

TESIS DOCTORAL

**INCENDIOS DE HIDROCARBUROS:
ESTUDIO DE LA FORMACIÓN Y
EVOLUCIÓN DEL
BOILOVER DE CAPA FINA**

Doctorando:
Fabio Ferrero

Director de Tesis:
Josep Arnaldos Viger

Barcelona, Marzo de 2006



5 EFECTO DEL *BOILOVER* SOBRE LA GEOMETRÍA DE LA LLAMA Y LA RADIACIÓN EMITIDA

El objetivo del presente capítulo es evaluar el efecto de la ebullición de la capa de agua sobre la geometría de la llama, concretamente sobre la longitud y la inclinación de ésta, y la radiación emitida por el incendio durante dicha fase. Como ya se ha indicado en el capítulo 2, la geometría de la llama en incendios de balsas de hidrocarburos ha sido objeto de estudio a partir de los años cincuenta, debido a su notable interés práctico ya que su conocimiento es fundamental al fin de apreciar el impacto del incendio sobre instalaciones contiguas.

En primer lugar, se describe el método adoptado para la obtención de las imágenes. A continuación, se explica el funcionamiento del programa que se ha utilizado al fin de obtener la información deseada sobre la geometría de la llama. El análisis se ha limitado al gasóleo, que como ya se ha indicado ha sido el único combustible que presenta *boilover*.

Posteriormente, se han analizado las correlaciones existentes en la bibliografía para calcular la longitud de la llama, comprobando que dichas correlaciones no se ajustan a los datos experimentales obtenidos en esta tesis, sobre todo cuando éstas intentan estimar dicha longitud durante el *boilover*. Por lo tanto, se han propuesto nuevas ecuaciones para el cálculo de esta longitud, teniendo en cuenta la existencia de las dos situaciones: período estacionario sin *boilover* y con *boilover*.

En los dos apartados siguientes se estudia la influencia del *boilover* sobre la inclinación y la frecuencia de pulsación de la llama.

Por último, se propone un modelo para el cálculo de la radiación incidente sobre un receptor durante dicho período y la repercusión del mismo en la estimación de las distancias de seguridad.

5.1 Metodología de medida de la longitud de la llama

El primer problema a tener en cuenta cuando se quiere medir una llama, independientemente del tipo de ésta a analizar, es definir sus límites. Además, cuando se quieren medir las dimensiones de una llama de tipo difusivo, otras tres dificultades complican el problema: la medición de un objeto tridimensional en un espacio geométrico bidimensional, el efecto de bloqueo de la radiación por el humo y la fluctuación de la altura, longitud e inclinación.

5.1.1 Límites de la llama

Los límites de la llama se eligieron, de acuerdo con lo definido por Cowley y Johnson (1991) [COWL 1991], en base a la parte ocupada por los productos de combustión a elevada temperatura que pueden emitir en el campo visible. Cabe indicar que ésta no es exactamente la zona ocupada por todos los productos de combustión. Además, para determinar la geometría de un cuerpo radiante, lo que más interesa de dicho cuerpo es la parte que puede emitir energía. Por lo tanto, el estudio se basa en la grabación de imágenes de dicha parte visible de la llama utilizando videocámaras.

5.1.2 Medida de la imagen

Una llama es un objeto tridimensional. Por lo tanto, su extremo, el cual define el contorno, se dispone en un punto del espacio que puede ser descrito por tres coordenadas. Por otra parte, hay que tener en cuenta que si se realiza una foto o una grabación de video de un objeto tridimensional en movimiento, se pierde la noción de la profundidad.

En este caso, se utilizaron dos cámaras, las cuales se dispusieron en ángulo recto entre sí. Además, se optó por colocar los aparatos de forma que la dirección predominante del viento fuera ortogonal a uno de los dos. En el caso en que la dirección del viento no sea exactamente perpendicular a la cámara, la altura e inclinación obtenida de las imágenes se puede corregir si se conoce la dirección del viento relativa a la línea de visión [MOOR 1982]. Si θ_{img} y L_{img} representan, respectivamente, la inclinación y la longitud determinadas a partir de las imágenes y θ_{cw} el ángulo entre la dirección del viento y la normal a la línea de visión; entonces, la longitud real y el ángulo real de la llama son:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_{img}}{\cos \theta_{cw}} \right) \quad (5.1)$$

$$L = L_{img} \frac{\cos \theta_{img}}{\cos \theta} \quad (5.2)$$

5.1.3 Efecto de bloqueo del humo

La formación de humo se debe a la falta de oxígeno en el interior de la llama; en llamas de tipo difusivo de gran tamaño, la entrada de aire no es suficiente para garantizar las condiciones estequiométricas en todo el incendio (especialmente en las zonas centrales, más lejanas de la antedicha entrada de aire). Por lo tanto, la combustión no puede realizarse completamente, apareciendo en los productos de combustión componentes pesados no oxidados. Estos se caracterizan por una emisividad mucho mayor que la del CO_2 y del vapor de agua, pero, siendo de color negro ya que su temperatura es la más baja respecto al resto de componentes que forman la llama, dichos productos, oscurecen

parte de esta llama. Normalmente, la parte de la llama tapada por el humo se desprecia, ya que dicho humo bloquea la radiación emitida.

5.1.4 Pulsación

Las características mecánicas de las llamas de tipo difusivo se manifiestan siempre en su fluctuación; es decir, en la repetición, a intervalos más o menos regulares, de un comportamiento característico. Las fases que se repiten son esencialmente la formación de la llama, su crecimiento debido a la entrada de aire desde el exterior, la consecuente turbulencia, el mantenimiento de una parte de la llama aún no exhausta y el retorno a la situación inicial. Según estudios previos [BEJA 1991], dichas fases se repiten con un periodo característico, generalmente variable con los factores que influyen sobre la turbulencia, especialmente la velocidad del viento. En este sentido, tiene mucho interés el *boilover*, debido a que la ebullición del agua aumenta la turbulencia del incendio.

Por otra parte, el carácter pulsante se traduce en la necesidad de procesar las imágenes con una frecuencia superior o, por lo menos, comparable con la pulsación propia de la llama. Por lo tanto, en este caso, a partir de la grabación del incendio, se han extraído 25 imágenes (*frames*) por segundo.

5.2 Adquisición de los datos

Como ya se ha dicho anteriormente, todas las pruebas realizadas han sido filmadas con dos cámaras de video, en posición perpendicular entre sí, de manera de poder evaluar el efecto de la inclinación de la llama. En cada prueba la posición donde situar las videocámaras ha sido elegida, basándose en el dato de dirección del viento registrado por la estación meteorológica, para garantizar la máxima perpendicularidad posible entre la línea de visión de una de las dos cámaras —nombrada CAM1— y la dirección en que, bajo la acción del viento, se desarrolla la llama, como se muestra en la figura 5.1. En cambio la otra cámara (CAM2) ha sido colocada a 90 grados respecto a la CAM1, es decir, en la dirección del viento predominante, para determinar las desviaciones de dicha línea.

Con la finalidad de obtener una información sobre la geometría de la llama que asegure la repetición y fiabilidad en los datos utilizados, se ha seguido un procedimiento específico. Los vídeos de las experiencias se han digitalizado en archivos .avi, por medio de una tarjeta capturadora de vídeo y se han almacenado en discos compactos. La tarjeta tenía, además de una entrada de video normal, una entrada S-Video, la cual permite una menor pérdida de calidad de la imagen durante el proceso de captura al PC. A partir de estos archivos digitales, se han adquirido las imágenes con una frecuencia de 25 imágenes por segundo, como ya se ha indicado en el apartado anterior, memorizándolas en archivos de extensión .jpg.

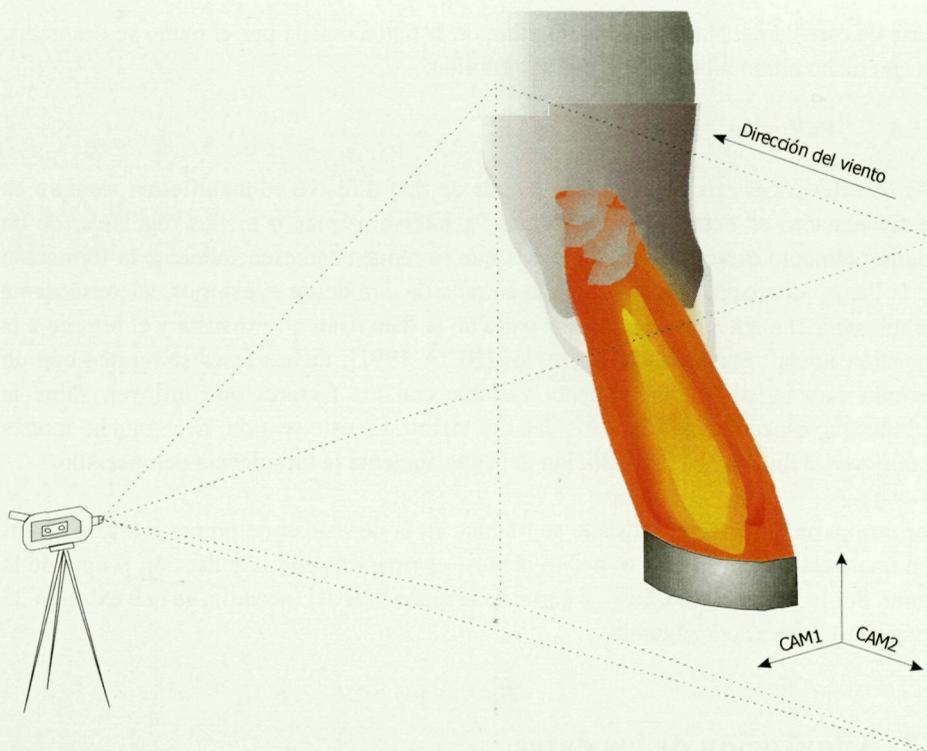


Figura 5.1. Posición de la cámara CAM1 respecto a la llama.

El primer programa, creado y utilizado por Falgas [FALG 2002], se basaba sobre el análisis de los valores RGB de los píxeles que conforman una imagen. En efecto, cada píxel está representado por tres valores numéricos que corresponden, respectivamente, a la intensidad de rojo (valor Red), a la intensidad de verde (valor Green) y a la intensidad del azul (valor Blue), los cuales definen el color del mismo píxel. El programa, utilizando los comandos predefinidos de MATLAB *impixel* e *improfile*, almacenaba la información RGB de la imagen en tres matrices distintas de igual tamaño. Las dimensiones de la matriz dependían solamente de la resolución de la imagen; por ejemplo, con una resolución de 320 x 480 píxel, las matrices tenían, obviamente, 320 líneas y 480 columnas. Posteriormente, el programa determinaba, de forma automática, el extremo superior de la llama en cada imagen, basándose en condiciones de pertenencia o no del píxel en el perfil del incendio. Pese a que las condiciones de pertenencia se habían determinado con precisión tras el análisis previo de varias imágenes de video, en algunos casos el programa proporcionaba datos incoherentes, debido a que, por sus características específicas, un punto del fondo de imagen o del cielo podía llegar a ser considerado como interno a la llama.

Dicho programa fue rediseñado por Muñoz, dejando de ser “completamente automático” ya que implicaba la presencia de un operador que determinase manualmente el punto superior de la llama [MUÑO 2005]. El algoritmo utilizado en la

presente tesis, nombrado *hdscanning*, deriva de una modificación del programa rediseñado por Muñoz y su funcionamiento se detalla a continuación.

Una vez especificado un directorio de trabajo, el programa lee previamente dos archivos de “entrada” que contienen información necesaria para la posterior obtención de datos. El primer archivo, cuyo nombre por defecto es *imgfiles.txt*, contiene la lista de los archivos de imágenes que el programa abrirá de forma sucesiva. El otro archivo, cuyo nombre por defecto es *parametros.inf*, se muestra en la figura 5.2.

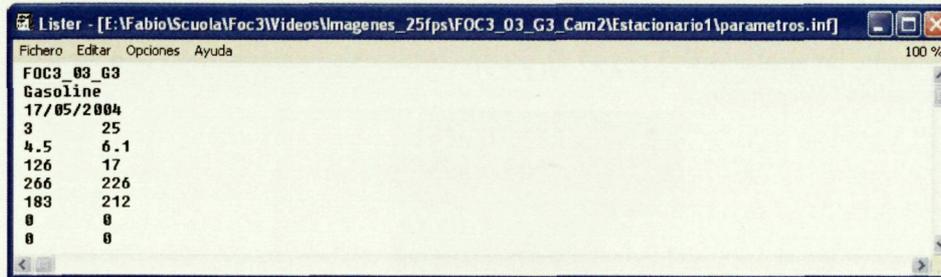


Figura 5.2. Ejemplo de archivo de “entrada” *parametros.inf*.

Dicho archivo requiere en el siguiente orden:

- el nombre del experimento,
- el tipo de combustible,
- la fecha de la prueba,
- el diámetro de la balsa utilizada, expresado en m,
- las imágenes por segundo (fps),
- los factores de conversión horizontal y vertical (cm/píxel),
- las coordenadas (x,y) del píxel que se elige como límite superior de la imagen,
- las coordenadas (x,y) del píxel que se elige como límite inferior de la imagen,
- las coordenadas (x,y) del píxel en que se sitúa el centro de la balsa,
- el ángulo con la corrección θ_{cw} (°) y su desviación estándar,
- la velocidad media del viento (m/s) y su desviación estándar.

Hay que destacar las siguientes consideraciones:

- Los factores de conversión horizontal y vertical (cm/píxel) se determinaron previamente, utilizando referencias de una imagen grabada antes del inicio del incendio.
- Elegir unos límites inferior y superior de la imagen no era una operación necesaria para el cálculo de las variables deseadas. Sin embargo, de esta forma el programa abre una imagen ampliada en la cual es más fácil caracterizar el extremo superior de la llama.
- Las coordenadas del centro se refieren a la imagen no recortada.

- El ángulo θ_{cw} se determina previamente tras la observación del dato de dirección del viento y de las grabaciones de video de los incendios.

Una vez ejecutado el programa de lectura de datos, si *hdscanning* no encuentra errores en esta fase de lectura de los archivos de “entrada”, se abre la primera imagen de la lista mediante el comando propio de MATLAB *imread* y se pone en modalidad de espera, hasta que el usuario no elija el extremo superior de la llama con un clic del ratón. Antes de pasar a una nueva imagen, el programa muestra la distancia entre el centro de la balsa y el extremo elegido, como se muestra en la figura 5.3. Además, con los factores de conversión, calcula la longitud, la altura y la inclinación de la llama y las corrige mediante las ecuaciones (5.1) y (5.2), memorizando toda la información en un archivo de “salida” (*length.dat*).



Figura 5.3. Ejemplo de imagen tratada.

A continuación, el programa cierra la imagen tratada y abre la siguiente, esperando nuevamente al clic del ratón por parte del usuario. La operación continúa hasta que se llega a leer la última imagen listada en el archivo *imgfiles.txt*. En este punto, el programa genera dos archivos de “salida”:

- El archivo *length.dat*, en el cual se han almacenado progresivamente los datos de altura y longitud de llama (en cm), la inclinación y, además, la longitud y la inclinación corregidas.
- El archivo *intermitencia.dat*, en el cual se memorizan los datos que conforman la curva de intermitencia de la longitud adimensional, a partir de la cual se podrán determinar los valores medio, máximo y mínimo de longitud, tal como se explicará en el siguiente apartado.

5.3 Análisis cualitativo de la longitud de la llama

Ronza [RONZ 2002], con la finalidad de un análisis cualitativo previo de la evolución de la geometría del incendio, estudió las imágenes grabadas con una frecuencia de una imagen por segundo. Dicho análisis, permitió evidenciar una tendencia general al aumento de la altura de la llama durante el *boilover* en las pruebas de gasóleo. En la presente tesis, no se ha realizado estudio previo, ya que los periodos del incendio han sido determinados con precisión en otros análisis (velocidad de combustión, temperatura del líquido). Por lo tanto, se ha procedido directamente a la determinación de las características geométricas de la llama en periodos específicamente elegidos. Mediante el uso del nuevo sistema de adquisición desarrollado (véase el apartado 3.4.1), ha sido posible caracterizar periodos con viento prácticamente constante en velocidad y dirección. Por lo tanto, se han podido determinar, con la ayuda de la observación de las grabaciones de las dos cámaras, fases con una llama estable; es decir, aptas para el análisis de las características geométricas, tanto para la fase estacionaria como para el *boilover*.

Hay que destacar que, mientras que en el período estacionario ha sido siempre posible determinar un periodo de 15-20 segundos de viento casi constante, en algunos casos, durante el *boilover* —debido a su menor duración— las fases estables han sido del orden de los 10 segundos. Sin embargo, esto no ha supuesto ningún problema, ya que, según estudios previos [PAGN 1989, BEJA 1991], para los diámetros examinados la frecuencia de pulsación tiene que estar comprendida entre 0,5 y 1,5 Hz y, en todos los casos analizados, el intervalo ha sido satisfactorio para mantener dicha frecuencia, teniendo en cuenta que se utilizaron 25 imágenes por segundo.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos tras el tratamiento efectuado sobre los fotogramas de los incendios. En estos resultados se analizan la longitud de la llama, así como la inclinación de ésta y su frecuencia de pulsación. Hay que indicar que no se ha considerado la influencia del espesor inicial de combustible, en cuanto en la bibliografía, todos los autores concuerdan en excluir la relevancia de dicho parámetro en los fenómenos fluidodinámicos que regulan la geometría de la llama en los incendios de balsa.

5.3.1 Incendios de gasóleo: periodo estacionario

En la figura 5.4 se muestra la evolución de la longitud de la llama en un intervalo de tiempo considerado, para la prueba FOC3_02_D3 (gasóleo, 3 m, espesor inicial de 15 mm). Es evidente la naturaleza pulsante de la llama, característica de incendios de grandes dimensiones; la longitud (y la altura) medida oscila alrededor de un valor medio, que se calcula para cada incendio según el criterio de la intermitencia, como se explicará a continuación. Cabe destacar que en la figura 5.4, las abscisas indican el tiempo relativo al inicio del intervalo elegido para el análisis y no al inicio del incendio.

Los datos de la figura 5.4 se utilizan para calcular la intermitencia de la llama $I(L)$, definida como la fracción de tiempo en la cual la longitud de dicha llama se encuentra por encima de una cota L [ZUKO 1995]. El cálculo de la intermitencia se efectúa una vez obtenidos los gráficos de longitud máxima en el periodo considerado y determinado el valor de longitud mínimo y máximo alcanzados, originando un rango de valores de este parámetro que se divide en diferentes clases. Entonces, para cada clase, se calcula la frecuencia de ocurrencia acumulada en el tiempo; es decir, el número de fotogramas en que la longitud visible de la llama cae en el interior de cada clase. A partir del dato de frecuencia acumulado se determina la intermitencia de la llama de forma porcentual.

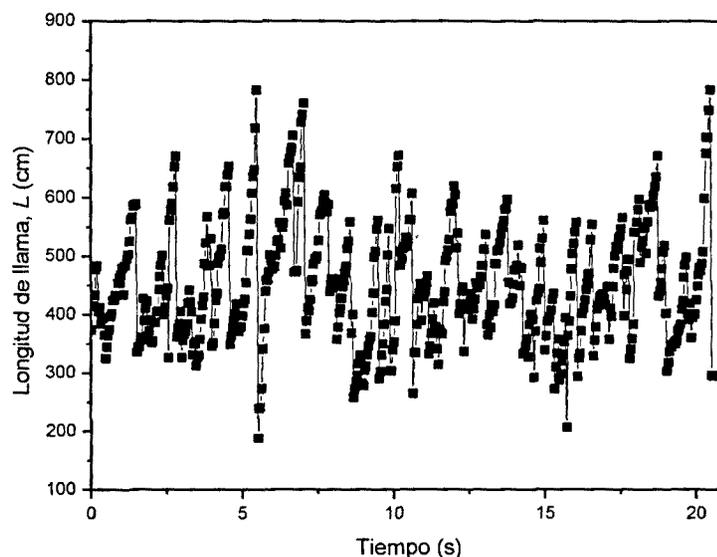


Figura 5.4. Evolución de la longitud de la llama en el periodo estacionario para la prueba FOC3_02_D3.

La figura 5.5 muestra la intermitencia para la prueba FOC3_02_D3, y en ella pueden verse los valores de:

- $I = 0,5$ que determina la longitud media;
- $I = 0,05$ que determina la longitud máxima;
- $I = 0,95$ que determina la longitud mínima.

Estas definiciones, las cuales son arbitrarias, han sido utilizadas por Zukoski [ZUKO 1995] para establecer las mencionadas longitudes.

El cálculo de la intermitencia lo efectúa directamente el programa *hdscanning* al final de la adquisición de datos. Cabe indicar que; para cada prueba, la intermitencia ha sido calculada en función de la longitud adimensional (L/D) y no de L : el resultado es

idéntico, al haber dividido siempre por el mismo factor multiplicativo. Además, expresar la longitud en términos adimensionales es útil, teniendo en cuenta que el cálculo de dicho parámetro mediante correlaciones siempre se hace a partir de dicho factor adimensional.

En la tabla 5.1 se indican todos los valores de longitud adimensional media, máxima y mínima en el periodo estacionario para los incendios de gasóleo realizados en este estudio, así como la velocidad media del viento. En algunos incendios, ha sido posible caracterizar más de una fase —durante el estacionario— en que la llama fue estable y, por lo tanto, utilizar dos datos de longitud media, máxima y mínima.

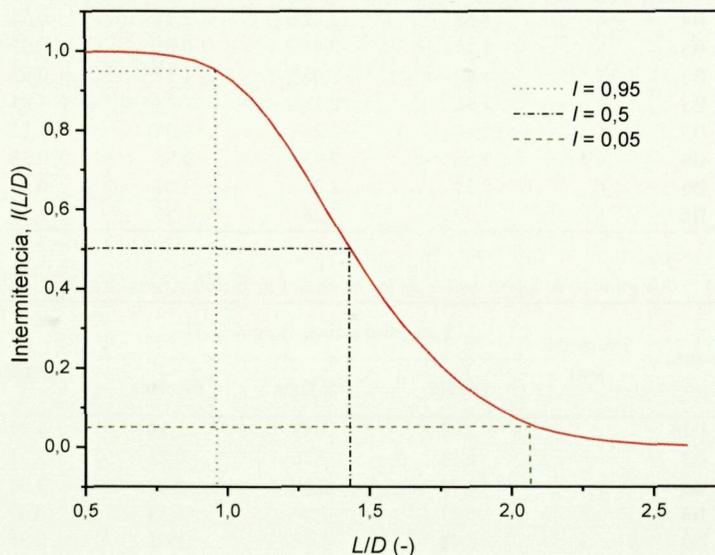


Figura 5.5. Intermitencia de la longitud de la llama en el periodo estacionario para la prueba FOC3_02_D3.

5.3.2 Incendios de gasóleo: *boilover*

El cálculo de la intermitencia en la fase *boilover* ha sido análogo al del periodo estacionario. Sin embargo, en este caso, el proceso de elección de un periodo con llama estable fue más complicado, a causa de la pequeña duración del *boilover*.

La tabla 5.2 muestra los valores de longitud adimensional media, máxima y mínima en el periodo del *boilover* para los incendios de gasóleo analizados en esta tesis, indicando también la velocidad media del viento durante la fase examinada.

Tabla 5.1 Longitud de la llama visible de los incendios de gasóleo durante el periodo estacionario

Experimento	Diámetro (m)	Longitud adimensional (L/D)			u (m/s)
		Media	Máxima	Mínima	
FOC3_22_D15	1,5	1,68	2,32	1,07	0,36
FOC3_01_D3	3	1,65	2,22	1,09	2,29
FOC3_02_D3	3	1,42	2,08	1,00	1,23
FOC3_04_D3	3	1,86	2,79	1,00	0,00
FOC3_05_D3	3	1,86	2,57	1,22	0,49
FOC3_18_D3	3	1,84	2,51	1,23	1,23
FOC3_20_D3	3	1,57	2,23	1,10	1,23
FOC3_14_D4	4	1,84	2,52	1,29	0,76
FOC3_15_D4	4	1,58	2,22	1,08	1,77
FOC3_16_D4	4	1,68	2,48	1,11	0,54
FOC3_09_D5	5	1,74	2,45	0,83	0,02
FOC3_10_D5	5	1,62	2,08	1,17	0,92
FOC3_11_D5	5	1,66	2,15	1,17	1,85
FOC3_11_D5	5	1,69	2,25	1,08	0,22
FOC3_07_D6	6	1,56	2,25	0,95	0,58
FOC3_12_D6	6	1,71	2,33	1,04	0,04
FOC3_12_D6	6	1,48	2,26	0,56	0,56

Tabla 5.2 Longitud de la llama visible de los incendios de gasóleo durante el *boilover*

Experimento	Diámetro (m)	Longitud adimensional (L/D)			u (m/s)
		Media	Máxima	Mínima	
FOC3_22_D15	1,5	2,48	3,53	1,74	1,01
FOC3_01_D3	3	1,38	2,35	0,85	2,51
FOC3_02_D3	3	1,70	2,39	0,92	1,34
FOC3_04_D3	3	1,97	3,04	1,35	0,07
FOC3_05_D3	3	2,48	3,16	1,83	0,34
FOC3_18_D3	3	1,98	2,84	1,31	1,23
FOC3_20_D3	3	2,24	2,73	1,80	0,11
FOC3_14_D4	4	2,36	3,27	1,76	0,36
FOC3_15_D4	4	1,66	2,59	1,28	1,19
FOC3_16_D4	4	1,91	2,70	1,31	0,99
FOC3_09_D5	5	2,19	3,07	1,49	0,41
FOC3_10_D5	5	1,76	2,40	1,29	1,55
FOC3_11_D5	5	1,87	2,52	1,38	1,59
FOC3_07_D6	6	1,86	2,52	1,36	0,29
FOC3_12_D6	6	1,89	2,46	1,29	0,59

Comparando los resultados de las tablas 5.1 y 5.2, se observa, como era de esperar, una tendencia al aumento de las tres longitudes características de la llama durante el *boilover* con respecto al estacionario sin *boilover*. Como muestra la figura 5.6, para la prueba FOC3_05_D3 (gasóleo, 3 m, 25 mm de espesor de combustible) ha sido posible realizar una comparación directa entre las longitudes, ya que las dos fases presentaron prácticamente las mismas condiciones de viento. Sin embargo, una cuantificación total

y absoluta del aumento de la longitud de la llama durante el *boilover* no ha sido posible, debido a que sólo en pocos experimentos se presentaron las condiciones antedichas. A pesar de todo, parece ser que a igual incremento (o disminución) de velocidad del viento puede ocurrir una respuesta diferente en la fase de ebullición respecto a la evolución normal del incendio. Por lo tanto, es evidente que en la obtención de correlaciones para determinar la longitud de la llama, es necesario incluir la influencia del viento.

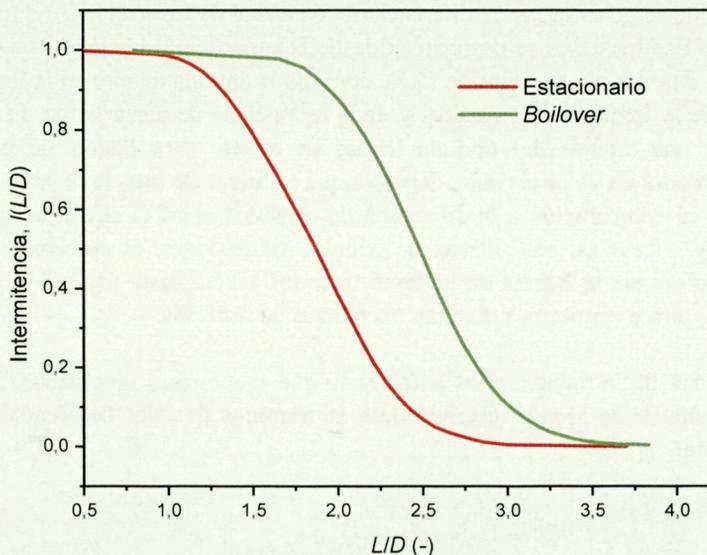


Figura 5.6. Comparación de la intermitencia de la llama entre el periodo estacionario y el *boilover* para la prueba FOC3_05_D3.

5.4 Determinación de una correlación para el cálculo de la longitud de la llama

En todas las correlaciones para la determinación de la longitud de la llama se han utilizado parámetros adimensionales, con la finalidad de eliminar la dependencia del tamaño del incendio. Las principales ecuaciones ya han sido descritas en orden cronológico en el capítulo 2. A continuación, se describen de forma detallada los parámetros adimensionales utilizados en las correlaciones existentes en la bibliografía que se han analizado al compararlas con los datos experimentales, así como en las nuevas correlaciones determinadas en esta tesis para el cálculo de esta longitud.

5.4.1 El número Q^*

El número adimensional de combustión Q^* , introducido por Zukoski [ZUKO 1981], se basa en el número de Froude:

$$Fr = U^2 / (D \cdot g) \quad (5.3)$$

el cual proporciona una medida de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de flotación que se generan por la diferencia de densidad de los gases. U representa la velocidad con que los gases se desprenden desde la superficie de la balsa. La relación entre fuerzas, descrita por la ecuación (5.3), controla la entrada de aire en la llama y es responsable de la formación de vórtices y de la turbulencia de dicha llama. El número en sí, ya da una medida del tipo de llama; en efecto, para llamas de pequeñas dimensiones tendrá un valor elevado, debido a que la fuerza de inercia de la llama será muy elevada en comparación a la diferencia de densidad entre el aire y los gases de combustión, y, viceversa, para llamas de grandes dimensiones, el número tendrá un valor pequeño porque la inercia de la llama tiene influencia hasta una cierta altura, a partir de dicha altura empiezan a dominar las fuerzas de flotación.

Con la finalidad de introducir otros parámetros que fueran más apropiados, Zukoski modificó el número de Froude, escribiéndolo en términos de calor desprendido, de la siguiente forma:

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a C_{p,a} T_a \sqrt{g D D^2}} \quad (5.4)$$

Por lo tanto, Q^* coincide con la raíz cuadrada del número de Froude expresado en términos de la potencia térmica desprendida por la combustión. El término \dot{Q} es el calor total desprendido por la llama y se calcula como producto entre la velocidad másica de combustión y el calor de combustión:

$$\dot{Q} = m \cdot \Delta H_c \cdot A \quad (5.5)$$

Por lo tanto, el número de Froude modificado o número de combustión, es una relación entre la velocidad de combustión, o sea la inercia de los vapores de combustible, y la fuerza de flotación de dichos vapores en el ambiente.

5.4.2 El número m^*

Entre las ecuaciones más utilizadas para el cálculo de la longitud de la llama, la mayoría de ellas utilizan el parámetro m^* , definido de la forma siguiente:

$$m^* = \left(\frac{m}{\rho_a (gD)^{1/2}} \right) \quad (5.6)$$

Observando las ecuaciones (5.4) y (5.5), y teniendo en cuenta que el área de la balsa A es proporcional al cuadrado del diámetro, el parámetro m^* es proporcional a Q^* . Sin embargo, las ecuaciones con el parámetro m^* son más utilizadas en los cálculos de la longitud de la llama en situaciones accidentales. Como se ha visto en el capítulo 4, la intensidad de ebullición —o la velocidad de combustión durante el *boilover*— depende del espesor de combustible al inicio del *boilover*, factor que ha sido considerado como limitante para la peligrosidad del fenómeno. El parámetro m^* congloba dicha dependencia y, por lo tanto, justifica su empleo durante la fase de ebullición.

5.4.3 El número u^*

En el segundo capítulo de la tesis, también se prestó atención a las correlaciones que tienen en cuenta el efecto de la velocidad del viento sobre la evaporación de los vapores de combustión. Como ya se indicó en dicho capítulo, el parámetro u^* , que contempla este efecto, se define según la ecuación (5.7), donde u_c , velocidad característica de combustión, se determina mediante la ecuación (5.8).

$$u^* = u/u_c \quad (5.7)$$

$$u_c = (g \cdot \dot{m} \cdot D / \rho_a)^{1/3} \quad (5.8)$$

Cabe indicar que, en las correlaciones para la determinación de la longitud de llama, si $u < u_c$, el parámetro u^* se toma igual a 1. En caso contrario, la longitud de la llama aumentaría por efecto del viento, hecho que es opuesto a la observación experimental.

5.4.4 Comparación con las correlaciones utilizadas actualmente para el cálculo de la longitud de la llama

Entre las diferentes correlaciones existentes en la bibliografía, se han escogido las ecuaciones que se presentan en la tabla 5.3, ya que actualmente dichas correlaciones son las más utilizadas. Para evaluar la validez de estas ecuaciones se han utilizado los parámetros estadísticos: *NMSE* (Normalized Mean Square Error, media normalizada de los errores al cuadrado) y *FB* (Fractional Bias, tendencia fraccionada):

$$NMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_0 - x_p)^2}{x_0 x_p} \quad (5.9)$$

$$FB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 2 \frac{x_0 - x_p}{x_0 + x_p} \quad (5.10)$$

donde x_0 y x_p son, respectivamente, el valor experimental y el calculado.

El parametro *NMSE* es una medida del grado de correlacion, cuanto mas se acerca a 0, tanto mas buena es la correlación. El parametro *FB* determina el grado de desviación, un valor negativo indica que la correlacion sobreestima los valores experimentales, mientras que un valor positivo los subestima. En las tablas 5 4 y 5 5 se muestra, en base a los valores de *NMSE* y *FB* obtenidos, la bondad de las correlaciones analizadas al compararlas con los datos experimentales de longitud media y maxima, para el período estacionario y para el *boilover*, respectivamente.

Tabla 5 3 Correlaciones analizadas para el calculo de la longitud de la llama

Autor	Ecuacion	Combustible
Heskestad [HES1 1998]	$\frac{L}{D} = -1,02 + 0,235 \frac{Q^{*2/5}}{D}$ (2 30)	metano
Thomas 1 [THOM 1963]	$\frac{L}{D} = 42(m^*)^{0.61}$ (2 16)	listones de madera
Mangialavori y Rubino [MANG 1992]	$\frac{L}{D} = 31,6(m^*)^{0.58}$ (2 31)	heptano, hexano, isobuteno
Thomas 2 [THOM 1963]	$\frac{L}{D} = 55(m^*)^{0.67}(u^*)^{-0.21}$ (2 18)	listones de madera
Moorhouse Cilindrica [MOOR 1982]	$\frac{L}{D} = 6,2(m^*)^{0.254}(u^*)^{-0.044}$ (2 33)	GNL, representacion cilindrica de la llama
Moorhouse Conica [MOOR 1982]	$\frac{L}{D} = 4,7(m^*)^{0.21}(u^*)^{-0.114}$ (2 32)	GNL, representacion conica de la llama
Pritchard y Binding [PRIT 1992]	$\frac{L}{D} = 10,615(m^*)^{0.305}(u^*)^{-0.030}$ (2 34)	principalmente GNL

Tabla 5 4 Bondad de las correlaciones analizadas para el calculo de la longitud de la llama (periodo estacionario)

	Heskestad	Thomas 1	Mangialavori y Rubino	Thomas 2	Moorhouse Cilindrica	Moorhouse Cónica	Pritchard y Binding
	Longitud media						
<i>NMSE</i>	0,155	0,036	0,009	0,020	0,006	0,006	0,107
<i>FB</i>	-0,375	-0,165	-0,032	-0,102	-0,032	0,035	-0,313
	Longitud maxima						
<i>NMSE</i>	0,010	0,037	0,101	0,062	0,097	0,143	0,006
<i>FB</i>	-0,046	0,167	0,299	0,231	0,299	0,365	0,018

Tabla 5 5 Bondad de las correlaciones analizadas para el calculo de la longitud de la llama (*boilover*)

	Heskestad	Thomas 1	Mangialavori y Rubino	Thomas 2	Moorhouse Cilindrica	Moorhouse Cónica	Pritchard y Binding
	Longitud media						
<i>NMSE</i>	-0,722	0,089	0,117	0,108	0,052	0,069	0,046
<i>FB</i>	1,581	0,064	0,192	0,135	0,157	0,219	-0,119
	Longitud maxima						
<i>NMSE</i>	-0,122	0,235	0,359	0,312	0,268	0,333	0,066
<i>FB</i>	1,662	0,393	0,516	0,461	0,486	0,545	0,218

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestra gráficamente el ajuste de las antedichas correlaciones a los datos experimentales.

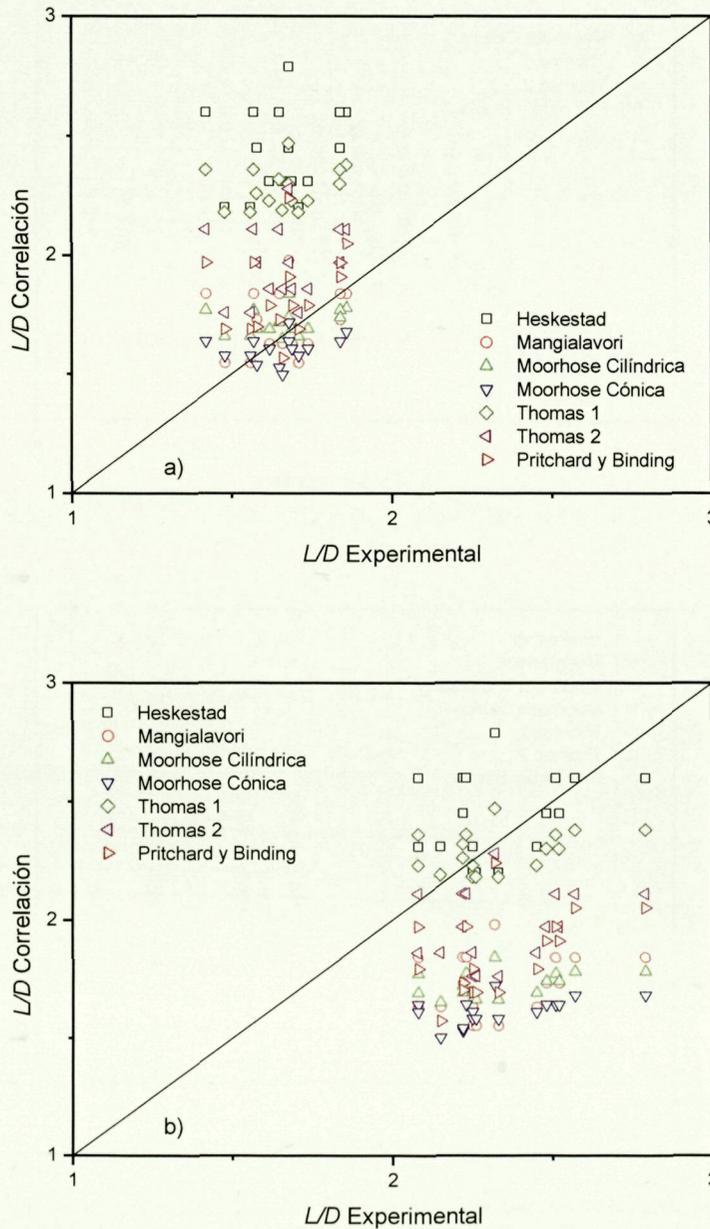


Figura 5.7. Comparación gráfica del ajuste de las correlaciones analizadas a los datos experimentales en el periodo estacionario; a) longitud media; b) longitud máxima.

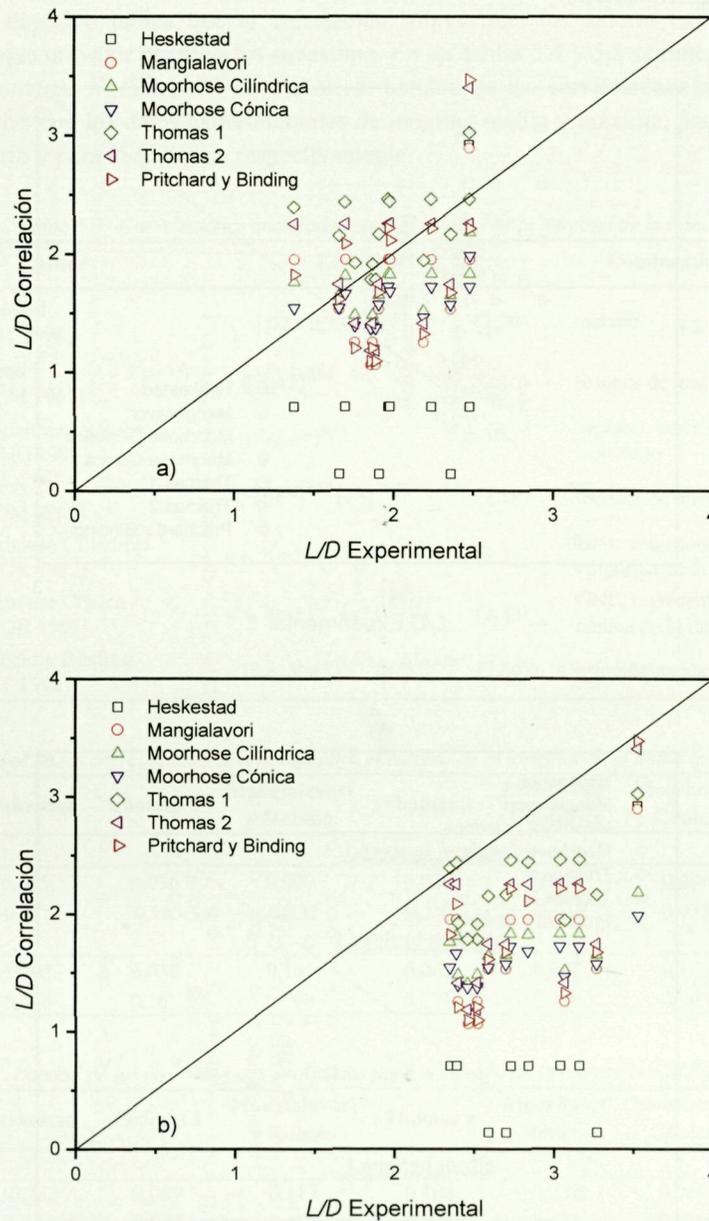


Figura 5.8. Comparación gráfica del ajuste de las correlaciones analizadas a los datos experimentales en el *boilover*; a) longitud media; b) longitud máxima.

En el caso del período estacionario, la correlación de Mangialavori y Rubino y la de Moorhouse para llamas cilíndricas estiman con una aceptable aproximación la longitud

media de la llama, mientras que la ecuación de Pritchard y Binding parece adecuada para el cálculo de la longitud máxima. Así y todo, se ha creído conveniente obtener nuevas correlaciones para este período que se ajustasen mejor a los resultados experimentales de este trabajo.

En la fase de *boilover*, como era de esperar, ninguna de las correlaciones anteriores calcula la longitud de la llama de forma satisfactoria. En consecuencia, se ha hecho imprescindible la obtención de nuevas ecuaciones para la estimación de dicha longitud en esta situación, las cuales correlacionen los datos experimentales con precisión.

Para la obtención de las nuevas ecuaciones para el cálculo de la longitud de la llama, tanto para el período estacionario como para el *boilover*, se ha optado por el uso de correlaciones del tipo:

$$\frac{L}{D} = a(m^*)^b (u^*)^c \quad (5.11)$$

en base a las siguientes consideraciones:

- La ecuación de Heskestad —que utiliza el parámetro Q^* — han presentado grandes desviaciones respecto a los datos experimentales.
- Ronza [RONZ 2002], analizando la longitud media de la llama en incendios de gasóleo y gasolina en la misma instalación, obtuvo valores notablemente inferiores a los determinados a partir de las ecuaciones que utilizan el parámetro Q^* presentes en la bibliografía actual. La causa se atribuyó principalmente al hecho de que el parámetro Q^* no contempla que, para balsas de gran tamaño, las reacciones de combustión de gasolina y, aún más, de gasóleo tienen una eficacia muy baja. En consecuencia, como en el cálculo de Q^* no se incluye dicha eficacia, los valores de este parámetro están sobreestimados.
- Vaccari [VACC 2002], a partir de los mismos datos experimentales, propuso nuevas correlaciones del tipo de la ecuación (5.12), incluyendo también la influencia del viento. Dichas correlaciones tenían factores de correlación bastante bajos.

$$\frac{L}{D} = a'(Q^*)^b (u^*)^c \quad (5.12)$$

5.4.5 Obtención de las nuevas correlaciones

En la tabla 5.6 se indican los valores de los parámetros a , b y c de las nuevas correlaciones del tipo de la ecuación (5.11), tanto para el período estacionario como para el *boilover*. Hay que destacar que:

- Las correlaciones han sido obtenidas a partir de la minimización de la suma de los errores cuadráticos medios entre los valores estimados y los datos experimentales.

- En el cálculo de m^* para el período estacionario, se ha utilizado el valor de la velocidad de combustión obtenido según la ecuación (A1.6). Para estimar la velocidad de combustión durante el periodo del *boilover* se ha usado la ecuación (4.16).

Tabla 5.6. Valores de los parámetros de las nuevas ecuaciones para el cálculo de la longitud de la llama.

$\frac{L}{D} = a(m^*)^b (u^*)^c$	Longitud Media		Longitud Máxima	
	Estacionario	Boilover	Estacionario	Boilover
a	4,201	3,839	7,421	5,854
b	0,181	0,115	0,226	0,135
c	-0,082	-0,450	-0,147	-0,389
$NMSE$	0,005	0,01	0,004	0,006
FB	-0,002	-0,01	-0,002	0,004

En la tabla 5.6, también se presentan los valores de $NMSE$ y FB para poder realizar la comparación entre las correlaciones actuales y las previas (tablas 5.4 y 5.5). En todos los casos, como era de previsible, las nuevas ecuaciones se ajustan a los datos experimentales de forma mucho mejor que las ecuaciones presentes en la bibliografía actual, como se observa también en las figuras 5.9 y 5.10.

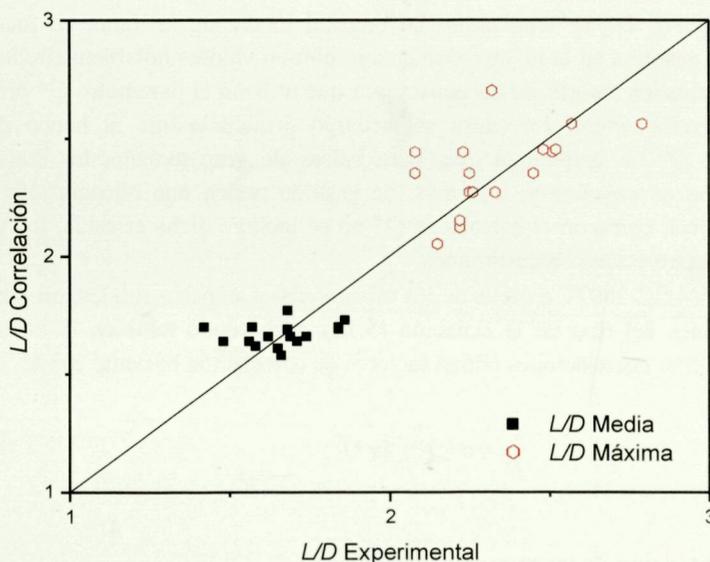


Figura 5.9. Comparación gráfica del ajuste de las nuevas correlaciones para el periodo estacionario.

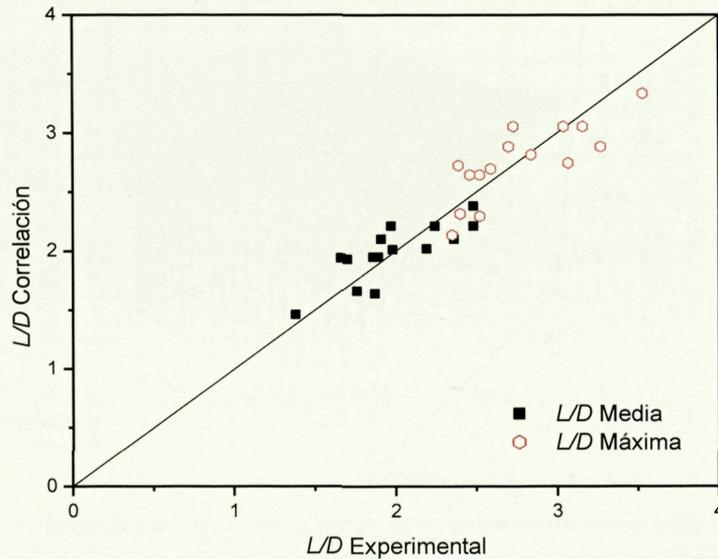


Figura 5.10. Comparación gráfica del ajuste de las nuevas correlaciones para el período *boilover*.

A continuación, se compara el comportamiento de estas nuevas correlaciones con las observaciones experimentales, evidenciando la influencia del *boilover*, tanto para la longitud media como para la longitud máxima. Posteriormente, se presenta la posibilidad de utilizar, tanto para el período estacionario como para el *boilover*, una sola correlación para el cálculo de la longitud media y factores multiplicativos para determinar las longitudes máxima y mínima de la llama.

Longitud media

La figura 5.11 representa tridimensionalmente las nuevas correlaciones para el período estacionario y durante el *boilover*, obtenidas a partir de los datos del FOC3.

La figura muestra como el *boilover* afecta a la longitud media de la llama y también como esta longitud es más baja a medida que la velocidad del viento es más grande. En efecto, a viento bajo ($u^* \approx 1$) la longitud media de la llama puede aumentar durante este período hasta un 40% más respecto al período estacionario, mientras que para valores de u^* de, aproximadamente, 3, dicho aumento deja de ser apreciable. El hecho de que dicha longitud aumente durante el *boilover* se debe a la disminución en la formación de humo, ya que este período tiene una mejor eficacia de combustión. Por otro lado, el viento actúa en sentido contrario, limitando la influencia de la ebullición.

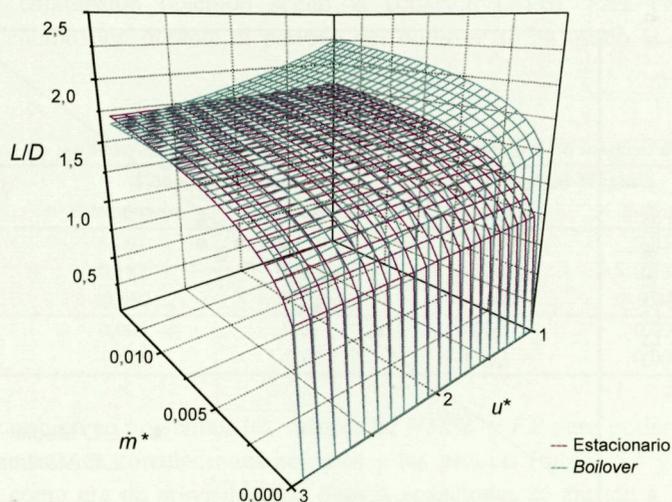


Figura 5.11. Representación tridimensional de las nuevas correlaciones para el cálculo de la longitud media.

Longitud máxima

Como muestra la figura 5.12, la influencia del *boilover* sobre la longitud máxima de la llama es totalmente análoga a la influencia sobre la longitud media, y, como para la antedicha longitud, el *boilover* tiene efecto para valores de u^* inferiores a 3.

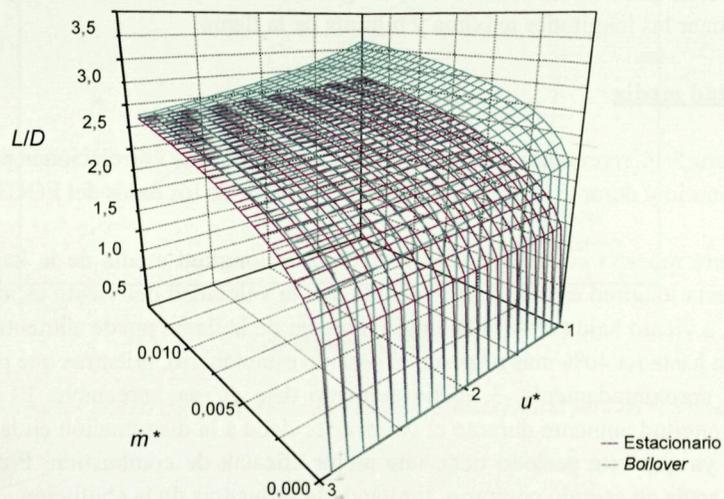


Figura 5.12. Representación tridimensional de las nuevas correlaciones para el cálculo de la longitud máxima.

Factores multiplicativos

Tras observar la antedicha correspondencia de comportamiento entre la longitud máxima y media de la llama, y suponer la misma analogía entre dicha longitud media y la longitud mínima, se ha pensado en utilizar una sola ecuación para estimar las tres longitudes con el uso de factores multiplicativos, tal como muestran las ecuaciones (5.13) y (5.14), según se propone en [MUÑO 2005].

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\max} = F_{\max} \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{med}} \quad (5.13)$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\min} = F_{\min} \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{med}} \quad (5.14)$$

Los factores multiplicativos que minimizan el error respecto a los datos experimentales se presentan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Factores multiplicativos.

Estacionario	F_{\min}	0,633	F_{\max}	1,397
Boilover	F_{\min}	0,710	F_{\max}	1,385

Por lo tanto, independientemente de la fase del incendio, las longitudes máxima y mínima de la llama se pueden obtener multiplicando el valor medio por un factor de, aproximadamente, 1,4 y 0,7, respectivamente.

Los factores multiplicativos varían presumiblemente con el tipo de combustible utilizado; sin embargo, esta metodología muestra como es suficiente obtener una correlación para el cálculo de la longitud media y de forma sencilla poder calcular también las longitudes máxima y mínima.

5.5 Inclinación de la llama

Por lo que se refiere a la obtención de una ecuación para el cálculo de la inclinación de la llama, se han utilizado correlaciones del siguiente tipo:

$$\cos(\theta) = \begin{cases} a(u^*)^b & u^* \geq 1 \\ 1 & u^* < 1 \end{cases} \quad (5.15)$$

La tabla 5.8 muestra los valores de los parámetros de la ecuación anterior determinados en esta tesis, los cuales minimizan el error cuadrático respecto a los datos experimentales, y los valores de los parámetros de las correlaciones existentes en la bibliografía actual.

Tabla 5.8. Valores de los parámetros correspondientes a las correlaciones para la estimación de la inclinación de la llama.

	<i>a</i>	<i>b</i>	Combustible
AGA [MUDA 1984]	1	-0,50	GNL
Thomas [THOM 1963]	0,7	-0,49	Listones de madera
Moorhouse [MOOR 1982]	0,86	-0,25	GNL, llamas cilíndricas
Nueva correlación: estacionario	0,92	-0,26	Gasóleo
Nueva correlación: <i>boilover</i>	0,92	-0,17	Gasóleo

La figura 5.13 muestra la comparación de las distintas correlaciones con los datos experimentales. Tras examinar esta figura y los valores de *NMSE* y de *FB* de la tabla 5.9, se observa que, entre las correlaciones existentes en la bibliografía, la ecuación de la American Gas Association (AGA) y la ecuación de Moorhouse para llamas cilíndricas se ajustan de forma discreta a los datos experimentales, tanto para el período estacionario como para el *boilover*. Como era de suponer, las nuevas correlaciones presentan un ajuste mejor.

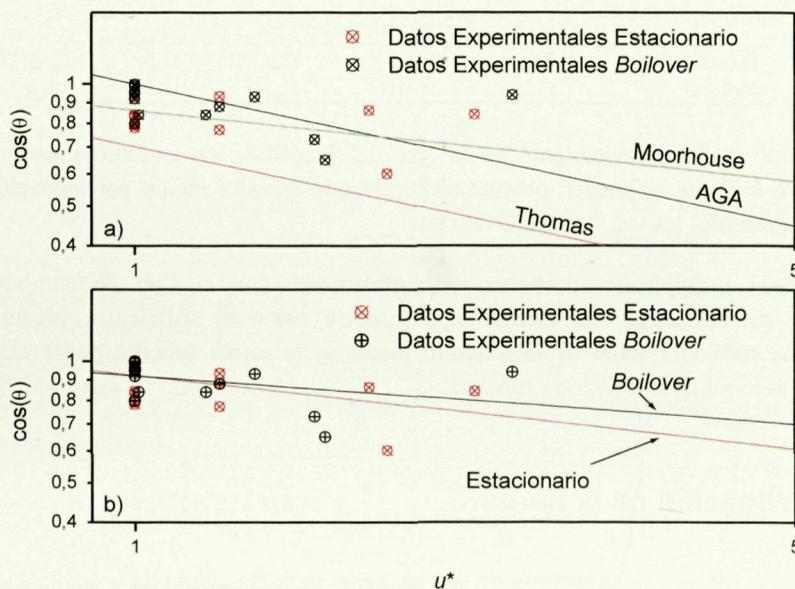


Figura 5.13. Correlaciones para la estimación de la inclinación de la llama: a) correlaciones ya existentes; b) nuevas correlaciones.

Tabla 5.9. Comparación del ajuste de las correlaciones para la estimación de la inclinación de la llama.

	Estacionario				Boilover			
	Thomas	AGA	Moorhouse Cilíndrica	Nueva correlación	Thomas	AGA	Moorhouse Cilíndrica	Nueva correlación
<i>NMSE</i>	0,103	0,014	0,015	0,010	0,122	0,022	0,018	0,012
<i>FB</i>	0,298	-0,055	0,071	-0,004	0,312	0,039	0,070	-0,006

Como ya se ha indicado en el capítulo 2, para el cálculo de la inclinación de la llama también se utilizan ecuaciones del tipo:

$$\frac{\tan(\theta)}{\cos(\theta)} = aFr^{b'}Re^{c'} \quad (5.16)$$

Sin embargo, debido a la mayor complejidad de este tipo de ecuación, junto con el hecho de que los valores de *NMSE* y *FB* de las correlaciones existentes en la bibliografía fueron mayores —indicando un peor ajuste de los datos experimentales—, no se ha tomado en consideración su utilización.

5.6 Frecuencia de pulsación

En los párrafos precedentes se ha observado que la evolución de la longitud de la llama es oscilatoria y, por lo tanto caracterizada por una frecuencia que se denomina frecuencia de pulsación. Dicho parámetro se utiliza para describir la dinámica de la llama, ya que se relaciona con el arrastre de aire hacia el interior de ésta. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para el cálculo de la frecuencia de pulsación.

En primer lugar, se ha realizado para cada prueba un filtrado de los datos de longitud de llama, aplicando una transformada rápida de Fourier (FFT). De esta forma, la curva obtenida se suaviza y, consecuentemente, es mucho más fácilmente interpretable, como se puede observar en la figura 5.14 para el experimento FOC3_12_D6 (Gasóleo, 6 m). Posteriormente, se han estimado los intervalos en los cuales fuera posible observar una evolución sinusoidal alrededor del valor de longitud media anteriormente determinado (en el caso examinado se ha elegido el periodo entre 1,5 y 7,3 segundos). La frecuencia de pulsación f se calcula entonces como relación entre el número N_p de picos de longitud máxima en el intervalo elegido y la duración Δt del mismo intervalo (ecuación 5.17). Nótese que, para que un punto sea considerado como pico, no es suficiente que sea un máximo absoluto, sino también tiene que haberse cruzado dos veces el valor de longitud media después del pico anterior, para que se haya cumplido una oscilación completa.

$$f = \frac{N_p}{\Delta t} \quad (5.17)$$

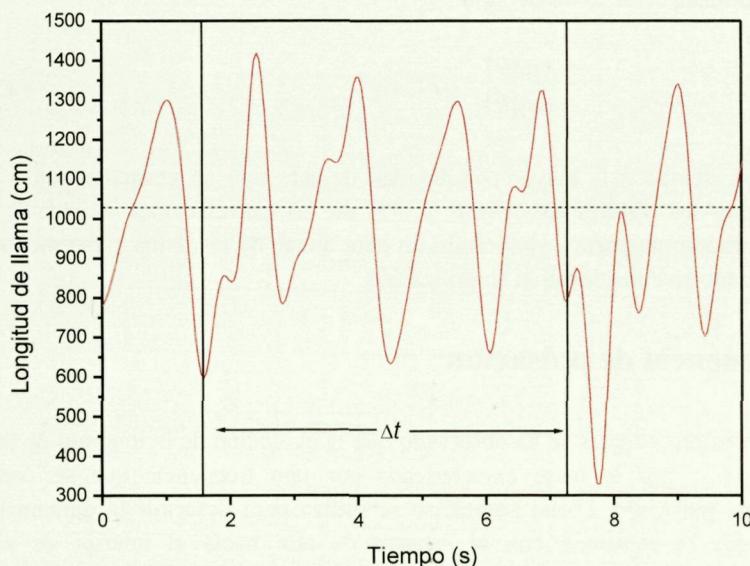


Figura 5.14. Determinación de la frecuencia de pulsación para el FOC3_12_D6 (Gasóleo, 6 m).

El dato obtenido ha sido comparado con el valor de frecuencia (valor medio) en todo el intervalo en que se disponía de datos de longitud de llama, evidenciando diferencias despreciables. En la tabla 5.10 se indican las frecuencias de pulsación determinadas, ordenando los incendios por diámetro y tipo de combustible. En el caso del gasóleo, el parámetro ha sido determinado tanto en el periodo estacionario como en el *boilover*. Es evidente que la frecuencia de pulsación disminuye al aumentar el diámetro. En las figuras 5.15 y 5.16, los resultados obtenidos en esta tesis junto a los ya existentes en la bibliografía se comparan con la correlación de Pagni [PAGN 1989]:

$$f^2 \approx \frac{2,3}{D} \quad (5.18)$$

En el caso del período estacionario, los valores se ajustan mucho a la curva definida por la ecuación (5.18), tanto para el gasóleo, como para la gasolina y la mezcla 50% gasóleo-50% gasolina. Por otro lado, estos datos representan una nueva información para los incendios de balsas de hidrocarburos, ya que en la bibliografía actual no hay prácticamente valores experimentales de frecuencia de pulsación para incendios de diámetros entre 1,5 y 6 m. Por lo que se refiere a la influencia del *boilover*, la frecuencia de pulsación de la llama muestra una tendencia a aumentar en esta fase, debido al mayor arrastre de aire hacia la llama, lo cual aumenta la velocidad de formación de vórtices que se traduce en un aumento de la pulsación de dicha llama. Durante el *boilover*, la dispersión de los datos crece por el aumento de la turbulencia; esto, junto a la falta de

otros estudios sobre el tema, ha hecho imposible la determinación de una ecuación satisfactoria para esta fase. Sin embargo, la disposición de los datos sugiere que la frecuencia de pulsación en el *boilover* se ajusta a una curva del tipo de la ecuación (5.18) con un coeficiente constante superior a 2,3.

Tabla 5.10. Resultados de frecuencia de pulsación.

Experimento	Combustible	D (m)	Estacionario		Boilover	
			u (m/s)	f (Hz)	u (m/s)	f (Hz)
FOC3_22_D15	Gasóleo	1,5	0,28	0,90	0,79	1,19
FOC3_01_D3	Gasóleo	3	2,42	0,93	2,66	1,47
FOC3_02_D3	Gasóleo	3	1,30	0,97	1,42	1,09
FOC3_04_D3	Gasóleo	3	0,00	0,98	0,08	1,47
FOC3_05_D3	Gasóleo	3	0,52	0,95	0,36	1,28
FOC3_18_D3	Gasóleo	3	1,30	0,89	1,30	0,93
FOC3_20_D3	Gasóleo	3	1,30	0,89	0,11	1,20
FOC3_14_D4	Gasóleo	4	0,90	0,73	0,42	1,13
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	0,88	0,70	1,40	0,94
FOC3_16_D4	Gasóleo	4	0,64	0,74	1,17	0,82
FOC3_09_D5	Gasóleo	5	0,02	0,77	0,52	0,84
FOC3_10_D5	Gasóleo	5	1,17	1,10	1,98	0,92
FOC3_11_D5	Gasóleo	5	2,36	0,80	2,03	0,76
FOC3_07_D6	Gasóleo	6	0,78	0,85	0,40	0,88
FOC3_12_D6	Gasóleo	6	0,06	0,70	0,80	0,83
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	2,09	0,58	-	-
FOC3_16_D4	Gasóleo	4	0,40	0,82	-	-
FOC3_09_D5	Gasóleo	5	0,94	0,81	-	-
FOC3_11_D5	Gasóleo	5	0,28	0,75	-	-
FOC3_12_D6	Gasóleo	6	0,76	0,78	-	-
FOC3_21_G15	Gasolina	1,5	0,00	1,36	-	-
FOC3_03_G3	Gasolina	3	0,00	1,00	-	-
FOC3_17_G3	Gasolina	3	0,90	0,79	-	-
FOC3_13_G4	Gasolina	4	0,66	0,86	-	-
FOC3_08_G5	Gasolina	5	0,00	0,75	-	-
FOC3_06_G6	Gasolina	6	0,30	0,78	-	-
FOC3_21_G15	Gasolina	1,5	0,86	1,02	-	-
FOC3_03_G3	Gasolina	3	0,20	0,94	-	-
FOC3_17_G3	Gasolina	3	1,67	0,77	-	-
FOC3_13_G4	Gasolina	4	1,01	0,87	-	-
FOC3_08_G5	Gasolina	5	0,71	0,79	-	-
FOC3_06_G6	Gasolina	6	0,04	0,78	-	-
FOC3_19_M3	Mezcla 50%-50%	3	0,61	0,89	2,2	1,03

En grandes incendios de hidrocarburos, las partes de la llama que contribuyen a la emisión de radiación son esencialmente la zona de llama continua y la de llama intermitente, no considerándose la emisión del penacho de humos por sus bajas temperaturas. El poder emisivo medio de la llama, dependerá, por lo tanto, del tamaño de las dos zonas. La zona inferior de la llama (zona de llama continua) presenta un poder emisivo muy elevado (al alrededor de 120-140 kW/m²), mientras que la superior (zona de llama intermitente) está muy a menudo oscurecida por el humo, al cual se asocia un poder emisivo del orden de 20-40 kW/m². En el ANEXO II se han presentado las principales correlaciones, que se utilizarán en el análisis, para estimar el poder emisivo medio de la llama en grandes incendios de hidrocarburos durante el periodo estacionario. Debido a que, durante el *boilover*, la cantidad de humo es reducida, es razonable pensar que el poder emisivo por consiguiente aumentará; el objetivo de este apartado es cuantificar dicho aumento, de manera de disponer de valores fiables para la determinación de distancias de seguridad en situaciones accidentales con formación de *boilover* de capa delgada.

El factor de vista entre la llama y el objeto receptor está definido como la relación entre la radiación que abandona la llama e incide directamente (sin reflexión) sobre dicho objeto receptor. Este parámetro es de carácter puramente geométrico y, por lo tanto, varía con la forma de la llama que se escoja. El factor de vista entre dos elementos diferenciales, como los mostrados en la figura 5.17, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_{dA_1 \rightarrow dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{\pi r^2} \quad (5.21)$$

El cuerpo 1 es el emisor y el 2 es el receptor, θ_1 y θ_2 los ángulos entre las normales a los elementos diferenciales y la línea que une los centros de los dos elementos y r es la distancia entre las dos superficies.

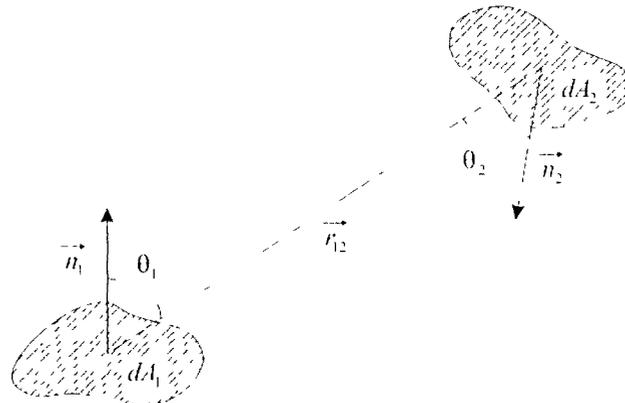


Figura 5.17. Intercambio de energía entre dos elementos diferenciales

Para calcular el factor de vista entre superficies finitas, hay que recurrir a una doble integración, que puede resultar laboriosa cuando se opera con formas irregulares. Sin embargo, para las geometrías más comunes se encuentran en la literatura factores de vista ya calculados. En este estudio, se ha optado por utilizar una forma de llama cilíndrica, recta o inclinada, según el incendio se realice en ausencia o presencia de viento, respectivamente. El objeto receptor (el radiómetro), debido a sus pequeñas dimensiones, se asimila a un punto; por lo tanto, el factor de vista entre este elemento diferencial (dA_2) y la llama (A_1), se calcula como:

$$F_{dA_2 \rightarrow A_1} = \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1}{\pi r^2} \quad (5.22)$$

En las pruebas experimentales realizadas, los receptores han sido colocados de manera que se encontraban siempre en la dirección del viento, en caso de presencia de este factor ambiental. Tanto en el caso de un cilindro recto como inclinado, se han utilizado las formulas propuestas en [CASA 1999].

Durante el *boilover*, la longitud de la llama crece y, consecuentemente, el factor de vista. Por lo dicho, es evidente que el incremento de radiación durante el *boilover* se debe a dos contribuciones: por un lado, el aumento del factor de vista, y el del poder emisor, por el otro.

Recordando la definición de intensidad de radiación, $I_{b,rad}$, (apartado 4.2.6) y empleando la ecuación (5.19), se puede escribir que:

$$I_{b,rad} = \frac{\dot{q}_b}{q_s} = \frac{\tau E_b F_b}{\tau E_s F_s} = \frac{E_b F_b}{E_s F_s} \quad (5.23)$$

donde los subíndices b y s se refieren a la fase *boilover* y período estacionario, respectivamente. Los factores de vista F_b y F_s se pueden calcular una vez que se conozcan la longitud y la inclinación de la llama. El poder emisor en el período estacionario E_s se determina a partir de las correlaciones existentes en la bibliografía, como ya se ha indicado anteriormente.

Para el cálculo de la longitud e inclinación de la llama, tanto para el período estacionario como para el *boilover*, se han utilizado las correlaciones determinadas en este capítulo, con los valores medios de velocidad de viento en el periodo en que ha sido determinada la radiación incidente. Los resultados de los correspondientes factores de vista se presentan en la tabla 5.11.

Tabla 5 11 Factores de vista en las pruebas experimentales

Experimento	D (m)	x_c/D (-)	u_s (m/s)	u_b (m/s)	$F_s^{(*)}$ (-)	$F_b^{(*)}$ (-)
FOC3_22_D1,5	1,5	5,00	0,80	0,71	0,037	0,036
FOC3_01_D3	3	3,00	1,62	2,28	0,100	0,102
FOC3_02_D3	3	5,00	1,75	1,37	0,023	0,030
FOC3_02_D3	3	5,00	1,75	1,37	0,023	0,030
FOC3_04_D3	3	5,00	0,00	0,39	0,029	0,033
FOC3_05_D3	3	5,33	0,51	0,41	0,027	0,033
FOC3_05_D3	3	7,33	0,51	0,41	0,015	0,018
FOC3_18_D3	3	3,00	1,32	1,00	0,117	0,118
FOC3_18_D3	3	5,00	1,32	1,00	0,038	0,046
FOC3_20_D3	3	3,00	0,86	0,22	0,080	0,072
FOC3_20_D3	3	5,00	0,86	0,22	0,033	0,033
FOC3_14_D4	4	3,00	0,81	0,64	0,066	0,071
FOC3_15_D4	4	3,00	1,65	1,05	0,108	0,073
FOC3_15_D4	4	5,00	1,65	1,05	0,035	0,030
FOC3_16_D4	4	3,00	0,79	1,45	0,076	0,118
FOC3_16_D4	4	5,00	0,79	1,45	0,030	0,041
FOC3_09_D5	5	3,00	0,57	0,62	0,065	0,070
FOC3_10_D5	5	3,00	1,35	2,08	0,064	0,056
FOC3_10_D5	5	5,00	1,35	2,08	0,025	0,022
FOC3_11_D5	5	3,00	1,96	1,50	0,095	0,111
FOC3_11_D5	5	5,00	1,96	1,50	0,030	0,038
FOC3_07_D6	6	3,00	0,81	0,75	0,065	0,067
FOC3_12_D6	6	3,00	0,20	1,15	0,065	0,081
FOC3_12_D6	6	5,00	0,20	1,15	0,029	0,034

(*) valores calculados utilizando la longitud máxima de llama

Como ya se ha comentado, existen un cierto número de ecuaciones, tanto para calcular la transmisividad atmosférica como el poder emisor en el período estacionario. Por lo tanto, se ha realizado un análisis para determinar cuales de dichas correlaciones proporcionan datos de flujo de calor, en el período estacionario, más próximos a los medidos experimentalmente. Para efectuar este análisis se han empleado los parámetros estadísticos *NMSE* y *FB* ya definidos anteriormente. Los resultados se presentan en la tabla 5.12.

Tabla 5 12 Comparación entre diferentes combinaciones de las distintas ecuaciones de transmisividad atmosférica y poder emisor

Modelo	L	E	τ	NMSE	FB
1	L máxima	E-SHOKRI	Wayne, 1991	0,106	-0,171
2	L máxima	E-MUÑOZ	Wayne, 1991	0,138	-0,183
3	L máxima	E-FRAC_RAD	Wayne, 1991	0,149	0,219
4	L máxima	E-REW_MOD	Wayne, 1991	0,152	0,248
5	L máxima	E-TNO/EFFECTS	Wayne, 1991	0,270	0,394
6	L máxima	E-MUDAN	Wayne, 1991	0,665	-0,697
7	L máxima	E-REW_MOD	1	0,077	0,180
8	L máxima	E-FRAC_RAD	1	0,073	0,137
9	L máxima	E-SHOKRI	Bagster y Pitblado, 1989	0,044	-0,064
10	L máxima	E-MUÑOZ	Bagster y Pitblado, 1989	0,065	-0,076

Como se ha indicado en la tabla 5.11 y se resalta en la tabla 5.12, para estos cálculos se ha utilizado la longitud de llama máxima (véase el apartado 5.4.5). Como primera aproximación, se ha empleado, conjuntamente con las diferentes ecuaciones de poder emisivo (desde el 1 al 6), la fórmula de τ propuesta por Wayne [WAYN 1991], siendo dicha ecuación una de las más utilizadas en los cálculos de los efectos térmicos. Tal y como se observa en la tabla, los modelos 5 y 6 proporcionan valores que se alejan notablemente de los datos experimentales, fundamentalmente por las ecuaciones utilizadas en el cálculo de E_s , el modelo 5 subestima dichos datos, mientras que el 6 los sobreestima. Por lo tanto, dichos modelos han sido descartados.

En los otros casos, los modelos han sido mejorados por medio de la utilización de otras correlaciones para la estimación de la transmisividad atmosférica. En el caso de los modelos con las ecuaciones de E-REW_MOD y de E-FRAC_RAD para el cálculo de E —los cuales con la τ de Wayne subestimaban los datos experimentales—, se ha utilizado una τ siempre igual a la unidad, con una considerable mejora del ajuste. En el caso de emplear las ecuaciones de E-SHOKRI y E-MUÑOZ, la fórmula de τ que conlleva a las menores desviaciones respecto a los datos experimentales es la obtenida por Bagster y Pitblado [BAGS 1989].

Los modelos 7, 8, 9 y 10 se aproximan bastante bien a los datos experimentales; por lo tanto, el cálculo del poder emisivo en el *boilover*, E_b , determinado a partir de la ecuación (5.23), se ha realizado para todos estos modelos antes de elegir el más apropiado.

Para cada uno de los cuatro modelos, los valores de E_s y E_b han sido calculados para cada prueba experimental y, posteriormente, promediados para cada diámetro (tabla 5.13). Debido a la gran influencia del viento sobre la medida de los radiómetros, en el promedio han sido utilizados solo aquellos incendios en que u fuera inferior a 1,5 m/s, valor elegido al observar las fluctuaciones de E_b y que, además, ha sido considerado como límite de aceptabilidad en la determinación de la velocidad de combustión (véase ANEXO I).

Tabla 5.13 Valores de poder emisivo medio de la llama, para cada diámetro, durante el periodo estacionario y durante el *boilover*

<i>D</i> (m)	Modelo 7		Modelo 8		Modelo 9		Modelo 10		Relación (-)
	E_s (kW/m ²)	E_b (kW/m ²)							
1,5	37,60	73,17	25,13	48,89	56,37	109,70	40,00	77,84	1,95
3	36,42	60,28	36,32	60,12	54,79	90,71	50,04	82,83	1,66
4	34,86	49,38	39,92	56,56	53,77	76,16	56,36	79,84	1,42
5	33,93	47,49	36,70	51,37	52,76	73,84	62,99	88,16	1,40
6	32,46	43,22	32,90	43,81	51,77	68,93	59,43	79,14	1,33

Al examinar la tabla 5.13, se puede observar como, a pesar de que los cuatro modelos estimen flujos de calor que se ajustan bien a los datos experimentales del estado estacionario (tabla 5.12), los valores de poder emisivo se diferencian notablemente de un modelo a otro. Sin embargo, hay que destacar que, por como ha sido determinado E_b —a partir de la ecuación (5.23)—, cualquiera que sea el modelo de estimación de E_s empleado, la relación entre E_b y E_s no varía. El resultado es interesante, en cuanto implica que el procedimiento empleado en este estudio se puede extender a otras condiciones operativas (tipo de combustible y diámetro de balsa), en las cuales otro modelo de estimación de E_s fuera más apropiado.

La figura 5.18 muestra la evolución de la relación entre los poderes emisivos en el *boilover* y en el período estacionario con el diámetro de la balsa; se observa que el poder emisivo crece en la fase de ebullición, de menor forma cuanto más grande es el diámetro de la balsa. Eso se puede deber a dos causas: por un lado, la cantidad por quemar al inicio del *boilover* decrece con el diámetro, según la ecuación (4.11) (véase apartado 4.2.4) y, por lo tanto, es menor la cantidad de combustible que se atomiza a causa del arrastre del vapor. Por otro lado, cuanto más grande es el incendio tanto más difícil es la penetración de aire en la llama, que raramente alcanzará el centro de dicha llama; por lo tanto, el aumento de turbulencia producido por el *boilover*, es mucho más eficaz para diámetros pequeños que para grandes, como muestran los valores de la relación de poderes emisivos de la tabla 5.13.

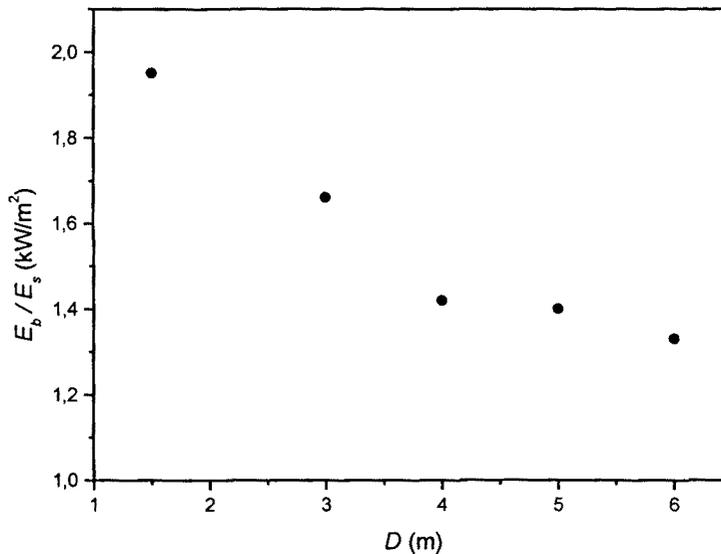


Figura 5.18 Relación entre los poderes emisivos medios en el *boilover* y en el período estacionario en función del diámetro

Al fin de determinar cual de los cuatro modelos es el más apropiado, se han realizado los siguientes análisis:

- Se han representado los valores promediados del poder emisor medio, tanto para el periodo estacionario como para el *boilover*, en función del diámetro, para observar cuales de dichos modelos presentan una evolución efectivamente representativa de una situación real (figura 5.19).
- Se han comparado, para los cuatro modelos, los flujos de calor experimentales con los calculados a partir de los poderes emisivos obtenidos. La comparación gráfica se presenta en la figura 5.20 y la bondad de los modelos se presenta en la tabla 5.14.

De dichos análisis se pueden destacar las siguientes consideraciones:

- Desde el punto de vista del ajuste a los datos experimentales, los modelos 9 y 10 son los que presentan mejores valores de *NMSE* y *FB*.
- Las correlaciones de poder emisor de E-REW_MOD y E-SHOKRI prevén poderes emisivos en el periodo estacionario siempre decrecientes con el diámetro. Sin embargo, estudios recientes, entre los cuales cabe destacar el de Muñoz [MUÑO 2005], han demostrado que el poder emisor, en incendios de gasóleo y gasolina, aumenta con una pendiente suave hasta un cierto diámetro y, posteriormente, decrece repentinamente. El aumento inicial se debe al incremento de temperatura de la llama con las dimensiones del incendio. Sin embargo, a medida que el diámetro del incendio crece, la producción de humo aumenta, generando un mayor efecto de bloqueo de la radiación desprendida. La conjunción de los dos efectos lleva a la evolución del poder emisor descrita. En este sentido, las ecuaciones para el cálculo del poder emisor de E-FRAC_RAD y E-MUÑOZ parecen más apropiadas, ya que tienen en cuenta el comportamiento antedicho.
- Los modelos 7 y 8, al tomar un valor de la transmisividad atmosférica igual a 1, presentan valores de poder emisor medio de la llama más pequeños, llevando a una subestimación del flujo de calor a distancias próximas al centro del incendio. Por el contrario, los modelos 9 y 10 proporcionan valores de flujo de calor más elevados a dichas distancias y dan valores subestimados solo en puntos bastante alejados del incendio, fuera de la zona de interés para el estudio de las distancias de seguridad.
- Por último, el modelo 10 estima un poder emisor durante la fase de ebullición prácticamente constante con el diámetro de la balsa. Esto se puede justificar recordando que la disminución del humo durante el *boilover* es tanto menor cuanto más grande es el diámetro, a causa de la mayor dificultad de penetración del aire; por lo tanto, es razonable suponer, en este período, que el poder emisor medio de la llama no varíe fuertemente con dicho diámetro, sino que se mantenga alrededor de un valor máximo, el cual corresponde al poder emisor de la superficie más externa de la llama.

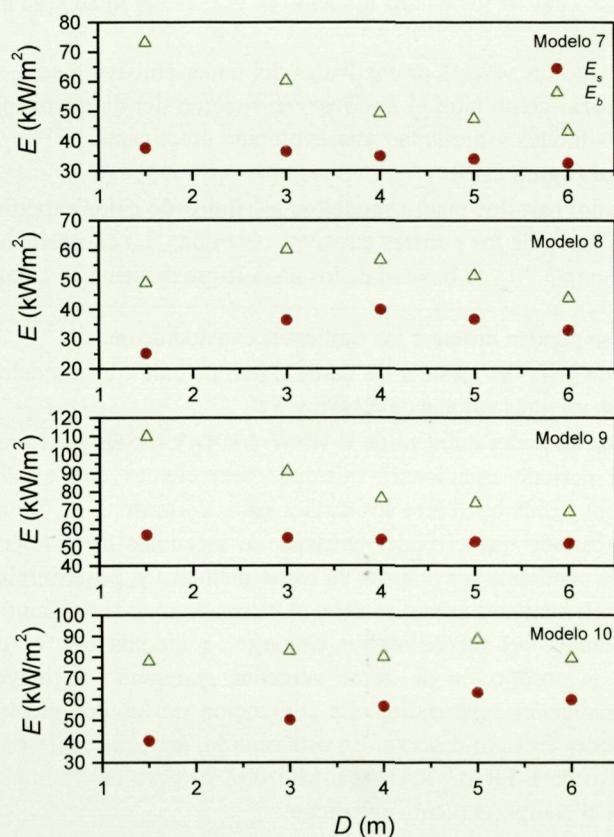


Figura 5.19. Representación de los valores calculados de poder emisivo medio de la llama en función del diámetro de incendio durante el *boilover* y durante el período estacionario.

En consecuencia y por el análisis realizado, el modelo 10 parece el más apropiado, para la determinación del incremento a aportar a las distancias de seguridad, por su mejor caracterización de la evolución del poder emisivo, tanto en el período estacionario como en el *boilover*.

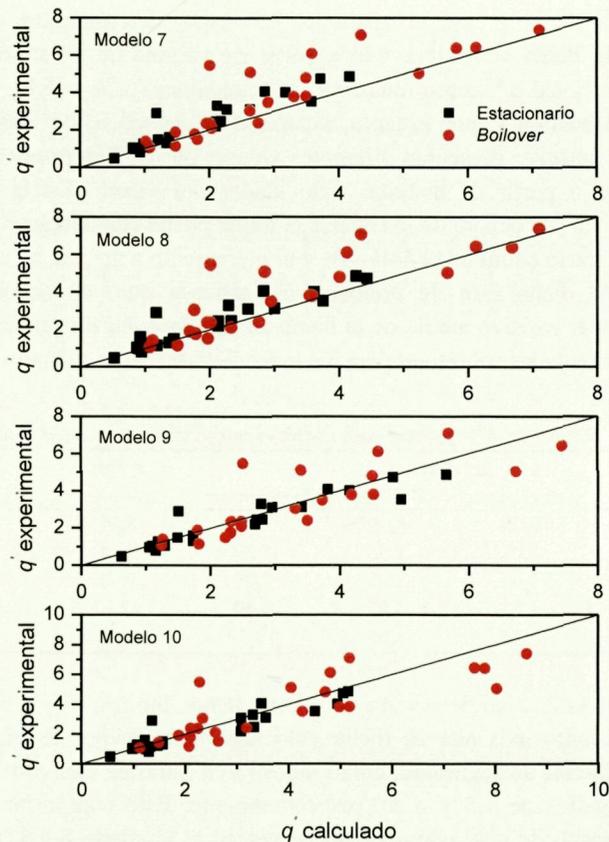


Figura 5.20. Comparación entre los datos experimentales y los valores calculados de radiación incidente.

Tabla 5.14. Ajuste a los datos experimentales de los valores de radiación incidente calculados en el periodo estacionario y en el *boilover*.

Modelo	L	E	τ	Estacionario		Boilover	
				NMSE	FB	NMSE	FB
7	L máxima	E-REW_MOD	1	0,077	0,180	0,104	0,154
8	L máxima	E-FRAC_RAD	1	0,073	0,137	0,101	0,126
9	L máxima	E-SHOKRI	Bagster y Pitblado, 1989	0,044	-0,064	0,081	-0,074
10	L máxima	E-MUÑOZ	Bagster y Pitblado, 1989	0,065	-0,076	0,102	-0,085

Los resultados proporcionados por el modelo 10 se han utilizado con la finalidad de determinar el incremento a aportar a las distancias de seguridad, en caso de aparición de un *boilover* de capa delgada. Se han considerado vientos variables entre 0 y 1,5 m/s, una temperatura ambiente de 20 °C y una humedad relativa del 50%. Para estimar las distancias de seguridad, se ha tomado el valor umbral de radiación térmica para un posible efecto dominó establecido en 8 kW/m², de acuerdo con la Directriz Básica de Protección Civil (BOE núm. 242 del 9 de octubre de 2003).

Hay que destacar que las correlaciones implementadas para la determinación de la inclinación de la llama (véase el apartado 5.5) están determinadas de forma que consideran que la llama se inclina solo a partir de valores de u^* superiores a 1. El parámetro adimensional u^* , como muestran las ecuaciones (5.7) y (5.8), depende de la velocidad de combustión y, por lo tanto, a paridad de velocidad de viento, el período estacionario y el *boilover* presentan diferentes valores de u^* . Eso implica que la llama se puede inclinar a partir de distintas velocidades del viento. En la tabla 5.15 se muestran los límites por debajo de los cuales la llama puede considerarse recta, tanto en el período estacionario como en el *boilover*, y el incremento a aportar a las distancias de seguridad durante dicha fase de *boilover*. Se observa que, de acuerdo al mayor incremento de poder emisivo medio de la llama en esta fase, las distancias de seguridad tienen que ser aumentadas sobretodo para los incendios de menor diámetro.

Tabla 5.15 Distancias de seguridad para llamas rectas y límites de velocidad del viento

D (m)	u (m/s)		x _c (m)		Relación
	Estacionario	Boilover	Estacionario	Boilover	
1,5	0,75	0,90	2,58	4,29	1,66
3	1,05	1,05	5,29	7,74	1,46
4	1,05	1,05	7,25	9,50	1,31
5	1,20	1,05	9,40	12,17	1,29
6	1,35	1,05	10,50	13,13	1,25

En caso de que la velocidad del viento excediera dichos límites, puede decirse que, de forma general, cuanto más alta es dicha velocidad tanto menor es el incremento a aportar a las distancias de seguridad, como muestran a título de ejemplo las tablas 5.16 y 5.17 para incendios de 1,5 y 4 m, respectivamente. Este comportamiento está de acuerdo con el hecho de que, como se puede ver en el apartado 5.4.5, la longitud de llama decrece más rápidamente durante el *boilover* que en el período estacionario.

Tabla 5.16 Distancias de seguridad para un incendio de 1,5 m de diámetro

u (m/s)	u*		x _c (m)		Relación
	Estacionario	Boilover	Estacionario	Boilover	
< 0,75	< 1,00	< 1,00	2,58	4,29	1,66
1,20	1,54	1,24	3,65	5,30	1,45
1,35	1,73	1,39	3,74	5,32	1,42
1,50	1,92	1,55	3,80	5,30	1,39

Tabla 5.17 Distancias de seguridad para un incendio de 4 m de diámetro

u (m/s)	u*		x _c (m)		Relación
	Estacionario	Boilover	Estacionario	Boilover	
1,05	0,89	0,95	7,25	9,50	1,31
1,20	1,02	1,09	9,14	11,86	1,30
1,35	1,15	1,23	9,43	11,94	1,27
1,50	1,27	1,36	9,65	11,98	1,24

La conclusión del análisis llevado a cabo, es que en el caso de presentarse el fenómeno del *boilover* de capa fina se deben incrementar las distancias de seguridad con respecto a las distancias adoptadas para el período estacionario sin *boilover* del incendio, tanto para la situación sin viento como con viento. Según la tabla 5.15, este incremento en las situaciones sin viento supone un aumento superior al 65% de dichas distancias para los incendios de pequeño diámetro (1,5 m), y para diámetros superiores a los 6 m la tendencia sugiere que este aumento sea del orden del 25-30%.

