama modelada como cilindro, en lugar de la temperatura de emisión del hollín, que es la que en estricto rigor debiese ser. De esta forma además fue posible ver si es que los cambios observados pueden responder más a una disminución de la temperatura, o bien a una disminución de la altura (estos últimos resultados se discuten en la sección siguiente).

Para el caso sin cortinas, se muestra la Figura 5.6, en donde se pueden apreciar como resultan las 2 curvas ajustadas.

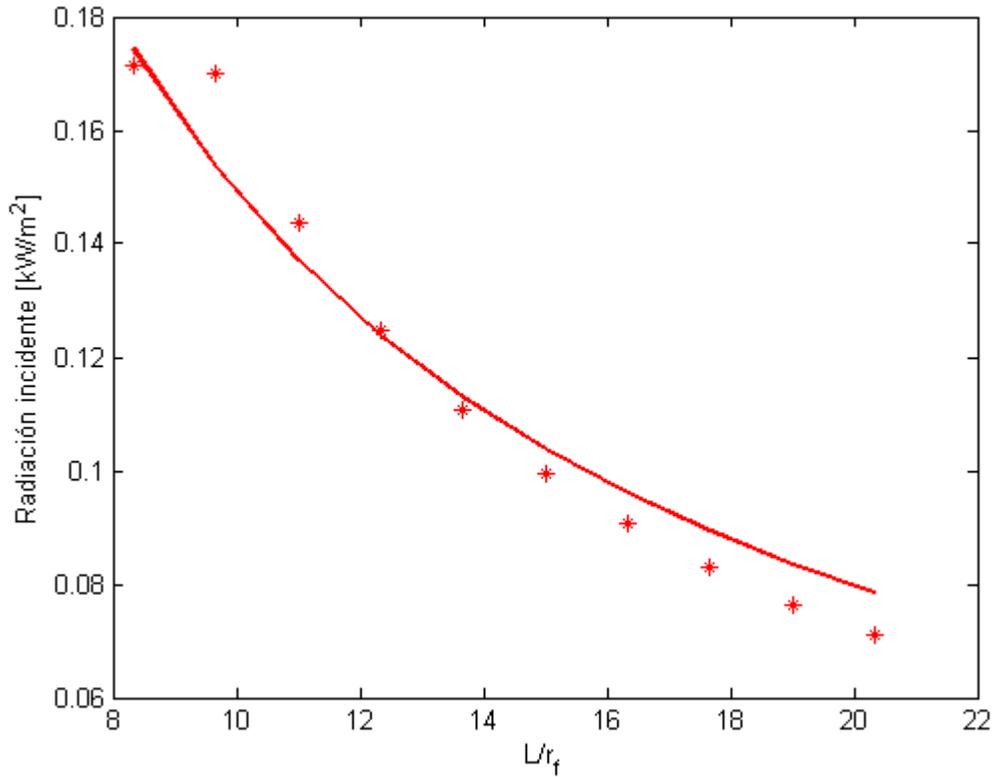


Figura 5.6: Curvas teórica y experimental para la radiación generada por la llama, caso sin cortinas.

Para este caso, el resultado de la minimización indica que la temperatura que mejor ajusta las curvas es de 548,3 [K], que se podría tomar como la temperatura representativa de la llama. Esta temperatura, sin embargo, es la temperatura del cilindro que se considera en el modelo de llama sólida, por lo tanto se podría asumir que este resultado es un promedio de la temperatura del manto de la llama. Las curvas para todos los resultados se encuentran en el Anexo A, y en la Figura 5.7 se muestra como varía esta estimación de la temperatura con la velocidad de las cortinas.

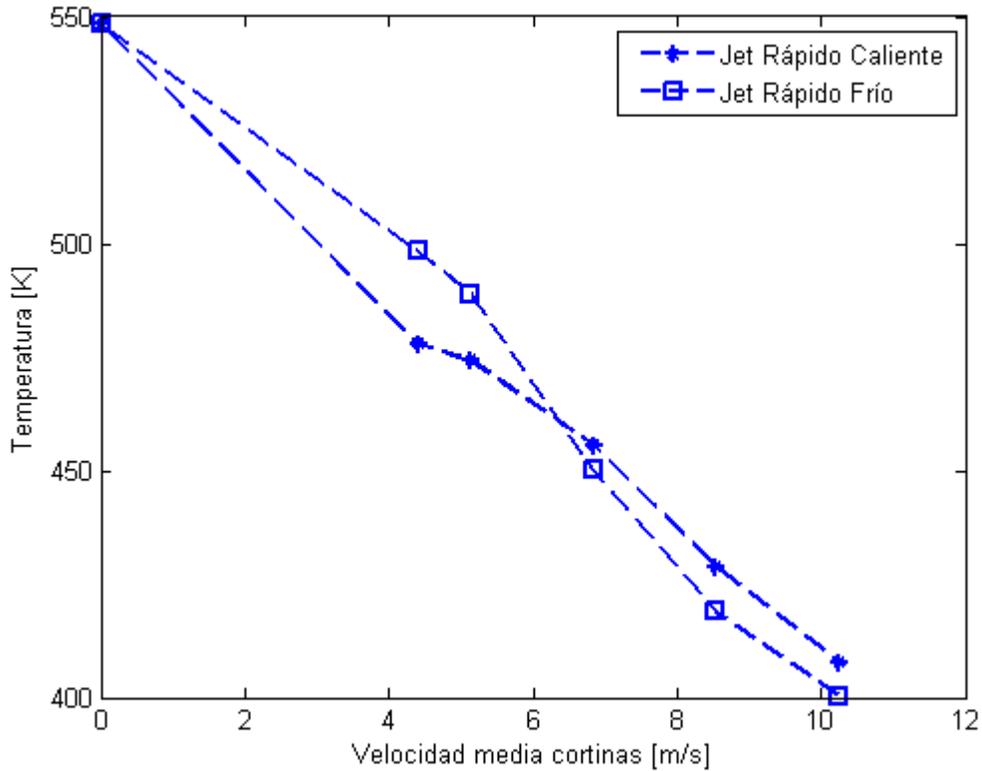


Figura 5.7: Temperatura representativa de la llama.

El modelo de llama sólida incorpora tanto la temperatura del cilindro usado como la altura de la llama, esto implica que entre una medición y otra podría suceder que la disminución en la radiación se debiera únicamente a la disminución en la altura de la llama, sin embargo, se comprueba que la disminución de la radiación medida se debe tanto a una altura de llama menor como a una disminución de la temperatura de la llama. Por lo tanto, y dado que la temperatura más alta se alcanza cuando se tiene una reacción estequiométrica (temperatura adiabática de llama), y tiende a disminuir en la medida que la relación aire – combustible se aleja de este óptimo, es factible considerar entonces que la presencia de las cortinas produce una combustión más incompleta, que ésta se hace más ineficiente.

## 5.2 Altura de la llama en función de la velocidad media de las cortinas

Se realizaron las mediciones para comprobar el efecto de las cortinas de aire sobre la llama de difusión, de acuerdo al procedimiento establecido en la sección 4.4.1. Una vez obtenidos los archivos de video, mediante el software *Matlab* se procesaron para obtener, en primer lugar el video de la primera parte de la medición, y en segundo lugar la altura media de llama.

Como se indicó anteriormente, la rutina en *Matlab* separa cada video en su set de cuadros, y posteriormente cada cuadro fue convertido en una matriz, de dimensiones iguales a las del cuadro (562 x 352 pixeles), en donde sus valores representan la luminosidad en la escala monocromática

(valores numéricos en el rango 0 – 255) de cada pixel. En la Figura 5.8, se aprecian 2 cuadros obtenidos del video para la medición sin cortinas, caudal de 0,58 [l/min]

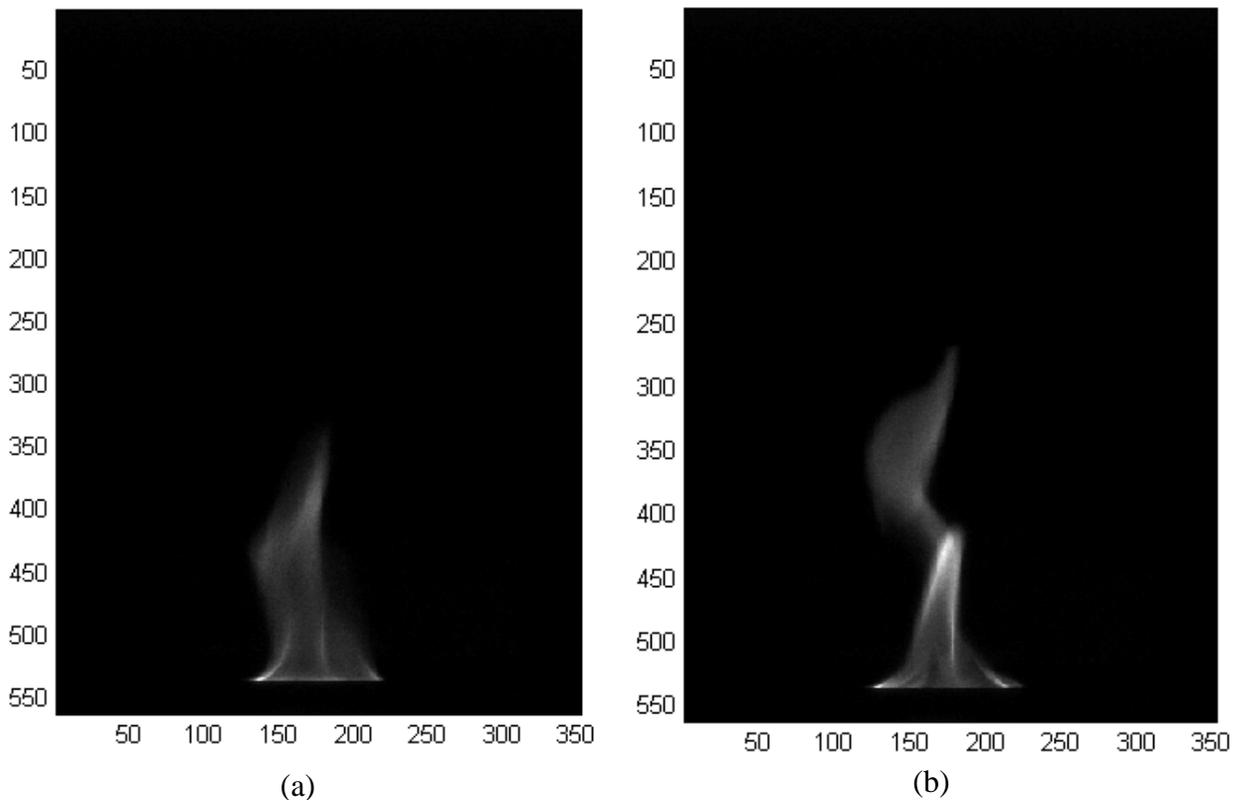


Figura 5.8: (a) Medición sin cortinas, cuadro 50. (b) cuadro 200.

Luego, para el cálculo de la altura media de la llama, se consideraron dos métodos distintos: por un lado se replicó el método usado en el trabajo de Severino (4), y por otro lado se desarrolló un método propio.

#### **Método de Severino (7)**

El método de Severino (7) consiste básicamente en encontrar el punto más alto (en el eje  $y$ ) de la llama para cada cuadro, y posteriormente promediar esta altura instantánea para obtener la altura promedio. Además este procedimiento permite graficar la evolución de la altura de llama en el tiempo, especialmente para poder ver el efecto que existe sobre la llama al encender las cortinas. Sin embargo, para esto es necesario definir un valor umbral expresado a través de un valor de luminosidad que permite discriminar la imagen (llama) del fondo (el túnel) y dado que no existe un método para encontrar un buen valor de umbral, Severino resuelve esto promediando la altura de llama para un rango de valores definido, para no sobre o sub estimar la altura de la llama.

#### **Método propio**

Este método es similar al de Severino (7), sin embargo la diferencia radica en encontrar un método para estimar un valor de luminosidad umbral que permita realizar una buena estimación de la altura de llama. Este método se basa en ciertos conceptos expresados por Weszka (25) y

Ridler (26). Este se basa en el análisis del histograma de la imagen; los cuadros de los videos están en la escala monocromática, y más aún, son prácticamente imágenes en blanco y negro, por lo tanto y de acuerdo a los trabajos mencionados, es posible asumir que las imágenes son bimodales, es decir, existen dos niveles de luminosidad característicos: uno representativo del fondo (negro), y otro representativo de la figura o llama (blanco). Una muestra de ello es la Figura 5.9, en donde se aprecia el histograma en forma general, mientras que en la Figura 5.10 se muestra un acercamiento o “zoom” a este mismo histograma, para la zona alrededor de un valor de luminosidad de 20, y así reconocer de mejor manera el nivel de luminosidad característico de la llama.

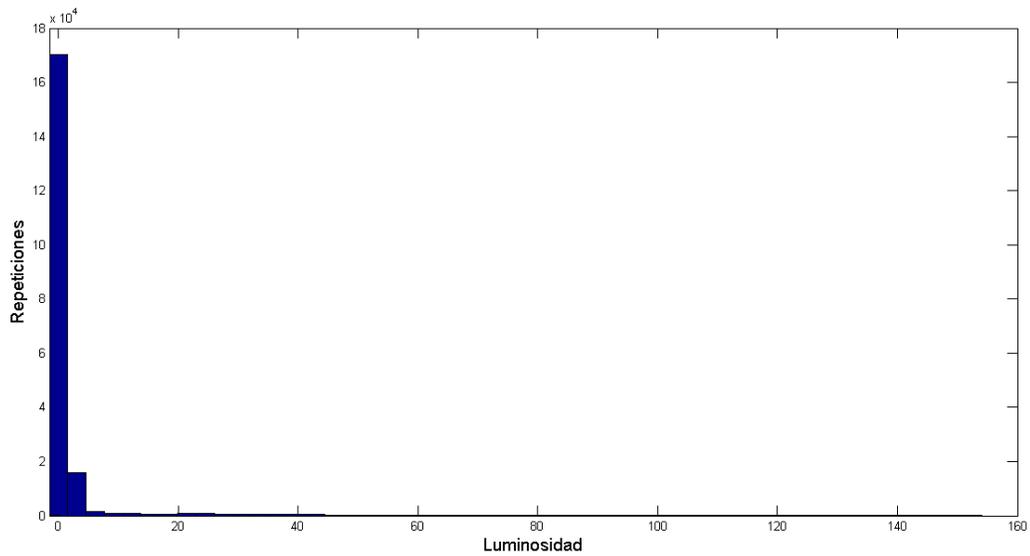


Figura 5.9: Histograma del cuadro n° 100, para la medición sin cortinas.

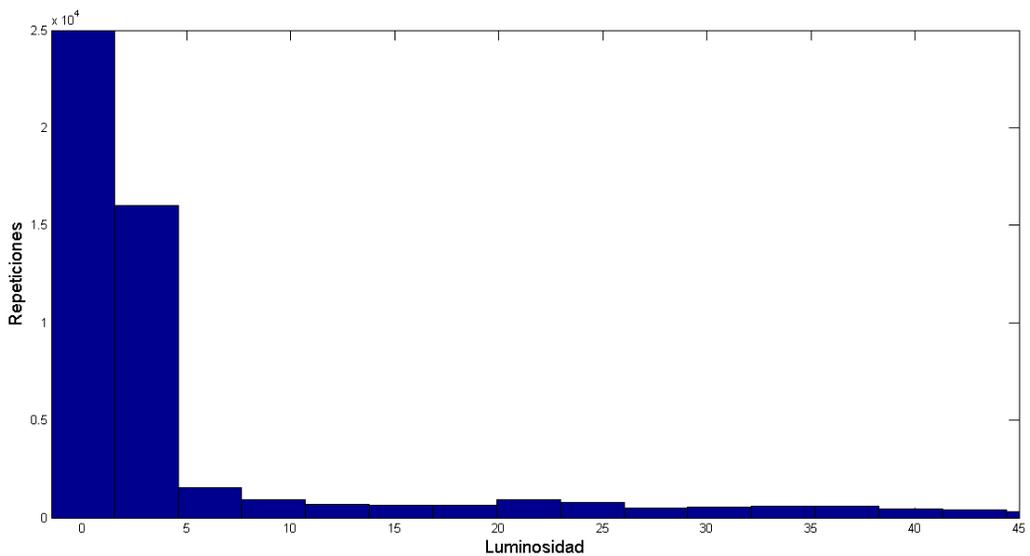


Figura 5.10: Acercamiento al histograma del cuadro n° 100, de la medición sin cortinas.

En la Figura 5.10, es posible apreciar este supuesto de que el histograma es bimodal, estando un peak marcadamente alrededor del cero (negro), representativo del fondo, mientras que el otro peak no es tan marcado pero se destaca del resto, estando para este cuadro en particular en un nivel de luminosidad igual a 20, quedando este nivel como la luminosidad representativa de la figura o llama en este caso, el cual será entonces seleccionado como umbral (entendido de igual manera que según Severino).

Luego, y gracias a una rutina de *Matlab*, se procesa un video a la vez (o sea una medición a la vez), en donde se analiza el histograma para cada uno de los cuadros obtenidos, obteniéndose un valor umbral por cada cuadro, para luego promediarlos, obteniéndose un valor umbral que separa la llama de su fondo, y es característico para cada video o medición. Con esto, se realiza un procedimiento análogo al realizado por Severino pero para un umbral único para obtener la altura de la llama, tanto instantánea como promedio. También usando un procedimiento similar, es posible segmentar las imágenes, es decir, separar la llama de su fondo, y esto se hace en la práctica dándole un valor de 255 (máxima luminosidad) aquellos pixeles que superen el umbral, y dándole un valor de 0 (mínima luminosidad), a aquellos pixeles que no superen el umbral. Una muestra de los resultados de este procedimiento se muestra en la Figura 5.11.

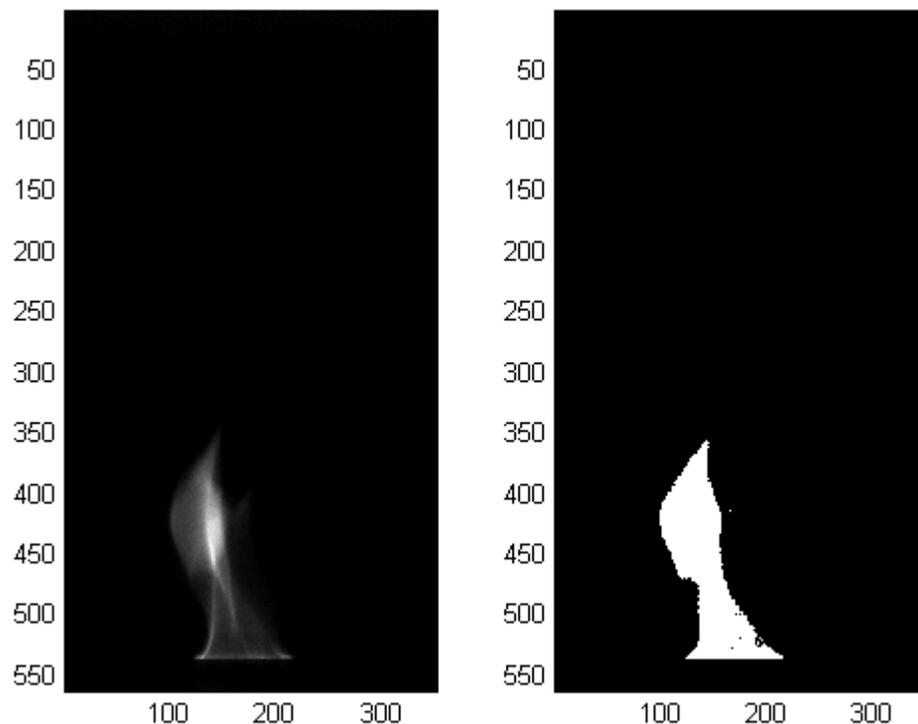


Figura 5.11: Cuadro original con su par segmentado. Cuadro n° 100, caudal 0,58 [l/min], sin cortinas.

En el Anexo B, se pueden encontrar más imágenes de comparación.

Posteriormente se realiza una comparación entre ambos métodos lo que da de resultado la Tabla 5.1, en donde se muestran las distintas alturas para las mediciones realizadas para un caudal de 0,58 [l/min], que corresponden a las mediciones 1 – 10 según el esquema definido previamente.

Tabla 5.1: Comparación de Resultados entre el método de Severino y el propio

Medición	Altura de llama (Método Severino ) [mm]	Altura de llama (Método Propio)[mm]
Sin Cortinas	89,3231	96,2323
1	41,2779	40,0978
2	47,111	45,8437
3	34,2003	32,6402
4	22,953	21,4205
5	15,0353	13,498
6	72,1573	71,1067
7	59,3402	57,3462
8	40,1577	38,1298
9	23,7205	24,603
10	13,8856	12,9576

Los resultados dan finalmente que en promedio existe una diferencia de 1,40 [mm] entre ambos métodos, con una desviación estándar de 0,39, cuya distribución normal se muestra en la Figura 5.12; por lo tanto, se puede decir que ambos métodos arrojan en general los mismo valores, por lo que en los próximos resultados (incluyendo los de radiación entregados en la sección anterior), se usará sólo uno de ellos. En el Anexo B se adjunta la tabla para las mediciones realizadas para un caudal de 0,74 [l/min], el cual corresponde a las mediciones 11 – 20 (incluyendo además el caso sin cortinas).

Una vez establecida la metodología para el cálculo de la altura, se procede entonces a analizar la influencia de las cortinas sobre la altura de la llama. Para esto se realizan las figuras, en donde se muestra como decae la altura de la llama normalizada por el diámetro de quemador ( $z_f/D$ ), parámetro usado tanto por Severino (7), como por otros autores para normalizar los resultados, en función de la velocidad promedio.

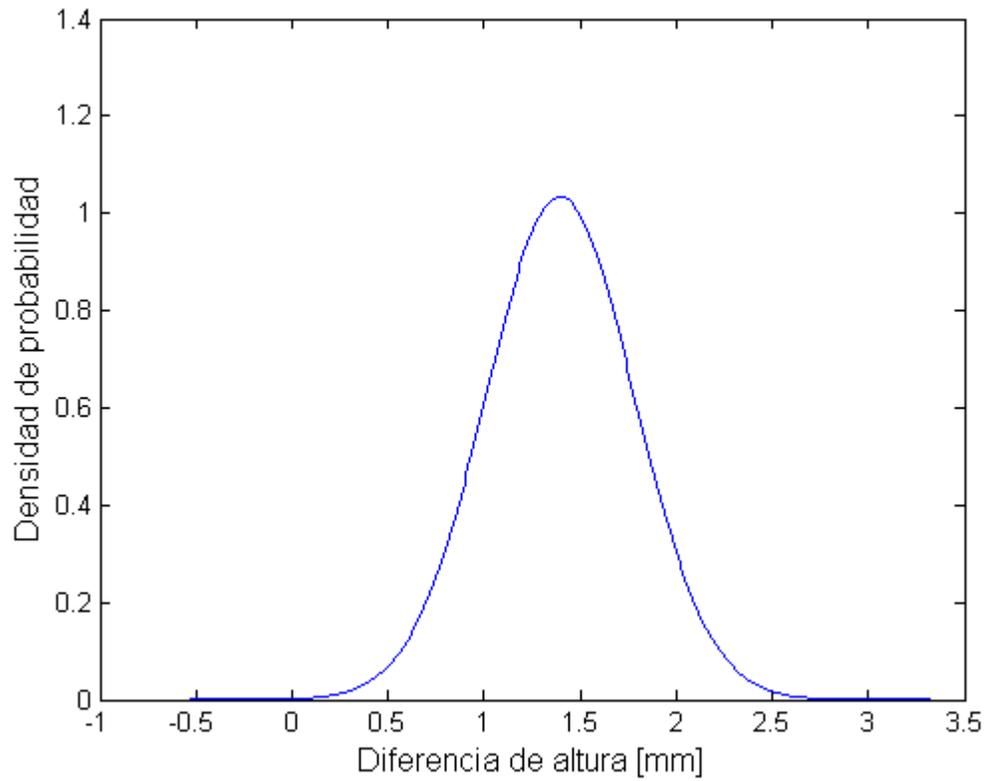


Figura 5.12: Distribución normal de las diferencias entre ambos métodos.

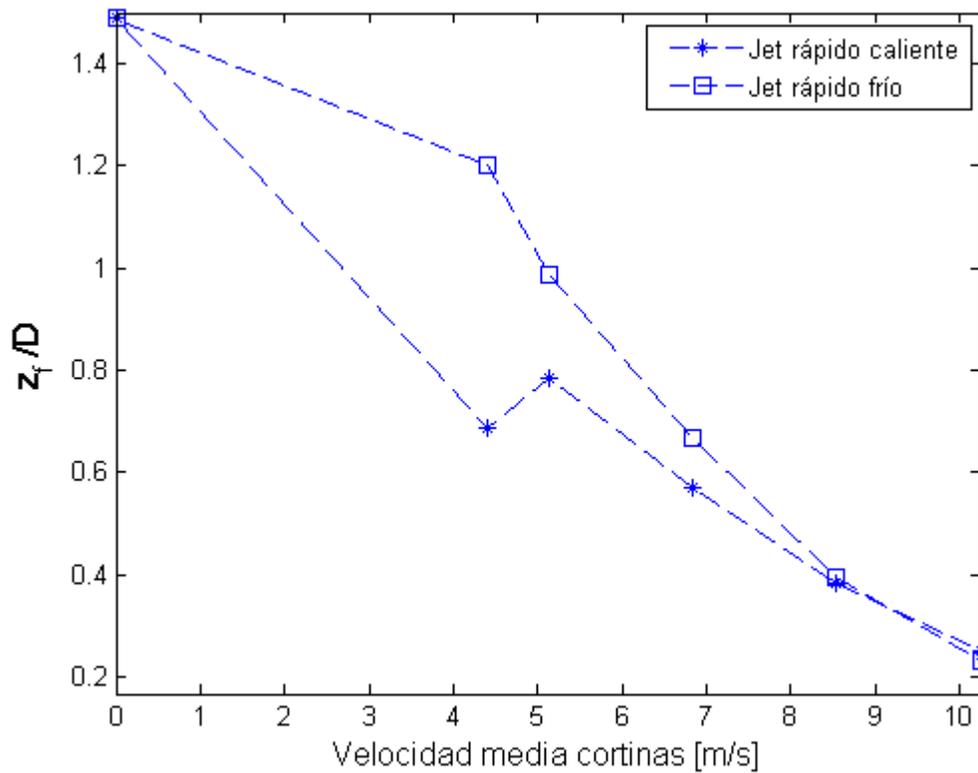


Figura 5.13: Altura media de la llama en función de la velocidad media de las cortinas, para un caudal de 0,58 [l/min] (Mediciones 1 – 10).

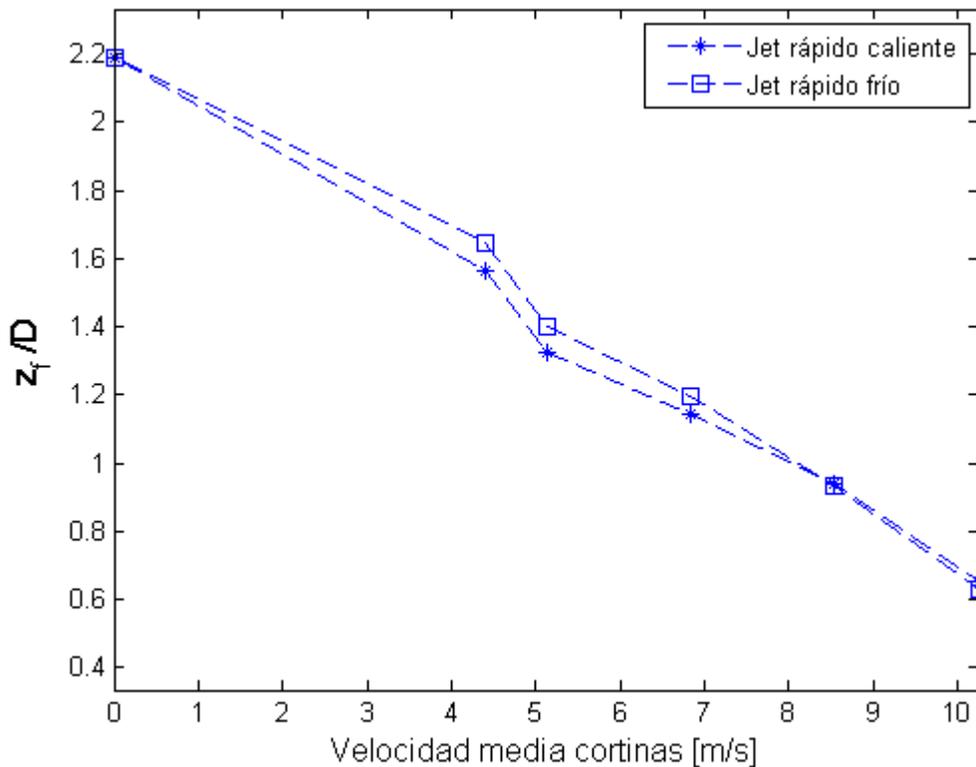


Figura 5.14: Altura media de la llama en función de la velocidad media de las cortinas, para un caudal de 0,74 [l/min] (Mediciones 11 – 20).

Los resultados muestran que existe una tendencia a la baja de la altura normalizada de la llama en función de la velocidad media de las cortinas, aunque no basta para extinguirla en el rango estudiado, además se puede apreciar que, por lo menos para velocidades menores a 8 [m/s], la configuración con el jet rápido caliente resulta más efectiva para el confinamiento que la con el jet rápido frío. Esto parece comprobar varios de los trabajos anteriores, por un lado el confinamiento prueba no ser completamente hermético, debido a las turbulencias e inestabilidades debidas por un lado al impacto de la cortina con el suelo (10), y a las diferencias de densidad y velocidad entre los dos chorros, según Lecaros (15) y Rivera (16). Por otro lado estos resultados coinciden con los obtenidos por Rojas (6), en donde la configuración más efectiva corresponde a aquella con el jet caliente más rápido. Esto se puede deber a que cuando el jet rápido es el caliente, las cortinas tienden a inclinarse hacia el interior de la celda de confinamiento, lo que compensa el efecto de empuje que ejerce la fuente térmica que describió Cecchi (13) en su trabajo. Una vez superada cierta barrera de velocidad, el efecto de empuje de la fuente térmica se hace poco relevante comparada con la velocidad media de las cortinas, haciendo que sea irrelevante cuál jet debiese ser más rápido.

Finalmente, se realiza una medición más larga con la configuración que entregó mejores resultados, la Medición 10, la cual duró tres minutos, el máximo permitido por el software de adquisición de datos, empezando con las cortinas apagadas, para luego encenderlas a los 10 segundos. Esto sin embargo, igualmente sirvió para comprobar que rápidamente luego de encender las cortinas la altura de la llama se estabiliza en un valor equivalente a su altura media

para aquella medición, indicando que se alcanza una situación de equilibrio. Esto puede ir asociado a las pérdidas de hermetismo que se describieron recientemente, en donde se termina por establecer un flujo o intercambio que en promedio tiene cierta estabilidad.

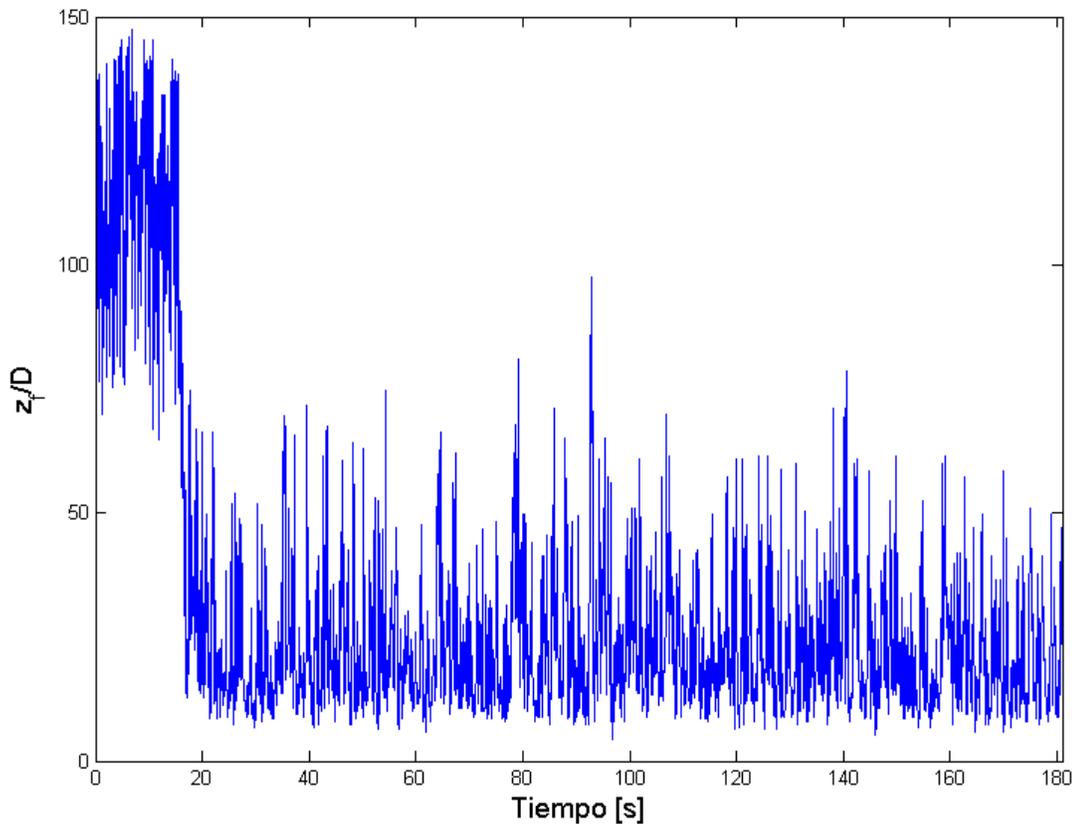


Figura 5.15: Altura de llama en función del tiempo, Medición 10.

Para la medición 10, la reducción en la altura de la llama alcanza un 84,45%, una reducción importante a la altura de llama, que como ya se comentó, está directamente relacionado con la capacidad de confinamiento.

### 5.3 Altura de llama en función de la liberación de calor

La evidencia sugiere que la altura normalizada ( $z_f/D$ ) sigue una correlación con la tasa adimensional de liberación de calor (HRR o heat release rate en inglés) del tipo potencial, y cuya forma más aceptada es la correlación obtenida por Heskestad (27), en donde se obtiene:

$$\frac{z_f}{D} = -1,02 + 15,6N^{1/5} \quad (5.1)$$

En que:

$$N = \left( \frac{c_p T_\infty}{LHV/r} \right)^3 \dot{Q}^{*2} \quad (5.2)$$

Siendo  $r$  la relación másica de aire y combustible, y  $\dot{Q}^*$ , el HRR adimensionalizado. Es decir que entre éste último y la altura adimensional existe una relación del tipo:

$$z_f/D \propto \dot{Q}^{*2/5} \quad (5.3)$$

Considerando esto se realizaron mediciones para comprobar experimentalmente esta correlación, especialmente si siguen una relación como en la ecuación (5.3).

Se realizó entonces un set de mediciones, para un rango de  $\dot{Q}^*$  de 0,53 – 0,72, que corresponde a un rango de 0,54 – 0,74 l/min del flujo de gas, variando el flujo cada 0,04 l/min, dando como resultado un set de 5 mediciones. La Tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5.2: Resultados para altura de llama en función de  $\dot{Q}^*$ .

$\dot{V}$ [l/min]	$\dot{Q}^*$	$z_f/D$
0,54	0,53	1,219
0,58	0,57	1,489
0,62	0,61	1,613
0,66	0,65	1,886
0,70	0,68	1,894
0,74	0,72	2,194

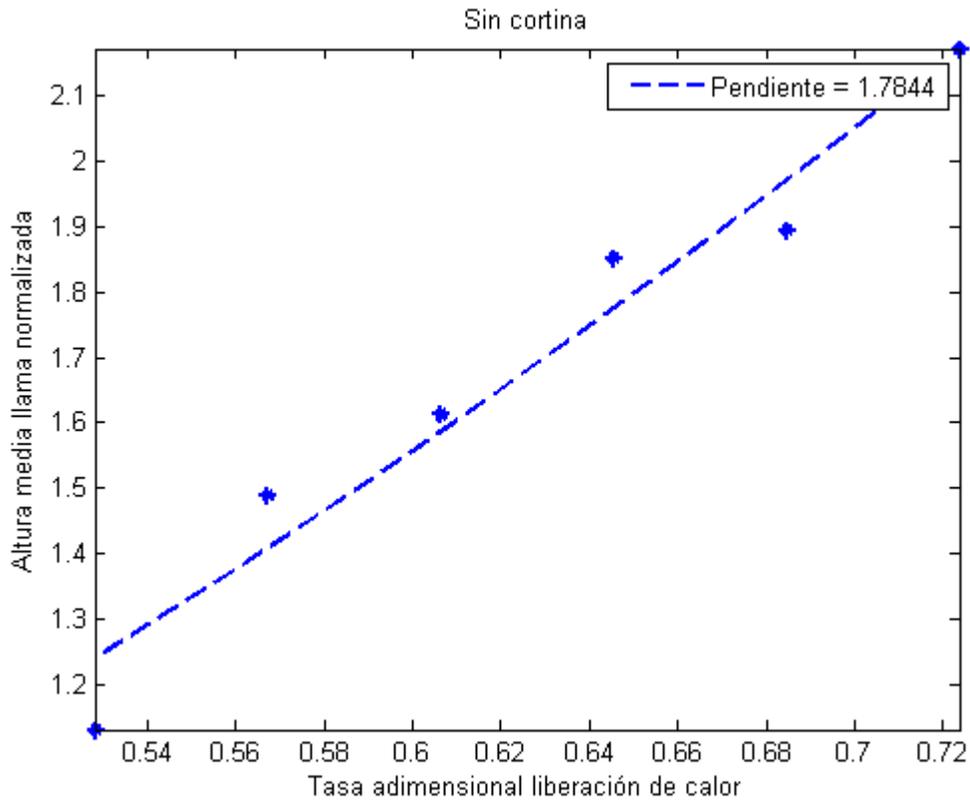


Figura 5.16: Resultado para altura de llama en función de  $\dot{Q}^*$ .

La Figura 5.16 muestra que la relación entre la altura de la llama y  $\dot{Q}^*$  tienen la forma:

$$z_f/D \propto \dot{Q}^{*1,7844} \quad 5.4$$

Este resultado contrasta con la correlación mostrada anteriormente. Sin embargo, de acuerdo a Zukoski (28), para un valor de  $\dot{Q}^*$  entre 0,1 y 1, se define una región de transición (Figura 5.17), en la cual se establece que el valor de este exponente varíe entre 0,4 y 2, no existiendo un claro acuerdo sobre la forma que debiese tener una correlación para esta zona, a diferencia de aquella existente para valores de  $\dot{Q}^*$  mayores.

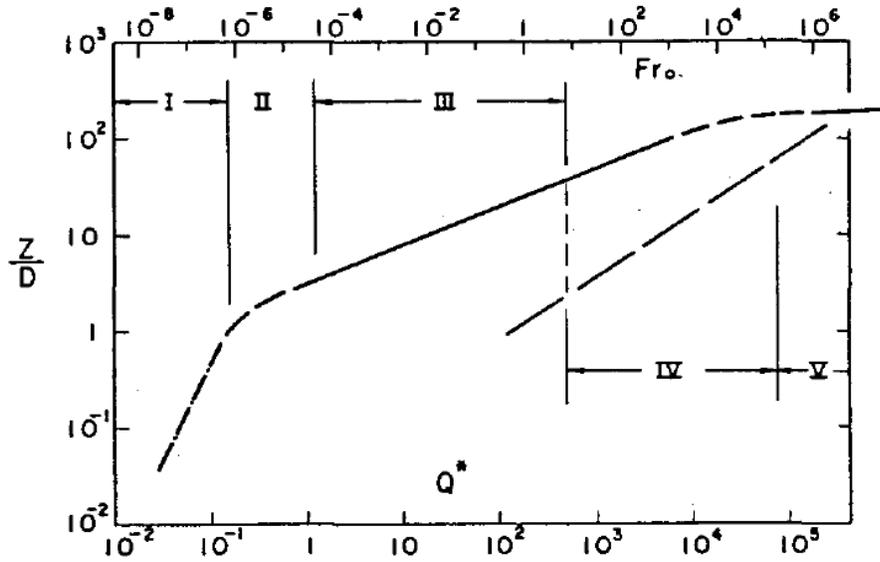


Figura 5.17: gráfico esquemático que muestra la existencia de diversas zonas o regiones para la altura de llama en función de  $\dot{Q}^*$ . (28)

Por otro lado, de acuerdo a Beyler (29), no existe un único criterio cuando la llama alcanza valores para su altura de llama bajos, tal como muestra la Figura 5.18.

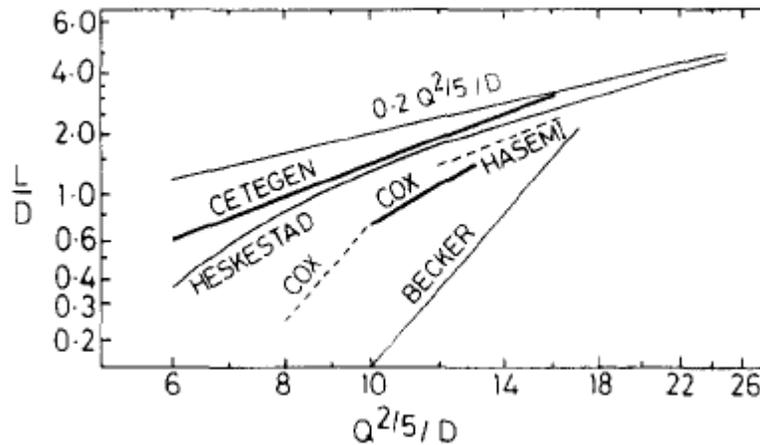


Figura 5.18: diferentes correlaciones para la altura de llama para valores bajos de  $\dot{Q}^*$ , representados en este caso por  $Q^{2/5}/D$ . (29)

En la Figura 5.18, se tiene que las correlaciones se hacen función de  $Q^{2/5}/D$  en vez de  $\dot{Q}^*$ , por lo que en la Tabla 5.3 se muestran las equivalencias entre dos factores para los valores usados en las mediciones.

Tabla 5.3: Equivalencias entre  $\dot{Q}^*$  y  $Q^{2/5}/D$ , para los valores usados en las mediciones

$\dot{V}$ [l/min]	$\dot{Q}^*$	$Q^{2/5}/D$
0,54	0,53	12,682
0,58	0,57	13,050
0,62	0,61	13,403
0,66	0,65	13,742
0,70	0,68	14,069
0,74	0,72	14,385

Sin embargo, se graficaron diversas correlaciones para compararlas con los datos obtenidos, los cuales se muestran en la Figura 5.19.

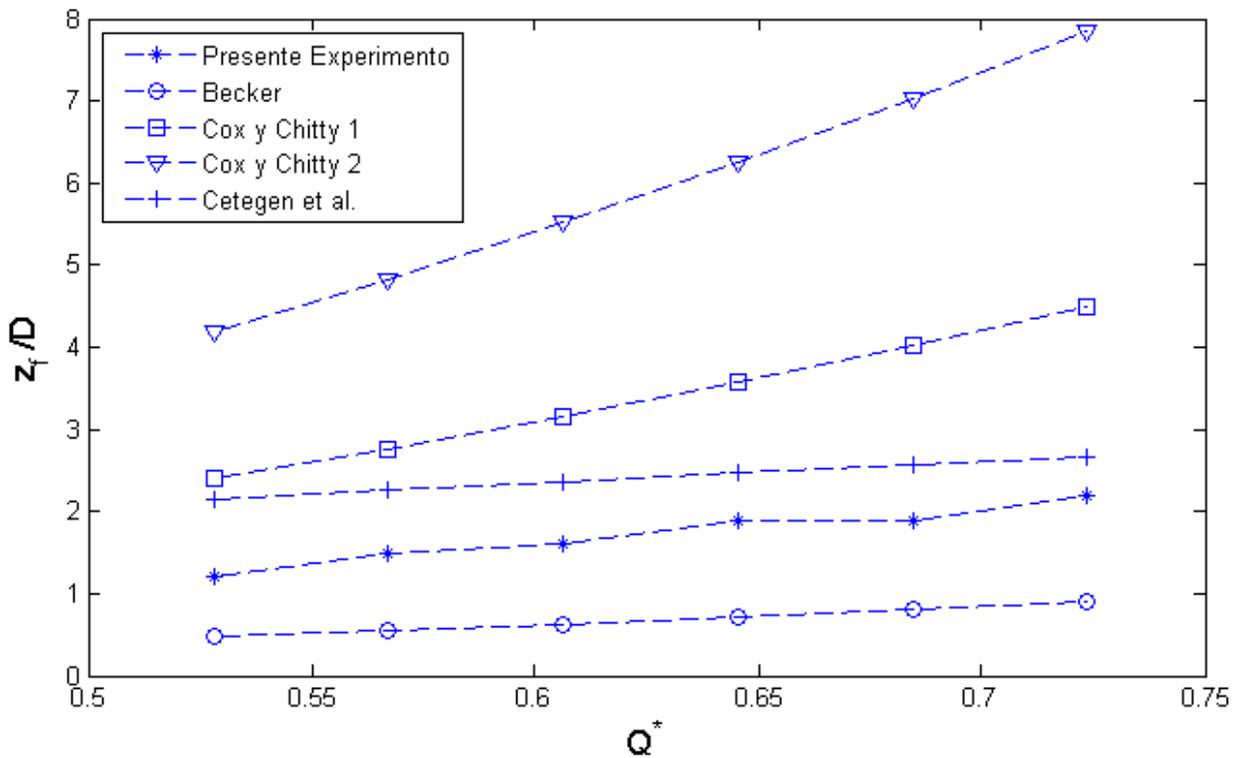


Figura 5.19: resultados obtenidos en las mediciones comparados con diversas correlaciones.

En la Figura 5.19, las correlaciones obtenidas corresponden a:

- Exp (resultados experimentales):  $3,851 (\dot{Q}^*)^{1,7844}$ .

- Becker:  $(0,068 Q^{2/5}/D)^5$  (29).
- Cox y Chitty 1:  $7,3 \times 10^{-6}(Q^{2/5}/D)^5$  (29).
- Cox y Chitty 2:  $15 (\dot{Q}^*)^2$  (28).
- Cetegen:  $3,3 (\dot{Q}^*)^{2/3}$  (28).

Si bien no existe alguna que se ajuste de manera adecuada a los datos experimentales, la comparación muestra que los datos registrados se encuentran contenidos entre las diversas relaciones, por lo tanto se puede establecer que éstos resultados se encuentran dentro de los márgenes esperados. Por otro lado, hay que recordar que según Beyler (29), al acortarse la llama, el diámetro de la superficie toma un rol importante, así como también la forma del quemador.

Luego, se realizó la misma medición, pero esta vez con la presencia de cortinas, en este caso se consideraron 2 configuraciones distintas, las cuales se muestran en la Tabla 5.4.

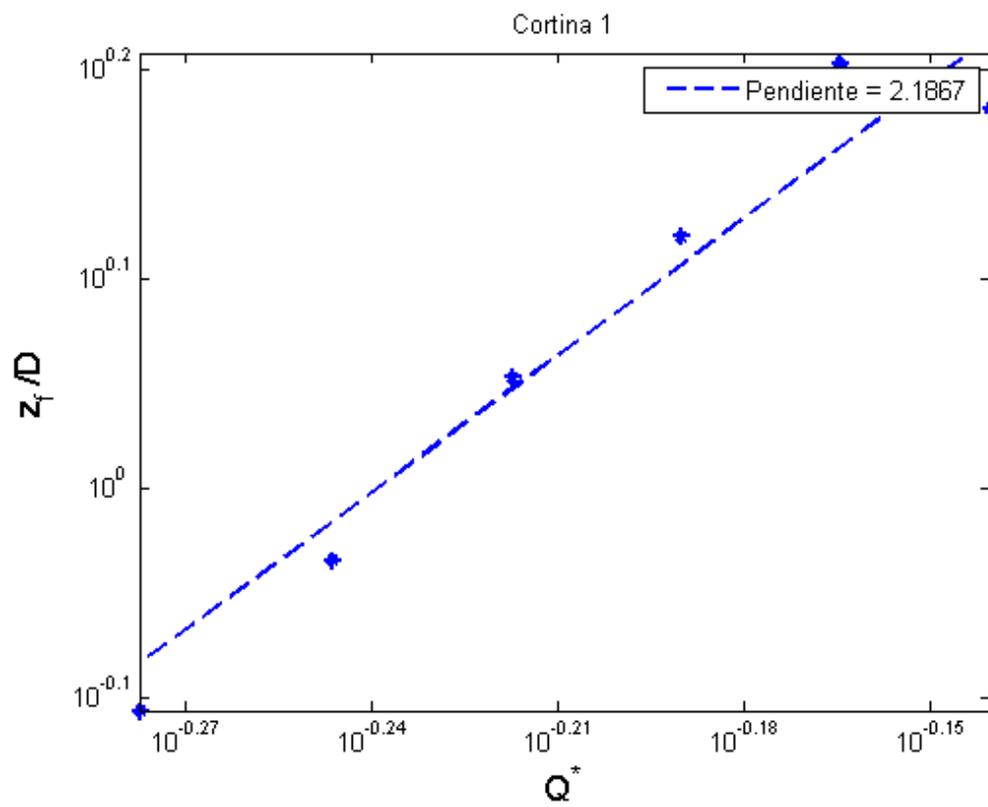
Tabla 5.4: Configuraciones cortinas usadas.

	Velocidades [m/s]	
	Jet Frío	Jet Caliente
Cortina 1	3,65	5,15
Cortina 2	1	2

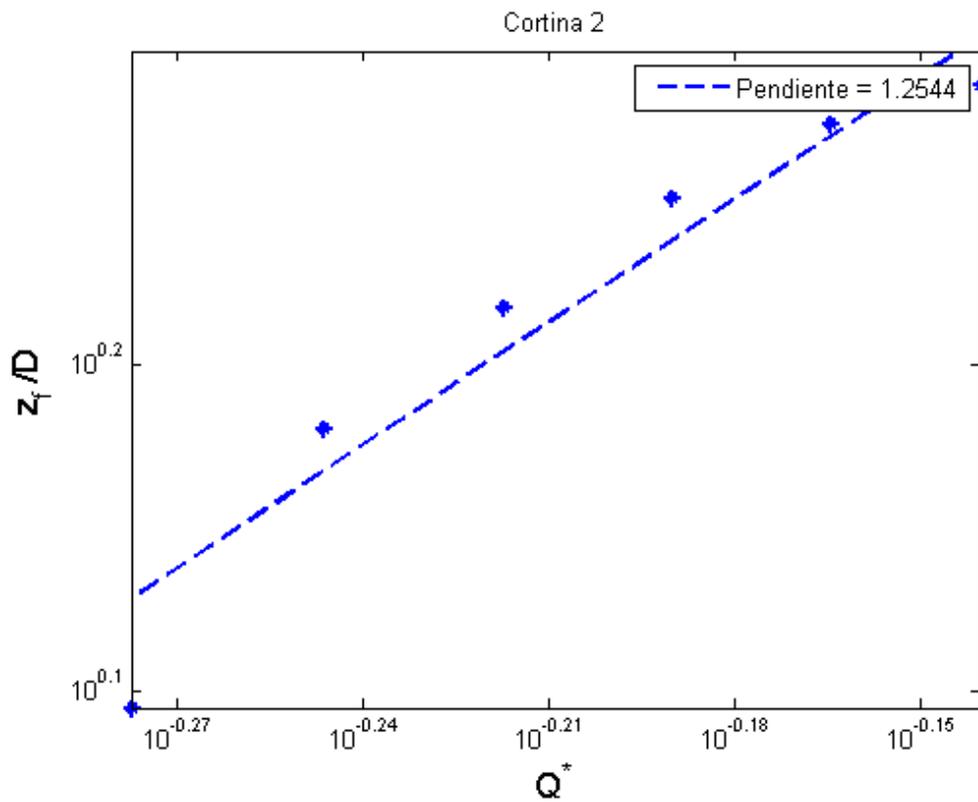
Los resultados muestran que para la cortina 1, la relación obtenida es  $L/D_f \propto \dot{Q}^{*2,1867}$ , mientras que para la cortina 2 es  $L/D_f \propto \dot{Q}^{*1,2544}$ , tal como se muestra en la Figura 5.20, (a) y (b).

Esto se puede explicar a partir de la Figura 5.17, y considerando lo expresado por Zukoski (28), en donde se plantea que para la zona III se tiene un exponente de  $2/5$ , mientras que en la zona I se tiene un exponente de dos, mientras que en la zona II se plantea, por ser una zona de transición, un valor para el exponente entre estos dos valores.

Las variaciones entre los exponentes se puede explicar porque, para la cortina más lenta (cortina 2), se tienen alturas mayores, por lo tanto el set de datos se encuentra más cercano a la zona III, en comparación con los resultados obtenidos para la cortina 1. Para esta configuración se obtienen alturas menores, por lo que los datos se encuentran más cercanos hacia la zona I en comparación con los resultados anteriores, provocando un comportamiento de la llama más similar a esta zona.



(a)



(b)

Figura 5.20: Altura normalizada de llama en función de la tasa adimensional de liberación de calor, (a) Cortina 1 y (b) Cortina 2.

Hay que recordar que la cortina 2 es la que tiene menor velocidad media, mientras que la cortina 1 mayor. Luego, hay que recordar que por lo menos para el rango estudiado, a mayor velocidad de las cortinas se tiene que existe un confinamiento más efectivo, y dadas las alturas obtenidas se puede establecer que en este caso la cortina 1 es más efectiva que la cortina 2.

Esto condiciona fuertemente los resultados obtenidos, ya que al tener un mejor confinamiento, las alturas de la primera configuración usada en este caso resultan ser menores, por lo que los resultados se encuentran más hacia la izquierda del gráfico de la Figura 5.17, en donde se puede reconocer cualitativamente que la pendiente de la curva es mayor. Luego, considerando esto es posible inferir entonces que el HRR realmente liberado es menor en comparación al caso sin cortinas, debido al mayor déficit de oxígeno. Por el contrario, al ser menos efectivo el confinamiento de la segunda configuración usada, las alturas resultantes son mayores, el HRR efectivamente liberado es mayor, por lo tanto se puede inferir cualitativamente que los datos se encuentran en una zona más cercana a la región III que el caso anterior, teniendo por lo tanto una pendiente menor.

## 6 Conclusiones

Se estudió experimentalmente una llama de difusión dentro de un túnel vial a escala, sujeta a la acción de cortinas de aire de impacto, en particular de la configuración Doble Jet – Doble Flujo (DJ – DF). En particular se estudiaron tres aspectos que caracterizan cómo se comporta la llama bajo la acción de las cortinas:

- La radiación emitida por la llama, en función de la velocidad media de las cortinas.
- La altura de la llama, en función de la velocidad media de las cortinas.
- La altura de la llama, en función de la tasa adimensional de liberación de calor, o HRR.

Cada una de estas mediciones permitió caracterizar el comportamiento de la llama, con el objetivo de poder evaluar la capacidad de las cortinas de aire para confinar, y reducir la transferencia de calor y masa entre el espacio confinado y la zona protegida, lográndose cumplir de esta forma los objetivos planteados al inicio de este estudio.

Trabajos anteriores ya habían intentado dar luces con respecto a esto, mostrando principalmente a través de simulaciones numéricas que las cortinas ofrecían propiedades interesantes, sin embargo, existían fugas y pérdidas de hermetismo principalmente al generarse turbulencias en la zona de impacto, además de inestabilidades en el flujo producto de las diferencias en las velocidades, las que sin embargo son necesarias con tal de poder impactar en forma perpendicular en el suelo del túnel, como lo sugiere Lecaros (15), ya que la presencia de una fuente térmica genera gradientes de temperatura entre la zona confinada y la protegida, generándose fuerzas de empuje que inclinan las cortinas hacia afuera, con el riesgo de hacer que ésta se despegue provocando la pérdida total de la capacidad de confinamiento.

Primero se mostraron los resultados para la radiación, en donde se puede apreciar que las curvas de radiación en función de la distancia a la fuente disminuyen a medida que aumenta la velocidad de las cortinas, que también queda demostrado cuando se grafica la radiación promedio de cada medición en función de la velocidad media de las cortinas. Esto demuestra, respaldándose en el trabajo de Yuan (24), que efectivamente las cortinas confinan, o aíslan, por lo menos parcialmente, el transporte de calor y masa entre el espacio confinado y el espacio protegido, y que se puede concluir que en la medida que aumenta la velocidad de las cortinas se hace más efectivo el confinamiento.

Luego se analizó la altura de las cortinas en función de la velocidad media de las cortinas, y en función de la tasa adimensionalizada de liberación de calor, pero antes de eso fue necesario establecer una metodología para calcular la altura de la llama.

Para poder evaluar la altura de la llama de cada una de las mediciones realizadas, se consideró por un lado el método usado por Severino (7) el cual consiste básicamente en procesar cuadro por cuadro cada video obtenido, encontrando el pixel más alto donde se encuentra llama, pero para

esto es necesario tener un valor umbral que permite distinguir si el pixel evaluado corresponde a la llama o bien al túnel, por lo que en la práctica se realizaba este procedimiento para una serie de valores umbral, para luego promediar las alturas obtenidas, teniendo finalmente una altura promedio. Por otra parte, se desarrolló un método propio, en el que básicamente se desarrolló una metodología para encontrar un umbral único, característico de cada medición. Los resultados obtenidos sugieren que con ambos resultados se obtienen básicamente las mismas alturas, con una diferencia promedio de 1,40 [mm] y una desviación estándar de 0,39.

Los resultados indican que la altura también disminuye con la velocidad de las cortinas, estando en concordancia con los resultados obtenidos anteriormente, por lo que es razonable suponer que las variaciones en la altura de la llama también tienen relación con la intensidad del confinamiento logrado.

Finalmente, los resultados para la altura de la llama en función muestran que si bien las alturas obtenidas no están en concordancia con la mayoría de las relaciones usadas normalmente en la literatura, se demostró que el fenómeno es esencialmente turbulento, y que se encuentra además en una zona donde la tendencia es variable, estando el exponente de los resultados dentro del rango esperado. También se obtuvieron estas curvas usando dos configuraciones distintas, obteniéndose exponentes muy distintos. En el caso de la configuración más rápida se obtiene un exponente más alto, lo que tiene que ver con que la llama tiene un grado de reacción menor, generando alturas menores, por lo tanto los datos se desplazan hacia valores en que el exponente se espera que sea mayor, mientras que para la configuración de cortinas más lenta, el exponente es menor, teniendo una explicación análoga al caso anterior.

Es posible concluir que si bien las cortinas no logran extinguir las llamas en los rangos usados en este estudio, si se demuestra que las cortinas tienen la capacidad para contener y para disminuir el grado de reacción de la combustión; al disminuir tanto la radiación, como la altura de la llama, se puede inferir que disminuye la concentración de oxígeno en los alrededores del quemador de llama de difusión, esto gracias a la acción de las cortinas.

Queda bastante trabajo por delante, por un lado se puede investigar como la relación entre las velocidades de los jets frío y caliente influye sobre el confinamiento, buscando optimizar la velocidad que logra minimizar al máximo posible la reacción de combustión en el espacio confinado usando las velocidades más bajas posibles, pensando en posibles aplicaciones comerciales que requerirán que la solución sea factible tanto técnica como económicamente.

Por otro lado, se puede avanzar en mediciones de las concentraciones de ciertos elementos como oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, entre otros, tanto en la zona protegida como en la zona confinada, de tal manera de poder establecer la capacidad de las cortinas para limitar el transporte de masa, y así poder concluir que tan segura sería la zona protegida, pensando en futuras aplicaciones prácticas.

Finalmente, también se podría recomendar la utilización de diferentes tipos de combustibles, especialmente por combustibles líquidos, y eventualmente sólidos, los cuales podrían recrear de

manera más fehaciente las características de un incendio real dentro de un túnel, especialmente considerando la producción de hollín, que podría tener un rol importante en la dinámica del incendio.

## 7 Bibliografía

1. **World Road Association.** Road Tunnels Manual. [En línea] [Citado el: 1 de Junio de 2013.] <http://tunnels.piarc.org/es/seguridad/experiencia.htm>.
2. **Luo, Na y Li, Angui.** *An experiment and simulation of smoke confinement utilizing an air curtain*, Safety Science vol. 59, 10-18, 2013.
3. **Guyonnaud L., Sollicc C., Dufresne de Virel M., Rey C.,** *Design of air curtains used for area confinement in tunnels*, Experiments in Fluids, vol. 28, 377-384, 2000.
4. **Hu L.H., Zhou J.W., Huo R., Peng W., Wang H.B.,** *Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channel*, Journal of Hazardous Materials, vol. 156, 327-334, 2008.
5. **Gupta S., Pavageau M. and Elicer-Cortés J.C.,** *Cellular confinement of tunnel sections between two air curtains*, Building and Environment, vol. 42(9), 3352-3365, 2007.
6. **Rojas, P.** *Estudio numérico sobre confinamiento al interior de túneles mediante cortinas de aire, usando código FDS - efectos debido a paredes no-adiabáticas del túnel.* Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2012.
7. **Severino, G.** *Caracterización de la energía liberada por una llama de difusión al interior de un túnel a escala reducida.* Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2013.
8. **González, F.** *Diseño y construcción de la instalación experimental para el estudio de confinamiento de escalares activos mediante cortinas de aire en impacto.* Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing Mecánica, Universidad de Chile, 2005.
9. **Celis, J.** *Estudio del confinamiento de un escalador activo entre dos cortinas de aire en impacto, mediante mediciones de temperaturas por termocuplas.* Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2008.
10. **Fernández, J.** *Estudio numérico del confinamiento de escalares activos por cortinas de aire en impacto.* Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2006.
11. **Elicer-Cortés J.C., Demarco R., Valencia, A. and Pavageau M.,** *Heat confinement in tunnels between two double-stream twin-jet air curtains*, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.36, 438-444, 2009.

12. **Felis F., Pavageau M., Elicer-Cortés J.C. and Dassonville T.**, *Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a double stream – twin jet air curtain for heat confinement in case of tunnel fire*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol.37, 1191-1196, 2010.
13. **Cecchi, P.** *Estudio experimental del transporte de calor turbulento a través de cortinas de aire para confinamiento de calor al interior de túneles*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Mecánica, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2010.
14. **Schneider, J.** *Estudio experimental del transporte de calor turbulento a través de cortinas de aire para el confinamiento de calor en túneles*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2012.
15. **Lecaros M., Elicer-Cortés J.C., Fuentes A, and Felis F.**, *On the ability of twin jets air curtains to confine heat and mass inside tunnels*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol.37, 970-977, 2010.
16. **Rivera, J., Elicer-Cortés J.C. and Pavageau M.**, *Turbulent heat and mass transfer through air curtains devices for the confinement of heat inside tunnels*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol.38, 688-695, 2011.
17. **Castro, Jorge.** *Estudio numérico del transporte de calor turbulento a través de cortinas de aire para confinamiento de calor, utilizando un modelo LES*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Mecánica y al título de Ingeniero Civil Mecánico, Dpto. Ing. Mecánica, Universidad de Chile, 2013.
18. **Kuo, Kenneth.** *Principles of Combustion*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2005. ISBN 0-471-04689-2.
19. **Karlsson, B. and Quintiere, J.** *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2000.
20. **Society of Fire Protection Engineers.** *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, Massachusetts, 2002.
21. **Dayan, A and Tien, C.L.** *Radiant heating from a cylindrical fire column*. Combustion Science and Technology, vol. 9 (1-2), 41-47, 1974.
22. **Hansen R. and Ingason H.**, *Model scale fire experiments in a model tunnel with wooden pallets at varying distances*. Studies in Sustainable Technology, Report, Mälardalen University, Sweden, 2010.
23. **Ingason, Haukur.** *Design Fires in Tunnels*. 2006.

24. **Yuan M., Chen B., Li C, Zhang J., Lu S.**, *Analysis of the combustion efficiencies and heat release rates of pool fires in ceiling vented compartments*, *Procedia Engineering*, vol. 62, 275 – 282, 2013
25. **Weszka, J.** *A survey of threshold selection technics*, *Computer Graphics and image Processing*, vol. 7, 259-265. 1978.
26. **Ridler T.W. and Calvard S.**, *Picture thresholding using an iterative selection method*, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 8 (8), 1978.
27. **Heskestad G.** *Luminous heights of turbulent diffusion flames*, *Fire Safety Journal*, *Fire Safety Journal*, vol. 5, 103-108, 1983.
28. **Zukoski, E.E.** *Fluid Dynamic Aspects of Room Fires*. *Fire Safety Science: Proceedings of the First International Symposium*, 1986.
29. **Beyler C.L.**, *Fire Plumes and Ceiling Jets*, *Fire Safety Journal*, vol. 11, 53–75, 1986.

## A Anexo 1: Resultados Radiación

### A.1 Radiación Incidente Mediciones 11 – 20

A continuación se presentan los resultados para las mediciones 11 – 20, correspondientes a aquellas mediciones definidas para un caudal de gas 0,74 [l/min].

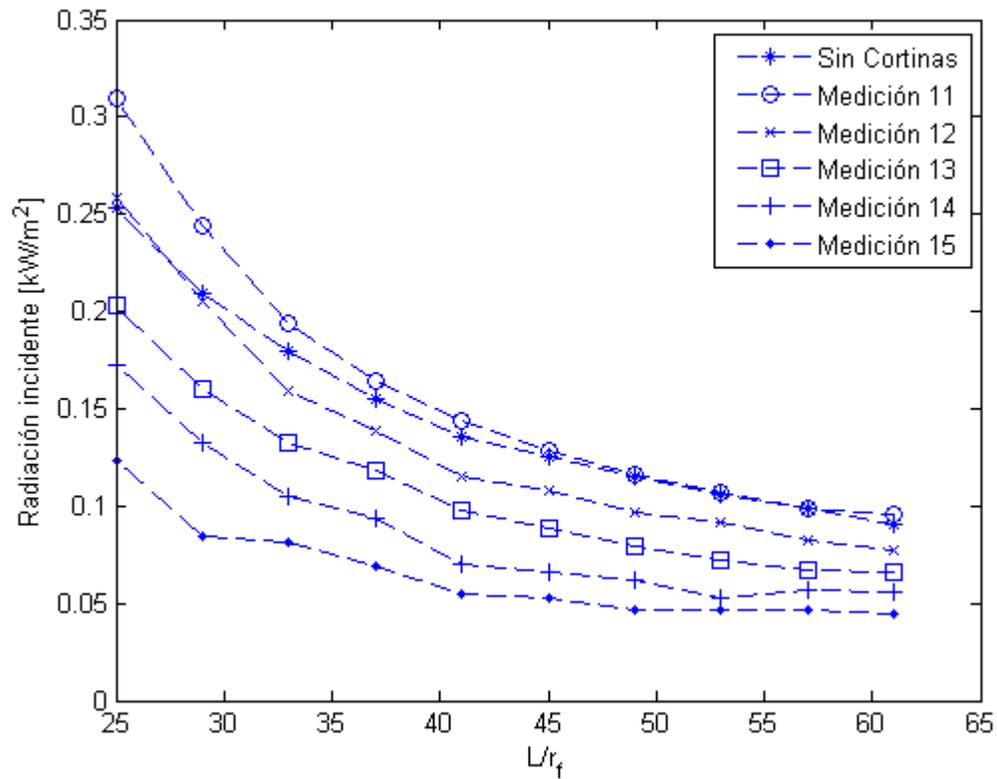


Figura A.1: Radiación en función de la distancia, mediciones 11 – 15.

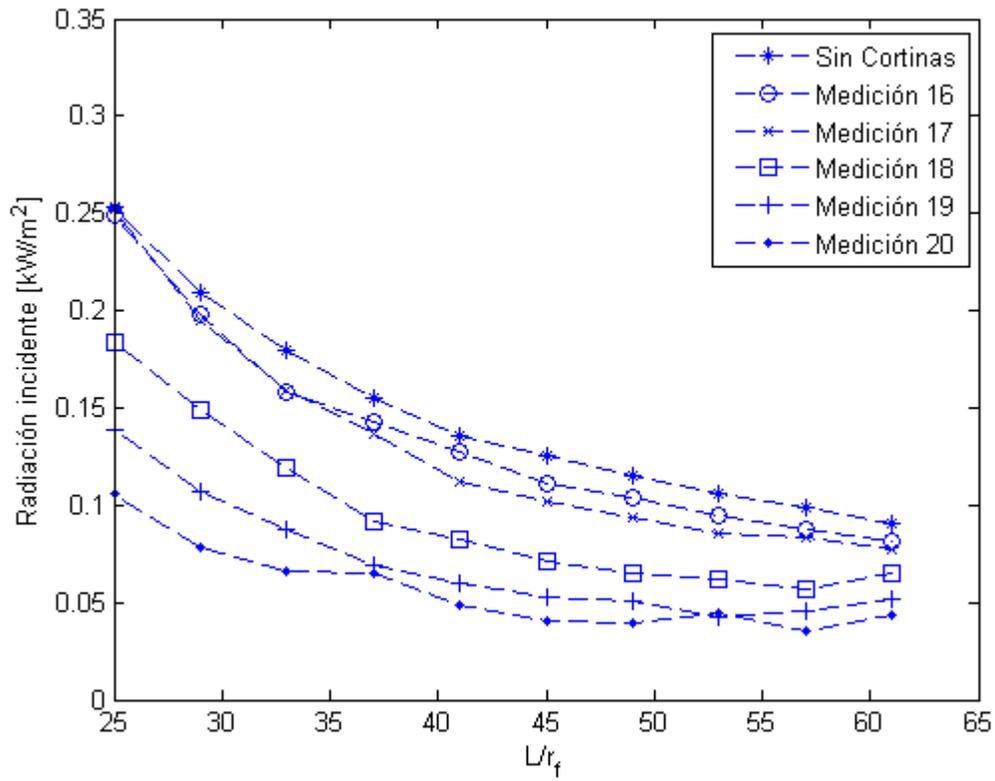


Figura A.2: Radiación en función de la distancia, mediciones 16 – 20.

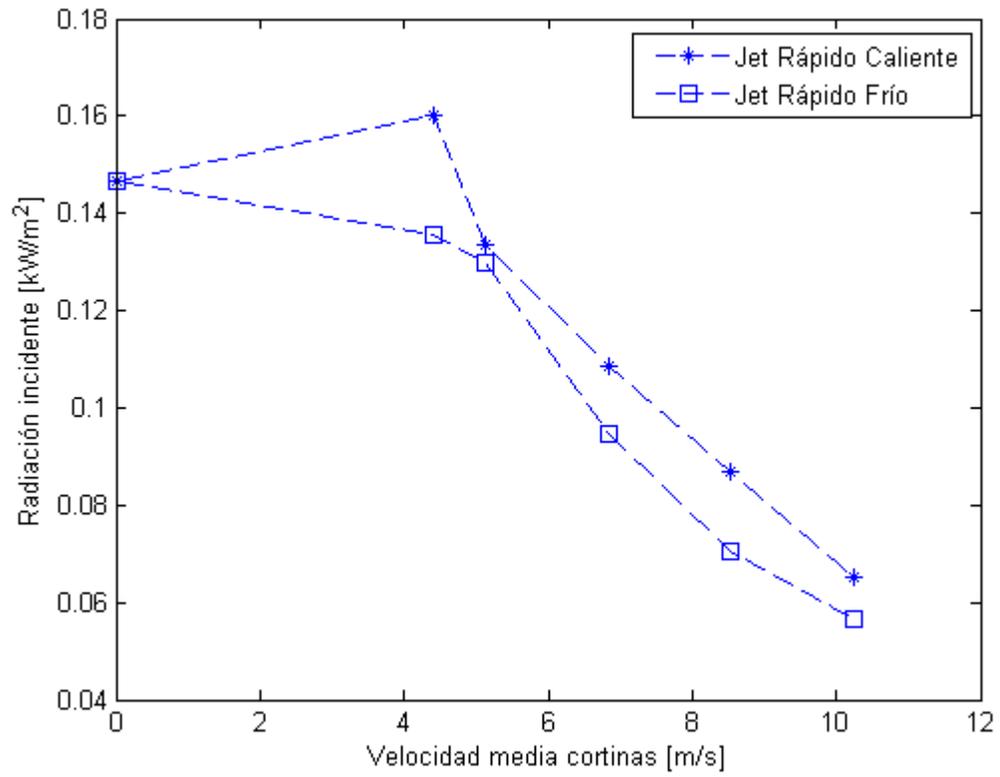


Figura A.3: Radiación promedio en función de la velocidad media de las cortinas

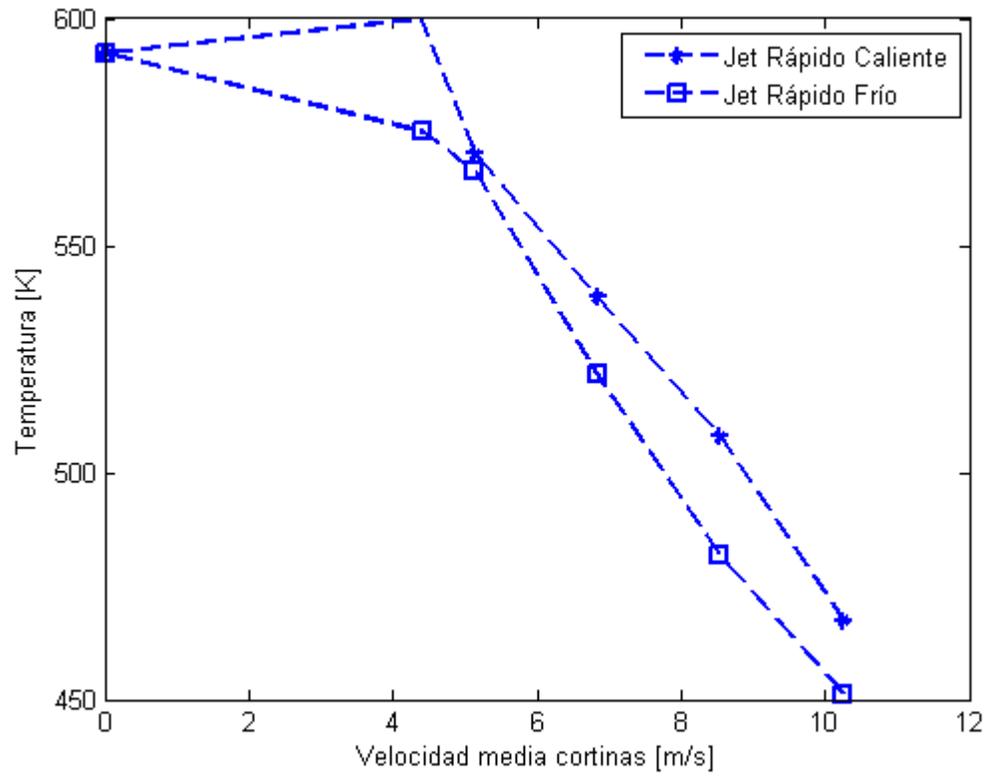


Figura A.4: Temperatura representativa de la llama.

## A.2 Curvas teóricas y experimentales radiación en función de la distancia.

En esta subsección se presentan las curvas a partir de las cuales se obtuvieron las estimaciones para la temperatura representativa de la llama.

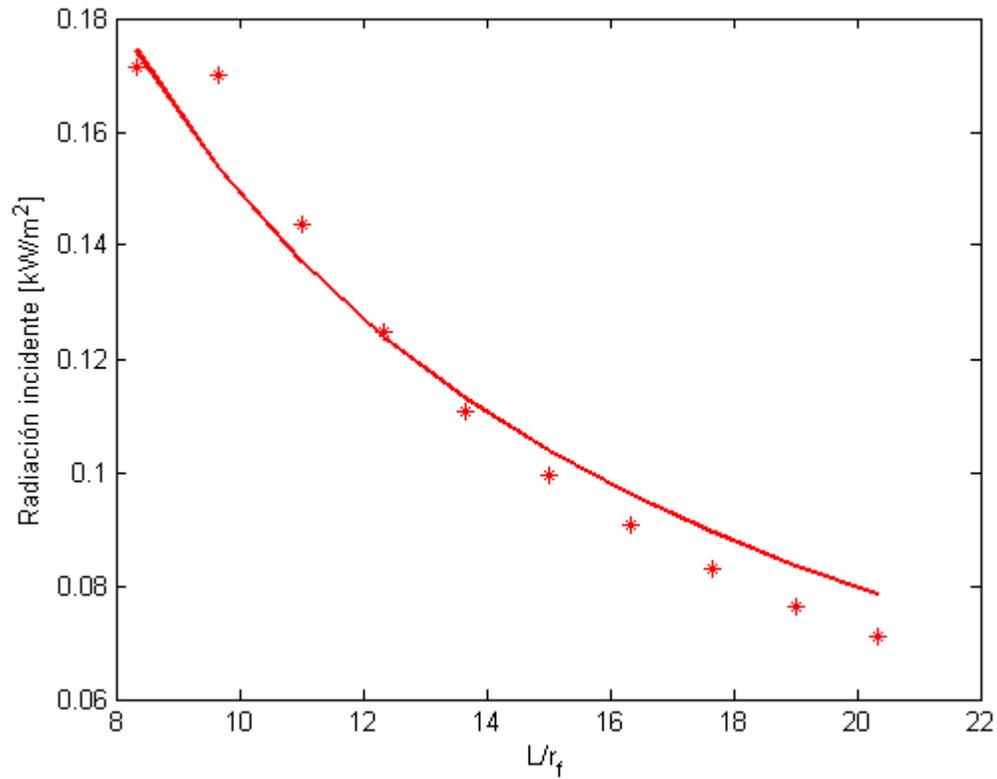


Figura A.5: Medición sin cortinas.

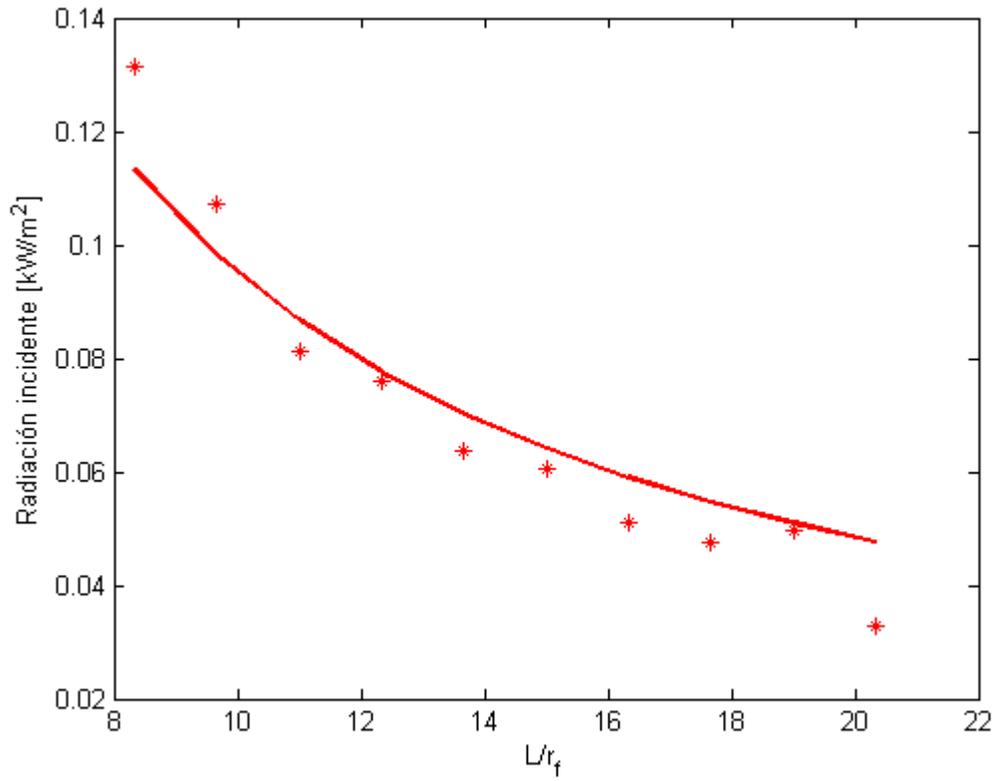


Figura A.6: Medición 1

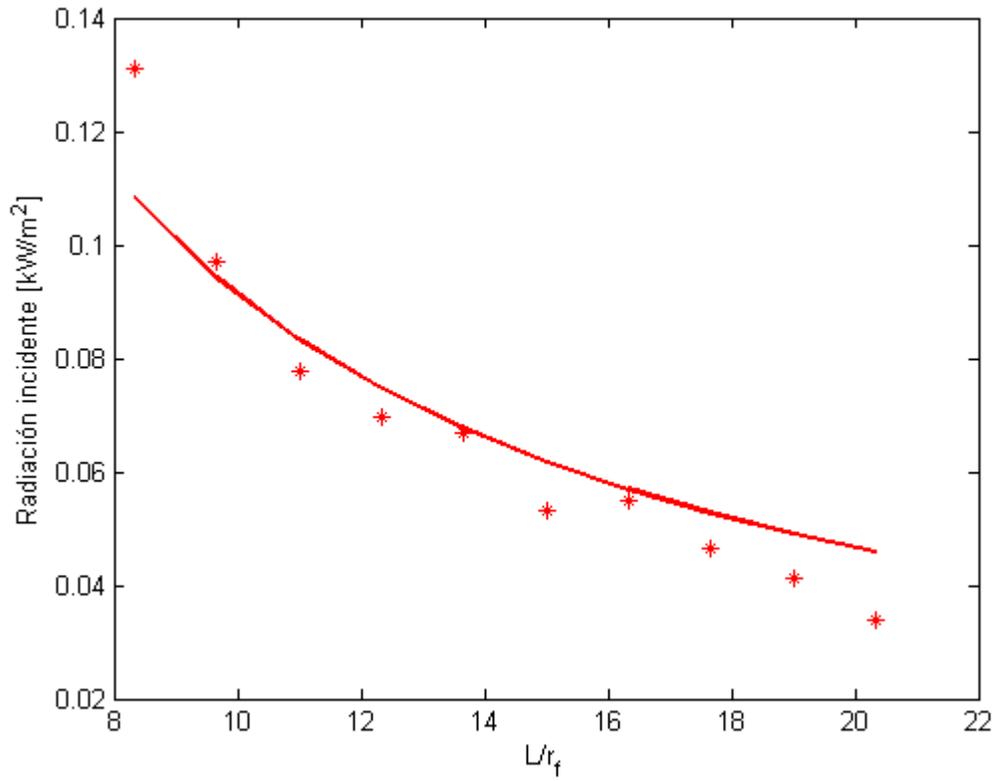


Figura A.7: Medición 2.

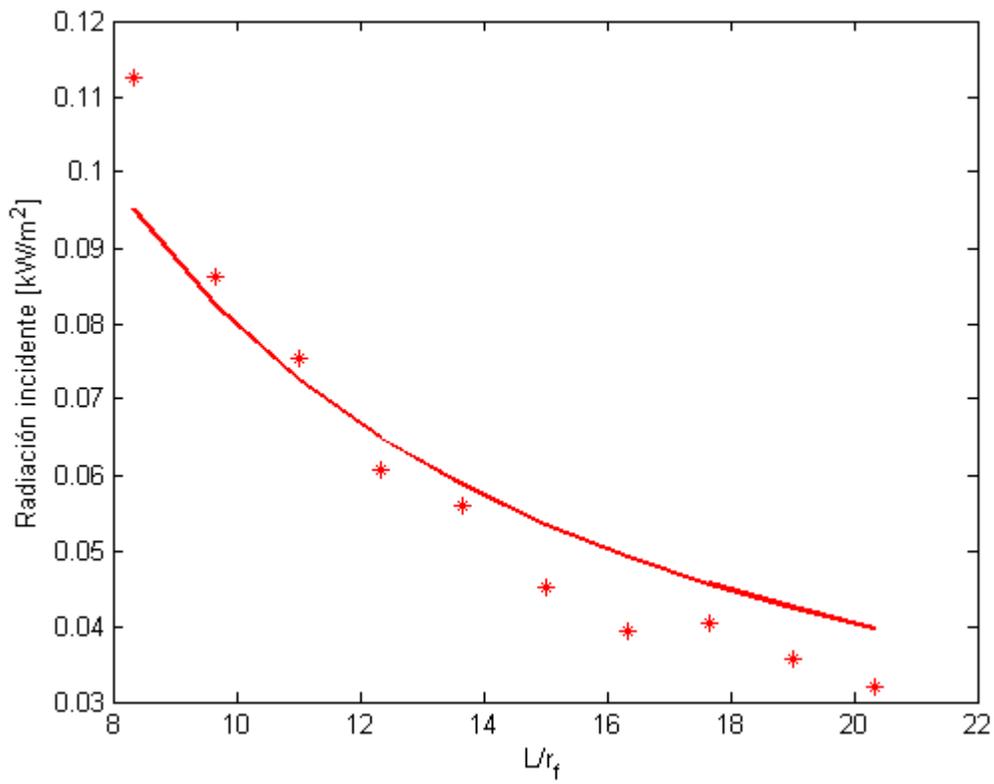


Figura A.8: Medición 3.

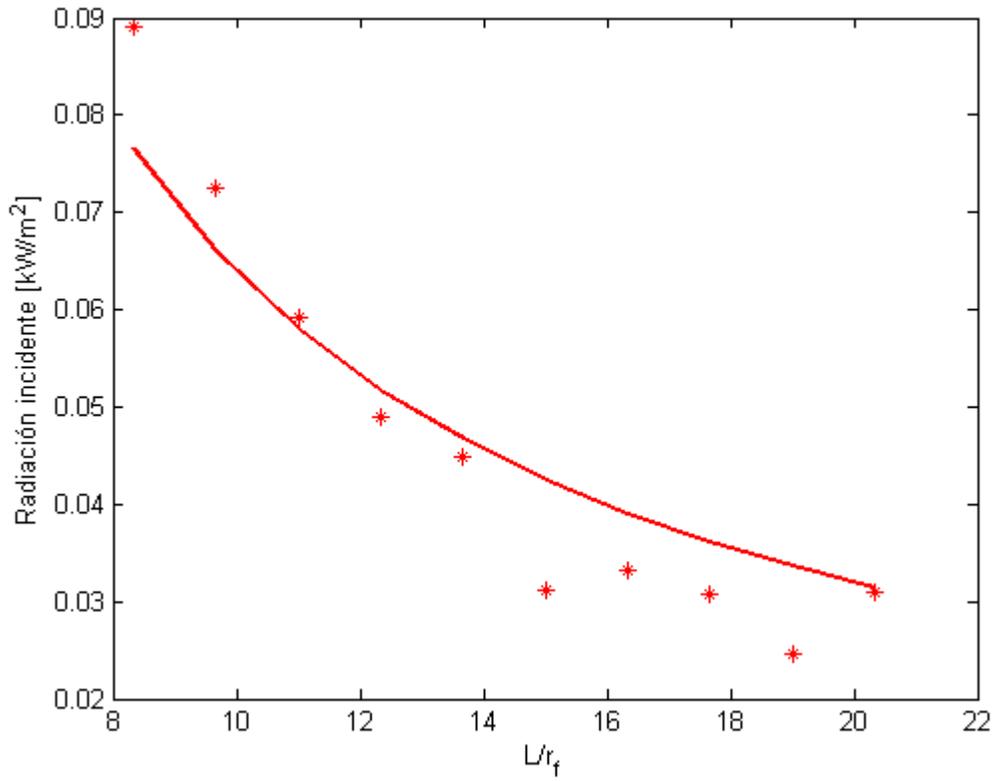


Figura A.9: Medición 4.

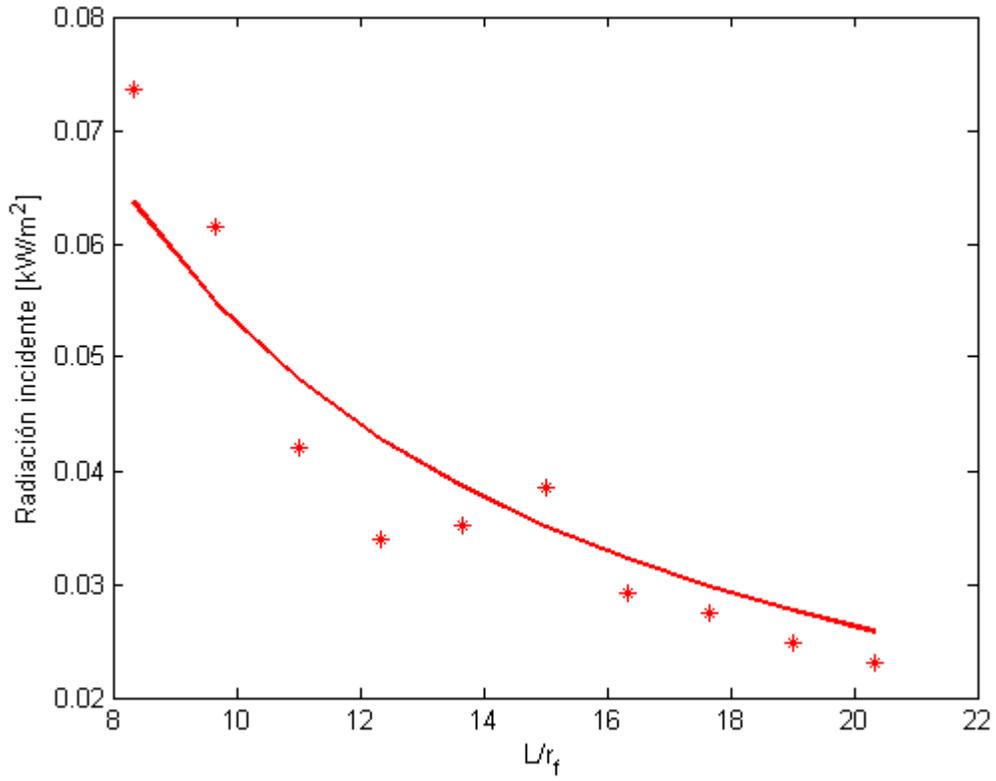


Figura A.10: Medición 5.

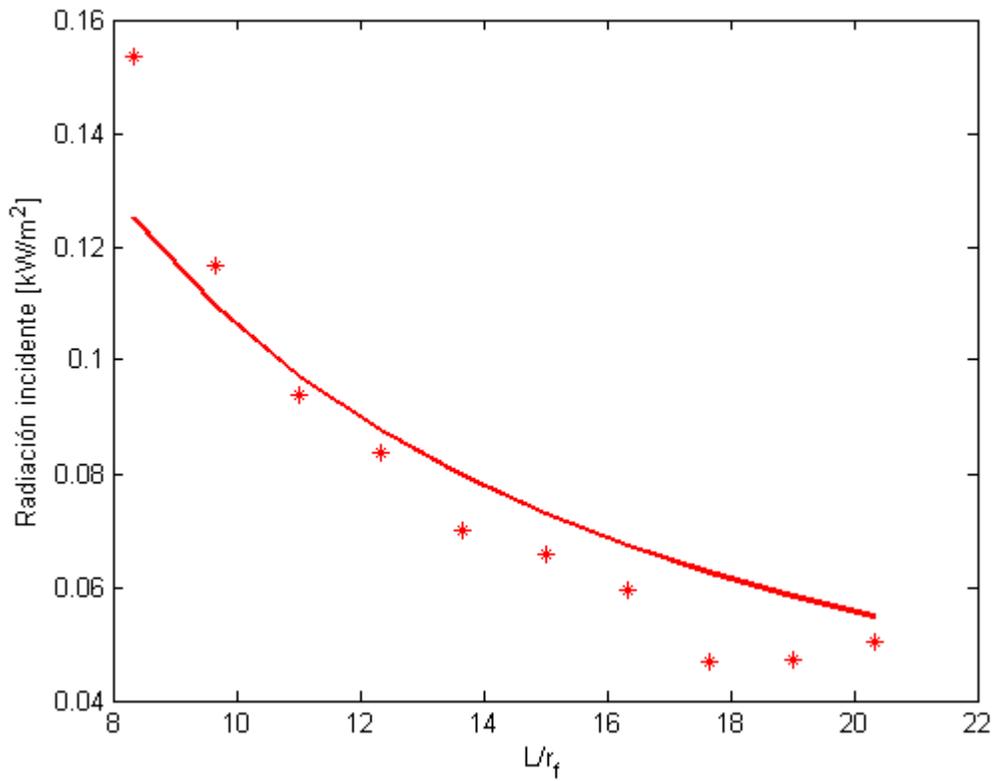


Figura A.11: Medición 6.

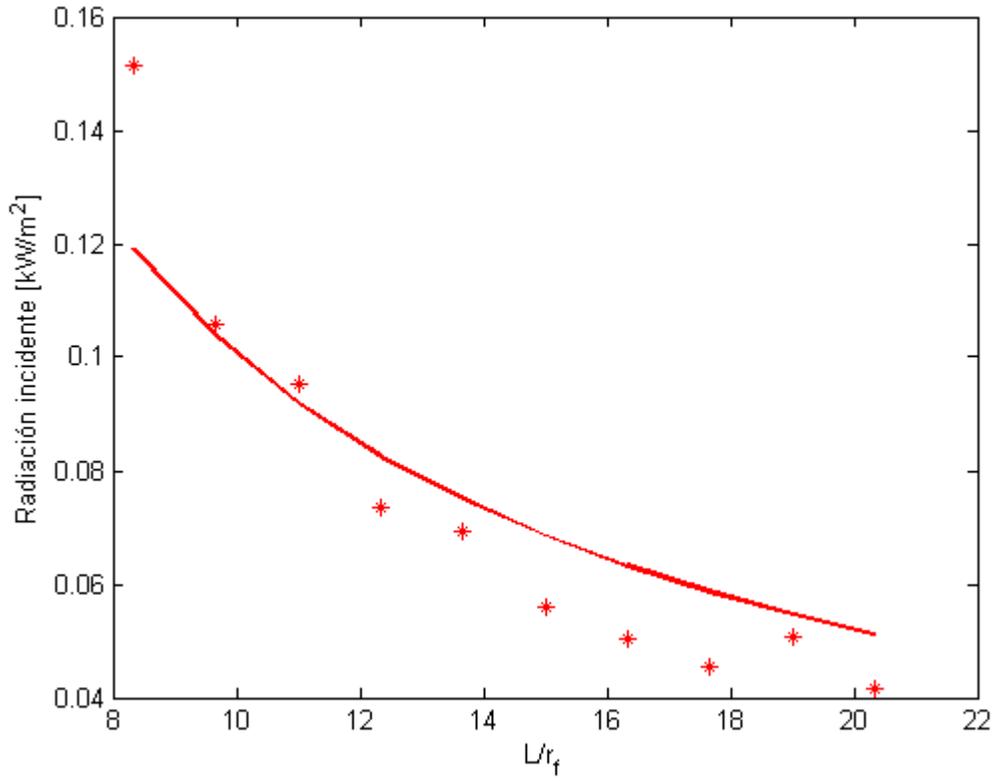


Figura A.12: Medición 7.

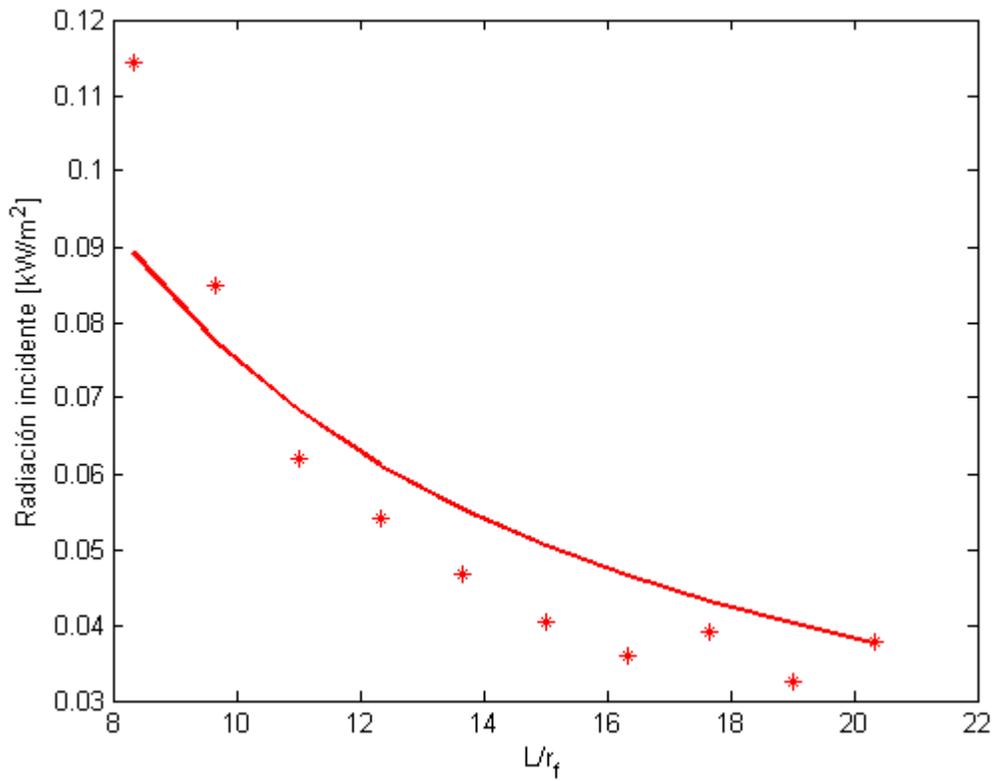


Figura A.13: Medición 8.

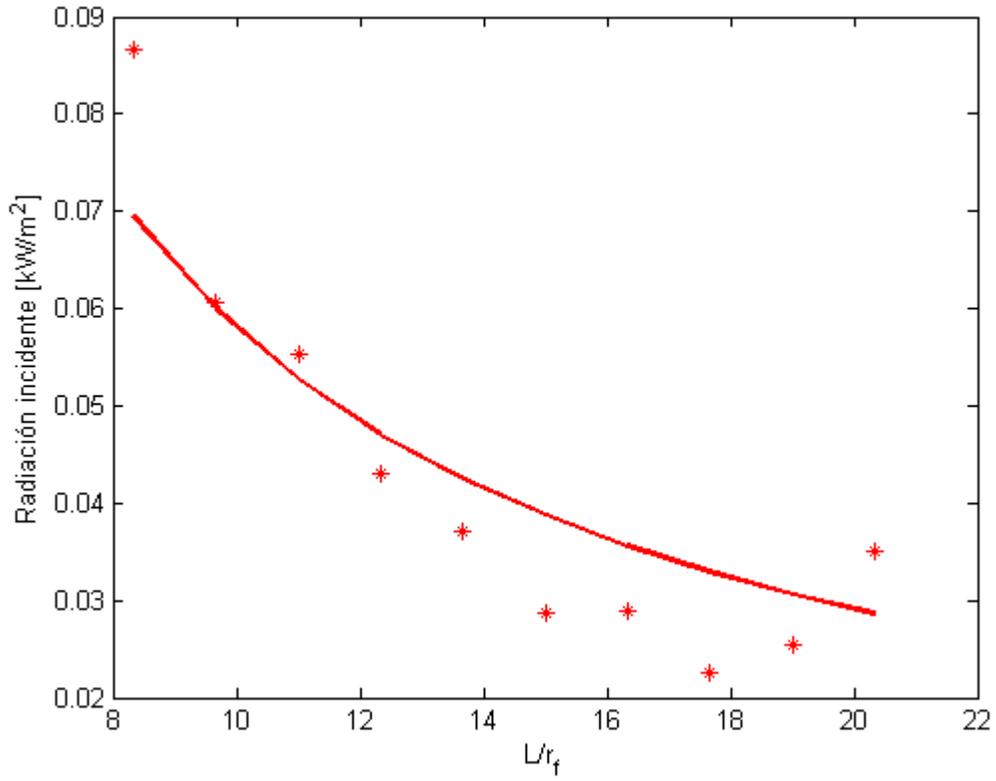


Figura A.14: Medición 9.

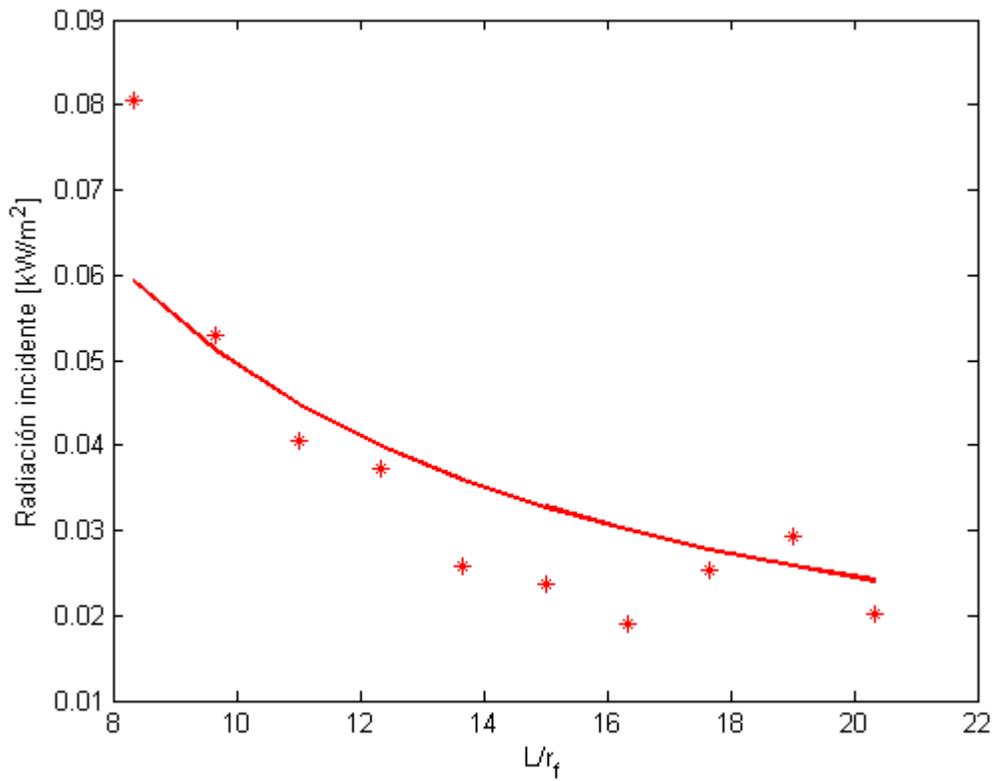


Figura A.15: Medición 10.

A continuación continúan las curvas para el flujo de gas igual a 0,74 [l/min].

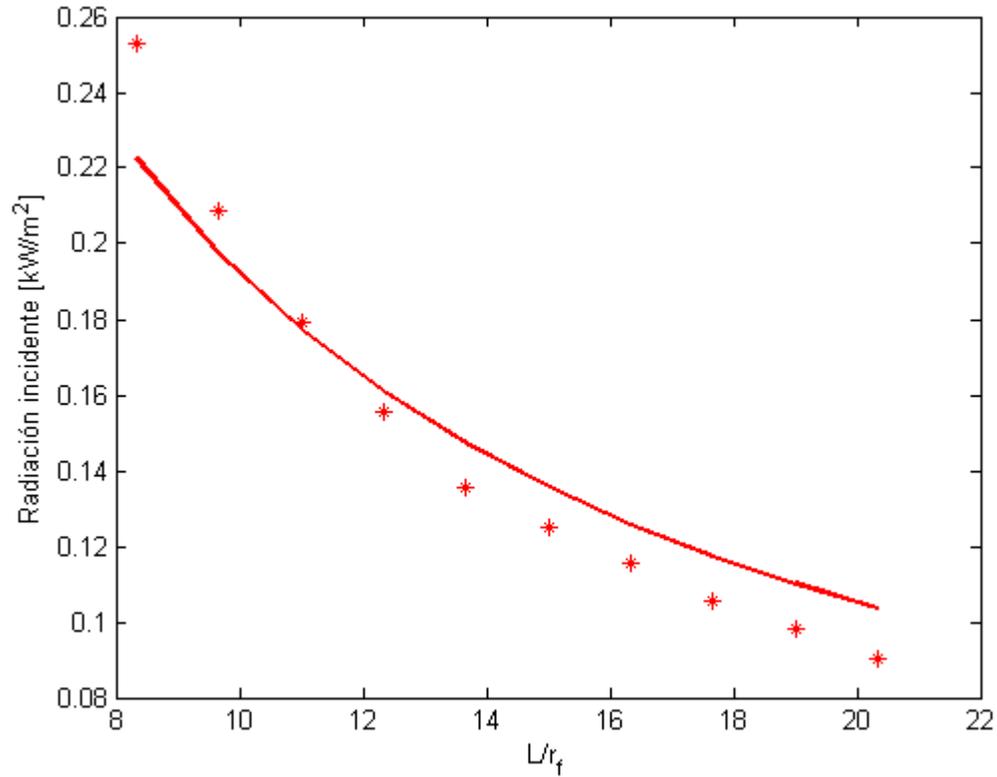


Figura A.16: Sin cortinas

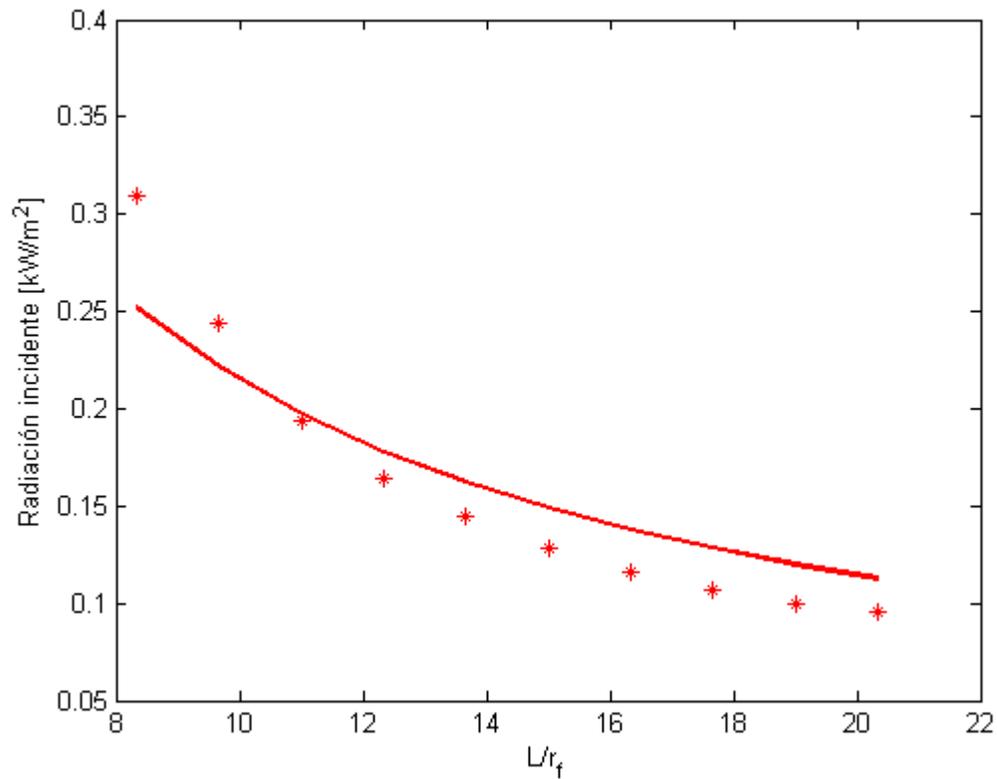


Figura A.17: Medición 11.

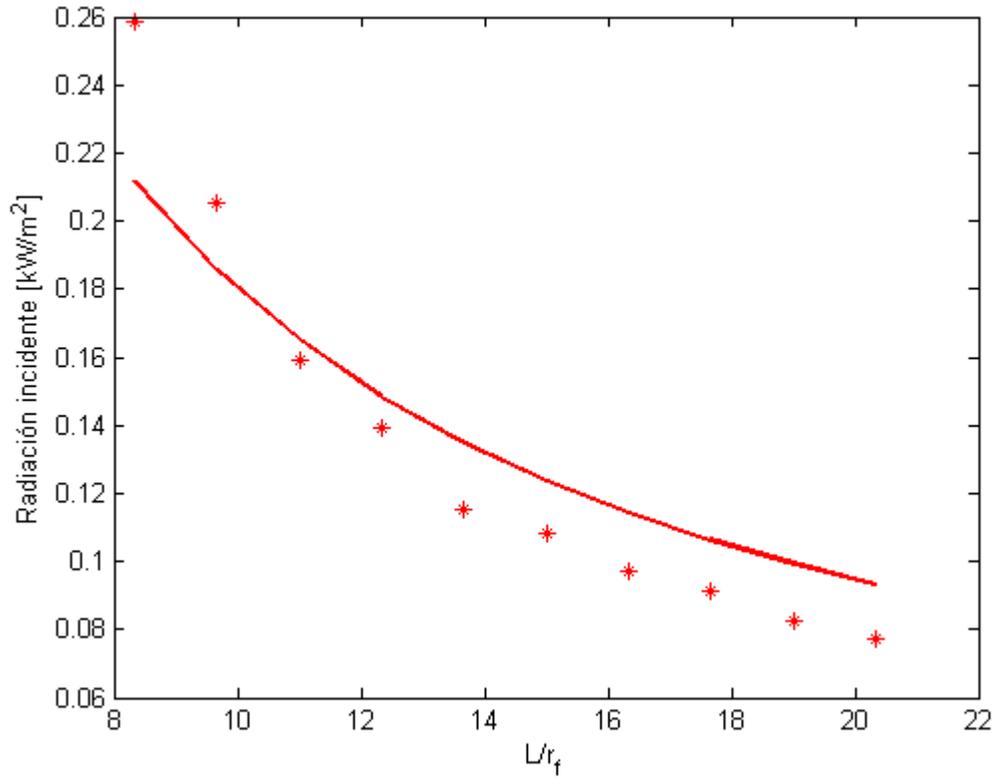


Figura A.18: Medición 12.

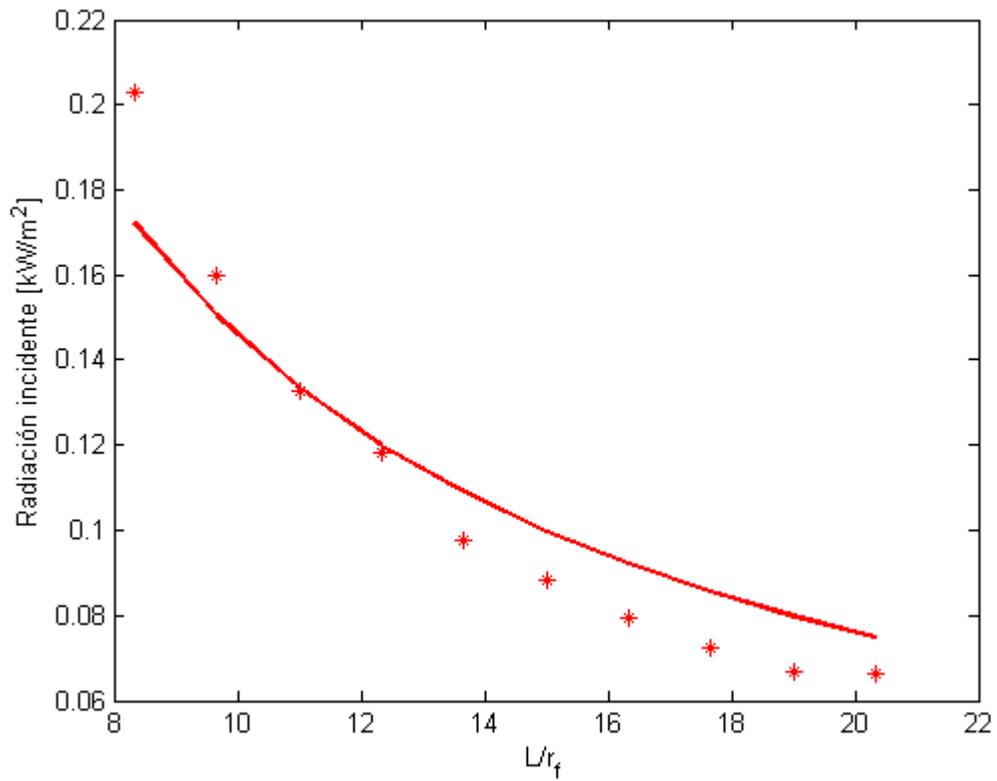


Figura A.19: Medición 13.

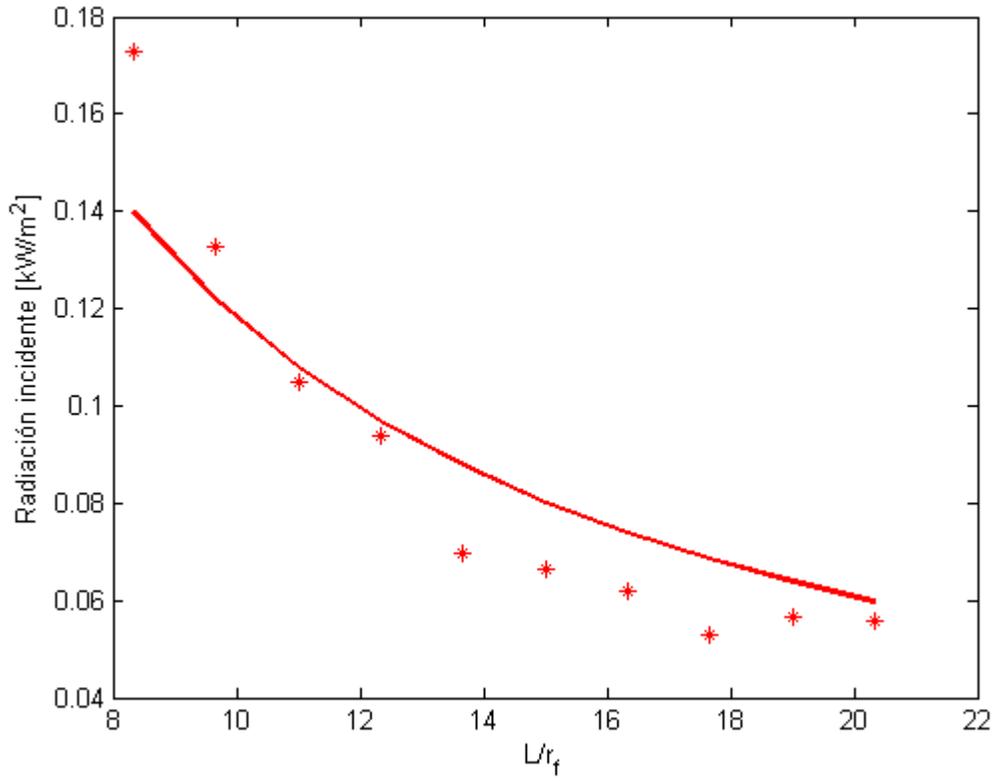


Figura A.20: Medición 14.

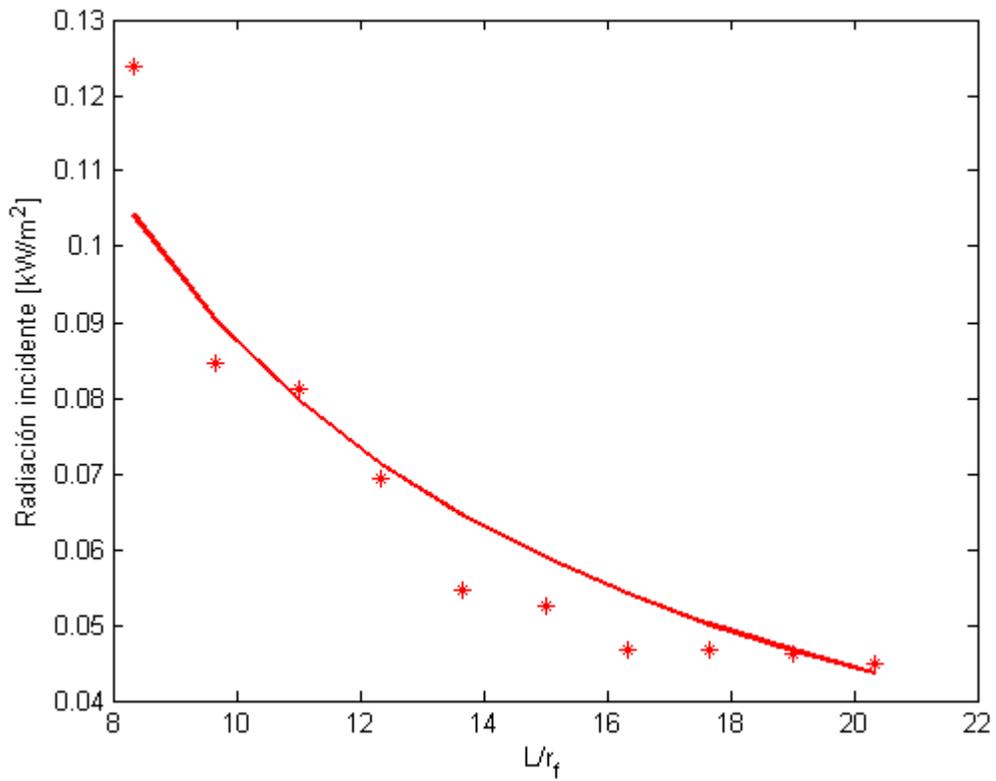


Figura A.21: Medición 15.

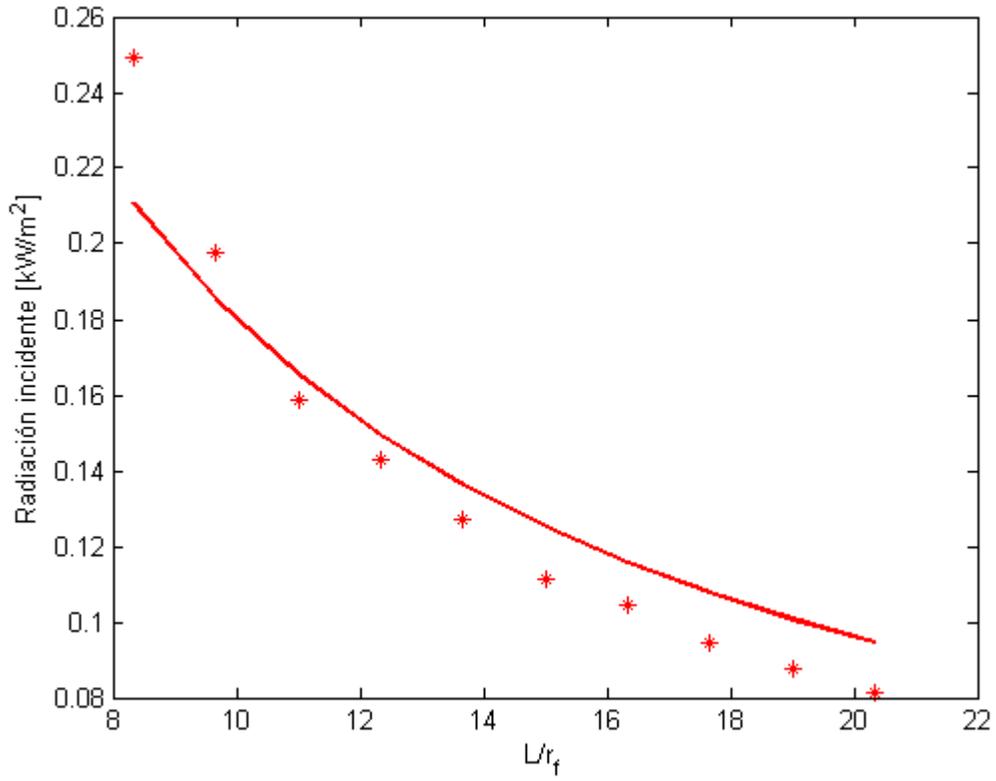


Figura A.22: Medición 16.

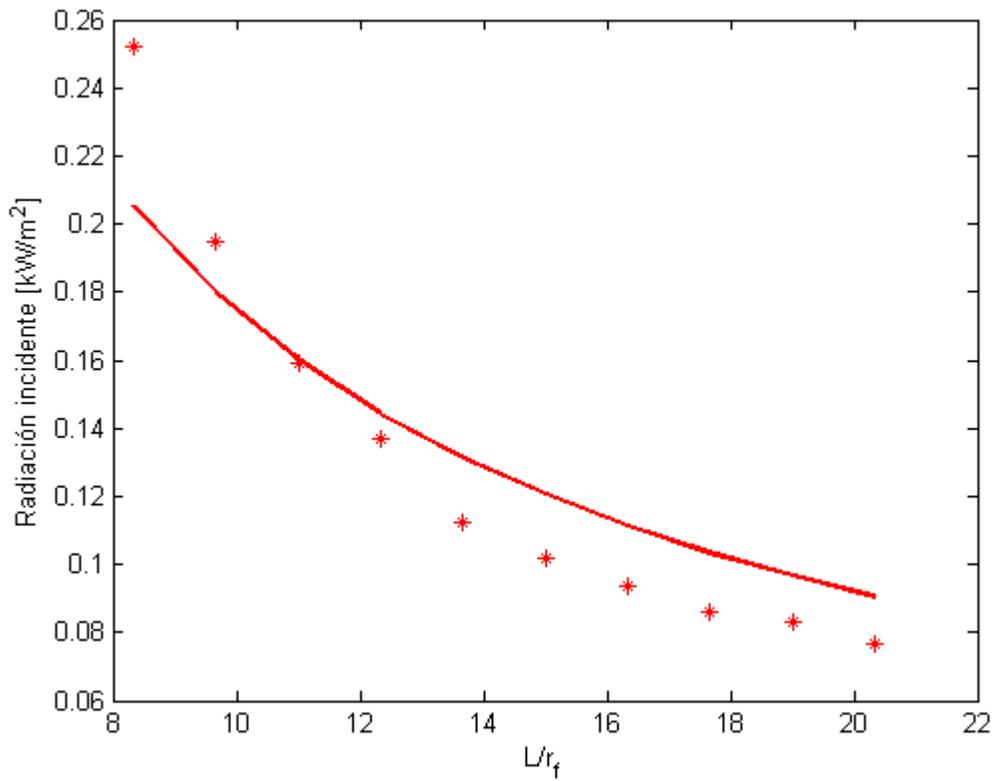


Figura A.23: Medición 17.

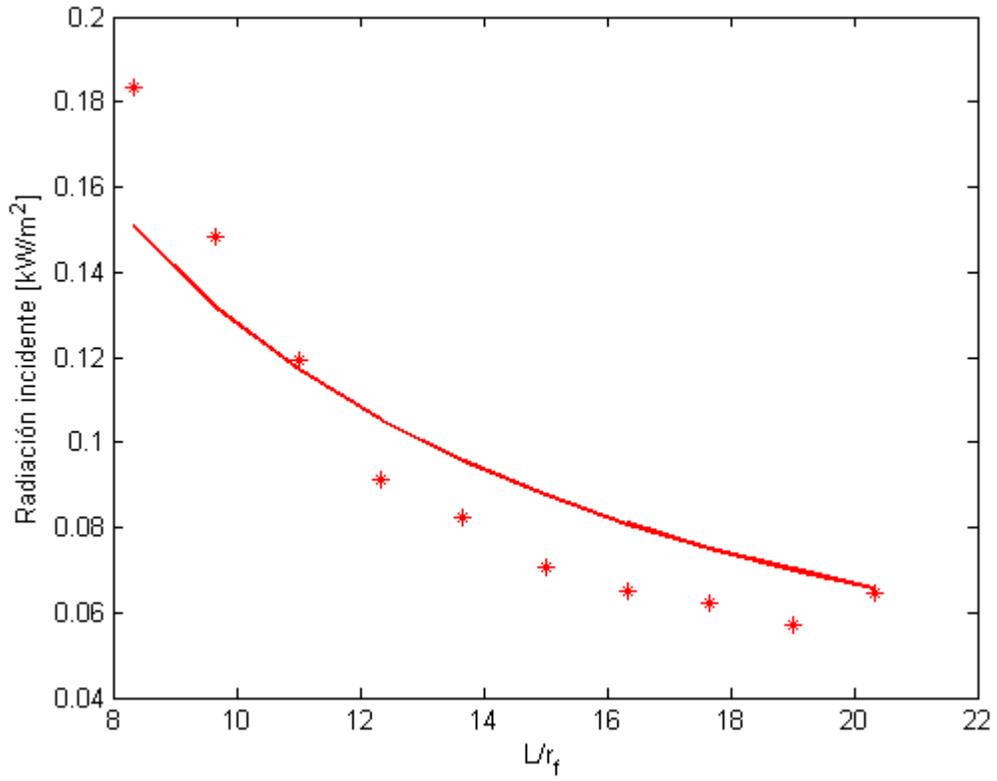


Figura A.24: Medición 18.

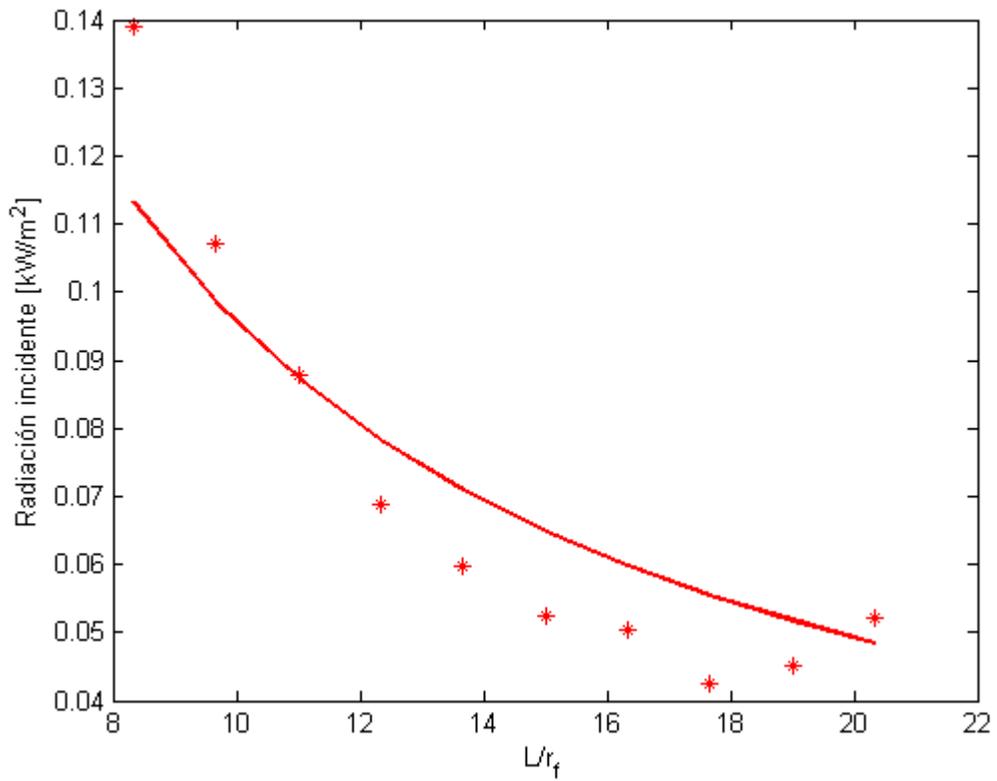


Figura A.25: Medición 19.

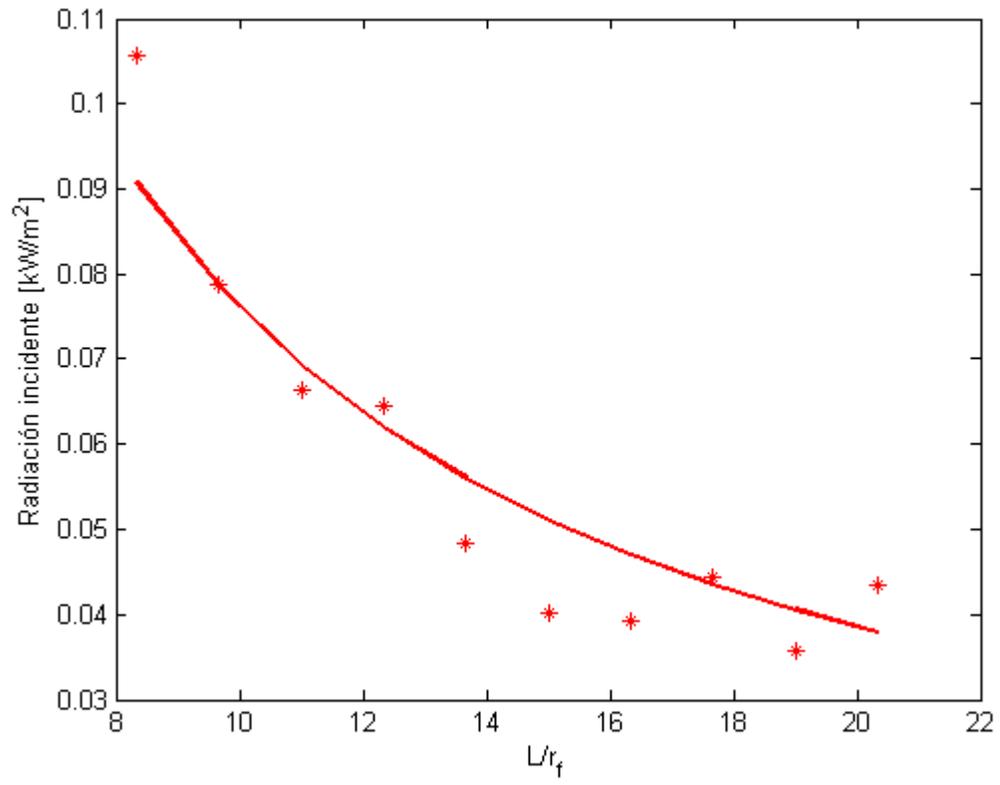


Figura A.26: Medición 20.

## B Anexo 2: Altura de llama en función de la velocidad de las cortinas

### B.1 Cuadros comparativos

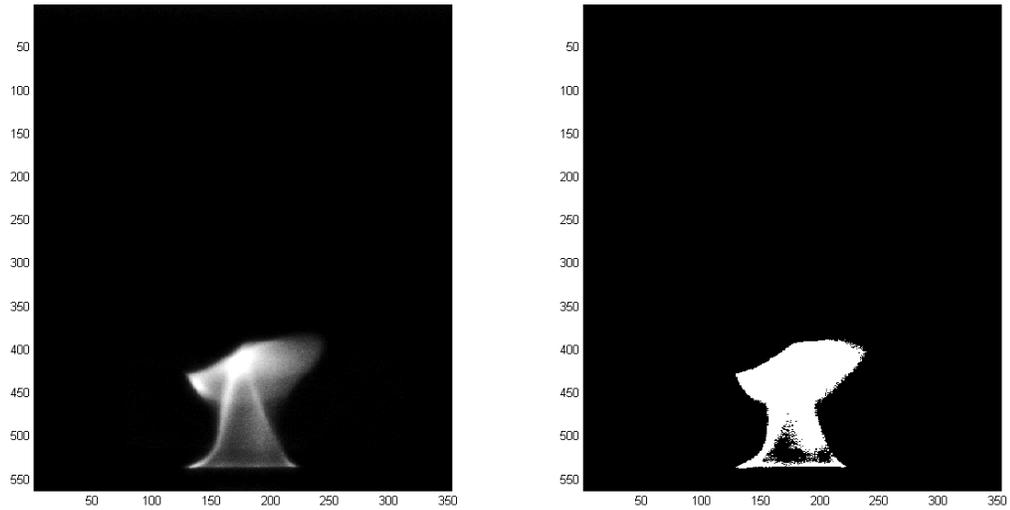


Figura 0.1: Caudal de 0,58 [l/min], cuadro 150.

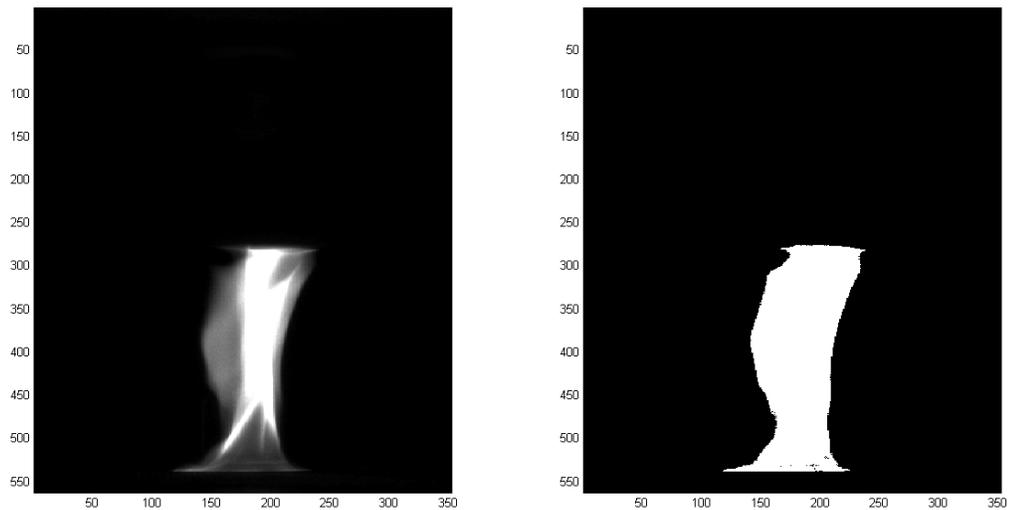


Figura 0.2: Caudal de 0,74 [l/min], cuadro 100.

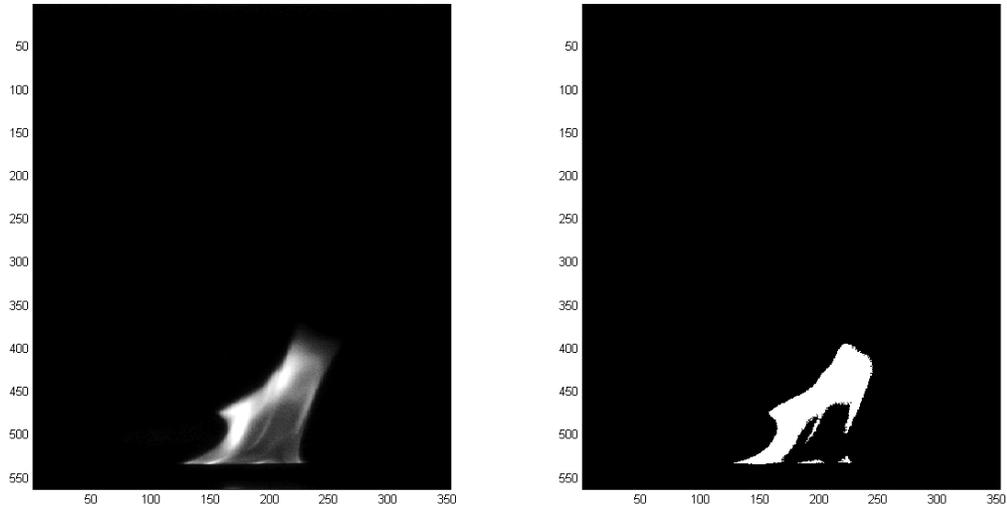


Figura 0.3: Caudal 0,74 [l/min], Medición 11

## B.2 Tabla comparativa métodos estimación de altura de llama

Tabla 0.1: Resultados de altura de llama para ambos métodos, para un caudal de 0,74 [l/min].

Medición	Altura Método Severino [mm]	Altura Método Propio [mm]
Sin Cortinas	131,47	129,34
11	93,75	88,37
12	79,45	74,85
13	68,47	64,69
14	56,44	52,68
15	38,97	36,59
16	98,73	93,82
17	84,11	79,38
18	71,82	67,62
19	55,88	52,70
20	37,62	33,88

Estos resultados como una diferencia promedio de 3,89 [mm], con una desviación estándar de 0,97, dando origen a la curva de distribución normal de la Figura B.4.

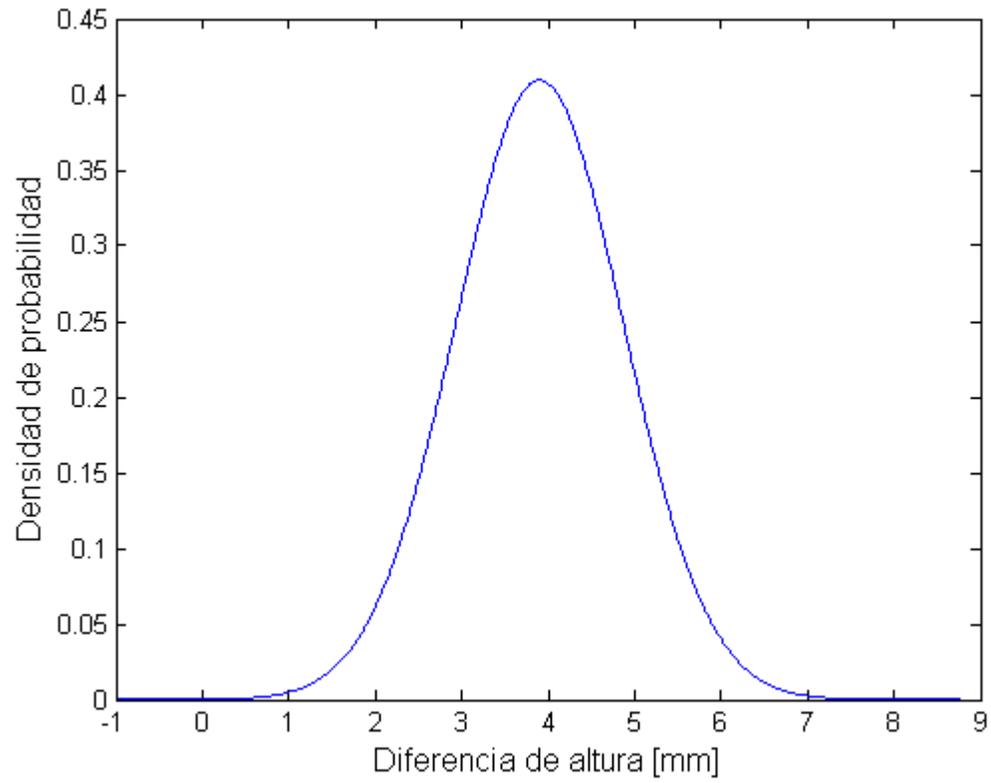


Figura 0.4: Distribución normal para las diferencias de medición de altura de llama entre ambos métodos.