

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



6 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CAPA LÍQUIDA

En el presente capítulo se analiza el comportamiento de la temperatura en la zona líquida del incendio, considerando la evolución de dicha temperatura con el tiempo y su distribución en función de la profundidad de la mencionada zona. El análisis contempla como zona líquida de los incendios experimentales realizados: la capa de combustible, la interfase combustible/agua y las capas superiores de agua. Este análisis es fundamental para establecer la aparición del fenómeno de *boilover*, así como el tipo de fenómeno formado, *boilover* genérico (*hot zone*) o *boilover* de capa fina.

En el análisis del comportamiento de la temperatura en función del tiempo se representaron, para cada experimento, los datos registrados por los termopares, examinando su evolución en cada fase del incendio. El estudio ha sido realizado para ambos combustibles empleados en los ensayos, el gasóleo y la gasolina.

El análisis de la distribución de la temperatura en el seno del líquido, para estudiar la posible formación o no de una onda de calor (*hot zone*), se llevó a cabo mediante un algoritmo desarrollado en MATLAB. El programa agrupa en forma matricial los datos procedentes de los termopares situados en la zona líquida y proporciona una representación de la temperatura en toda la capa de líquido considerada (combustible, interfase y capas superiores del agua).

En todos los experimentos, los termopares se posicionaron en correspondencia al centro de la balsa más pequeña, de 1,5 m de diámetro, según las modalidades descritas en el apartado 3.2.2.

6.1 Evolución de la temperatura con el tiempo

La evolución de la temperatura de la zona líquida para cada fase del incendio, para los dos combustibles utilizados, se muestra en las figuras 6.1 (gasóleo, ensayo FOC3_04_D3) y 6.2 (gasolina, ensayo FOC3_03_G3).

6.1.1 Incendios de gasóleo

Todos los ensayos realizados para este combustible han mostrado un comportamiento parecido (figura 6.1), el cual se detalla a continuación.

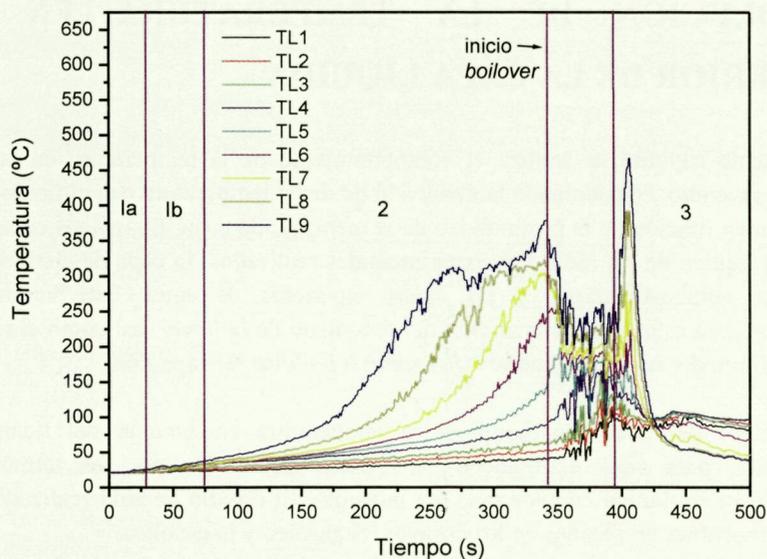


Figura 6.1. Evolución de la temperatura en la zona líquida para la prueba FOC3_04_D3.

Inicialmente, el incendio tiene un estado transitorio (1a y 1b), en el cual hay un pequeño aumento de la temperatura, dividido en dos fases: la fase 1a donde las llamas, que están concentradas en la zona de ignición, se esparcen hasta alcanzar las mismas dimensiones de la balsa y, a continuación, la fase 1b donde dichas llamas aumentan su altura hasta llegar al incendio totalmente desarrollado, esta fase se caracteriza por un aumento de la temperatura ligeramente más apreciable. El instante en el cual la temperatura empieza a crecer de forma considerable es el final de la fase transitoria y, a la vez, el inicio del periodo estacionario.

La fase 2 representa la primera parte del periodo estacionario, en la cual se observa, más claramente, el aumento de la temperatura registrada por cada termopar en el transcurso del experimento. El aumento afecta principalmente a los termopares más cercanos a la superficie del combustible, a causa de la proximidad de las llamas. El comportamiento característico de esta parte del periodo estacionario, para todos los incendios analizados, es que los termopares más cercanos a la superficie del combustible (TL7, TL8 y TL9) alcanzan una temperatura aproximadamente constante antes del comienzo del *boilover* (segunda parte del periodo estacionario). El valor alcanzado está alrededor de 290 °C, es decir, una temperatura dentro del intervalo conocido de vaporización del gasóleo¹. Eso

¹ La temperatura de vaporización del gasóleo está comprendida entre 180 y 370 °C (dato proporcionado por REPSOL).

significa que dichos termopares se encuentran dentro de la zona formada por el líquido en evaporación incipiente o por los vapores de combustible que alimentan a la llama. Nótese que, según la curva de destilación del gasóleo a 290 °C, la fracción destilada es, aproximadamente, de un 65-70% del volumen total, indicando que las fracciones más ligeras ya se han evaporado, esto explica la ralentización del aumento de temperatura, ya que cada vez la combustión es más difícil.

En algunos incendios, como en el caso examinado, el termopar TL9 ha mostrado, pocos segundos antes del *boilover*, un ulterior aumento de la temperatura, debido a que dicho termopar ha estado, por algunos instantes, fuera de la zona de los vapores y en contacto directo con las llamas. El aumento es de corta duración, ya que se produce en la parte final de la fase 2, que es un poco antes de que se presente la ebullición del estrato de agua (*boilover*), por lo cual el termopar se enfría y, entonces, muestra una disminución de la temperatura medida por él. El inicio de la ebullición del agua afecta también a los termopares TL6, TL7 y TL8, que, a medida que transcurre el tiempo, registran también una temperatura más baja. El inicio de la ebullición va acompañado, como ya se ha indicado en capítulos anteriores, por un leve crepitar, el cual se produce a causa del arrastre de combustible hacia las llamas por parte de las burbujas de vapor. En el caso de los termopares TL1, TL2, TL3 y TL4, la temperatura registrada sigue aumentando, ya que la turbulencia de las capas superiores todavía no ha afectado a dichos termopares; como puede verse en la figura 6.1, estos termopares no han alcanzado los 100 °C en este instante. La ebullición, inicialmente más reducida crece y alcanza una fase en la cual todos los termopares miden valores que oscilan alrededor de una temperatura fija, tanto mayor cuanto más arriba se encuentra el termopar. En el caso examinado, dicha fase —a la cual se hará referencia con el nombre de *boilover* completamente desarrollado— se inicia, aproximadamente, a los 360 s. Además, la formación y el desarrollo del *boilover* van acompañados por el aumento del crepitar de las llamas y de la turbulencia de éstas, tanto en su interior como en su superficie, que implica una mayor radiación desprendida hacia el exterior; a partir del nivel sonoro del incendio, el inicio del *boilover* ha sido fijado en 360 s (véase el capítulo 4). Por otro lado, tal como muestra la figura 6.1, y era de suponer, el termopar TL5 tiene un comportamiento, en cuanto a temperatura registrada, comprendido entre los termopares TL4 y TL6, al estar inmerso en la interfase agua/combustible. Por último, cabe indicar que el tiempo necesario para que se establezca la temperatura de los termopares —inicio del *boilover* desarrollado—, desde el momento en que acaba la primera parte del periodo estacionario (2), está alrededor de los 15-20 segundos.

A medida que la cantidad de combustible a quemar es menor, la ebullición disminuye de intensidad hasta llegar al final del periodo de *boilover*. En este instante se produce la última fase del incendio, nombrada transitorio final (3), en la cual el crepitar de las llamas disminuye de una forma apreciable.

En el caso de los termopares TL7, TL8 y TL9, la disminución de la intensidad de ebullición se traduce en un incremento de la temperatura registrada por ellos, debido a

que desaparece el enfriamiento que producían las burbujas de vapor durante el *boilover*. Por lo tanto, los termopares, al encontrarse dentro del incendio, miden la temperatura de la llama a diferentes alturas. Los termopares TL5 y TL6 presentan una evolución parecida, aunque el máximo mostrado es menor ya que están en una posición muy cercana a la capa de agua. De hecho, en el caso de TL5, el aumento casi no se percibe. Los otros termopares —TL1, TL2, TL3 y TL4—, en cambio, bajan progresivamente su temperatura, en cuanto la turbulencia va cesando; por lo tanto, los mismos vuelven a medir la temperatura del agua o de la interfase (85-90 °C), la cual ha bajado de cota.

Después de haber analizado el comportamiento general de la temperatura en la zona líquida, diferenciado las fases del incendio, y observado que la evolución es la misma en todos los casos, se ha procedido a estudiar con más detalle los valores alcanzados en cada periodo. Los resultados de las temperaturas medias se presentan en la tabla 6.1.

La obtención de las temperaturas medias se realizó de manera distinta para cada termopar, de acuerdo con su comportamiento. Por lo que se refiere a las temperaturas medias de los TL7, TL8 y TL9 en el periodo estacionario, el valor presentado en la tabla es un promedio de las temperaturas medias en el periodo en que la temperatura se estabilizaba. Sin embargo, para cada uno de los demás termopares (TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, y TL6), debido a que no habían alcanzado la temperatura máxima en el periodo estacionario, el valor en la tabla es el promedio del valor alcanzado exactamente en el instante final del periodo (en el caso examinado a los 340 s).

La temperatura para el periodo de *boilover* considera solo la fase completamente desarrollada del mismo. Los valores presentados en la segunda columna de la tabla 6.1 representan, para cada termopar, un promedio de las temperaturas medias durante dicho periodo, y se han obtenido de la misma forma que en el caso de los termopares TL7, TL8 y TL9 en el periodo estacionario.

Por último, en el transitorio final se recogieron las temperaturas máximas puntuales alcanzadas por cada termopar, promediando los valores sobre todos los incendios.

Tabla 6.1 Temperaturas medias para cada termopar, teniendo en cuenta todas las pruebas, en las distintas fases del incendio (gasóleo)

Termopar (TLx)	Temperatura máxima en el período estacionario (°C)	Temperatura en el <i>boilover</i> (°C)	Temperatura máxima en el transitorio final (°C)
9	315	230	445
8	305	210	380
7	290	190	320
6	250	170	235
5	155	165	170
4	85	145	135
3	65	125	105
2	50	95	90
1	45	90	85

La comparación entre las temperaturas mostradas en la tabla 6.1 se debe realizar, principalmente, entre la primera parte del periodo estacionario y el periodo de *boilover* desarrollado. En primer lugar, se debe prestar atención al grupo de termopares formado por TL6, TL7, TL8 y TL9, al observar que sus medidas, cuando se pasa de un periodo al otro, disminuyen bruscamente. La disminución se explica, como ya se ha indicado anteriormente, por el enfriamiento producido por las burbujas de vapor.

El segundo grupo, que comprende los termopares TL1, TL2, TL3, TL4 y TL5, los cuales están inmersos dentro del agua y de la interfase (TL5), muestran, contrariamente a lo que ocurre para el otro grupo, un aumento de temperatura al pasar de un periodo al otro, en cuanto el calor procedente de la llama se utiliza para calentar el agua y evaporar parte de ella. El hecho de que los termopares más próximos a la interfase (TL5, TL4 y TL3) puedan alcanzar temperaturas superiores a los 100 °C, se explica por la gran turbulencia observada en la fase de ebullición, la cual hace que estos termopares estén en contacto con una mezcla bifásica formada por agua y combustible. Cabe destacar, que el termopar TL5 alcanza valores de 150 °C durante el periodo estacionario, ya que este termopar se encuentra en la interfase agua/combustible y, por lo tanto, está midiendo un valor que está entremedio de la temperatura de las dos capas. Además, hay que tener en cuenta que la interfase, a partir del momento en que empieza el *boilover*, desciende progresivamente llegando a alcanzar termopares que están en posiciones más bajas, los cuales pueden registrar valores de temperatura cada vez mayores.

Finalmente, el posterior aumento de la temperatura medida por los termopares TL5, TL6, TL7, TL8 y TL9, entre el *boilover* y el transitorio final, se debe al hecho de que, en este último periodo, los termopares antedichos no están cubiertos por la capa de vapores de combustible, sino en contacto directo con las llamas. Para los otros termopares —TL1, TL2, TL3 y TL4—, las temperaturas máximas disminuyen al pasar al transitorio final; los valores muestran que los termopares TL3 y TL4 han quedado por lo menos algunos instantes en la llama o interfase, y que los termopares TL1 y TL2 han estado siempre en el agua.

Un hecho destacable, el cual se observó en la mayoría de los experimentos, fue que la interfase agua/combustible al final de la prueba se encontraba siempre próxima al termopar cuya temperatura característica durante la fase de *boilover* desarrollado era más cercana a los 120 °C. Estudios previos [INAM 1992, GAR1 1999] fijaron en dicho valor la temperatura mínima de interfase para la ocurrencia del fenómeno.

6.1.2 Incendios de gasolina

La figura 6.2 muestra la típica evolución de la temperatura de la zona líquida para un incendio de gasolina.

El comportamiento en las primeras fases del incendio —el transitorio inicial (1a y 1b)— no es muy distinto del descrito para los incendios de gasóleo.

Cuando se inicia el periodo estacionario (2), se observa que empieza a haber un aumento notable de la temperatura, como ocurre en los incendios de gasóleo. Este aumento evoluciona de forma diversa, para cada uno de los termopares involucrados, como a continuación se detalla.

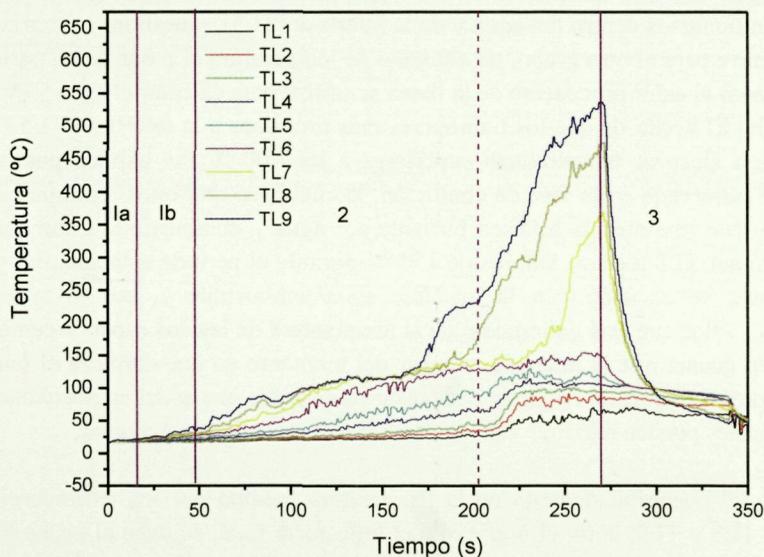


Figura 6.2. Evolución de la temperatura en la zona líquida para la prueba FOC3_03_G3.

Los termopares colocados más cerca de la superficie libre de la zona líquida —TL7, TL8 y TL9— registran una señal en constante aumento hasta que se alcanza una temperatura de, aproximadamente, 105-110 °C; a partir de este momento, el incremento de temperatura se hace más suave. Como en el caso del gasóleo, esta ralentización del incremento de la temperatura indica que, en esta zona, los componentes más ligeros ya han destilado y, por lo tanto, los demás requieren más calor para su evaporación. Una vez más, a dicha temperatura corresponde una fracción destilada de, aproximadamente, un 65-70% del volumen inicial². Sin embargo, en un determinado instante, la temperatura medida por estos termopares presenta una subida repentina; esta subida se debe al hecho de que los antedichos termopares ya se encuentran en el interior de las llamas. El aumento de temperatura continua hasta el inicio del transitorio final (3). Este comportamiento se manifiesta antes para el termopar TL9, que es el primero en

² La temperatura de vaporización de la gasolina está comprendida entre 50 y 215 °C (dato proporcionado por REPSOL).

encontrarse en contacto directo con la llama, a continuación para el TL8 y finalmente para el TL7. El termopar TL6 —situado a 2 mm sobre la interfase agua/combustible—, tiene un comportamiento parecido pero, al no haberse quedado descubierto durante la fase estacionaria, presenta, obviamente, una temperatura final menor que los termopares TL7, TL8 y TL9.

Los termopares inmersos en el agua —TL1, TL2, TL3, TL4— presentan, durante el mismo periodo, una evolución distinta. Como puede observarse en la figura 6.2, la temperatura registrada por ellos, inicialmente, aumenta de forma más suave y, posteriormente (en este caso, aproximadamente, a los 200 segundos de iniciarse el incendio), aumenta más rápidamente hasta alcanzar un valor que se mantiene estable hasta el inicio del transitorio final. Es interesante notar que el aumento más pronunciado se produce cuando el termopar TL5 está próximo a los 100 °C. El gradiente inicial de temperatura más suave se debe a la menor conducción del agua, que hace que el calor se propague más lentamente en este líquido. Por otro lado, el aumento a los 200 segundos de iniciarse el incendio, se debe, probablemente, al hecho de que la capa de combustible tiene un espesor tal que la radiación empieza a ser más influyente en la transferencia de calor hacia el agua.

Como era de esperar, el termopar TL5, colocado en la interfase agua/combustible, muestra un comportamiento intermedio entre el TL6 (inmerso en el combustible) y el TL4 (inmerso en el agua).

Por lo que se refiere al transitorio final (3), también se agrupan los termopares según un comportamiento u otro. Los termopares que quedan en contacto con la llama en el estacionario, bajan drásticamente su temperatura debido a que la llama se hace más pequeña a gran velocidad y, por lo tanto, el calor recibido es notablemente menor. El termopar TL6 responde a dicha reducción de la dimensión de la llama con una disminución de la temperatura hasta valores cercanos a la temperatura del agua, ya que se encuentra muy cerca de ésta. Los termopares inmersos en el agua —TL1, TL2, TL3 y TL4— no están afectados por la progresiva disminución de las dimensiones del incendio, ya que el agua mantiene su temperatura constante. Como sucede en el periodo estacionario, el termopar TL5 muestra un comportamiento intermedio entre el TL6 y el TL4. La duración del periodo transitorio final es, en general, menor que en los incendios de gasóleo.

Un hecho importante a remarcar es que, en los experimentos realizados con gasolina, no se ha evidenciado un sobrecalentamiento del estrato de agua, en cuanto el termopar TL5 solo esporádicamente alcanzó los 120 °C, valor que, como ya se ha citado anteriormente, en varios estudios previos [GAR1 1999, INAM 1992] se ha fijado como el límite mínimo de temperatura en la interfase agua/combustible para que se produzca un *boilover*. Esto se explica considerando que las temperaturas de ebullición de la mayoría de los compuestos de la gasolina son bajas —un 65 % destila a menos de 110 °C—. Por este mismo motivo, la formación de una *hot zone* parece improbable (el

análisis de distribución de la temperatura en la capa del líquido del apartado 6.2 aclarará dicho aspecto).

El comportamiento descrito se repitió en todas las pruebas, con la única diferencia en las duraciones de los periodos del incendio. Por lo tanto, se ha realizado un estudio de las temperaturas alcanzadas por cada termopar en todas las pruebas realizadas, presentadas en la tabla 6.2. El análisis se ha limitado al periodo estacionario, el cual se ha dividido en dos partes. La primera parte acaba justo en el instante en que los termopares TL1, TL2, TL3, TL4, y TL5 aumentan su temperatura de manera más intensa (aproximadamente a los 200 s del inicio del incendio en la prueba FOC3_03_G3). La segunda parte termina con el inicio del transitorio final (a los 270 s del inicio del incendio en este caso). Para los termopares antedichos, en el primer intervalo se seleccionó el valor al final del periodo (temperatura máxima). En cambio, en la segunda fase las temperaturas se han obtenido como una media de los valores que se mantienen estables; en primer lugar, la media se ha realizado para cada ensayo y, posteriormente y para cada termopar, se ha calculado como valor final una media global con todos los incendios.

La determinación de estas temperaturas para los termopares TL6, TL7, TL8 y TL9, se ha realizado de forma distinta. Para la primera parte, se seleccionó el valor de temperatura anterior al valor del instante en el cual se encuentran estos termopares en contacto con las llamas, y para la segunda parte, se tomó la temperatura máxima alcanzada.

Tabla 6.2. *Temperaturas medias para cada termopar, teniendo en cuenta todas las pruebas, en las distintas fases del incendio (gasolina).*

Termopar (TLx)	Temperatura de la primera fase del periodo estacionario (°C)	Temperatura de la segunda fase del periodo estacionario (°C)
TL9	130	580
TL8	128	545
TL7	125	465
TL6	115	155
TL5	95	120
TL4	60	105
TL3	40	95
TL2	30	70
TL1	28	55

Los valores en la tabla muestran de forma numérica, los comportamientos antes comentados. El resultado más interesante es posiblemente que la interfase agua/combustible alcance los 120 °C solo esporádicamente (como temperatura máxima), hecho que, como ya se ha dicho, impide la aparición del *boilover*.

6.2 Distribución de la temperatura en la capa de líquido

En cada gráfico mostrado a continuación, se presenta, para un determinado instante de tiempo, la distribución de la temperatura en la capa de líquido a partir de los datos registrados por los termopares. Como ya se ha explicado en el apartado 3.2.2, los termopares han sido colocados en un eje vertical centrado al eje del incendio y separados por una distancia de 2 mm entre sí, de manera que el termopar TL5 se encontrara justo en la interfase combustible-agua. En los mencionados gráficos, las abscisas representan este eje vertical (profundidad de la capa líquida), con valores que van desde -8 mm (es decir, 8 mm por debajo de la interfase combustible-agua) hasta 8 mm por encima de la interfase. Por como han sido nombrados los termopares, el TL1 está colocado a -8 mm, el TL2 a -6 mm y así sucesivamente. Por otra parte, cada gráfico constituye una imagen de un determinado instante del incendio; por lo tanto, en las figuras se indica el tiempo transcurrido desde el inicio de dicho incendio. La línea vertical de color marrón, que aparece en la mayor parte de los gráficos, representa la superficie del combustible, la cual, a medida de que dicho combustible se va consumiendo, se mueve hacia TL5 (termopar de referencia, 0 mm).

El objetivo del análisis de la distribución de la temperatura en la capa de líquido es poder evidenciar la eventual formación de una onda de calor, y, en caso negativo, proporcionar información para conocer el mecanismo desencadenante del *thin layer boilover*.

El estudio se ha realizado tanto para los incendios de gasóleo como para los de gasolina; en este último caso, para tener una comparación con un combustible multicomponente que no experimenta *thin layer boilover*.

6.2.1 Incendios de gasóleo

Como ya se ha mencionado, la necesidad de este análisis nace de la duda de si realmente se forma una onda de calor al trabajar con capas finas de combustible. En esta situación, el fenómeno de la ebullición de la capa de agua podría ser desencadenado simplemente a causa de la proximidad de la llama a dicha capa y por la transferencia de calor desde la llama hacia el líquido. De hecho, en experimentos de *thin layer boilover* a pequeña escala no se ha registrado la formación de una onda de calor [BROE 1995, GAR1 1999]. Por lo que concierne a incendios a gran escala, no existe todavía una seguridad absoluta sobre este tema; por tanto, el presente análisis pretende esclarecer las carencias actualmente existentes.

El comportamiento de los incendios ha sido análogo para todos los experimentos realizados. Para el gasóleo se ha elegido como prueba de referencia el ensayo FOC3_04_D3, con un diámetro de 3 m y un espesor inicial de combustible de 20 mm (figura 6.3), cuya evolución se detalla a continuación.

Como se observa en la figura 6.3 referida a los 168 s desde el inicio del incendio, después de una fase transitoria inicial, la temperatura registrada por los termopares experimenta un aumento exponencial en función de la posición de dichos termopares en el eje vertical (tomando como referencia la interfase combustible-agua). La tendencia descrita se presenta a partir del momento en que la temperatura proporcionada por TL5 alcanza los 35-40 °C; según el diámetro del incendio y el espesor inicial de combustible, varía el tiempo inicial necesario para que se establezca este perfil exponencial. Analizando la figura 6.4 (la misma prueba que la figura anterior pero referida a los 323 s del inicio del incendio), el perfil exponencial se registra solo hasta el termopar TL8 (colocado a 6 mm de la interfase), el termopar TL9 tiene casi la misma temperatura que TL8. Este hecho podría llevar a pensar en la formación de una onda de calor; sin embargo, se observa que la zona de gradiente cero se encuentra fuera del líquido (está cruzada por la línea marrón que representa la superficie libre) y, por lo tanto, esta midiendo la temperatura de la llama. De hecho, también el gradiente entre los termopares TL7 y TL8 muestra una pendiente menor; se podría hablar de onda de calor si esta zona creciera con el tiempo, propagándose hacia el fondo de la balsa con velocidad mayor respecto a la regresión de la superficie. Sin embargo, se observa que, con el progresar del tiempo (figuras 6.4, 6.5 y 6.6), la zona a temperatura constante no crece de tamaño, sino se desplaza con la superficie libre.

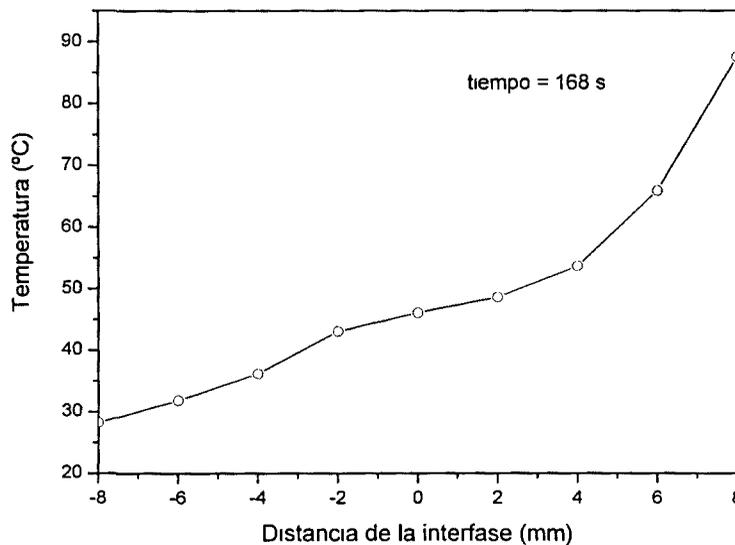


Figura 6.3 Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 168 s para la prueba FOC3_04_D3

La presencia de esta zona a alta temperatura cercana a la superficie del combustible se puede atribuir a la proximidad de la llama y, evidentemente, a la transferencia de calor por convección, radiación y conducción desde el incendio. En consecuencia, una vez

que la superficie del combustible está cercana a la capa de agua, la ebullición de la misma ocurre fácilmente si la temperatura del combustible que se está consumiendo supera la temperatura de ebullición del agua, como en el caso del gasóleo. Por ello, el calentamiento que experimenta el combustible no se puede definir como onda de calor. El hecho de que la capa isotérmica no se propague hasta el fondo de la balsa, es porque la velocidad de destilación de los hidrocarburos que conforman el gasóleo es muy similar a que la velocidad con que retrocede la superficie del líquido (es decir, la velocidad de combustión). La baja velocidad de destilación se debe al intervalo relativamente pequeño de temperaturas de ebullición de los compuestos que forman el gasóleo respecto, por ejemplo, a un crudo.

Se puede entonces afirmar que para incendios de balsa con diámetros comprendidos entre 1,5 y 6 m y con espesores de combustible hasta 2,5 cm, no se registra la formación de una onda de calor. El resultado concuerda con investigaciones precedentes con capas reducidas de combustible [GARO 1996]. Además, basándose en trabajos previos en los cuales se efectuaron experimentos con distintos combustibles, se puede concluir que la formación de una onda de calor no solo depende del espesor de combustible, sino también del tipo de combustible y de sus características, principalmente del rango de ebullición de los hidrocarburos que lo componen [KOSE 1994, BROE 1995].

En el desarrollo del análisis se nombra *seudo onda de calor* al tipo de calentamiento observado en las pruebas realizadas en esta tesis, para diferenciarla claramente de la onda de calor que se forma en incendios con capas de combustible más gruesas. En los experimentos realizados, la *seudo onda de calor* mantiene una temperatura de, aproximadamente, 300 °C, valor en el intervalo de destilación del gasóleo (180-370 °C).

Por otro lado, cabe indicar que durante todo el periodo estacionario (antes del inicio del *thin layer boilover*), la llama consigue calentar una capa de combustible de espesor comprendido entre 1 y 3 mm, según el ensayo.

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6, se muestran tres distribuciones de temperaturas, registradas en diferentes instantes desde el inicio del incendio, donde puede observarse el comportamiento de la *seudo onda de calor* y el movimiento de la superficie del combustible.

En la figura 6.6 se puede apreciar que la temperatura medida para el termopar TL5 (en la interfase) es de 150 °C, valor mucho mayor que la temperatura de ebullición del agua. El fenómeno se explica recordando que el termopar registra, a causa de las oscilaciones del líquido, una temperatura intermedia entre la del agua y la del combustible. Por lo tanto, no es de extrañar que dicho termopar TL5 pueda mostrar una temperatura superior en 50 °C a la temperatura de ebullición del agua.

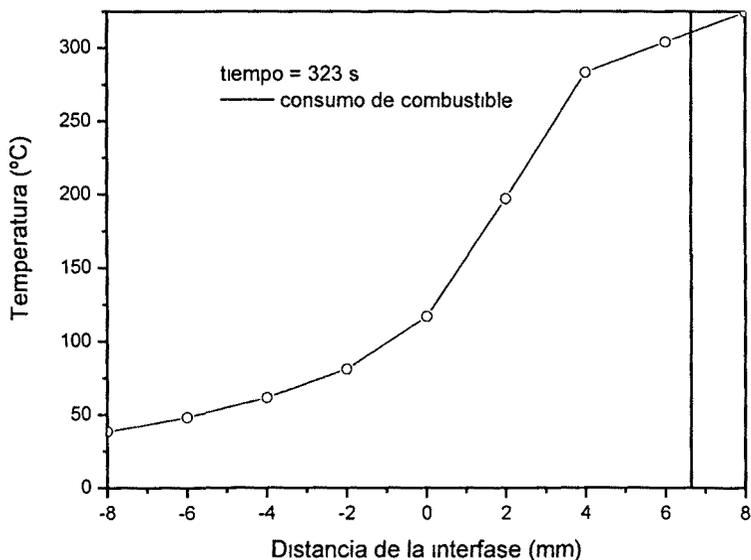


Figura 6 4 Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 323 s para la prueba FOC3_04_D3

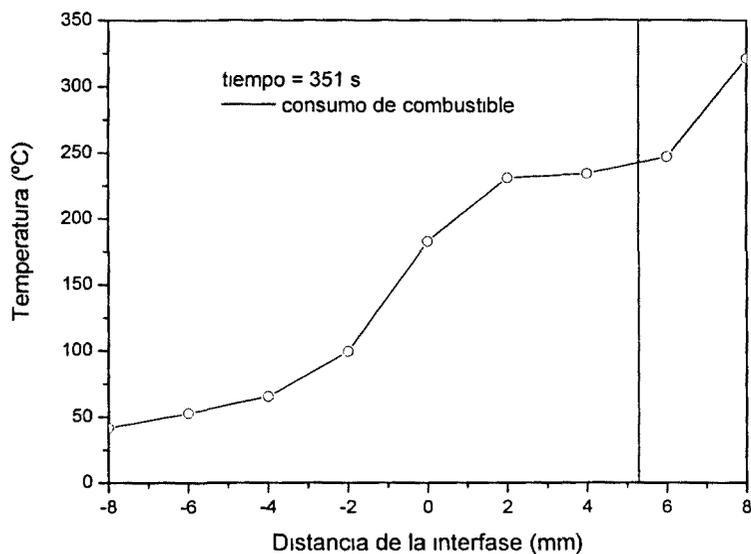


Figura 6 5 Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 351 s para la prueba FOC3_04_D3

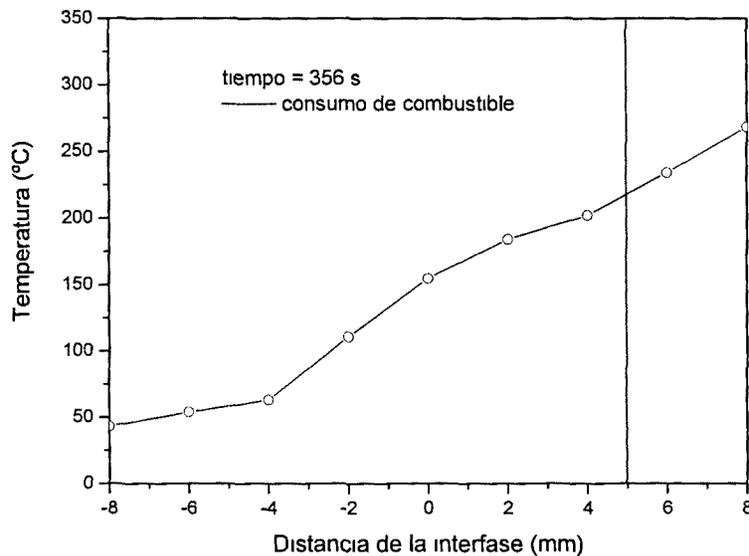


Figura 6.6 Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 356 s para la prueba FOC3_04_D3

Además, se puede observar que, a medida que el nivel del combustible disminuye, los termopares descubiertos entran en contacto con la llama, produciéndose un gradiente de temperatura más marcado. Eso se nota en las figuras 6.6 y 6.7 al observar la distribución de temperaturas registradas por los termopares TL8 y TL9.

Mientras el combustible se consume y la superficie libre del combustible se acerca a TL6 (a 2 mm), se empieza a escuchar el crepitar con producción esporádica de burbujas de vapor que enfrían los termopares que encuentran en su camino (figura 6.7). El enfriamiento se manifiesta en una disminución de la temperatura y del espesor de la seudo onda de calor, y en la aparición de fluctuaciones en la medida de dicha temperatura, a causa de la turbulencia generada por la evaporación. Cuando se establece el *thin layer boilover* desarrollado, la turbulencia se hace mayor a causa de la ebullición más intensa del estrato de agua. En este periodo la distribución de la temperatura se distorsiona, mostrando grandes gradientes de temperatura entre cada termopar. Evidentemente, esta distorsión en los valores registrados cabe atribuirla a la turbulencia que hace que un termopar se encuentre esporádicamente bajo la capa de agua o que sea enfriado por el vapor que se está produciendo o, bien, que mida la temperatura de la llama. Cabe indicar que a partir del inicio del *boilover* desarrollado, la línea marrón no es representativa de la superficie libre del líquido. De hecho, una vez que se desarrolla el *boilover*, la superficie libre es muy irregular debido a la turbulencia y, por lo tanto, no es posible situarla con precisión; por ello, a partir de este instante, dicha superficie se representa con una línea discontinua.

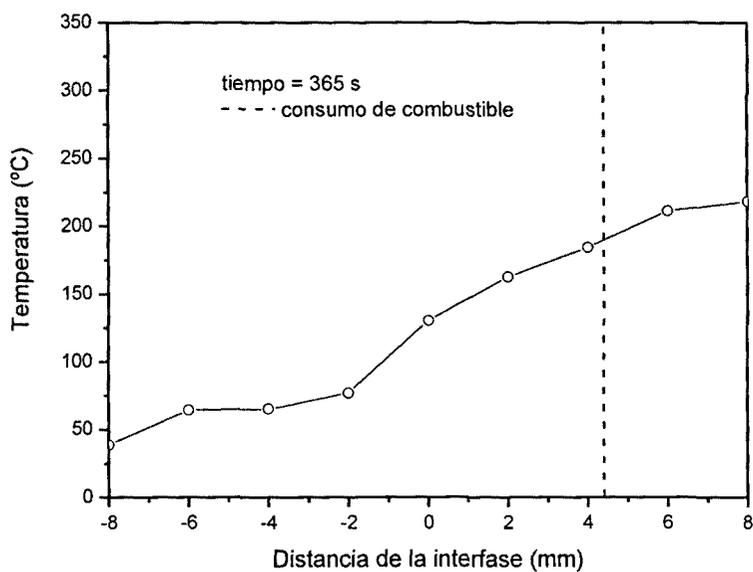


Figura 6.7. Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 365 s para la prueba FOC3_04_D3.

La figura 6.8 muestra los instantes inmediatamente precedentes al final del incendio, en los cuales solo queda una pequeña cantidad de combustible sobre el estrato de agua.

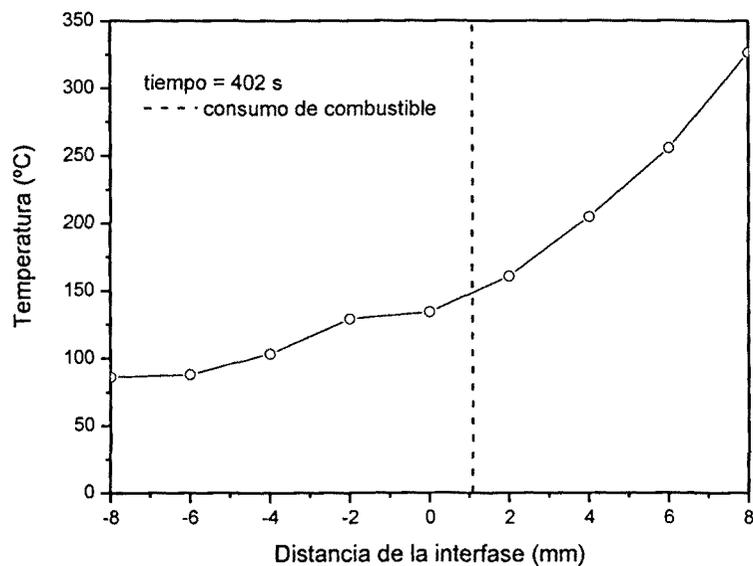


Figura 6.8. Distribución de la temperatura en el líquido en el instante 402 s para la prueba FOC3_04_D3.

Como puede verse, en este instante, la temperatura parece seguir una distribución exponencial; esto se debe a que los termopares que están fuera del agua miden la temperatura de llama que, aunque dicha llama vaya apagándose, evidentemente, su temperatura es siempre superior a la de la capa de líquido.

Después de haber explicado el mecanismo y las causas del calentamiento de la capa de combustible, haber analizado su comportamiento y haberla definido como seudo onda de calor, para diferenciarla de una onda de calor real, se ha llevado a cabo el estudio del tiempo necesario para que dicha seudo onda de calor alcance el termopar TL9 (a 8 mm) y el termopar TL5 (a la interfase), termopares usados como límites de la medida de la temperatura dentro del combustible. Promediando los valores obtenidos para los incendios de igual espesor inicial de combustible, se obtuvieron los antedichos tiempos, cuyos valores se muestran en las tablas 6.3 y 6.4. En el caso del termopar TL5 se indica también el tiempo requerido para que el termopar alcance los 100 °C y el instante del inicio del *boilover*.

Tabla 6.3 Tiempos necesarios para que la seudo onda de calor alcance el termopar TL9

Espesor inicial de combustible (mm)	Distancia del termopar desde la superficie libre (mm)	Instante de llegada de la seudo onda de calor al termopar (s)
15	7	170 – 180
20	12	270 – 280
25	17	360 – 370

Tabla 6.4 Tiempos necesarios para que la seudo onda de calor alcance el termopar TL5

Espesor inicial de combustible (mm)	Tiempo requerido para alcanzar 100 °C (s)	Instante de llegada de la seudo onda de calor al termopar (s)	Instante de inicio del <i>boilover</i> (s)
15	208	220 – 230	240
20	296	310 – 320	330
25	369	390 – 410	422

En todos los ensayos realizados, en el instante en que la seudo onda de calor alcanzaba el termopar TL9 (a 8 mm por arriba de la interfase), éste indicaba un valor comprendido entre 285 y 290 °C. A continuación, la temperatura de la seudo onda de calor crecía hasta los 300 °C, para después mantenerse prácticamente constante, hasta que ésta alcanzaba al termopar TL6, instante en donde empezaba a disminuir su temperatura, y cuando dicha seudo onda de calor llegaba al termopar TL5 (interfase) la medida registrada por éste disminuía hasta, aproximadamente, los 150 °C. Eso se debe a la proximidad del agua, la cual está absorbiendo calor para después evaporarse. Otro hecho a remarcar es que a partir del momento en que el termopar TL5 alcanzaba los 100 °C, transcurrían siempre aproximadamente entre 30 y 50 segundos antes de que se iniciara el *boilover* totalmente desarrollado.

A continuación, la figura 6.9 presenta, como resumen de lo detallado anteriormente, la evolución temporal de la distribución de temperaturas, así como la evolución temporal del consumo de combustible.

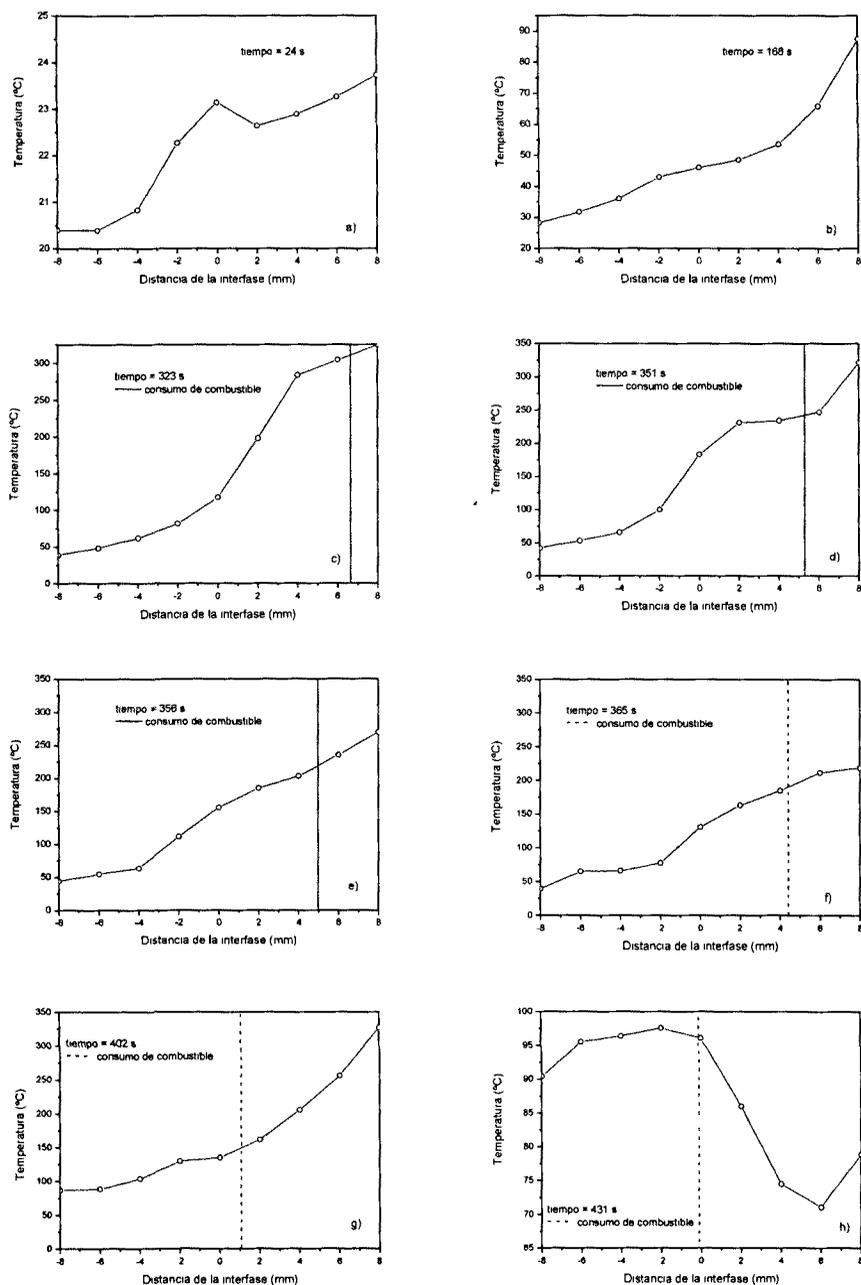


Figura 6.9. Evolución temporal de la distribución de temperatura en el líquido para la prueba FOC3_04_D3.

Cabe indicar que la figura 6.9(a) se refiere a la fase inicial antes del alcance de una temperatura uniforme, mientras que la figura 6.9(h) muestra el instante inmediatamente anterior al final de la prueba, en el cual se están enfriando mayoritariamente los termopares en contacto con el aire; de esta observación se puede deducir cuanto ha bajado el nivel de agua en las balsas durante el *boilover*.

6.2.2 Incendios de gasolina

En el caso de los incendios de gasolina, el comportamiento es análogo al observado en las pruebas con gasóleo en las fases iniciales; es decir, la temperatura muestra una forma exponencial bien definida, como se observa en la figura 6.10 (72 s después del inicio del incendio de la prueba elegida como referencia, ensayo FOC3_03_G3). Cabe destacar que, de acuerdo con las mejores propiedades de combustión de la gasolina, el perfil exponencial se logra más rápidamente y se muestra ya cuando el termopar TL5 ha alcanzado los 20-25 °C.

En cambio, para tiempos posteriores se observa la formación de una zona con temperaturas comprendidas entre 110 y 115 °C, con un espesor de, aproximadamente, 3-6 mm. El gradiente de temperatura es mucho menor respecto al que se observa en los incendios de gasóleo, en donde, además, la zona de temperatura constante no es tan grande. Todo lo antedicho se puede ver en las figuras 6.11 y 6.12, en las cuales se representan los perfiles de temperatura a los 117 y 142 segundos desde el inicio del experimento, respectivamente; en la figura 6.12, también puede verse el inicio del avance de la superficie libre del líquido (línea marrón).

El mayor espesor de la zona de gradiente de temperatura nulo podría hacer pensar en la formación de una onda de calor, pero la temperatura que alcanza dicha zona, la cual no crece en el transcurso del incendio, no es suficientemente elevada para producir un *boilover*; esta observación está en total acuerdo con los resultados obtenidos por Koseki [KOSE 1999]. Como ya se ha indicado, investigaciones precedentes afirman que la temperatura necesaria para desarrollar un *boilover* o *thin layer boilover* debe ser superior a los 120 °C [INAM 1992]. Además, esta capa de líquido a temperatura constante se mueve hacia el fondo de la balsa con una velocidad menor respecto a la velocidad de combustión de la gasolina. Esto puede atribuirse al hecho de que la gasolina está formada por compuestos con puntos de ebullición muy próximos, lo cual no permite la acumulación de calor dentro del líquido.

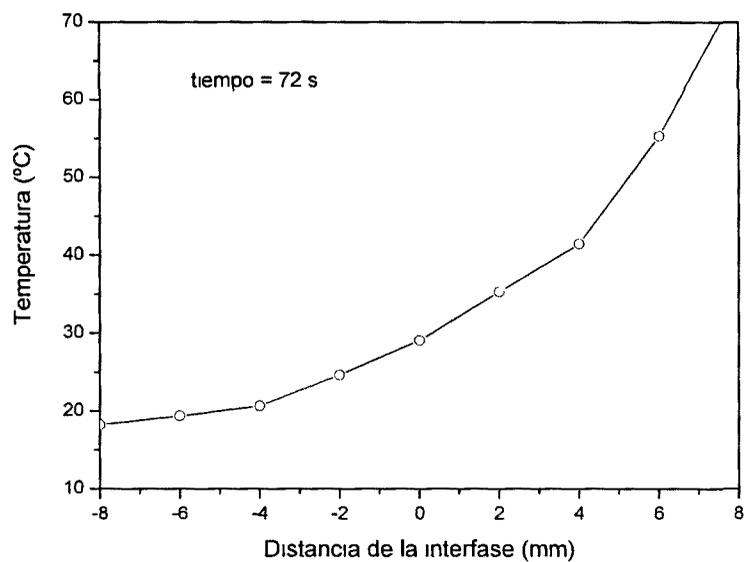


Figura 6 10 Distribucion de temperaturas en la zona liquida a los 72 s del inicio del incendio (prueba FOC3_03_G3)

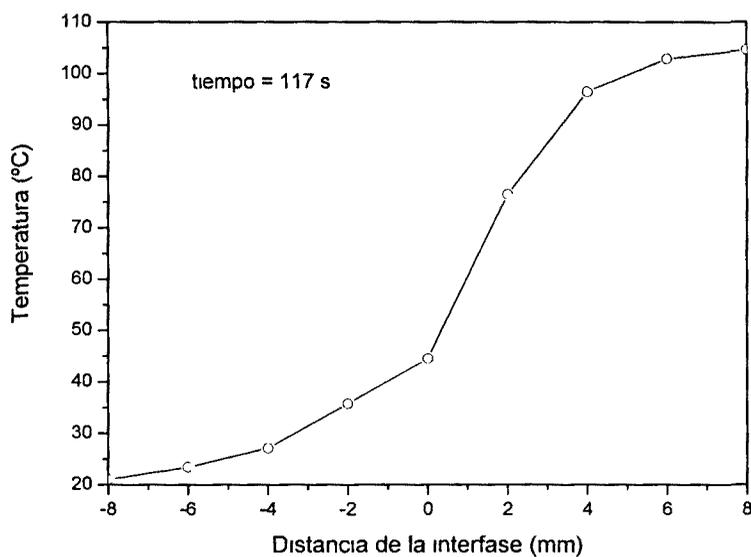


Figura 6 11 Distribucion de temperaturas en la zona liquida a los 117 s del inicio del incendio (prueba FOC3_03_G3)

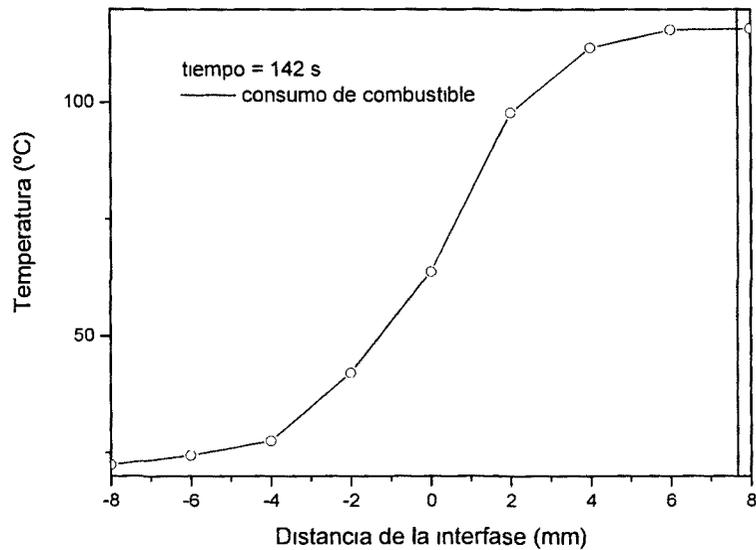


Figura 6.12 Distribución de temperaturas en la zona líquida a los 142 s del inicio del incendio (prueba FOC3_03_G3)

La capa líquida a temperatura constante alcanza espesores máximos comprendidos entre 3 y 6 mm según el incendio, y no se ha observado que dichos espesores dependan del diámetro del incendio. Un hecho destacable que se muestra en todos los incendios es que dicha capa, una vez alcanzado su espesor máximo, se empequeñece progresivamente hasta extinguirse cuando la superficie libre llega al termopar TL6 (a 2 mm de la interfase). Este comportamiento, debido probablemente a la proximidad del agua que actúa como fuente fría, puede verse en las figuras 6.13 y 6.14.

La figura 6.15 muestra el resumen de la evolución temporal de la distribución de temperaturas para la zona líquida, así como la evolución del consumo de combustible. Como en el caso del gasóleo, la figura 6.15(a) presenta la distribución de temperatura en la fase inicial antes del alcance de una temperatura uniforme, y la figura 6.15(h) muestra los instantes del final del incendio.

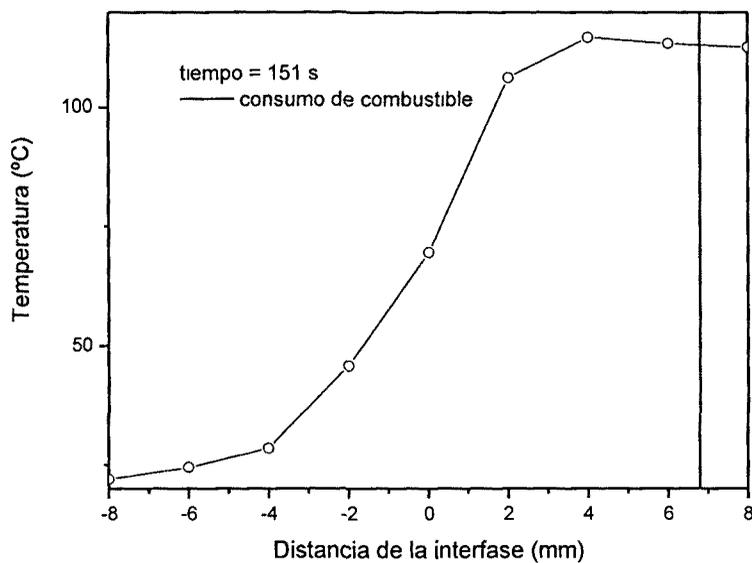


Figura 6 13 Distribución de temperaturas en la zona líquida a los 151 s del inicio del incendio (prueba FOC3_03_G3)

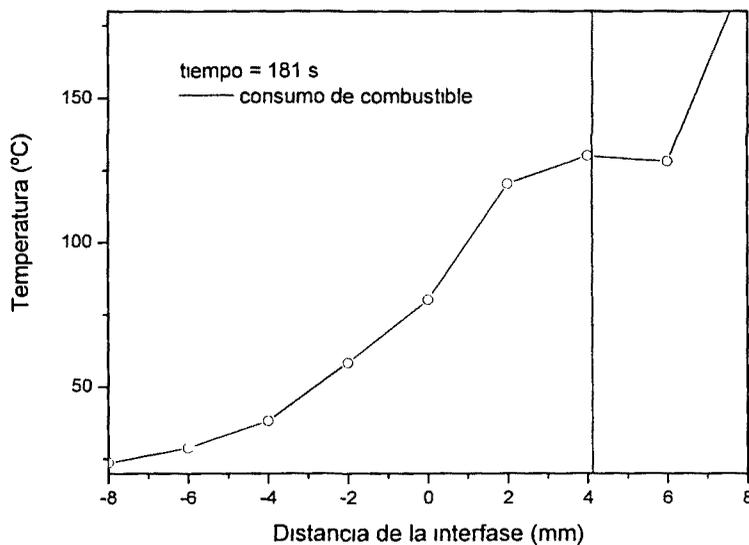


Figura 6 14 Distribución de temperaturas en la zona líquida a los 181 s del inicio del incendio (prueba FOC3_03_G3)

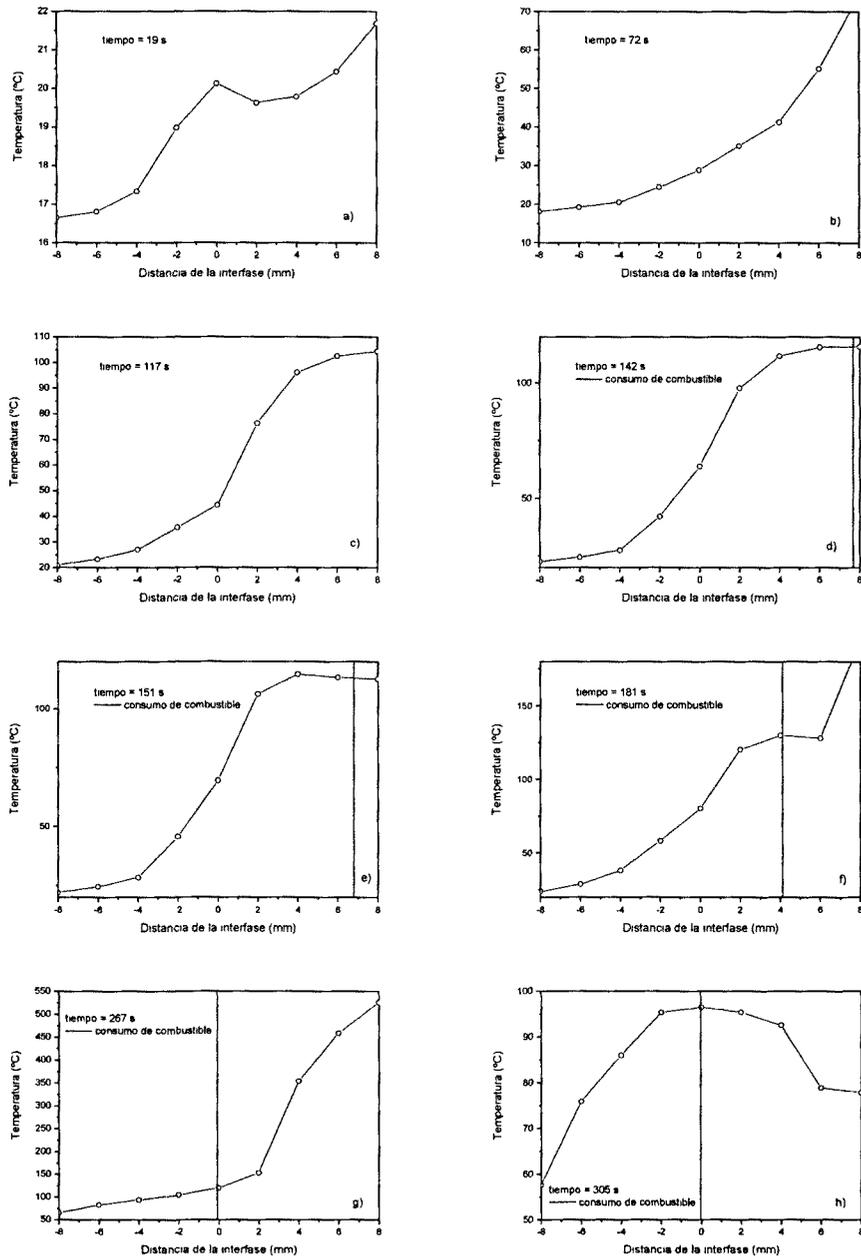


Figura 6.15. Evolución temporal de la distribución de temperaturas en la zona líquida (prueba FOC3_03_G3).

6.3 Discusión final

El análisis llevado a cabo en este capítulo ha evidenciado el diferente comportamiento de la temperatura en el interior del líquido para los dos combustibles utilizados. Con la finalidad de un resumen de los resultados obtenidos, en la figura 6.16 se comparan, para los dos ensayos de referencia —FOC3_03_G3 (gasolina, 3 m de diámetro, 2 cm de combustible) y FOC3_04_D3 (gasóleo, 3 m de diámetro, 2 cm de combustible)— las evoluciones de los termopares más representativos. Por lo que se refiere a la interfase (TL5), solo el gasóleo ha alcanzado temperaturas de 120 °C o superiores, hecho que ha conducido a la ocurrencia de un *boilover*, obviamente de capa fina, por los espesores empleados. Por otro lado, la evolución de la temperatura del termopar TL9 —representativo de los termopares en el interior del hidrocarburo— ha registrado, durante la fase de *boilover* en el incendio de gasóleo, una disminución de temperatura, relacionada al calor abstraído por el proceso de evaporación. En cambio, en la gasolina, la temperatura del termopar TL9 ha continuado aumentando hasta la fase final del incendio, prueba de no haber experimentado ebullición de la capa de agua.

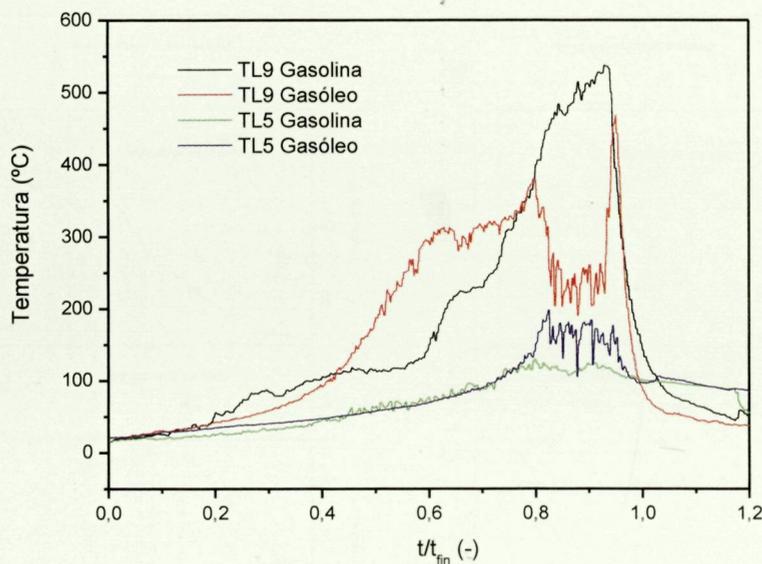


Figura 6.16. Comparación entre la evolución de la temperatura en el interior de la capa líquida del gasóleo y de la gasolina.

Cabe indicar que, para poder realizar una comparación directa entre los dos combustibles, en abscisas no se ha puesto el tiempo absoluto desde el inicio del incendio, sino se ha dividido dicho tiempo por la duración total del ensayo (t_{fin}), mayor, a paridad de espesor inicial y diámetro, para el gasóleo, debido a su menor velocidad de combustión. Por lo tanto, la figura da la impresión (equivocada) que el gasóleo se

calienta más rápidamente que la gasolina. Pese a esta limitación, el gráfico es muy útil para observar los efectos de la ebullición de la capa de agua, principalmente el aumento de turbulencia en la capa de líquido y el enfriamiento de los termopares que, debido al consumo de combustible, han quedado en contacto directo con la llama. Es interesante notar como, a medida que la ebullición pierde intensidad ($t/t_{fin} \approx 0,85$), la evolución de la temperatura en el incendio de gasóleo toma nuevamente la misma forma que la observada para la prueba de gasolina.

Por lo que se refiere al análisis de la distribución de la temperatura en la capa de líquido, el estudio ha llevado a la conclusión que para ambos hidrocarburos no se ha originado una onda de calor propiamente dicha, debido al limitado espesor y a las peculiares características de los combustibles. En particular, en el caso de la gasolina, las bajas temperaturas de ebullición hacen que no aparezca nunca el fenómeno del *thin layer boilover*. Para ambos combustibles, el mecanismo de transferencia de calor observado se ha definido como *seudo onda de calor*; dicho mecanismo deriva probablemente, como la onda de calor propiamente dicha, de una destilación fraccionada de los componentes de la mezcla de hidrocarburos, pero no es capaz de originar una *hot zone*, es decir una zona a alta temperatura que crece a medida que el incendio avanza (véase el apartado 1.3). Sin embargo, la *seudo onda de calor*, podría, en caso de espesores más elevados y/o diferentes rangos de ebullición, evolucionar en una onda de calor propiamente dicha.

Finalmente, también cabe destacar que en el experimento realizado con la mezcla de 50% gasóleo y 50% gasolina (FOC3_19_M3), en el cual se produjo *boilover* —siempre de capa fina—, la evolución de temperatura en el interior del líquido ha sido análoga a los incendios de gasóleo. Por otro lado, cabe indicar que, debido a la mayor volatilidad y a la baja temperatura de ebullición de la gasolina, en esta prueba la *seudo onda de calor* se alcanzó más rápidamente —originando el *boilover* a tiempos inferiores respecto al gasóleo— y con valores máximos de temperatura menores (alrededor de 250 °C).

7 MODELADO DEL FENÓMENO *BOILOVER*

En el análisis desarrollado en el capítulo 6, se ha mostrado como, en los experimentos realizados en esta tesis, debido a los limitados espesores de combustible y a las peculiares propiedades de los hidrocarburos empleados, no se ha observado la formación de una onda de calor y de una *hot zone* propiamente dicha. Solo fue posible observar una zona a alta temperatura de espesor muy reducido, la cual no incrementa de tamaño y de temperatura al avanzar hacia el fondo de la balsa. Dicha zona, que se ha denominado *seudo onda de calor*, se propaga a la velocidad de combustión y asume características distintas según el tipo de hidrocarburo; en el caso del gasóleo, estas características llevan a la formación del *thin layer boilover*.

El objetivo principal del presente capítulo es desarrollar un modelo matemático para caracterizar de forma precisa la evolución de la temperatura en el interior de la capa de líquido y, especialmente, la temperatura de la interfase agua-combustible, para mezclas de hidrocarburos que queman sobre un sustrato acuoso.

El capítulo se estructura en dos secciones. En la primera, se desarrolla un modelo con la finalidad de predecir la evolución de la temperatura, en el caso en que se trabaje con espesores reducidos. Es decir, este modelo predice la antedicha evolución cuando el mecanismo del fenómeno es el *thin layer boilover*.

En la segunda parte del capítulo, se modifica el modelo anterior, extendiendo su validez a un caso de *hot zone boilover*; es decir, para capas gruesas de hidrocarburos. Además, de esta forma, se pretende aclarar si existen diferencias sustanciales entre estos mecanismos o, bien, si estas dos tipologías de *boilover* son prácticamente iguales con ligeras variaciones.

Las predicciones de las simulaciones se han comparado con los resultados de los experimentos realizados en esta tesis y con datos procedentes de la bibliografía.

7.1 Modelado del *thin layer boilover*

7.1.1 Modelo teórico

En varios estudios previos [TWAR 1981, TWAR 1982, INAM 1992, GAR1 1999], los modelos propuestos consideraron simplemente la conducción y la absorción en profundidad de la radiación desprendida por la llama, sin tener en cuenta las corrientes convectivas que se originan en el líquido, a causa de las diferentes densidades de los componentes de la mezcla de hidrocarburos. Dichos modelos presentaron grandes desviaciones con respecto a los resultados experimentales, estas desviaciones se pueden atribuir a la desestimación del término convectivo.

Por lo tanto, se ha tenido en cuenta la componente convectiva, y como se verá más adelante, dicha componente es de fundamental importancia para un correcto modelado. El modelo se basa en el propuesto por Broeckman y Schecker en 1995 [BROE 1995].

En este modelo, el balance de energía en la capa de combustible está regulado por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\text{si } T_f < T_{flash} \quad \rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + \dot{q}_{rad} \gamma_f e^{-\gamma_f z} \quad (7.1)$$

$$\text{si } T_f \geq T_{flash} \quad \rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + V_a \frac{\partial T_f}{\partial z} + \dot{q}_{rad} \gamma_f e^{-\gamma_f z} \quad (7.2)$$

Como puede observarse, se asume que las corrientes convectivas aparecen cuando el combustible alcanza la temperatura de *flash point*¹. Se han utilizado las temperaturas de *flash point* sugeridas en [BOND 1991].

Además, el modelo también considera el balance de energía de la capa de agua:

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) + \dot{q}_{rad,w} \gamma_w e^{-\gamma_w z} \quad (7.3)$$

$\dot{q}_{rad,w}$ representa el flujo de calor por radiación en la interfase combustible/agua y es, por lo tanto, la parte del flujo de calor en la superficie, \dot{q}_{rad} , que ha podido atravesar la capa de combustible.

Las condiciones iniciales adoptadas han sido las siguientes:

$$T_f(z,0) = T_0 \quad (7.4)$$

$$T_w(z,0) = T_0 \quad (7.5)$$

y las condiciones de contorno:

$$\dot{q}_{tot} = m \Delta H_v + \left. \frac{\partial T_f}{\partial z} \right|_{z=h_0} \quad (7.6)$$

$$T_f(0,t) = T_w(0,t) \quad (7.7)$$

¹ El *flash point* de un combustible se define como la temperatura más baja a la cual el combustible puede formar una mezcla con aire susceptible de ignición.

$$K_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial z} \right|_{z=0^+} = K_w \left. \frac{\partial T_w}{\partial z} \right|_{z=0^-} \quad (7.8)$$

$$\left. \frac{\partial T_w}{\partial z} \right|_{z=-\infty} = 0 \quad (7.9)$$

En el presente modelo, también se ha considerado la variación de las propiedades físicas con la temperatura utilizando el paquete comercial HYSYS.

Como ya se ha descrito en el apartado 3.3, en los ensayos experimentales se emplearon un transductor de calor total —que mide la suma del calor por radiación y convección— y un radiómetro. Los valores medios obtenidos durante el incendio se presentan en el ANEXO III. Esto dos valores de flujo de calor se han introducido en el modelo, junto a la velocidad de combustión y el coeficiente de absorción. Para este último parámetro, se han empleado los valores recomendados por otros autores [INAM 1992, BROE 1995, GAR2 1999].

El sistema de ecuaciones diferenciales se ha resuelto numéricamente mediante la aplicación DSS/2 (Pirkle y Schiesser, 1987), la cual realiza el cálculo combinando Runge-Kutta con el método de las líneas [PIRK 1987].

Por último, la velocidad de las corrientes convectivas se ha considerado como un parámetro de ajuste. Los valores ajustados de dicha velocidad se han optimizado empleando la siguiente función objetivo:

$$\sum (T(t)_{\text{experimental}} - T(t)_{\text{modelo}})^2 \quad (7.10)$$

La estimación de la incertidumbre en la determinación de la velocidad de las corrientes convectivas ha sido del $\pm 2,6\%$

7.1.2 Simulación de los experimentos

La figura 7.1 presenta una comparación de los perfiles de temperatura en la fase líquida calculados mediante el modelo y los obtenidos experimentalmente a cuatro instantes diferentes, para la prueba FOC3_03_G3 (gasolina, 3 m de diámetro, con un espesor inicial de 2 cm de combustible). En la figura, el valor de referencia en abscisa corresponde a la interfase combustible agua. Como velocidad de combustión se ha empleado el valor medio en el período estacionario, igual a 0,098 mm/s. El valor de 0,18 mm/s para la velocidad de las corrientes convectivas ha proporcionado los perfiles presentados en la figura, en la cual se observa que dichos perfiles se ajustan bastante bien a los valores experimentales. Se debe mencionar que, a 200 s, los termopares a 6 y 8 mm por encima de la interfase (TL8 y TL9) se encuentran ya fuera de la fase líquida y bajo el efecto directo de las llamas. Por lo tanto, estos puntos se encuentran fuera de los rangos de aplicabilidad del modelo.

Durante el experimento presentado en la figura anterior, el *boilover* obviamente no se observó, debido al rango de ebullición de este combustible. No obstante y como se verá más adelante, los resultados obtenidos y su aplicación son interesantes en términos de transferencia de calor.

Una comparación igual que la anterior, para la prueba FOC3_04_D3 (gasóleo, 3 m de diámetro, 2 cm de espesor inicial de combustible), se presenta en la figura 7.2. En este caso, la velocidad de combustión utilizada ha sido igual a 0,049 mm/s. Mientras que, para la velocidad de las corrientes convectivas se ha obtenido un valor de 0,038 mm/s.

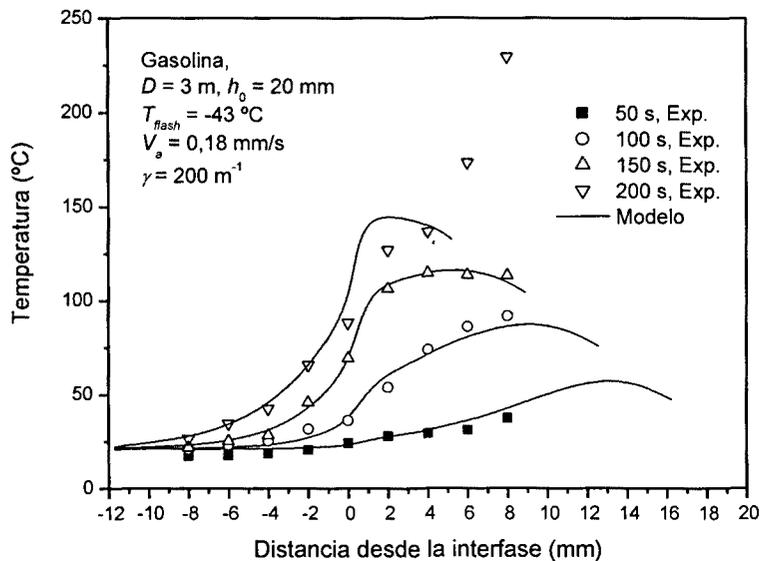


Figura 7.1. Simulación de un experimento de gasolina de 3 m de diámetro (FOC3_03_G3).

La simulación para un incendio de 5 m de diámetro (FOC3_09_D5), se presenta en la figura 7.3. En este caso, donde la velocidad de combustión media en el período estacionario fue de 0,063 mm/s y el grueso de combustible era de 15 mm, el valor de la velocidad de las corrientes convectivas encontrado es del mismo orden que el determinado para el incendio de 3 metros, concretamente igual a 0,03 mm/s.

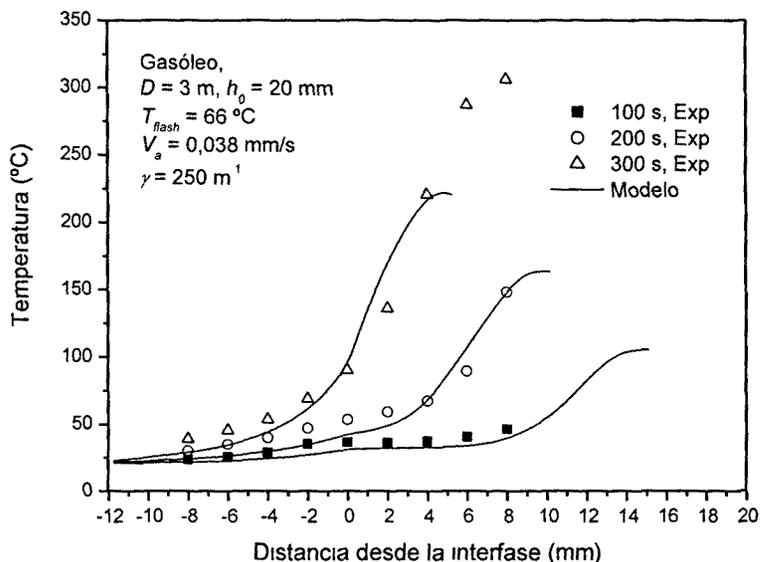


Figura 7.2 Simulación de un incendio de gasoleo 3 m de diámetro (FOC3_04_D3) A los 300 s los termopares TL8 y TL9 se encuentran ya fuera de la fase líquida

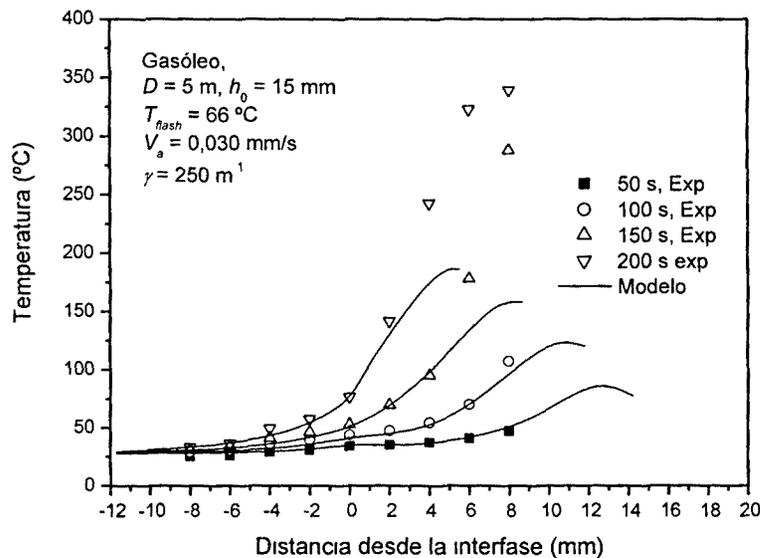


Figura 7.3 Simulación de un incendio de gasóleo de 5 m de diámetro (FOC3_09_D5) A los 200 s los termopares TL7, TL8 y TL9 se encuentran ya fuera de la fase líquida

El modelo se ha aplicado también a los datos publicados por otros autores. La figura 7.4 muestra una comparación de las predicciones con los datos experimentales de Garo *et al.* [GAR2 1999], para un crudo en una balsa de 0,15 metros de diámetro. Hay que hacer notar que los datos presentados en esta figura, son los únicos disponibles en la bibliografía de *thin layer boilover* con suficiente detalle para llevar a cabo una simulación. Como puede verse, las predicciones se ajustan con bastante precisión a los datos experimentales, mostrando que el modelo se puede aplicar también a diámetros más pequeños. Para este caso, se ha determinado una velocidad de las corrientes convectivas de 0,012 mm/s.

Cabe destacar, que los valores obtenidos para la velocidad de las corriente convectivas son del mismo orden de magnitud que los valores encontrados en la bibliografía. Para varios tipos de crudo, Koseki [KOSE 1994] determinó velocidades entre 0,033 y 0,085 mm/s, mientras que Broeckman y Schecker [BROE 1995] determinaron valores entre 0,142 y 0,523 mm/s. Más tarde, Casal *et al.* [CASA 1999] sugirieron velocidades entre 0,083 y 0,332 mm/s.

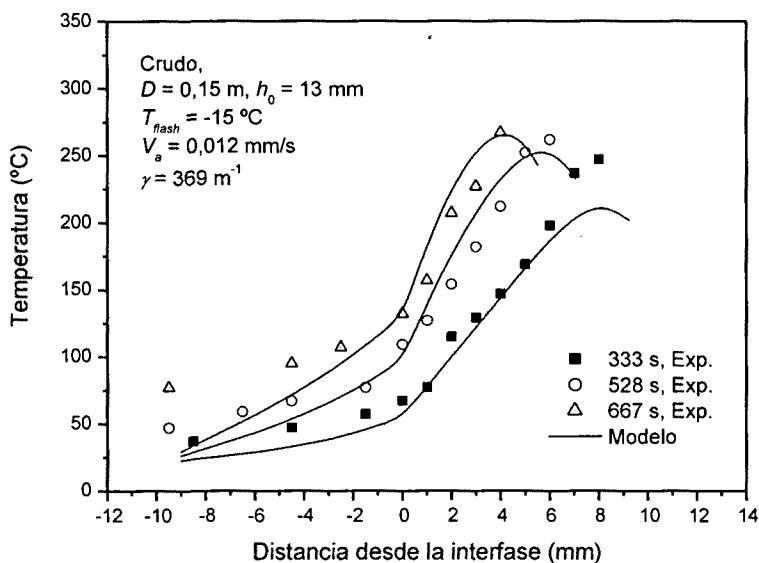


Figura 7.4. Comparación entre las predicciones del modelo y los datos de Garo *et al.* [GAR2 1999].

7.1.3 Análisis de los parámetros del modelo

La influencia de la velocidad de las corrientes convectivas, en el caso de la simulación presentada en la figura 7.2, se muestra en la figura 7.5. Dicha velocidad es una velocidad efectiva creada por el movimiento hacia abajo de los componentes de más alta densidad que ocupan el lugar de los componentes más ligeros y que desplazan a dichos componentes, los cuales, como es natural, tienden a subir. Como las partículas en

un nivel más alto, están más calientes, este movimiento reciproco genera un flujo de calor hacia el fondo de la balsa (*heat wave*). Como se observa en la figura 7.5, un valor más alto de la mencionada velocidad representa un flujo más alto de calor e implica temperaturas más altas en la capa de combustible que, a lo largo del tiempo, pueden generar una *hot zone*.

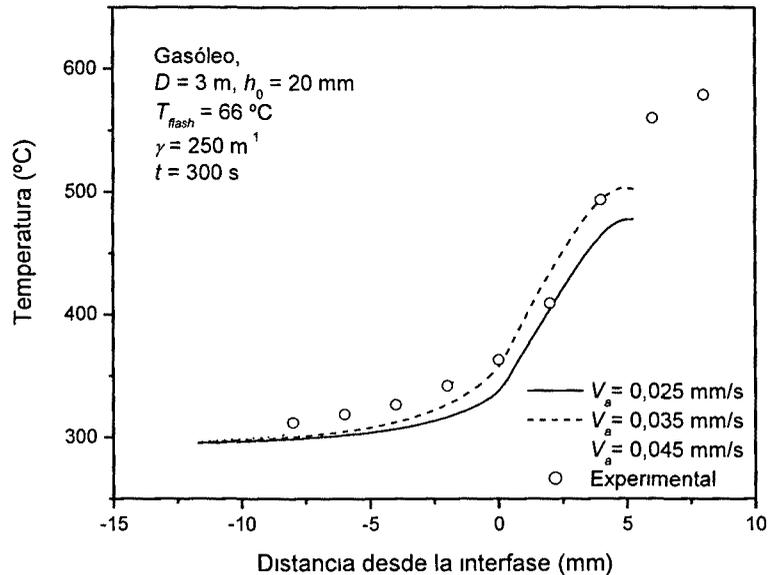


Figura 7.5 Influencia de la velocidad de las corrientes convectivas sobre el perfil de temperaturas en la capa líquida

La figura 7.6, muestra el efecto del coeficiente de absorción de la radiación en profundidad sobre la distribución de temperaturas en la capa líquida de combustible, manteniendo todos los demás parámetros constantes. Al emplear un valor más alto de este parámetro causa que la absorción de un mayor porcentaje de la radiación se produzca en las capas superiores del combustible y, por lo tanto, un menor porcentaje de este flujo de calor alcanzará a las capas más profundas. Esto genera, obviamente, un perfil de temperatura más pronunciado al aumentar la temperatura en las capas superiores de combustible y, a la vez, al disminuir la misma en las capas inferiores, tal como puede verse en la figura 7.6.

Cabe remarcar que el modelo utiliza como único parámetro de ajuste la velocidad de las corrientes convectivas, mientras que, por lo que se refiere al coeficiente de radiación en profundidad se han utilizado valores recomendados en la bibliografía.

Para la misma prueba, FOC3_04_D3, se ha estudiado el efecto del espesor inicial de combustible. La figura 7.7 muestra el tiempo necesario para alcanzar una determinada

temperatura en la interfase para distintos espesores iniciales de combustible. Garo y Vantelon [GAR1 1999], basándose en sus experimentos con un aceite térmico, registraron que el *boilover* ocurre cuando la temperatura del agua en la interfase alcanza un valor de aproximadamente 393 K, como ya se ha indicado en capítulos anteriores. Considerando sus observaciones, se ha estudiado el periodo del proceso que lleva a temperaturas predefinidas de la interfase. El tiempo requerido por la interfase para alcanzar 363 K, 373 K y 383 K, para distintos espesores iniciales de combustible, se ha evaluado y representado en la mencionada figura 7.7. Como puede verse, un espesor más grande requiere un tiempo más elevado para alcanzar una determinada temperatura en la interfase y, en consecuencia, para generar *boilover*. La tendencia confirma totalmente las observaciones experimentales de Garo *et al.* [GAR2 1999] y Koseki [KOSE 1994], y está en total acuerdo con lo dicho en el capítulo 4.

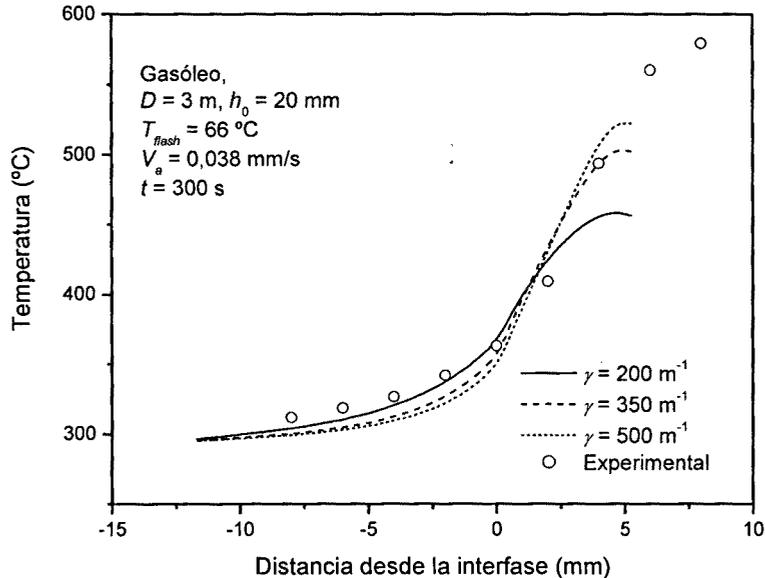


Figura 7.6. Influencia del coeficiente de absorción en profundidad sobre el perfil de temperaturas en el interior de la capa líquida.

Además, en dicha figura, se observa un buen ajuste entre los valores experimentales y los calculados para determinar el tiempo requerido para alcanzar una temperatura de 373 K. Por otro lado, en ella se muestran los valores experimentales medios del tiempo de inicio del *boilover* para diferentes espesores de combustible. Puede verse que dichos valores son coherentes con las predicciones, indicando un *boilover* a tiempos similares a los obtenidos para 373 K. También se muestra el único dato disponible en la bibliografía para un incendio de tamaño similar (balsa cuadrada de 2,7 m de lado, diámetro equivalente de 3,05 m), aportado por Koseki [KOSE 1994]. Aunque este dato corresponde a un combustible diferente (crudo de petróleo), su orden de magnitud

coincide con la del resto de los resultados. Los resultados de un análisis similar, estudiando el efecto del flujo de calor por radiación, se muestran en la figura 7.8. Como era de esperar, una determinada temperatura en la interfase se alcanza en un tiempo más corto cuando el flujo de calor por radiación es más alto.

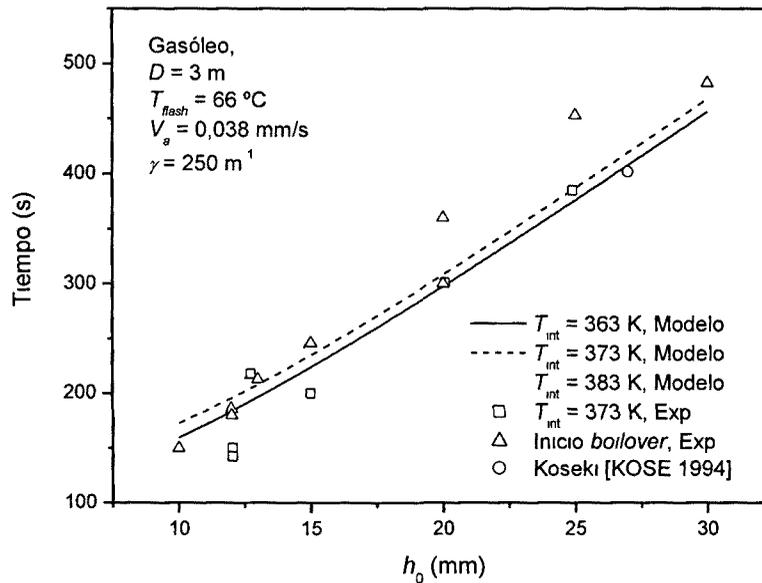


Figura 7.7 Influencia del espesor inicial de combustible, comparando el tiempo, estimado por el modelo, requerido para alcanzar las temperaturas de interfase predefinidas y los tiempos experimentales de inicio del *boilover*

Finalmente, la figura 7.9 muestra el espesor del combustible que queda por quemar en determinados instantes, tales como el tiempo necesario para alcanzar una determinada temperatura en la interfase, en función del espesor inicial de combustible. La cantidad por quemar crece al aumentar dicho espesor inicial, como ya fue determinado por Koseki [KOSE 1991] y por Garo y Vantelon [GAR1 1999]. Los valores experimentales de espesor de combustible, justo al inicio del *boilover*, son del mismo orden de magnitud que los estimados por el modelo.

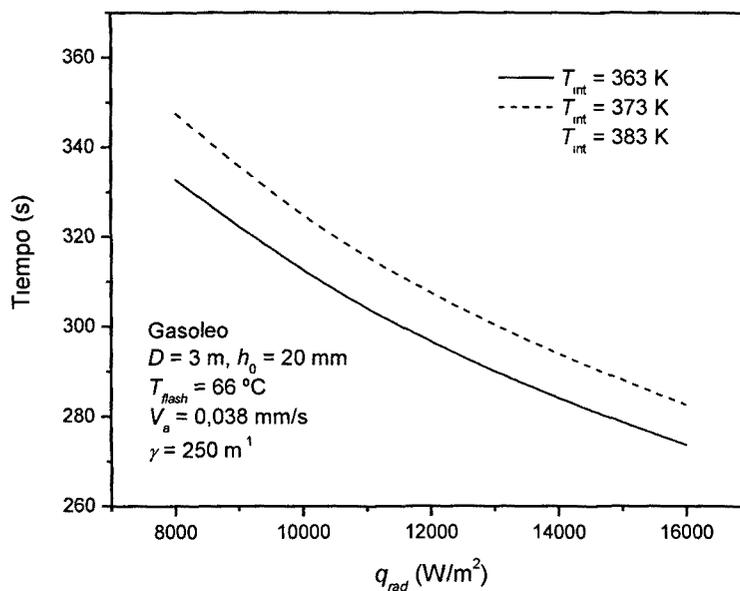


Figura 7 8 Tiempo requerido para alcanzar las temperaturas de interfase predefinidas en función del flujo de calor por radiación

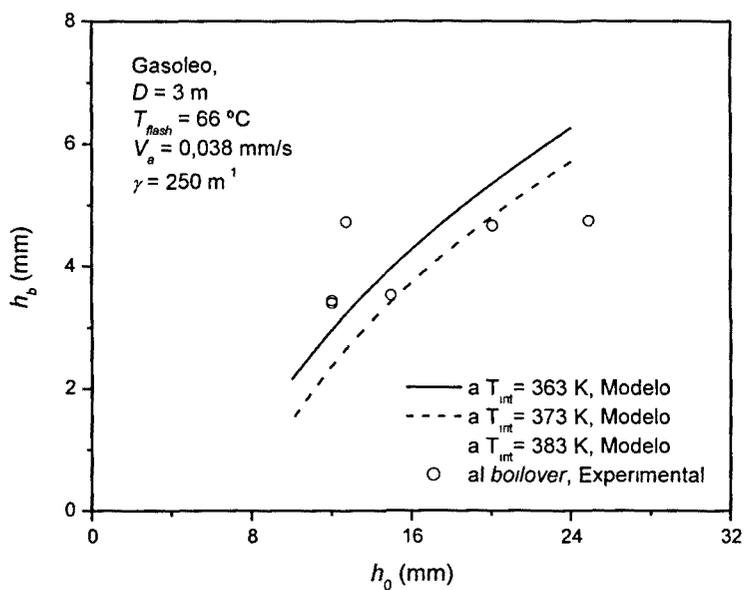


Figura 7 9 Espesor de combustible al inicio del *boilover* en función del espesor inicial

7.2 Extensión del modelo al *hot zone boilover*

7.2.1 Modelo teórico

El modelo original para simular el *thin layer boilover* se ha modificado y extendido para representar el fenómeno del *boilover* genérico, considerando una velocidad de las corrientes convectivas variable con el tiempo, de acuerdo con la ecuación:

$$V_a = V_{a,0}(\rho_0/\rho_r) \quad (7.11)$$

Como ya se ha comentado, la velocidad de las corrientes convectivas se define como una velocidad efectiva, generada por el movimiento hacia abajo de los componentes más pesados del combustible, los cuales remplazan los componentes de menor densidad que, a su vez, suben hacia la superficie. Este movimiento recíproco, produce un flujo de calor hacia abajo, ya que las partículas de las capas superiores se encuentran a temperaturas más elevadas. Al mismo tiempo, debido a que los componentes de más baja densidad evaporan antes, la densidad media del combustible que queda por quemar aumenta con el tiempo durante el proceso. La figura 7.10 muestra la variación de densidad del combustible (crudo de petróleo) que queda por quemar, simulada con el paquete comercial HYSIS. Como puede verse, mientras se desarrolla el proceso, el rango de densidad de los componentes se hace cada vez más estrecho, por ello la velocidad de las corrientes convectivas adquiere valores menores. Por lo tanto, el modelo presentado en el apartado 7.1 ha sido modificado para tener en cuenta esta dependencia de dicha velocidad con el tiempo, según la relación mostrada por la ecuación (7.11). Broeckman y Schecker [BROE 1995] ya observaron la antedicha suposición; estos autores determinaron que la velocidad de expansión de la *hot zone* hacia el fondo del tanque o balsa decrecía al aumentar la temperatura de dicha *hot zone*, es decir, al aumentar la densidad del combustible que quedaba por quemar.

Las suposiciones, las ecuaciones y las condiciones de contorno del modelo son las mismas que las del modelo precedente, con la única diferencia que V_a no es un valor constante, sino variable según la antedicha ecuación (7.11).

También en este caso, el sistema de ecuaciones diferenciales se ha resuelto numéricamente, utilizando el mismo paquete de Pirkle y Schiesser (1987) [PIRK 1987].

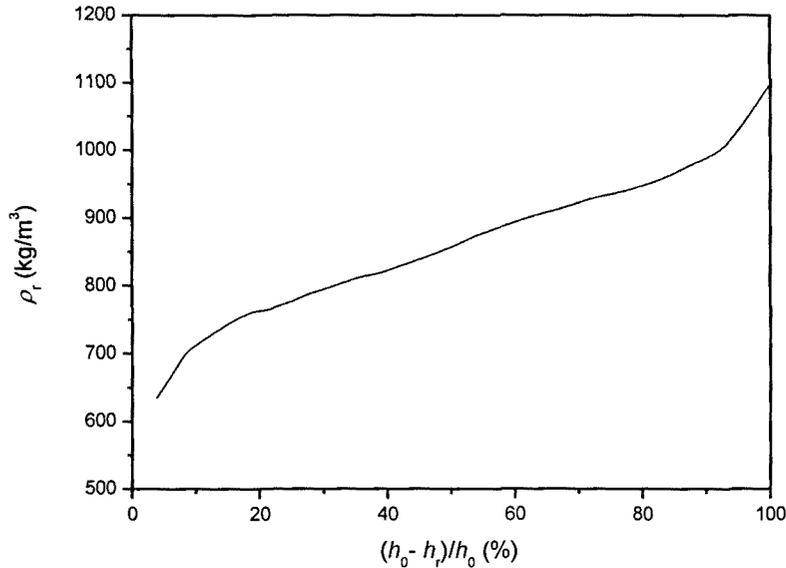


Figura 7.10 Variación de la densidad del combustible (crudo) en función del porcentaje quemado del mismo, durante el proceso de combustión

En este nuevo modelo, el parámetro de ajuste es ahora la velocidad inicial de las corrientes convectivas V_{a0} . Dicho parámetro también se ha obtenido optimizando el error entre los valores calculados por el modelo y los datos experimentales mediante la ecuación (7.10).

7.2.2 Resultados y discusiones

La figura 7.11 compara las predicciones del modelo con los datos experimentales para la prueba FOC3_05_D3 (gasóleo, 3 m de diámetro y 2,5 cm de espesor inicial de combustible). El valor de referencia en abscisa corresponde a la interfase agua-combustible. Los valores de flujo de calor de calor están detallados el ANEXO III. Como velocidad de combustión se ha utilizado el valor medio en el período estacionario, igual a 0,051 mm/s. En este caso, el valor para la velocidad inicial de las corrientes convectivas es de 0,039 mm/s. Por otro lado, a 400 s, tanto los datos experimentales como las predicciones del modelo dan un valor de temperatura en la interfase de 385 K, mientras que el *boilover* empieza a los 453 s desde el inicio del incendio.

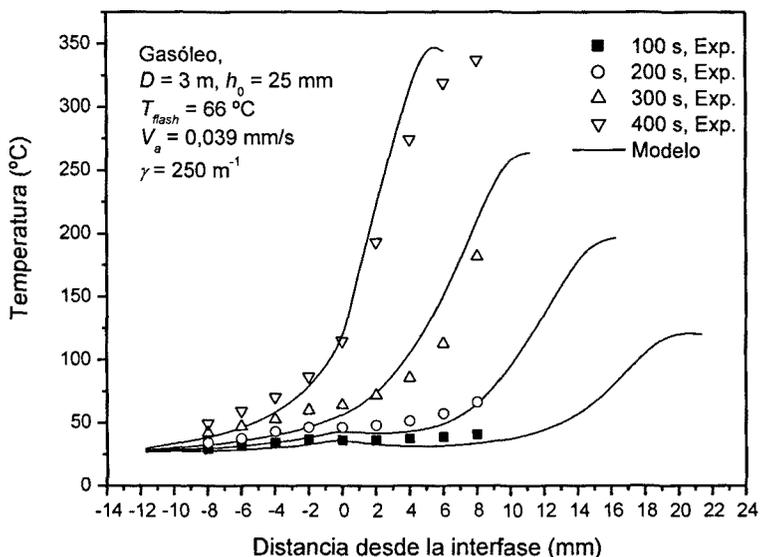


Figura 7.11. Simulación mediante el modelo modificado del experimento FOC3_05_D3.

Aunque los resultados experimentales de la figura 7.11 se han obtenido para una situación de *thin layer boilover* (grosor inicial de 2,5 cm), hay un buen ajuste con el modelo modificado; por lo tanto, la extensión realizada del modelo también es válida para esta situación.

Para poder investigar la validez del modelo con espesores mayores de combustible, éste se ha aplicado a los datos experimentales de otros investigadores. La figura 7.12 muestra la comparación del modelo con los datos de Koseki (1994) [KOSE 1994], para un incendio de crudo llevado a cabo en una balsa de 1 m de diámetro y un grosor inicial de combustible de 10 cm. Para este experimento, la velocidad inicial de las corrientes convectivas se ha determinado en 0,095 mm/s. Como se observa en la figura, el ajuste entre los datos experimentales y los valores proporcionados por el modelo es bastante bueno. Por otro lado, en la figura 7.13 se comparan las predicciones del modelo con los datos publicados por Broeckmann y Schecker en 1995 [BROE 1995], para otro incendio con crudo. En este caso, el grosor de combustible era de 15,1 cm, siendo el diámetro de la balsa también de 1 m. El valor de la velocidad inicial de las corrientes convectivas se ha determinado en 0,12 mm/s. Como muestra la figura, las predicciones tienen un ajuste aceptable con los datos experimentales, a pesar de que se observen algunas diferencias. Por lo tanto, considerando las observaciones mostradas en las figuras 7.12 y 7.13, se puede afirmar que el modelo es aplicable a espesores mayores.

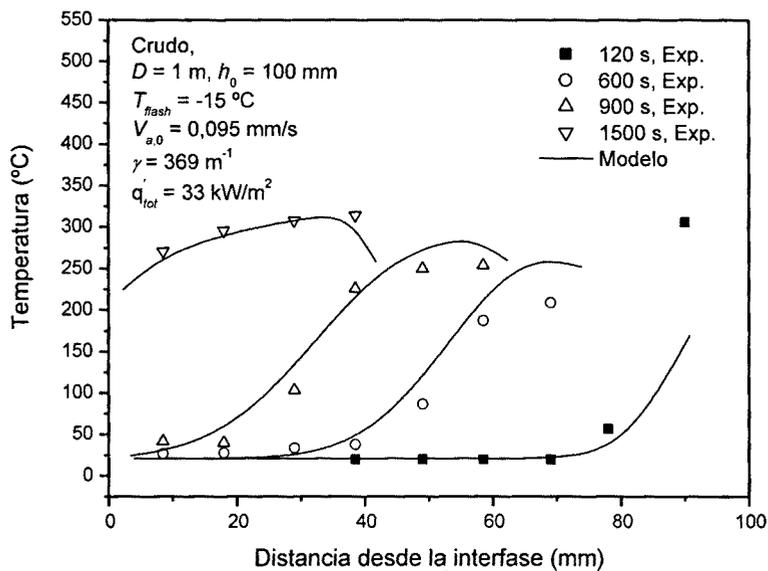


Figura 7.12. Comparación entre las predicciones del modelo y los datos de Koseki (1994) [KOSE 1994]. El punto a más alta temperatura a los 120 s corresponde al termopar que se encuentra prácticamente fuera de la fase líquida y fuera de los límites de aplicación del modelo.

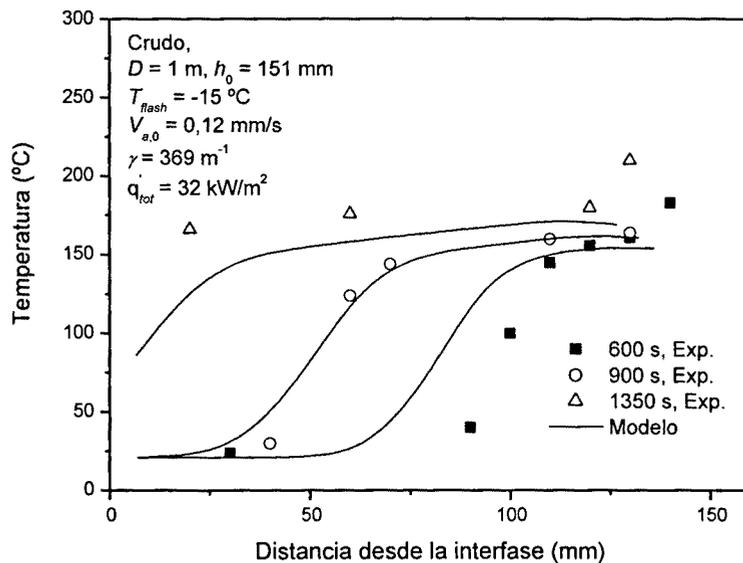


Figura 7.13. Comparación entre las predicciones del modelo y los datos de Broeckman y Schecker [BROE 1995].

Para la totalidad de los casos modelados, siempre se ha obtenido un buen ajuste entre las predicciones del modelo y los datos experimentales. La tabla 7.1 muestra un listado de los experimentos a los cuales se ha aplicado el modelo, así como los correspondientes valores de la velocidad inicial de las corrientes convectivas estimados para diferentes combustibles (pese a que la gasolina no genera *boilover*, como ya se ha dicho, desde el punto de vista del análisis de la transferencia de calor, los datos obtenidos son bastante interesantes). Dicha velocidad ha sido determinada con el mismo valor de incertidumbre de $\pm 2,6\%$ que la velocidad obtenida mediante el modelo de *thin layer boilover*, y sus valores son del mismo orden de magnitud que los datos encontrados en la bibliografía [KOSE 1994, BROE 1995, CASA 1999]. Como se observa en la figura 7.14, $V_{a,0}$ no muestra seguir una tendencia clara con el diámetro de la balsa; esta observación es coherente con la suposición realizada por Koseki para ciertos rangos de diámetros, el cual consideró que la velocidad de regresión de la onda de calor era independiente con el diámetro del incendio [KOSE 1994].

Por otro lado, un mayor espesor inicial de combustible produce una mayor velocidad de las corrientes convectivas para todos los combustibles, como se ve en las figuras 7.15(a), 7.15(b) y 7.15(c). El calentamiento a través de una capa más espesa hace que un mayor número de partículas contribuya a la convección y, en consecuencia, crea mayores velocidades. Los valores publicados por Koseki muestran la misma tendencia, es decir, una velocidad de propagación de la onda de calor tanto mayor cuanto más grande es el espesor inicial de combustible [KOSE 1994].

Tabla 7.1. Resumen de los experimentos empleados en el modelado del *boilover* genérico.

Experimento	Combustible	D (m)	h_0 (mm)	$V_{a,0}$ (mm/s)	Pr	Re	Fo
FOC3_02_D3	Gasóleo	3,0	15	0,035	12,96	0,547	0,1750
FOC3_04_D3	Gasóleo	3,0	20	0,038	12,96	0,796	0,1200
FOC3_05_D3	Gasóleo	3,0	25	0,039	12,96	1,011	0,0949
FOC3_14_D4	Gasóleo	4,0	15	0,020	12,96	0,313	0,3075
FOC3_15_D4	Gasóleo	4,0	20	0,025	12,96	0,523	0,1841
FOC3_16_D4	Gasóleo	4,0	25	0,027	12,96	0,704	0,1362
FOC3_10_D5	Gasóleo	5,0	15	0,030	12,96	0,469	0,2034
FOC3_11_D5	Gasóleo	5,0	20	0,040	12,96	0,850	0,1106
FOC3_03_G3	Gasolina	3,0	20	0,180	3,00	19,270	0,0227
FOC3_17_G3	Gasolina	3,0	15	0,170	3,00	13,695	0,0319
FOC3_13_G4	Gasolina	4,0	15	0,150	3,00	12,068	0,0362
FOC3_08_G5	Gasolina	5,0	15	0,150	3,00	12,105	0,0360
Garo <i>et al.</i> (1999)	Crudo	0,15	13	0,012	28,00	0,081	0,6142
Broeckmann y Schecker (1995)	Crudo	1,0	151	0,120	28,00	9,563	0,0053
Koseki (1994)	Crudo	1,0	100	0,095	28,00	5,001	0,0101

En la figura 7.16 se presenta un análisis en términos del número de Prandtl. En esta figura, se define un tiempo característico para el *boilover* como:

$$t_c = \int_0^{h_0} \frac{dh_r}{V_a(h_r)} \quad (7.12)$$

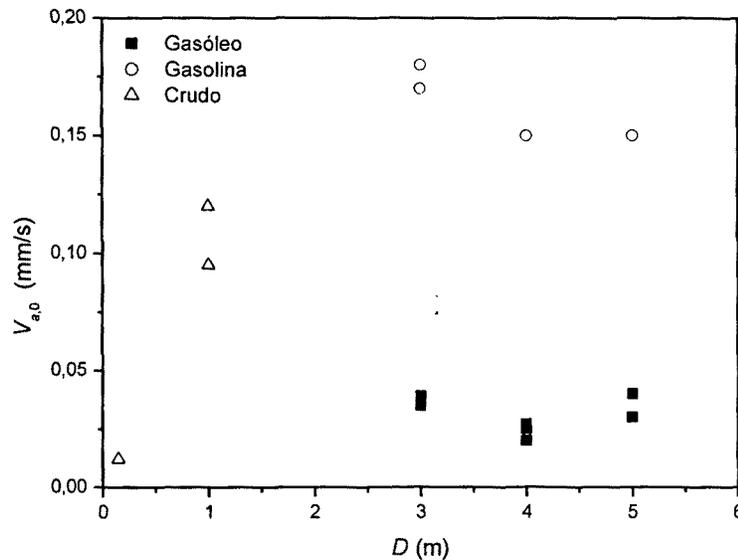


Figura 7.14. Velocidad inicial de las corrientes convectivas en función del diámetro.

El concepto de tiempo característico corresponde al tiempo necesario que requiere la onda de calor para viajar a través de la capa de combustible hasta la interfase, y dicho tiempo es más elevado para combustibles con números de Prandtl más altos. Como ya se sabe, el número de Prandtl es la relación de la viscosidad cinemática con la difusividad térmica ($Pr = \nu/\alpha$). Muchos autores han comentado que el combustible tiene que tener una naturaleza viscosa, de manera de poder ofrecer una resistencia al paso del vapor y, eventualmente, generar una erupción violenta [HALL 1925, BROE 1994, CASA 1999]. Para una determinada viscosidad, un combustible con una menor difusividad térmica —es decir, con un número de Prandtl más alto—, requiere un tiempo mayor para que la onda de calor alcance la interfase, como se observa en la figura 7.16. Para los tipos de combustible analizados, se ha encontrado que el tiempo experimental de inicio del *boilover* es menor que el tiempo característico, como puede verse en la figura. Obviamente, el tiempo característico es un concepto hipotético; en la realidad, la interfase alcanza temperaturas suficientemente altas mientras el punto de temperatura máxima todavía está desplazándose hacia el fondo de la balsa, como se

observa en las figuras 7.11, 7.12 y 7.13, y el combustible todavía no se ha quemado completamente. En consecuencia, el *boilover* ocurre antes de dicho tiempo característico.

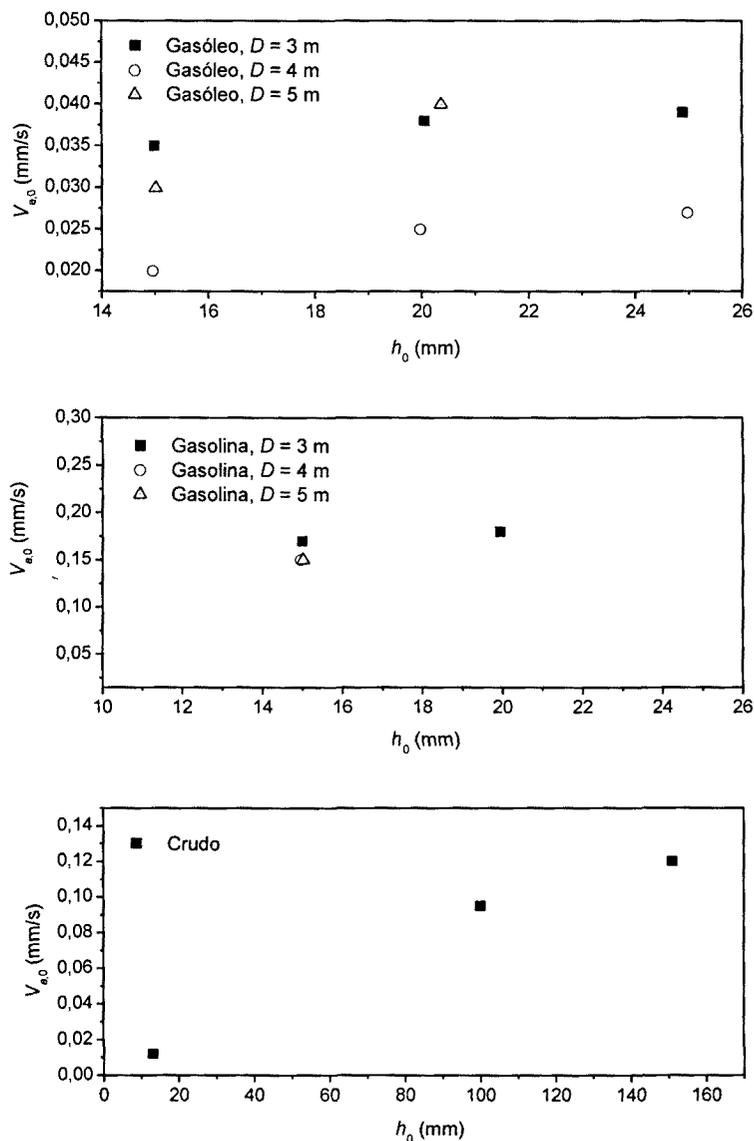


Figura 7.15. Variación de la velocidad inicial de las corrientes convectivas con el espesor inicial de combustible para gasóleo (a), gasolina (b) y crudo (c).

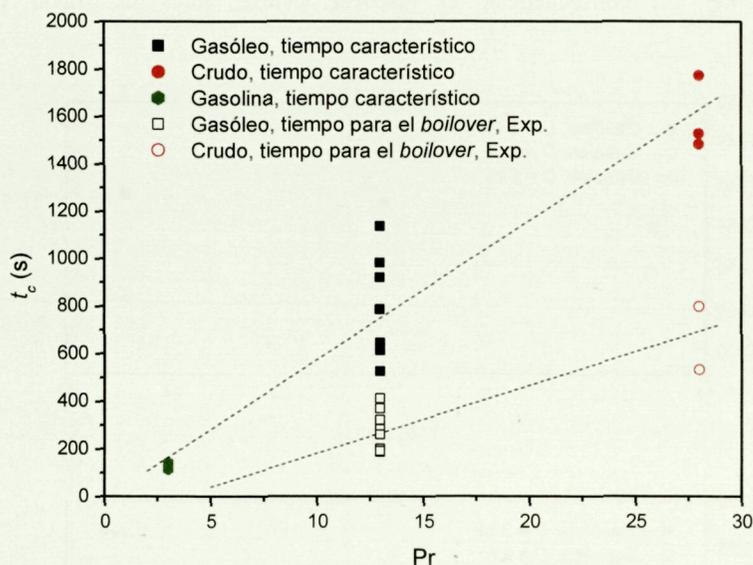


Figura 7.16. Tiempo característico y tiempo de inicio del *boilover* en función del número de Prandtl.

Como se ha visto en la figura 7.16, para combustibles con más bajos números de Prandtl el *boilover* ocurre antes, y para la gasolina ($Pr = 3$) el fenómeno no se observa. Las líneas discontinuas en el gráfico solo pretenden mostrar la tendencia, sin sugerir una variación lineal. La extrapolación de los datos lleva a pensar que existe un mínimo del número de Prandtl para que el *boilover* pueda ocurrir. [INAM 1992] detectaron una especie de *boilover* después de un largo proceso de combustión con keroseno ($Pr = 6,2$), y [KOSE 1994] observó que el keroseno no experimentaba un *boilover* intenso, pero un proceso de combustión de larga duración podría acabar con la expulsión de dicho combustible debido a la ebullición del agua. Considerando todas estas observaciones, el límite inferior del número de Prandtl para que ocurra el *boilover* se puede establecer alrededor del número de Prandtl del keroseno. Obviamente, el número de Prandtl varía con la temperatura y todos los valores en este análisis se toman a la temperatura de referencia de 373 K.

La figura 7.17 muestra el número de Fourier, basado en el tiempo característico y definido por la ecuación (7.13), como una función del número de Reynolds, éste último definido por la ecuación (7.14).

$$Fo = \alpha \cdot t_c / h_0^2 \quad (7.13)$$

$$Re = V_{a,0} / \nu \quad (7.14)$$

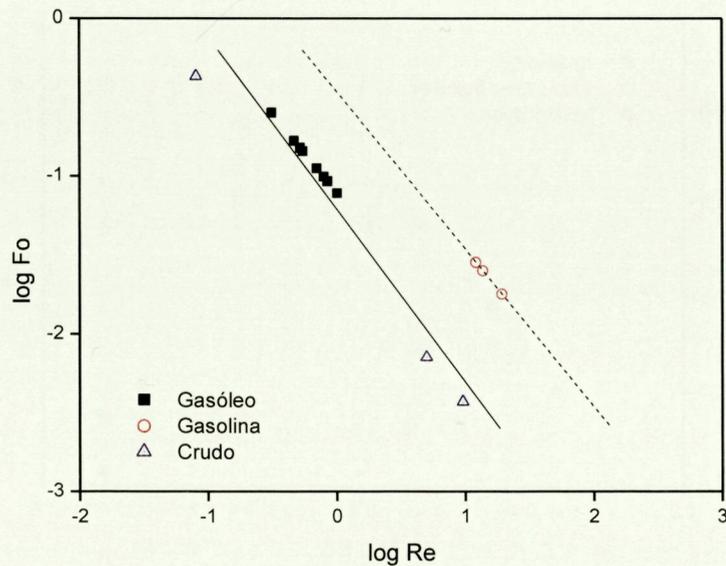


Figura 7.17. Número de Fourier vs. número de Reynolds.

Se observa que los datos de los combustibles que generan *boilover* —el gasóleo y el crudo— siguen una línea, mientras que la gasolina, que no produce *boilover*, sigue otra línea prácticamente paralela a la que siguen los otros dos combustibles, pero desplazada. Estas rectas pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{para la gasolina} \quad Fo = 0,434 Re^{-1,00} \quad (7.15)$$

$$\text{para el gasóleo y el crudo} \quad Fo = 0,079 Re^{-1,08} \quad (7.16)$$

El número de Fourier está considerado como una medida de la velocidad de penetración de la onda de calor y una rápida penetración no permite la formación de un frente a temperatura suficientemente alta para producir un *boilover*. Es decir, un valor más alto de difusividad térmica ayuda a reducir el riesgo de *boilover*.

En la figura 7.18, se observan tres grupos diferentes. En ella, se observa que las situaciones con altos números de Prandtl y bajos números de Fourier provocan un *boilover*, mientras casos con altos valores de ambos números corresponden a un *thin layer boilover*. Finalmente, el *boilover* no ocurre con el tercer grupo de datos donde el número de Prandtl es relativamente bajo.

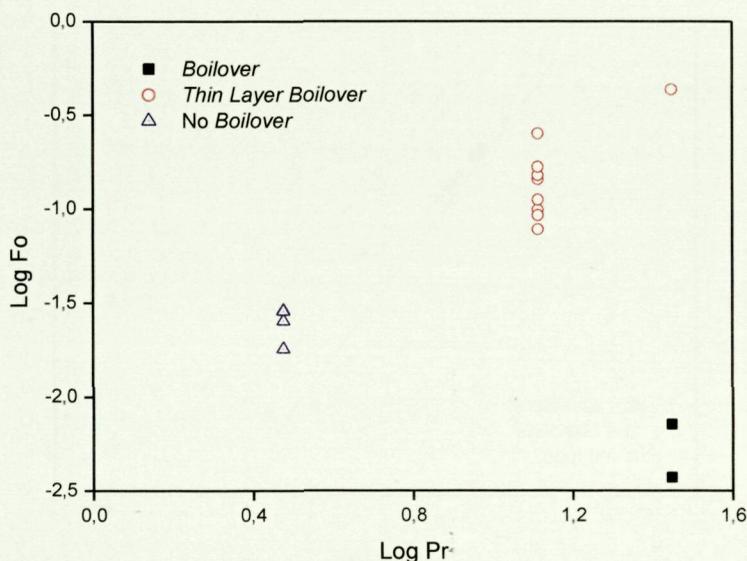


Figura 7.18. Número de Fourier vs. número de Prandtl.

Como conclusión del análisis llevado a cabo, cabe destacar que el mecanismo de transferencia de calor en mezclas de hidrocarburos que queman sobre una capa de agua, se puede simular con el modelo propuesto, tanto en el caso de combustibles que generen *hot zone boilover*, *thin layer boilover* o que no produzcan este fenómeno. Por otro lado, la aparición de uno u otro tipo de fenómeno depende del tipo de hidrocarburo involucrado y se puede caracterizar mediante el uso de los números adimensionales utilizados en este trabajo.

7.3 Velocidad de las corrientes convectivas en función de la temperatura de ebullición y del espesor inicial de combustible

Observando los valores de la tabla 7.1 y las figuras 7.14 y 7.15, resulta evidente que la velocidad inicial de las corrientes convectivas ($V_{a,0}$) depende del tipo de combustible y del espesor de éste al inicio del incendio. Por lo tanto, para tener en cuenta la dependencia con el tipo de combustible, es razonable pensar que dicha velocidad esté influenciada por la temperatura media de ebullición del mismo. En la figura 7.19 se representan los valores de $V_{a,0}$ en función de dicha temperatura para dos espesores iniciales de hidrocarburo distintos. Cabe indicar, que las temperaturas medias de ebullición de los combustibles, cuyos valores se muestran en la tabla 7.2, han sido

determinadas como media integral a partir de las curvas de destilación de dichos combustibles

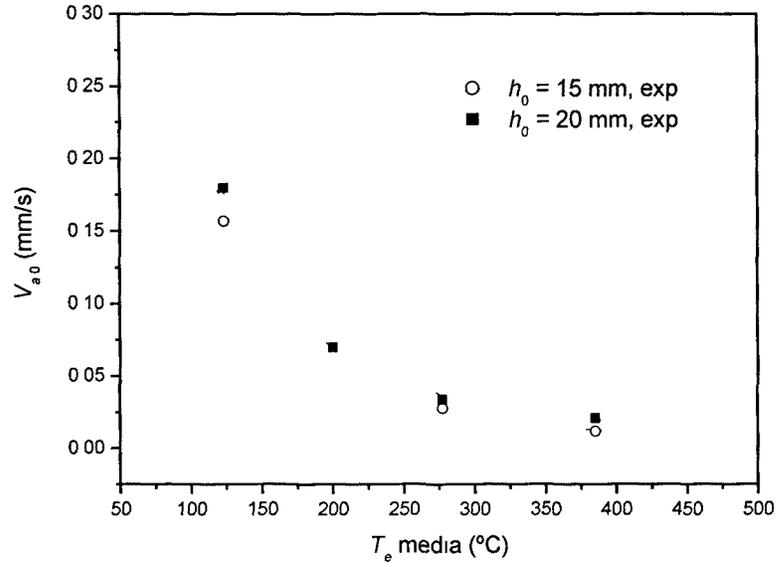


Figura 7.19. Velocidad inicial de las corrientes convectivas en función de la temperatura media de ebullición

Tabla 7.2 Temperaturas medias de ebullición de los combustibles

Combustible	T_e (°C)
Crudo	385
Gasoleo	278
Mezcla (50% gasoleo – 50 % gasolina)	200
Gasolina	123

Las curvas de tendencia dibujadas en la figura 7.19 muestran claramente como V_{a0} decrece con la temperatura media de ebullición, siguiendo curvas diferentes para cada espesor inicial de combustible. Las ecuaciones (7.17) y (7.18), en las cuales T_e se expresa en °C y V_{a0} en mm/s, muestran las correlaciones que se ajustan a los datos experimentales para cada espesor

$$V_{a0} = 7185 T_e^{-2.23} \quad \text{para } h_0 = 15 \text{ mm} \quad (7.17)$$

$$V_{a0} = 1778 T_e^{-1.92} \quad \text{para } h_0 = 20 \text{ mm} \quad (7.18)$$

Como ya se ha indicado en el apartado anterior, tras observar los valores de la tabla 7.1 y la figura 7.15, y al inicio de este apartado, así como se muestra en la figura 7.19, el espesor inicial de combustible tiene influencia sobre las velocidades convectivas, por ello, es conveniente correlacionar todos los datos experimentales con una sola ecuación

que tenga en cuenta la influencia de los dos parámetros, T_e y h_0 , sobre dichas velocidades. El modelo de ecuación escogido ha sido del tipo:

$$V_{a,0} = a(h_0)^b (T_e)^c \quad (7.19)$$

donde T_e se expresa en $^{\circ}\text{C}$, h_0 en mm y $V_{a,0}$ en mm/s. Minimizando la función objetivo:

$$\sum \left((V_{a,0})_{\text{experimental}} - (V_{a,0})_{\text{estimada}} \right)^2 \quad (7.20)$$

se obtiene la correlación (7.21), la cual presenta un coeficiente R de 0,97. El ajuste de dicha correlación con los datos experimentales puede verse en la figura 7.20.

$$V_{a,0} = 267,34 (h_0)^{0,94} (T_e)^{-2,09} \quad (7.21)$$

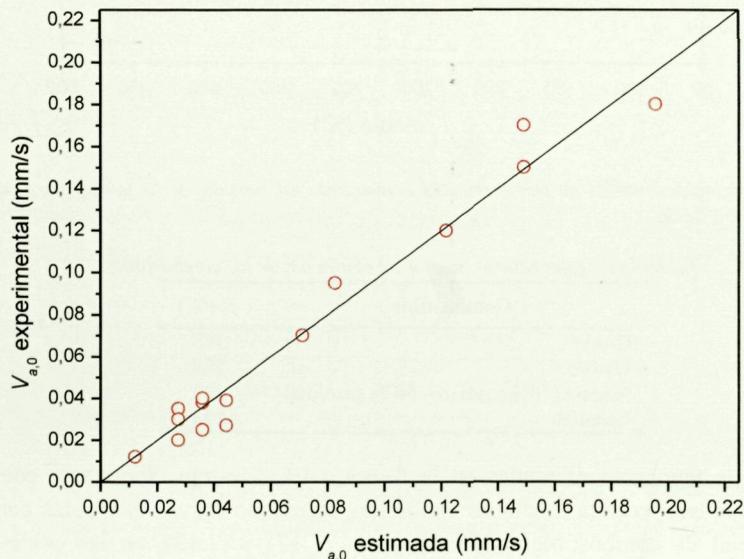


Figura 7.20. Comparación de los valores calculados mediante la ecuación (7.21) con los datos experimentales.

Como consideración final, cabe destacar que la ecuación (7.21) puede utilizarse para estimar la velocidad inicial de las corrientes convectivas de otros hidrocarburos diferentes a los empleados en este estudio, y así poder evaluar la posibilidad de ocurrencia de una de las dos tipologías de *boilover*, a partir del análisis mostrado en el apartado anterior mediante los números de Fourier y Prandtl.

8 CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

1. En esta tesis se ha rediseñado y renovado una instalación existente, para llevar a cabo una serie de experimentos en balsas de gran tamaño —diámetros comprendidos ente 1,5 y 6 metros—, y determinar de la forma más precisa y real los parámetros de interés en situaciones con formación de *boilover* y, fundamentalmente, para el caso de *thin layer boilover*. La recogida de información se ha realizado mediante un sistema de adquisición desarrollado *ad hoc*, el cual permitía la sincronización entre los diferentes equipos de medida.

In this thesis, an experimental facility was redesigned and renewed in order to carry out a series of large-scale experiments —diameters ranging from 1.5 to 6 meters— and to precisely and realistically determine the fundamental parameters in accidents involving boilover and thin layer boilover in particular. Data were acquired using software developed ad hoc, which allowed us to store the data on a computer without losing the synchronization between the various instruments.

2. Se han estudiado los parámetros característicos del *boilover* de capa fina observándose que, como en otras pruebas realizadas por otros autores a escala de laboratorio, la cantidad porcentual quemada hasta la ebullición del sustrato acuoso crece con el espesor inicial de combustible, hasta alcanzar un máximo que aumenta proporcionalmente al diámetro de la balsa. La dependencia con el diámetro del incendio desaparece a partir de diámetros mayores de 3 m, lo cual está de acuerdo con la variación de la velocidad de combustión con dicho diámetro.

The fundamental parameters of thin layer boilover were studied. It was observed that, as in other experiments performed at laboratory scale by other authors, the pre-boilover burned-mass ratio grows as the initial thickness of the fuel layer increases, reaching a maximum value that increases in proportion to the pool diameter. This dependency on pool size disappears for diameters greater than 3 m, in agreement with the changes in the burning rate as the size of the pool increases.

3. El tiempo de inicio del *thin layer boilover* ha mostrado una tendencia lineal con el espesor inicial de combustible. La influencia del diámetro sobre este parámetro es mucho menor que en incendios de pequeña escala. Por otra parte, se ha obtenido una nueva ecuación (ecuación (4.3)), para determinar la dependencia de la velocidad aparente de penetración del calor (*apparent thermal penetration rate*) en función del diámetro de la balsa; dicha ecuación es válida para combustibles cuyas características están comprendidas entre las del gasóleo y las de los aceites térmicos.

The onset time of thin layer boilover showed a linear increase as the initial thickness of the fuel layer increased. The diameter of the pool influences this parameter much less than in small-scale experiments. A new correlation (Equation

(4.3)) was obtained to determine the dependence of the apparent thermal penetration rate on the pool diameter. This equation is valid for fuels whose properties are comprised between those of the diesel and those of the thermal oils.

4. Se ha determinado que la intensidad de ebullición (aumento en porcentaje de la velocidad de combustión durante el *thin layer boilover*) decrece exponencialmente con el diámetro del incendio; además, mediante la correlación de los datos experimentales, se han obtenido dos ecuaciones (ecuaciones (4.16) y (4.17)) que permiten estimar con un buen ajuste las intensidades de ebullición media y máxima en función de dicho diámetro. También se ha observado que, para diámetros de incendio superiores a los 3 ó 4 m, la velocidad de combustión es mayor en el período estacionario sin *thin layer boilover* que durante el *thin layer boilover*. Por otro lado, se ha observado que el factor que limita la intensidad de ebullición es la cantidad de combustible sin quemar al inicio del fenómeno.

Boilover intensity (i.e. percentage increase in burning rate during thin layer boilover) decreases exponentially as the diameter of the fire decreases. Furthermore, by correlating the experimental data, two equations were obtained (Equations (4.16) and (4.17)) that allow us to estimate average and maximum boilover intensity with good agreement. It was observed that, for diameters greater than 3 or 4 m, the burning rate is higher in the stationary period without thin layer boilover than during thin layer boilover. It was also noticed that the factor that limits boilover intensity is the amount of fuel left to burn at phenomenon onset.

5. La intensidad de radiación (definida como el aumento, durante el *thin layer boilover*, de la radiación incidente sobre un receptor situado a una cierta distancia del incendio) ha presentado la misma tendencia que la intensidad de ebullición, decreciendo con el diámetro debido a la menor cantidad de combustible sin quemar al inicio del fenómeno. Sin embargo, los valores obtenidos de intensidad de radiación muestran como los efectos térmicos incrementan siempre durante el *thin layer boilover*, ya que hay una mayor eficacia de combustión durante este período.

Radiation intensity (defined as the increase in incident radiation on a target at a certain distance from the fire during thin layer boilover) showed the same trend as boilover intensity, i.e. it decreased with diameter because less fuel was left to burn at boilover onset. Nevertheless, the radiation intensity results showed that the thermal effect of the fire is always greater during thin layer boilover, because the combustion efficiency appears to be higher in this phase.

6. En el análisis de la geometría del incendio, se ha estudiado la evolución de la longitud de la llama, observándose un aumento durante el *thin layer boilover*; también se ha observado que dicho aumento está bastante limitado al incrementarse la velocidad del viento. Por otro lado, se han obtenido unas nuevas correlaciones del tipo de la ecuación (5.11), más adecuadas que las existentes en la bibliografía, para la estimación de la longitud media y máxima durante las dos fases más

características del incendio, el período estacionario y el *thin layer boilover*; en la tabla 5.6 se muestran las constantes de dichas correlaciones. También se ha determinado la relación existente entre la longitud media y las longitudes máxima y mínima. Dicha relación ha permitido establecer, utilizando correlaciones de la forma de las ecuaciones (5.13) y (5.14), la estimación de las dos longitudes límite de la llama antedichas mediante la longitud media y la utilización de factores multiplicativos, tanto para el período estacionario como para el *thin layer boilover*, dichos factores se muestran en la tabla 5.7.

Flame length was studied by fire geometry analysis. Flame length increased during boilover; however, this increase was limited when wind speed increased. Furthermore, new correlations of the form of Equation (5.11) were obtained; these correlations are better than those found in the literature at estimating average and maximum flame length during the two fundamental phases of the fire, the stationary period and the thin layer boilover. Table 5.6 shows the constants of these correlations. A relationship between average, maximum and minimum flame length was also detected. By using correlations of the form of Equations (5.13) and (5.14), this relationship allowed us to establish the maximum and the minimum flame dimensions, by multiplying the average flame length by appropriate multiplying factors, for both the stationary period and the thin layer boilover. Table 5.7 shows these factors.

7. Por lo que se refiere a la inclinación de la llama, también se han obtenido dos nuevas correlaciones del tipo de la ecuación (5.15) para estimar dicha inclinación, tanto en el período estacionario como durante el *thin layer boilover*, en la tabla 5.8 pueden verse las constantes para dichas correlaciones. Además, se ha observado que el *thin layer boilover* no ejerce un efecto apreciable sobre dicho parámetro.

Two new correlations of the form of Equation (5.15) were determined to estimate flame inclination, in both the stationary period and boilover. Table 5.8 shows the constants for these correlations. It was also noticed that thin layer boilover has no major effect on this parameter.

8. Se ha estudiado también la frecuencia de pulsación de la llama; los datos obtenidos durante el período estacionario se ajustan a las correlaciones existentes en la bibliografía. Por otro lado, durante el *thin layer boilover* la frecuencia de pulsación aumenta, debido al mayor arrastre de aire hacia la llama. Dicho aumento de pulsación decrece con el diámetro, ya que a medida que aumentan las dimensiones del incendio existe una mayor dificultad de que penetre el aire en el mismo.

Flame pulsation frequency was studied. Data obtained during the stationary period fit the correlations previously published in the literature. However, flame pulsation frequency increases during thin layer boilover because more air is entrained in the flame. The increase in pulsation is lower at bigger diameters because, as when the dimensions of the fire grow, it becomes more difficult for air to penetrate the flame.

9. Se ha determinado, basándose en los datos de radiación incidente registrados y en las correlaciones existentes en la bibliografía, que modelo se ajustaba mejor para estimar los efectos térmicos durante el *thin layer boilover*, con la finalidad de calcular el incremento a aportar a las distancias de seguridad en caso de ocurrencia del fenómeno. Se ha escogido el modelo que calcula la radiación incidente estimando el valor de la transmisividad atmosférica mediante la ecuación de Bagster y Pitblado [BAGS 1989] y el poder emisor medio de la llama mediante la ecuación propuesta por Muñoz [MUÑO 2005]. Se ha observado que el incremento en las distancias de seguridad decrece con el tamaño del incendio. Además, debido a que el efecto del viento sobre la disminución de la longitud de llama es más marcado durante el *thin layer boilover*, la situación en la cual el aumento de las distancias de seguridad es más grande es cuando no hay presencia de viento. Como resultado de este estudio, se ha presentado la tabla 5.15 que muestra los incrementos a aportar en dichas condiciones; dichos incrementos van desde un 65% para los incendios de 1,5 m hasta un 25-30% para los de 6 m, valor el cual también se propone para diámetros superiores.

Based on the experimental incident radiation data and the correlations from the literature, it was determined which model was best at estimating thermal effects during thin layer boilover in order to calculate the increase that should be applied to safety distances in the event of a thin layer boilover. It was selected the model that calculates the incident radiation by estimating the atmospheric transmissivity values using Bagster & Pitblado's equation [BAGS 1989] and that calculates the average emissive power of the flame using Muñoz's equation [MUÑO 2005]. The increase in the safety distances decreased as the size of the fire decreased. Furthermore, because the effect of wind, which reduces flame length, is stronger during thin layer boilover, the highest increase must be applied to safety distances in the absence of wind. Table 5.15 shows the increments under these conditions based on this analysis. The safety-distance increases ranged from 65% for a 1.5-m fire to 25-30% for a 6-m fire. Based on the observation of an exponential decay evolution, the latter value seems suitable for bigger diameters.

10. El análisis realizado de la distribución de la temperatura en el interior del líquido ha mostrado que, observando la variación de dicha distribución en función del tiempo, también pueden establecerse los periodos característicos de la evolución de un incendio de balsa, obteniéndose resultados equivalentes a los obtenidos por otras metodologías (velocidad de combustión, temperatura de la llama, etc.). Por otro lado, dicho análisis ha permitido establecer que la temperatura a la cual debe estar la interfase combustible-agua para la aparición del fenómeno del *thin layer boilover* es de, aproximadamente, 120 °C como ya habían indicado otros autores, temperatura que sólo se ha alcanzado de forma permanente en los incendios de gasóleo.

A study of the temperature distribution inside the liquid was carried out. By observing the distribution variation as a function of time, the fundamental periods of the evolution of a pool fire can be detected. The results were the same as those obtained using other methodologies (burning rate, flame length, etc.) The analysis allowed us to establish that the minimum fuel-water interface temperature required for a thin layer boilover is approximately 120 °C, in accordance with previous observations by other authors. This temperature was only achieved on a permanent basis in diesel fires.

- 11 Mediante el análisis anterior también se ha observado que, por las características de los experimentos llevados a cabo en esta tesis —limitados espesores de combustible y los tipos de hidrocarburos empleados—, no hay formación de una *hot zone* propiamente dicha. Solo ha sido posible observar una zona a alta temperatura de espesor muy reducido que se ha denominado *seudo hot zone*, la cual no incrementa ni de tamaño ni de temperatura.

The abovementioned analysis showed that, for the characteristics of the experiments performed for this thesis —limited fuel thickness and fuel type—, no proper hot zone was formed. Only a thin high-temperature zone was observed. This zone, named the pseudo hot zone, does not increase in size or temperature as it moves towards the bottom of the pool.

- 12 Se ha desarrollado un modelo matemático para predecir los perfiles de temperatura a través de la capa de líquido (combustible y agua) durante el proceso que lleva a la aparición del *thin layer boilover*. El modelo incluye el mecanismo de convección, el de conducción y el de absorción de la radiación por parte del sustrato líquido. Dicho modelo ha mostrado un muy buen ajuste con los datos experimentales, tanto con los obtenidos en esta tesis como por otros autores.

A mathematical model to predict the temperature profiles in the liquid layer (fuel and water) during the process that leads to thin layer boilover was developed. The model includes convective and conductive heat transfer and radiation absorption in the liquid layer. It showed good agreement with both the experimental data of this thesis and the results of other authors.

- 13 A partir de dicho modelo, se han estimado los valores de velocidad de las corrientes convectivas, los cuales han sido del mismo orden de magnitud que los determinados por otros autores. El modelo también permite predecir los tiempos requeridos para alcanzar temperaturas concretas y predefinidas en la interfase para distintos espesores iniciales de combustible, los tiempos así obtenidos han mostrado un buen ajuste con los tiempos determinados experimentalmente, así mismo, los tiempos experimentales estimados para que aparezca el *thin layer boilover* son coherentes con las predicciones del modelo.

Using this model, the velocity of the convective currents was estimated. The results were of the same order of magnitude as those of other authors. The model also makes it possible to predict the time required to reach specific interface temperatures for various initial fuel-layer thicknesses. The results showed good agreement with the experimental data. Likewise, the experimental thin layer boilover onset times were consistent with the predictions of the model.

14. El modelo matemático anterior, previamente desarrollado para simular el *thin layer boilover*, ha sido modificado y ampliado para poder simular también el fenómeno del *boilover* genérico. En esta nueva versión del modelo, al considerar que la densidad del combustible que queda por quemar varía durante el proceso, la velocidad de las corrientes convectivas se considera variable con el tiempo. Las predicciones del modelo se ajustan muy bien a los datos experimentales, tanto a los de esta tesis como a los publicados por otros autores.

The abovementioned mathematical model, previously developed to simulate thin layer boilover, was modified and enhanced to simulate generic boilover as well. This new version of the model assumes that the density of the fuel left to burn varies during the process. Therefore, the velocity of the convective currents is considered variable over time. The predictions of the model fit very well with the experimental data, both the results of this thesis and the values published by other authors.

15. Mediante dicho modelo se ha determinado el valor inicial de la velocidad de las corrientes convectivas para los experimentos realizados para esta tesis, tanto par el gasóleo como para la gasolina, al variar el diámetro y el espesor inicial de hidrocarburo; así mismo, se han obtenido valores de dicho parámetro para pruebas realizadas por otros autores, los cuales emplearon crudo como combustible. Dicha velocidad no ha mostrado una dependencia clara con el diámetro; en cambio, aumenta al aumentar el espesor inicial de hidrocarburo. Esta tendencia se atribuye al mayor número de partículas que participan en la convección cuando hay un mayor espesor de combustible.

Using this new model, the initial velocities of the convective currents for the experiments performed for this thesis, for both diesel and gasoline and for different diameters and initial fuel-layer thicknesses, were determined. Likewise, values for this parameter were obtained for experiments by other authors, which used crude oil as fuel. These velocities showed no clear dependence on diameter but they do increase as the initial hydrocarbon thickness increases. This trend is due to the fact that more particles participate in convection when the fuel layer is bigger.

16. Se ha observado que el tiempo de inicio del *boilover* crece al crecer el número de Prandtl. Este resultado sugiere que existe un valor mínimo del número de Prandtl para que ocurra el *boilover*. Considerando los resultados publicados por otros autores, parece que este límite se puede establecer tomando, aproximadamente, el número de Prandtl del keroseno a una temperatura de 373 K. Por otro lado,

situaciones con bajos números de Fourier constituyen un riesgo mayor de ocurrencia del *boilover*. Por lo tanto, una combinación de los números de Prandtl y de Fourier decide la posibilidad y el tipo de *boilover*. En todos los casos, combustibles con menor difusividad térmica presentan una mayor tendencia a provocar este peligroso fenómeno.

Boilover onset time was observed to decrease with the Prandtl number. This suggests that the Prandtl number must reach a minimum value in order for boilover to occur. The results published by other authors seem to indicate that this limit can be fixed for the kerosene Prandtl number at a temperature of 373 K. Situations with a low Fourier number have a greater boilover risk. Therefore, a combination of the Prandtl and Fourier numbers determines the possibility and type of boilover. In any case, fuels with a lower thermal diffusivity are more likely to cause this dangerous phenomenon.

17. Por último, se ha determinado una correlación (ecuación (7.21)) para estimar el valor inicial de la velocidad de las corrientes convectivas durante el *boilover*, para mezclas de hidrocarburos, en función de la temperatura media de ebullición y el espesor inicial de combustible.

Finally, a correlation (Equation (7.21)) for estimating the initial velocity of the convective currents during boilover for hydrocarbon mixtures, as a function of the average boiling temperature and the initial thickness of the fuel, was proposed.

NOMENCLATURA

a_e	Conductividad térmica modificada, mm^2/min
A	Área de la balsa, m^2
A_R	Área del recipiente colocado sobre la balanza, m^2
C_p	Calor específico a presión constante, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$C_{p,a}$	Calor específico a presión constante del aire, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$C_{p,v}$	Calor específico a presión constante de los vapores, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
C/H	Relación entre los átomos de carbono y hidrógeno del combustible, -
D	Diámetro de la balsa, m
E_l	Poder emisor de la zona inferior de la llama, kW/m^2
E_{lum}	Poder emisor de la zona luminosa de la llama, kW/m^2
E_{max}	Poder emisor máximo de la llama, kW/m^2
E_{soot}	Poder emisor del hollín, kW/m^2
E_u	Poder emisor de la zona superior de la llama, kW/m^2
f	Frecuencia de pulsación de la llama, Hz
f_B	Frecuencia de adquisición de la balanza, Hz
F	Factor de vista geométrico, -
F_B	Factor de conversión peso balanza-altura combustible, mm/g
F_{max}	Factor multiplicativo para la longitud máxima de llama, -
F_{min}	Factor multiplicativo para la longitud mínima da llama, -
g	Aceleración de la gravedad, m/s^2
h	Altura total del líquido en la balsa, mm
h_0	Espesor inicial del combustible, mm
h_b	Espesor del combustible al inicio del <i>boilover</i> , mm
h_{hz}	Espesor de la onda de calor, mm
$h_{hz,max}$	Espesor de máximo de la onda de calor, mm
h_r	Espesor del residuo de combustible en un determinado instante, mm
H	Coefficiente de transferencia de calor por convección, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
I	Intermitencia de la llama visible, -
I_b	Intensidad de ebullición, -

$I_{b,rad}$	Intensidad de radiación, -
k	Coefficiente de extinción, m^{-1}
k_m	Coefficiente medio de extinción, m^{-1}
K	Coefficiente de transferencia de calor por conducción, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
L	Altura/longitud de la llama visible, m
L_c	Longitud media de la llama no obscurecida por el humo, m
L_{img}	Altura/longitud de la llama visible no corregida, m
m	Masa, kg
\dot{m}	Velocidad instantánea de combustión, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_b	Velocidad de combustión en el <i>boilover</i> , $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_{max}	Velocidad máxima de combustión en el periodo estacionario, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_{norm}	Velocidad de combustión en ausencia de viento, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_s	Velocidad de combustión en el estacionario, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_{viento}	Velocidad de combustión en presencia de viento, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
M^{**}	Velocidad de combustión en el régimen convectivo turbulento, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
N_p	Número de picos de longitud de llama en un periodo, -
\hat{r}_0	Relación estequiométrica másica entre aire-combustible, -
r	Velocidad de regresión de la onda de calor, mm/s
q_b	Radiación recibida por un receptor durante el <i>boilover</i> , kW/m^2
q_{chem}	Calor total liberado por la combustión por unidad de superficie, kW/m^2
q_{fuel}	Calor de vaporización del combustible por unidad de superficie, kW/m^2
q_{loss}	Perdidas de calor a través de las paredes de la balsa, kW/m^2
q_{rad}	Flujo de calor por radiación en la superficie de la balsa, kW/m^2
q_s	Radiación recibida por un receptor en el periodo estacionario, kW/m^2
q_{tot}	Flujo de calor total en la superficie de la balsa, kW/m^2
\dot{Q}	Calor total liberado por la combustión, W
\dot{Q}_{cond}	Calor transferido desde la llama al líquido a través de las paredes, W
\dot{Q}_{conv}	Calor transferido por convección, W
\dot{Q}_{rad}	Calor transferido por radiación, W
\dot{Q}_{rerad}	Calor transferido por radiación desde la balsa a la llama, W
\dot{Q}_{tot}	Calor total intercambiado entre llama y superficie de la balsa, W

t	Tiempo, s
t_b	Instante de inicio del <i>boilover</i> , s
t_c	Tiempo característico, s
T	Temperatura del combustible en un determinado instante, K
T_a	Temperatura ambiente, K
T_b	Temperatura en el seno del líquido en condiciones ambientales, K
T_e	Temperatura de ebullición del combustible, K
T_{flash}	Temperatura de <i>flash point</i> del combustible, K
T_{int}	Temperatura de la interfase agua/combustible, K
T_l	Temperatura de la llama, K
T_s	Temperatura de la superficie del combustible, K
T_0	Temperatura inicial del combustible o del agua, K
u	Velocidad del viento, m/s
u_c	Velocidad característica de combustión, m/s
U_R	Fracción de llama no oscurecida, -
V_a	Velocidad de las corrientes convectivas, mm/s
$V_{a,0}$	Velocidad inicial de las corrientes convectivas, mm/s
\dot{V}_v	Caudal volumétrico del combustible vaporizado, m ³ /s
W	Peso registrado por la balanza, g
x	Profundidad respecto a la superficie libre del combustible, m
x_c	Distancia radial desde el centro de la balsa, m
x_{lum}	Fracción de llama luminosa, -
\dot{y}	Velocidad de combustión, mm/s
\dot{y}_{max}	Velocidad máxima de combustión, mm/s
$\dot{y}_{c,a}$	Transferencia de calor aparente, mm/s
$\dot{y}_{c,r}$	Transferencia de calor real, mm/s
\dot{y}_{evap}	Velocidad de evaporación del agua, mm/s
z	Distancia desde la interfase combustible/agua, m

Letras griegas

α	Difusividad térmica del combustible, m ² /s
β	Factor de corrección del coeficiente de extinción, -
χ	Porcentaje de combustible quemado antes del <i>boilover</i> , -
χ_s	Fracción de calor de retroalimentación, -
$\chi_{s,teórico}$	Fracción de calor de retroalimentación ideal, -
ΔH_c	Calor de combustión, J/kg
ΔH_v	Calor latente de vaporización, J/kg
ΔH_v^*	Calor latente de vaporización de la mezcla de hidrocarburos, J/kg
Δt	Intervalo de tiempo, s
ΔV	Variación volumétrica del combustible, m ³
ΔV_{MG}	Variación volumétrica del agua, m ³
ε	Emisividad de la llama, -
γ	Coefficiente de absorción en profundidad, m ⁻¹
η_{rad}	Fracción de la energía de combustión irradiada, -
L	Parámetro característico definido por [CHAT 2001], mm/m ²
μ	Viscosidad dinámica, kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
ν	Viscosidad cinemática, m ² /s
θ	Inclinación de la llama, radianes
θ_{cw}	Ángulo para la corrección de la inclinación de llama, radianes
θ_{mg}	Inclinación de la llama no corregida, radianes
ρ	Densidad, kg/m ³
ρ_a	Densidad del aire, kg/m ³
ρ_f	Densidad del combustible, kg/m ³
ρ_r	Densidad del combustible sin quemar, kg/m ³
ρ_v	Densidad de los vapores de combustible, kg/m ³
ρ_w	Densidad del agua, kg/m ³
ρ_0	Densidad inicial del combustible, kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, 5,67·10 ⁻⁸ W·m ⁻² ·K ⁻⁴
τ	Transmisividad atmosférica, -
ζ	Fracción de superficie de llama cubierta por humo, -

Grupos adimensionales

B	Parámetro adimensional de la ecuación (2.4)
Fr	Número de Froude
N	Parámetro de escala de la ecuación (2.4)
m^*	Velocidad de combustión adimensional
Pr	Número de Prandtl
Q^*	Calor desprendido por la llama en forma adimensional
Re	Número de Reynolds
u^*	Velocidad del viento adimensional

Parámetros estadísticos

FB	Tendencia fraccionada
$NMSE$	Media normalizada de los errores al cuadrado
R	Coefficiente de correlación

BIBLIOGRAFÍA

- [ALRA 1990] ALRAMADHAN, M.A., ARPACI, V.S., SELAMET, A., "*Radiation Affected Liquid Fuel Burning on Water*", *Combustion Science and Technology*, 72, pp. 233-253, 1990
- [ARAI 1990] ARAI, M., SAITO, K., ALTENKIRCH, R.A., "*A Study of Boilover in Liquid Pool Fires Supported on Water. Part I: Effects of a Water Sublayer on Pool Fires*", *Combustion Science and Technology*, 71, pp. 25-40, 1990
- [ATAL 1971] ATALLAH, S., ALLAN, D.S., "*Safe Separation Distances from Liquid Fuel Fires*", *Fire Technology*, 7(1), pp. 47-56, 1971
- [BABR 1983] BABRAUSKAS, V., "*Estimating Large Pool Fire Burning Rates*", *Fire Technology*, 19, pp. 251-261, 1983
- [BAGS 1989] BAGSTER, D.F., PITBLADO, R.M., "*Thermal Hazards in the Process Industry*", *Chemical Engineering Progress*, pp. 69-75, July, 1989
- [BECK 1978] BECKER, H.A., LIANG, D., "*Visible Length of Vertical Free Turbulent Diffusion Flames*", *Combustion and Flame*, 32, pp. 115-137, 1978
- [BEJA 1991] BEJAN, A., "*Predicting the Pool Fire Vortex Shedding Frequency*", *Journal of Heat Transfer*, February, 113, pp. 261-263, 1991
- [BLIN 1957] BLINOV, V.I., KHUDIAKOV, G.N., "*Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids*", *Doklady Accademia Nauk SSSR*, 113, pp. 1094-1098, 1957
- [BLIN 1961] BLINOV, V.I., KHUDIAKOV, G.N., "*Diffusion Burning of Liquids*", English Translation of US Army Engineering Research and Development Laboratories, T-1490a-c. ASTIA, AD 296762, 1961
- [BOND 1991] BOND, J., "*Sources of Ignition, Flammability Characteristics of Chemicals and Products*", Butterworth-Heinemann, 2ª edición, London, 1991
- [BROE 1992] BROECKMAN, B., SCHECKER, H.G., "*Boilover: Effects in Burning Oil-tanks*", 7th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Italia, 1992

- [BROE 1995] BROECKMAN, B., SCHECKER, H.G., "*Heat Transfer Mechanisms and Boilover in Burning Oil-water Systems*", *Journal Loss Prevention in the Process Industries*, 8(3), pp. 137-147, 1995
- [BURG 1947] BURGOYNE, J.H., KATAN, L.L., "*Fires in Open Tanks of Petroleum Products: Some Fundamental Aspects*", *Journal of the Institute of Petroleum Technologists*, 33(1), pp. 158-191, 1947
- [BURG 1961] BURGESS, D.S., STRASSER, A., GRUMER, J., "*Diffusive Burning of Liquid Fuels in Open Trays*", *Fire Res. Abs. and Rev.*, 3, pp. 177-192, U.S. Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania, 1961
- [BURG 1962] BURGESS, D.S., ZABETAKIS, M.G., "*Fire and Explosion Hazards Associated with LNG*", US Bureau of Mines, Report 6099, 1962
- [BYRA 1966] BYRAM, G.M., CLEMENTS H.B., BISHOP M.E., NELSON R.M. Jr., "*Project Fire Model: an Experimental Study of Model Fires*", Final Report, Office of Civile Defense Contract OCD-PS-65-40, USDA Forest Service, Southeastern Forest Experimental Station, Asheville, NC, 46 pp., 1966
- [CASA 1999] CASAL, J., MONTIEL, H., PLANAS, E., VILCHEZ, J.A., "*Análisis del riesgo en instalaciones industriales*", Edicions UPC, Barcelona, 1999
- [CHA1 2001] CHATRIS, J.M., "*Velocitat de combustió i distribució de temperatures en incendis de bassals d'hidrocarburs*", Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Tesis Doctoral, 2001
- [CHA2 2001] CHATRIS, J.M., QUINTELA, J., FOLCH, J., PLANAS, E., ARNALDOS, J., CASAL, J., "*Experimental Study of Burning Rate in Hydrocarbon Pool Fires*", *Combustion and Flame*, 126(1), pp. 1373-1383, 2001
- [CORL 1965] CORLETT, R.C., "*Heat Transfer Data Summary – Pool Burning Study*", Eng. Sci. Lab. Tech. Rept., 19, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachussets, Julio 1965
- [COTT 1989] COTTONE, B., "*Irraggiamento da incendi di diversi idrocarburi: sperimentazione e modelli interpretativi*", Politecnico di Torino, Proyecto Final de Carrera, 1989

- [COWL 1991] COWLEY, L.T., JOHNSON, A.D., "*Blast and Fire Engineering Project for Topside Structures. Fire Loading Series*", The Steel Construction Institute, Technical Report, 1991
- [COXC 1985] COX, G., CHITTY, R., "*Some Source-dependent Effects of Unbounded Fires*", *Combustion and Flame*, 60, pp. 219-232, 1985
- [DERI 1972] DE RIS, J., ORLOFF, L., "*A Dimensionless Correlation of Pool Burning Data*", *Combustion and Flame*, 18, pp. 381-388, 1972
- [DITA 1992] DITALI, S., ROVATI, A., RUBINO, F., "*Experimental Model to Assess Thermal Radiation from Hydrocarbon Pool Fires*", 7th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Italia, 1992
- [EVAN 1986] EVANS, D., BAUM, H., McCAFFREY, B., MULLHOLLAND, G., HARKLEROAD, M., MANDERS, W., "*Combustion of Oil on Water*", Report NBSIR 86-3420, National Bureau of Standards, 1986
- [FALG 2002] FALGAS, I., "*Caracterització geomètrica de flames en incendis d'hidrocarburs a camp obert*", Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Proyecto Final de Carrera, 2002
- [FANH 1995] FAN, W.C., HUA, J.S., LIAO, G.X., "*Experimental Study on The Premonitory Phenomena of Boilover in Liquid Pool Fires Supported on Water*", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 8(4), pp. 221-227, 1995
- [FERR 2002] FERRERO, F., "*Incendi da pozza: velocità di combustione, boilover e temperatura di fiamma*", Politecnico di Torino, Proyecto Final de Carrera, 2002
- [GARO 1996] GARO, J.P., GILLARD, P., VANTELON J.P., FERNÁNDEZ-PELLO A.C., "*Effect of the Fuel Boiling Point on the Boilover Burning of Liquid Fuels Spilled on Water*", 26th Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, 1996
- [GAR1 1999] GARO, J.P., VANTELON, J.P., "*Thin Layer Boilover of Pure or Multicomponent Fuels*", en: ZARKO, V.E., WEISER, V., EISENREICH, N., VASIL'EV, A.A., eds., "*Prevention of Hazardous Fires and Explosions. The Transfer to Civil Applications of Military Experiences*", Series: NATO Science Partnership Sub-Series: 1: Disarmament Technology, vol. 26, Kluwer Academic, Dordrecht, 1999, pp. 167-182, 1999

- [GAR2 1999] GARO, J.P., GILLARD, P., VANTELON J.P., FERNÁNDEZ-PELLO A.C., "*Combustion of Liquid Fuels Spilled on Water. Prediction of Time to Start of Boilover*", Combustion Science and Technology, 147, pp. 39-59, 1999
- [GARO 1996] GARO, J.P., GILLARD, P., VANTELON J.P., FERNÁNDEZ-PELLO A.C., "*Effect of the Fuel Boiling Point on the Boilover Burning of Liquid Fuels Spilled on Water*", 26th Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, 1996
- [GRUM 1961] GRUMER, J., STRASSER, A., KUBALA, T.A., BURGESS, D.S., "*Uncontrolled Diffusive Burning of Some New Liquid Propellants*", Fire Res. Abs. and Rev., 3, pp. 159-176, U.S. Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania, 1961
- [HALL 1925] HALL, H., "*Oil Tank Fire Boilover*", Mechanical Engineering, 47(7), pp. 540-544, 1925
- [HAMI 1995] HAMINS, A., KASHIWAGI, T., BURCH, R.R., "*Characteristics of Pool Fire Burning*", en: TOTTEN, G.E., REICHEL, J., eds., "*Fire Resistance of Industrial Fluids*", ASTM STP 1284, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1996
- [HAMI 1999] HAMINS, A., YANG J.C., KASHIWAGI T., "*A Global Model for Predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires*", NISTIR 6381, NIST, United States Department of Commerce , 1999
- [HASE 1987] HASEGAWA, H., "*Experimental Study on the Mechanism of Hot Zone Formation in Open-tank Fires*", Fire Safety Science, 2, Proceedings of the 2nd Int. Symp., pp. 221-230, 1987
- [HESK 1983] HESKESTAD, G., "*Structure of Turbulent Diffusion Flames*", Fire Safety Journal, 5, pp. 103-108, 1983
- [HES1 1998] HESKESTAD, G., "*On Q^* and the Dynamics of Turbulent Diffusion Flames*", Fire Safety Journal, 30, pp. 215-227, 1998
- [HES2 1998] HESKESTAD, G., "*Dynamics of the Fire Plume*", Philosophical Transactions of The Royal Society, London, Series A, 356(1748), pp. 2815-2833, 1998
- [HOTT 1959] HOTTEL, H.C., "*Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquid*", Fire Res. Abs. and Rev., 1, pp. 41-44, 1959

- [HRIS 2001] HRISTOV J., *"Burning of a Slick of Fuel on Water – Qualitative Analysis of the Heat Transfer Model and the Pre-boilover Time on the Basis of Data Available"*, Bourgas 2001 – 6th Workshop on Transport Phenomena in Two-phase-flow, Proceeding, 2001
- [HYSYS] HYSYS, http://hysys.che.ufl.edu/getting_started.html
- [IDEM 1985] Idemitsu Kosan Oil Company Ltd., *"Crude Oil and Its Combustion"*, Report, 1985
- [INAM 1992] INAMURA, T., SAITO, K., TAGAVI, K.A., *"A Study of Boilover in Liquid Pool Fires Supported on Water. Part II: Effects of In-depth Radiation Absorption"*, Combustion Science and Technology, 86, pp. 105-119, 1992
- [ITOI 1991] ITO, A., INAMURA, T., SAITO K., EVANS, D., *"Holographic Interferometry Temperature Measurements in Liquid for Pool Fires"*, Proc. 3rd ASME-YSME Joint Thermal Eng. Conference, 1991
- [JSSE 1981] Japan Society of Safety Engineering, *"Report of Oil Fire Experiment"*, 1981
- [KOSE 1989] KOSEKI, H., *"Combustion Properties of Large Liquid Pool Fires"*, Fire Technology, 1989, 25(3), pp. 241-255, 1989
- [KOSE 1991] KOSEKI, H., KOKKALA, M., MULHOLLAND, G.W., *"Experimental Study of Boilover in Crude Oil Fires"*, Fire Safety Science, 3, Proceedings of the 3rd Int. Symp., pp. 865-874, 1991
- [KOSE 1994] KOSEKI, H., *"Boilover and Crude Oil Fire"*, Journal of Applied Fire Science, 3(3), pp. 243-272, 1994
- [KOSE 1996] KOSEKI, H., *"Radiation Properties and Flame Structure of Large Hydrocarbon Pool Fire"*, 30th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, 2, 13-20 Marzo de 1996
- [KOSE 1999] KOSEKI, H., *"Large Scale Pool Fires: Results of Recent Experiments"*, Fire Safety Science, 6, Proceedings of the 6th Int. Symp., 1999
- [KOSE 2000] KOSEKI, H., IWATA, Y., *"Tomakomai Large Scale Crude Oil Fire Experiments"*, Fire Technology, 36(1), 2000

- [KOSE 2004] KOSEKI, H., NATSUME, Y., IWATA, Y., TAKAHASHI, T., HIRANO, T., “*A Study on Large-scale Boilover Using Crude Oil Containing Emulsified Water*”, Fire Safety Journal, 39, pp. 143-155, 2004
- [LEES 1996] LEES, F.P., “*Loss Prevention in the Process Industries*” 2ª edición, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996
- [MANG 1992] MANGIALAVORI, G., RUBINO, F., “*Experimental Tests on Large Hydrocarbon Pool Fires*”, 7th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Italia, 1992
- [MCCA 1979] McCAFFREY, B.J., “*Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*”, NBSIR 79-1910, Washington, National Bureau of Standards, 1979
- [MCCA 1988] McCAFFREY, B.J., “*Flame Height*”, en: DINENNO, P.J., ed., “*The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*”, 1ª edición, National Fire Protection Association, Quincy (Massachusetts) y Society of Fire Protection Engineers, Boston (Massachusetts), 1988
- [MHID 2004] Health and Safety Executive, “*MHIDAS*”, April 2004 [CD-ROM], London, 2004
- [MOOR 1982] MOORHOUSE, J., “*Scaling Criteria for Pool Fires Derived from Large-scale Experiments*”, IChemE Symp. Series, 71, pp. 165-179, 1982
- [MUDA 1984] MUDAN, K.S., “*Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires*”, Progr. Energy Combustion Science, 10, pp. 59-80, 1984
- [MUDA 1988] MUDAN, K.S., CROCE, P.A., “*Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires*”, en: DINENNO, P.J., ed., “*The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*”, 1ª edición, National Fire Protection Association, Quincy (Massachusetts) y Society of Fire Protection Engineers, Boston (Massachusetts), 1988
- [MUÑO 2005] MUÑOZ, M.A., “*Estudio de los parámetros que intervienen en la modelización de los efectos de grandes incendios de hidrocarburos: geometría y radiación térmica de la llama*”, Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Tesis Doctoral, 2005

- [ORTE 2001] ORTEGA CUNILL, R.M., PINA ANDREU, Y., "*Estudi de plomalls de fum d'incendis d'hidrocarburs en 3D*", Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Proyecto Final de Carrera, 2001
- [PAGN 1989] PAGNI, P.J., "*Pool Fire Vortex Shedding Frequencies*", ASME paper N° 89-WA/FE-5 en TREFETHEN, L.M., PANTON, R.L., "*Some Unanswered Questions in Fluid Mechanics*", 1989
- [PETT 1983] PETTY, S.E., "*Combustion of Crude Oil on Water*", Fire Safety Journal, 5, pp. 123-124, 1983
- [PIRK 1987] PIRKLE Jr., J. C., SCHIESSER, W. E., "*DSS/2: A Transportable Fortran 77 Code for Systems of Ordinary and One, Two and Three-dimensional Partial Differential Equations*", Proceedings of 1987 Summer Computer Simulation Conference, Montreal, 1987
- [PRIT 1992] PRITCHARD, M.J., BINDING, T.M., "*FIRE2 - A New Approach For Predicting Thermal-Radiation Levels From Hydrocarbon Pool Fires*", Symp. on Major Hazards Onshore and Offshore, pp. 491-505, 1992
- [RASB 1956] RASBASH, D.J., ROGOWSKI, Z.W., STARK, G.W., "*Properties of Liquid Fuels*", Fuel, 31, pp. 94-107, 1956
- [REWH 1996] REW, P.J., HULBERT, W.G., "*Development of Pool Fire Thermal Radiation Model*", HSE Contract Research Report No. 94/1996, 1996
- [REWH 1997] REW, P.J., HULBERT, W.G., DEAVES, D.M., "*Modelling of Thermal Radiation from External Hydrocarbon Pool Fires*", Transaction of the IChemE, 75, Part B, pp. 81-89, 1997
- [RONZ 2002] RONZA, A., "*Incendi da pozza: velocità di combustione, boilover e geometria di fiamma*", Politecnico di Torino, Proyecto Final de Carrera, 2002
- [SCAN 1992] SCANDPOWER A/S, SINTEF-NBL, "*Handbook for Fire Calculations and Fire Risk Assessment in the Process Industry*", VBH-Trykk, Lillestrom, Norway, 1992
- [SHOK 1989] SHOKRI, M., BEYLER, C.L., "*Radiation from Large Pool Fires*", SFPE Journal of Fire Protection Engineering, 1(4), pp. 141-150, 1989
- [SKUM 1969] SKUM, Svenska Skumsläcknings Aktiebolaget, "*Oil Tank Fire Extinguishing*", 1969

- [STEW 1970] STEWARD, F.R., "*Prediction of the Height of Turbulent Diffusion Buoyant Flames*", *Combustion Science and Technology*, 2, pp. 203-212, 1970
- [TAKA 1999] TAKAHASHI, N., SUZUKI, M., DOBASHI, R., HIRANO, T., "*Behavior of Luminous Zones Appearing on Plumes of Large-Scale Pool Fires of Kerosene*", *Fire Safety Journal*, 33, pp. 1-10, 1999
- [THOM 1963] THOMAS, P.H., "*The Size of Flame from Natural Fires*", 9th Int. Symp. on Combustion, Pittsburgh, The Combustion Institute, pp. 844-859, 1963
- [TNO 1997] VAN DEN BOSCH, C.J.H., WETERINGS, R.A.P.M., "*Methods for the Calculation of Physical Effects Due to Releases of Hazardous Materials (Liquid and Gases)*" (TNO Yellow Book), 3^a edición, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, The Netherlands, 1997
- [TNO 2003] TNO, "*EFFECTS, DAMAGE, EFFECTSPUS, EFFECTSGIS: User's and Reference Manual. Version 5.5*", Apeldoorn, The Netherlands, 2003
- [TWAR 1981] TWARDUS, E.M., BRZUSTOWSKY, T.A., "*The Burning of Crude Oil Spilled on Water*", *Archivum Combustionis* 1(1/2), pp. 49-60, 1981
- [TWAR 1982] TWARDUS, E.M., BRZUSTOWSKY, T.A., "*A Study of the Burning of a Slick of Crude Oil on Water*", 19th Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 847-854, 1982
- [VACC 2002] VACCARI, R., "*Modellizzazione dell'altezza di fiamma in incendi da pozza di idrocarburi su larga scala*", Politecnico di Milano, Proyecto Final de Carrera, 2002
- [WAYN 1991] WAYNE, F.D., "*An Economical Formula for Calculating Atmospheric Infrared Transmissivities*", *Journal Loss Prevention in the Process Industries*, 4(2), pp. 86-92, 1991.
- [WELK 1966] WELKER, J.R., SLIEPEVICH, C.M., "*Bending of Wind Blown Flames from Liquid Pools*", *Fire Technology*, 2, pp. 127-135, 1966
- [YAMA 1986] YAMAGUCHI, T., WASAKA, K., "*Oil Pool Fire Experiment*", *Fire Safety Science*, 3, Proceedings of the 3rd Int. Symp., pp. 911-918, 1986

- [ZUKO 1981] ZUKOSKI, E.E., KUBOTA, T., CETEGEN, B., "*Entrainment in Fire Plumes*". Fire Safety Journal, 3, pp. 107-121, 1981
- [ZUKO 1984] ZUKOSKI, E.E., CETEGEN, B.M., KUBOTA, T., 20th Int. Symp. On Combustion, Pittsburgh, The Combustion Institute, 1984
- [ZUKO 1994] ZUKOSKI, E.E., "*Mass Flux in Fire Plumes*", Fire Safety Science, 4, Proceedings of the 4th Int. Symp., 1994
- [ZUKO 1995] ZUKOSKI, E.E., "*Properties of Fire Plumes*", en COX, G., "*Combustion Fundamentals of Fires*", Fire Research Station, Watford, UK, 1995

ANEXO I VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN

La finalidad del presente anexo es la determinación de una ecuación semiempírica que permita estimar la velocidad de combustión para incendios de balsa durante el periodo estacionario en función del diámetro, para los dos combustibles utilizados. El estudio ha sido realizado en paralelo con otros componentes del CERTEC, y pese a no constituir el objetivo central de la presente tesis, sirve como base para el análisis de la influencia del *boilover* de capa fina sobre los parámetros fundamentales de un incendio de balsa.

En la parte inicial del anexo se describe el procedimiento utilizado para el cálculo del parámetro a estudio. A continuación, se detallan brevemente, en función de la evolución de la velocidad de combustión en el transcurso del incendio, las características de las fases de desarrollo de un incendio de balsa. Además, se discute el comportamiento de la velocidad de combustión en el periodo estacionario en función del diámetro de la balsa, del espesor inicial de combustible y de la velocidad del viento. Finalmente, se presenta la correlación entre la velocidad de combustión y el diámetro de la balsa, en la forma matemática propuesta por Babrauskas [BABR 1983] (véase también el apartado 2.2).

AI.1 Metodología de cálculo

El cálculo de la velocidad de combustión se realizó midiendo las variaciones de peso registradas por la balanza, la cual funciona según el principio de los vasos comunicantes, como se ha descrito de manera detallada en el apartado 3.3.1. El primer paso para el cálculo de dicho parámetro es la obtención del factor de conversión F_B , el cual permite transformar el peso registrado por la balanza en el valor de altura total de combustible en la balsa. Con dicho factor se podrá proceder al tratamiento de la señal obtenida.

AI.1.1 Factor de conversión altura/peso

El coeficiente F_B puede ser calculado mediante la ecuación (AI.1), pero se prefirió efectuar en cada prueba un proceso de tara, para asegurarse el correcto funcionamiento del sistema.

$$\Delta h = \frac{\Delta W}{A_R \rho_f} = F_B \Delta W \quad (\text{AI.1})$$

Por esto, fue necesario realizar el vertido del hidrocarburo en distintas etapas, dejando entre cada una un tiempo suficiente para la estabilización de la señal leída por la balanza.

La figura AI.1 muestra un gráfico típico de peso en función del tiempo para un ensayo experimental (el caso específico se refiere a la prueba FOC3_04_D3). La primera parte, a escalones, representa el proceso de llenado, y la segunda, donde la curva es decreciente, el desarrollo del incendio. Cada vertido —representado gráficamente en la figura AI.1 como el intervalo comprendido entre dos líneas verticales— puede ser dividido en dos fases: una primera en que se observa una variación del peso en función del tiempo y una segunda en que la señal se estabiliza. El proceso de llenado varía notablemente su duración en función de la prueba, siendo diferente la cantidad de líquido a verter y el modo de vertido de los dos combustibles (véase el apartado 3.6).

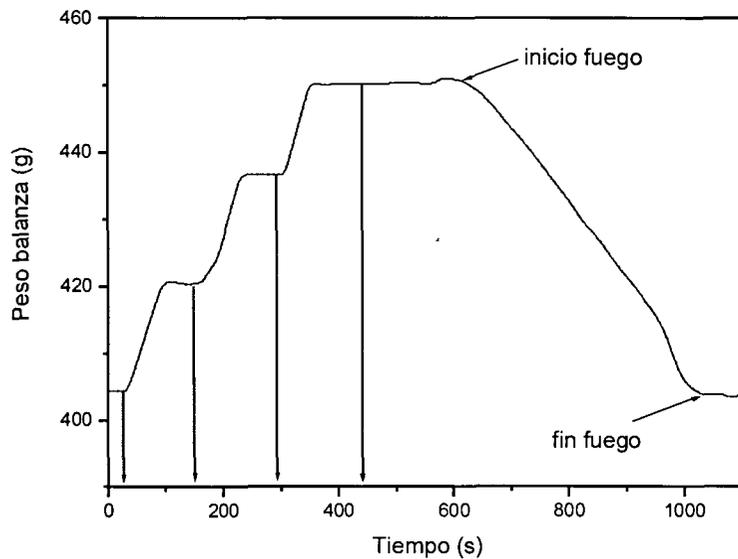


Figura AI.1. Peso registrado por la balanza en función del tiempo para la prueba FOC3_04_D3.

El factor de conversión F_B ha sido calculado para cada etapa como la relación entre los milímetros de líquido vertidos (volumen vertido dividido por el área de la balsa) y la diferencia de peso registrada por la balanza. El valor final, elegido para el cálculo de la velocidad de combustión, es el promedio de todos los factores de conversión obtenidos en la fase de llenado (2 o 3 según el ensayo). En la tabla AI.1 se muestra, a título de ejemplo, el proceso para la prueba FOC3_04_D3 (incendio de gasóleo en una balsa de 3 m de diámetro, con 2 cm de espesor inicial de combustible).

Tabla AI.1. Cálculo del factor de conversión para la prueba FOC3_04_D3

Volumen (l)	Espesor (mm)	Peso (g)	F_B (mm/g)
50,5	7,1	15,9	0,449
50	7,1	16,4	0,431
41,5	5,9	13,5	0,435
Promedio			0,439

El valor obtenido se puede aplicar solo cuando no se produzca la ebullición de la capa de agua, como ocurre durante el *boilover*; en esta fase, la migración del agua contribuye a la disminución del peso medido por la balanza. Si se considerasen válidos los datos de altura de líquido obtenidos mediante la correlación lineal también después del inicio del *boilover*, se cometería un error debido a las diferentes densidades del agua y del combustible. De hecho, también en el caso en que los dos líquidos tuviesen la misma densidad, no se podrían tampoco usar los valores de altura para calcular la velocidad de combustión, porque el dato se vería afectado por la variación de peso que representa la evaporación del agua. Consecuentemente, para evaluar la velocidad de combustión durante el *boilover*, se hace necesario introducir otro método de cálculo. Tal procedimiento, descrito en el apartado 4.2, implica el conocimiento del residuo no quemado.

En la última campaña experimental, la utilización del software de adquisición FireALL ha automatizado el proceso; insertando, para cada fase, el volumen vertido, el programa calcula, a partir de la variación de peso con la señal estable, el factor de conversión con el mismo método descrito precedentemente. El software efectúa también el tratamiento de la señal descrito a continuación, permitiendo visualizar en tiempo real la evolución de la velocidad de combustión.

Un factor que podría comprometer el éxito de las pruebas es la gran volatilidad de la gasolina, que en el proceso de preparación podría experimentar una evaporación no despreciable. En la fase de diseño de la primera campaña experimental llevada a cabo por el CERTEC, Chatris calculó la evaporación teórica de dicho combustible, tanto en ausencia como en presencia de viento [CHA1 2001]. Los valores obtenidos eran despreciables respecto a la cantidad total de hidrocarburo, siendo comprobados *a posteriori* con la observación experimental. Este hecho justifica la elección de no añadir cantidades adicionales de combustible para compensar la evaporación y, además, se garantiza que los ensayos se pueden realizar en condiciones seguras. Para el gasóleo no ha sido necesario analizar su evaporación, debido a su baja volatilidad éste no comporta problemas de pérdida de combustible.

AI.1.2 Tratamiento de la señal

La velocidad de combustión se puede determinar efectuando la derivada en el tiempo de la variación de nivel precedentemente registrada. En la práctica, la velocidad de combustión se calculó, en primera aproximación, como la relación entre la diferencia entre dos valores consecutivos de altura (h_i y h_{i-1}) y el tiempo transcurrido entre la

captura de los dos datos (es decir el inverso de la frecuencia de adquisición de la balanza f_B):

$$\dot{y}_i = (h_i - h_{i-1})f_B \quad (\text{AI.2})$$

De esta manera la velocidad de combustión se expresa en mm/s; para pasar dicha velocidad a $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ es suficiente multiplicar ésta por la densidad del combustible.

Debido a la limitada sensibilidad de la balanza, la velocidad de combustión así calculada presenta una evolución discontinua, de difícil interpretación. Por lo tanto, se necesita un filtrado de los valores de peso; para ello, se eligió una operación de media móvil, la cual se realiza en tiempo real por el sistema de adquisición de datos. La media móvil consiste en un promediado recursivo que permite la suavización (*smoothing*) de la curva inicial, eliminando las discontinuidades debidas a la sensibilidad de la balanza. La figura AI.2 muestra un gráfico de velocidad de combustión en función del tiempo, después de la derivación de los valores procedentes del filtrado de datos.

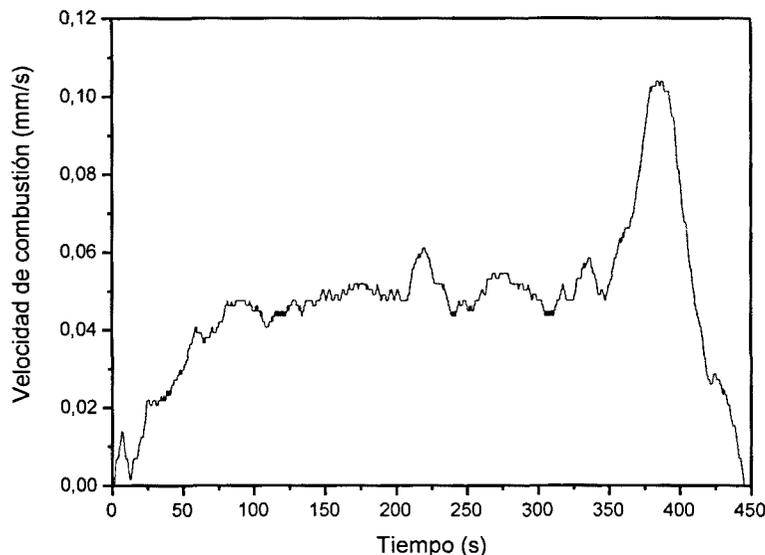


Figura AI.2. Velocidad de combustión en función del tiempo para la prueba FOC3_04_D3

AI.2 Identificación de las fases del incendio

Una vez obtenida para cada prueba la evolución de la velocidad de combustión en función del tiempo, es posible caracterizar las diferentes fases del incendio. Para

proceder a su identificación se han utilizado los gráficos de peso total del líquido en función del tiempo, evidenciando los cambios de pendiente, y los gráficos de velocidad de combustión en función del tiempo. Las figuras AI.3 y AI.4 muestran los periodos característicos para las pruebas FOC3_03_G3 (gasolina, 3 metros de diámetro y espesor inicial de combustible de 2 centímetros) y FOC3_04_D3 (gasóleo, 3 metros de diámetro y espesor inicial de combustible de 2 centímetros).

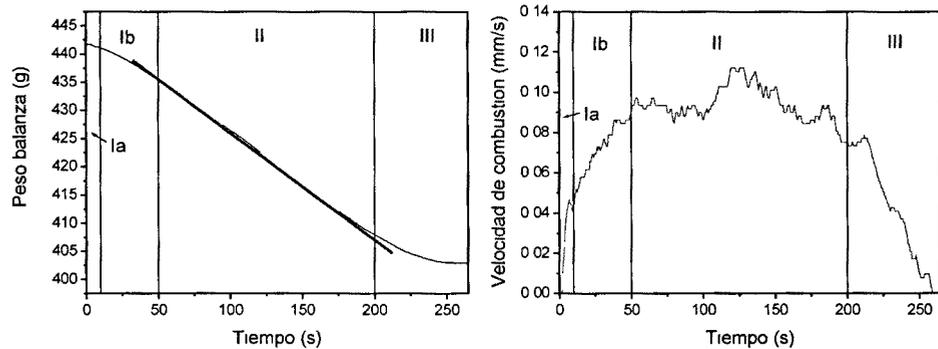


Figura AI 3 Fases del incendio para la prueba FOC3_03_G3

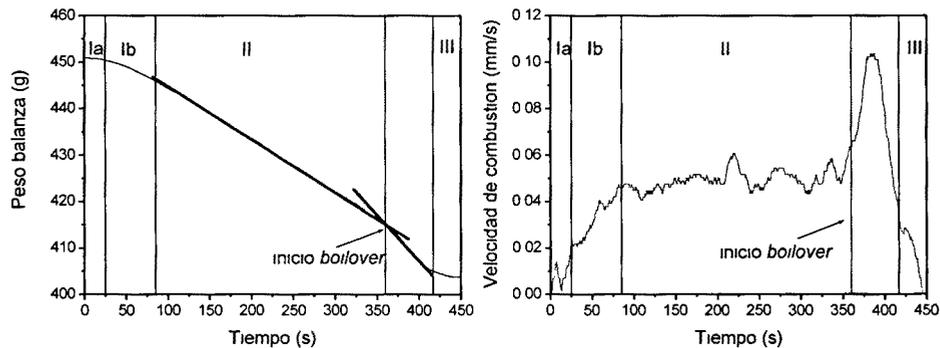


Figura AI 4 Fases del incendio para la prueba FOC3_04_D3

Chatris [CHA1 2001], ya realizó una descripción detallada de todas las fases del incendio. Lo que cabe destacar aquí, es el distinto comportamiento de los dos combustibles durante la fase más importante del incendio, el periodo estacionario (II), la cual se instaura después de un transitorio inicial (I). En efecto, mientras que en los incendios de gasolina la velocidad de combustión se mantiene constante hasta el periodo transitorio de extinción final (III), en las pruebas con gasóleo, a instantes diferentes según el espesor inicial de combustible (véase el apartado 4.2), se observa un aumento de la pendiente del peso registrado por la balanza, equivalente a un aumento de velocidad de combustión. La variación se asocia a la ebullición de una parte del agua bajo la capa de combustible, esto también queda confirmado por la aparición de un crepitar cada vez más intenso; es el fenómeno conocido como *thin layer boilover*.

AI.3 Análisis del periodo estacionario

Una vez caracterizados los periodos del incendio, se ha pasado a analizar el comportamiento de la velocidad de combustión en la fase más significativa del incendio. Chatris [CHA1 2001] realizó un análisis de la rapidez con la cual se alcanzaba el estado estacionario, análisis que, por lo tanto, ha sido obviado en este estudio. El periodo transitorio final no ha sido tenido en cuenta, debido a su inestabilidad y su escasa importancia desde el punto de vista del análisis de riesgo. En la tabla AI.2 se muestran las principales características de las pruebas efectuadas al fin de estudiar la velocidad de combustión en el periodo estacionario.

Tabla AI.2. Resultados experimentales de la campaña FOC3: velocidad de combustión.

Ensayo	Combustible	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Velocidad del viento* (m/s)	Velocidad de combustión ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
FOC3_22_D1.5	Gasóleo	1,5	19,8	0,72	0,0383
FOC3_22_D1.5	Gasóleo	1,5	19,8	1,32	0,0426
FOC3_01_D3	Gasóleo	3	12,7	1,95	0,0426
FOC3_01_D3	Gasóleo	3	12,7	1,99	0,0462
FOC3_02_D3	Gasóleo	3	15,0	1,24	0,0475
FOC3_02_D3	Gasóleo	3	15,0	2,61	0,0535
FOC3_04_D3	Gasóleo	3	20,1	0,00	0,0411
FOC3_04_D3	Gasóleo	3	20,1	0,29	0,0423
FOC3_05_D3	Gasóleo	3	24,9	0,46	0,0394
FOC3_05_D3	Gasóleo	3	24,9	0,89	0,0441
FOC3_18_D3	Gasóleo	3	12,0	1,30	0,0517
FOC3_20_D3	Gasóleo	3	12,0	0,29	0,0462
FOC3_20_D3	Gasóleo	3	12,0	0,31	0,0443
FOC3_20_D3	Gasóleo	3	12,0	1,34	0,0508
FOC3_14_D4	Gasóleo	4	15,0	0,84	0,0565
FOC3_14_D4	Gasóleo	4	15,0	0,85	0,0574
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	20,0	1,24	0,0572
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	20,0	1,48	0,0433
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	20,0	1,73	0,0623
FOC3_15_D4	Gasóleo	4	20,0	1,80	0,0598
FOC3_16_D4	Gasóleo	4	25,0	1,04	0,0484
FOC3_16_D4	Gasóleo	4	25,0	1,12	0,0559
FOC3_09_D5	Gasóleo	5	15,0	0,00	0,0518
FOC3_09_D5	Gasóleo	5	15,0	0,29	0,0519
FOC3_09_D5	Gasóleo	5	15,0	0,80	0,0547
FOC3_10_D5	Gasóleo	5	20,0	1,39	0,0564
FOC3_10_D5	Gasóleo	5	20,0	1,52	0,0522
FOC3_10_D5	Gasóleo	5	20,0	1,88	0,0647
FOC3_10_D5	Gasóleo	5	20,0	1,94	0,0630
FOC3_11_D5	Gasóleo	5	20,4	1,01	0,0575
FOC3_11_D5	Gasóleo	5	20,4	2,37	0,0586
FOC3_07_D6	Gasóleo	6	15,0	0,02	0,0498
FOC3_07_D6	Gasóleo	6	15,0	0,82	0,0516
FOC3_12_D6	Gasóleo	6	20,0	0,39	0,0528

Tabla AI.2. (continuación).

Ensayo	Combustible	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Velocidad del viento* (m/s)	Velocidad de combustión (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)
FOC3_21_G1.5	Gasolina	1,5	19,8	0,01	0,064
FOC3_21_G1.5	Gasolina	1,5	19,8	0,77	0,077
FOC3_03_G3	Gasolina	3	20,0	0,00	0,069
FOC3_17_G3	Gasolina	3	15,0	1,43	0,087
FOC3_13_G4	Gasolina	4	15,0	0,25	0,070
FOC3_13_G4	Gasolina	4	15,0	0,76	0,083
FOC3_08_G5	Gasolina	5	15,0	0,00	0,085
FOC3_06_G6	Gasolina	6	14,9	0,21	0,079

*valores medios en la fase en que se calculó la velocidad de combustión

Los ensayos han sido ordenados por tipo de combustible y diámetro para una mayor legibilidad de los datos. Los valores presentados se refieren solo a la última campaña experimental y se obtuvieron a partir del promedio de la velocidad de combustión en periodos de viento constante. Por lo tanto, en los incendios en los cuales se ha caracterizado más de un periodo de viento constante, se ha determinado más de un valor de velocidad de combustión. Los valores utilizados de campañas anteriores pueden consultarse en [CHA1 2001, FERR 2002].

A continuación, y con el objetivo de obtener una correlación para la predicción de la velocidad de combustión en función del diámetro de la balsa, se analizan, previamente, los efectos sobre dicha velocidad, en el estado estacionario, de las siguientes variables:

- velocidad del viento;
- espesor de combustible.

Velocidad del viento

Como ya se ha discutido durante la revisión bibliográfica, la influencia del viento sobre la velocidad de combustión es un hecho probado. Sin embargo, los estudios acerca de dicha influencia todavía no han llevado a una tendencia clara de ésta sobre la velocidad de combustión, presentando a menudo resultados contradictorios. En los párrafos siguientes, se intenta delimitar con mayor precisión la influencia antedicha.

Como muestran los valores presentados en la tabla AI.2, en los experimentos realizados en esta tesis, el viento ha influido en el sentido de aumentar la velocidad de combustión. La figura AI.5 pone de manifiesto dicha tendencia para la prueba FOC3_03_G3:

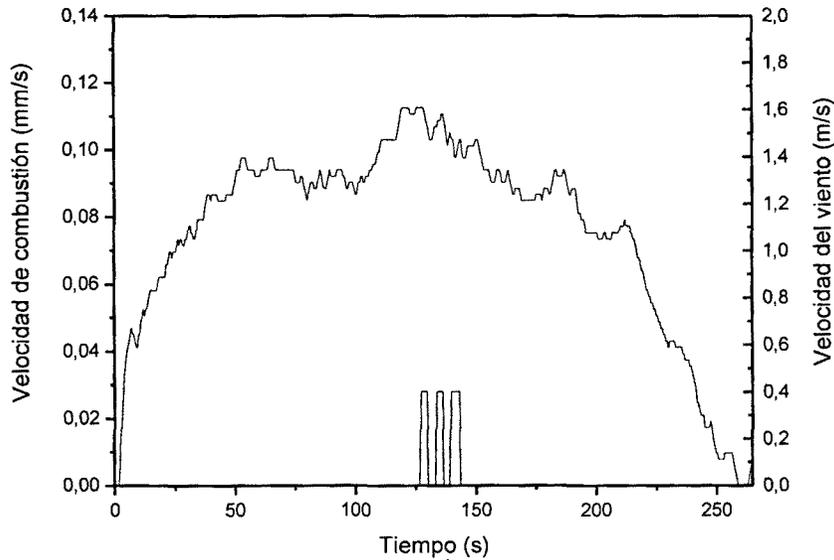


Figura A1.5. Influencia del viento sobre la velocidad de combustión para la prueba FOC3_03_G3.

Hay que recordar que el efecto del viento sobre la velocidad de combustión se puede manifestar de dos maneras contrapuestas:

- **Inclinación de la llama:** una llama inclinada presenta un factor de vista F llama-superficie de la balsa inferior. De la misma manera, el coeficiente de extinción $k\beta$, relacionado con la distancia media recorrida por la radiación luminosa en el contorno de la llama para alcanzar la interfase combustible-gas, experimenta una disminución. Observando las ecuaciones (2.10) y (2.11) se puede entonces afirmar que el efecto “geométrico” del viento provoca una disminución de la velocidad de combustión.
- **Eficacia de combustión:** el aumento de la turbulencia, generado por la presencia de la corriente forzada de aire procedente de los lados de la balsa, promueve la mezcla entre combustible y comburente. La más rápida desaparición de los reactivos causa un incremento de la producción de vapores inflamables; en consecuencia, se produce un aumento del gradiente de concentración de los mismos con respecto a la interfase. En segundo lugar, la mayor eficacia de la combustión aumenta la temperatura de la llama. Por lo tanto, el aumento de la turbulencia resulta en:
 - un incremento de \dot{m}_{\max} , que depende de T_l según la ecuación (2.11);
 - un aumento de la contribución del calor transferido desde la llama por convección \dot{Q}_{conv} .

Ambos efectos contribuyen a aumentar la velocidad de combustión. Sin embargo, para velocidades de viento muy grandes, el transporte al exterior del volumen

inflamado de parte de los vapores combustibles puede jugar un papel en la reducción de la velocidad de combustión, llevando, en casos extremos, a la eventual extinción del incendio. No parecen existir conocimientos certeros sobre el límite máximo de velocidad que el viento puede tener, para la cual no pueda mantenerse un incendio de forma persistente [COTT 1989].

Resumiendo, los posibles efectos del viento sobre la velocidad de combustión pueden ser cuatro, de los cuales dos promueven la combustión y dos la reducen. Posiblemente, los más importantes son el aumento de \dot{Q}_{conv} y a la vez la disminución de F y del producto $k\beta$. El aumento de la componente convectiva del transporte térmico es tanto más importante cuanto más pequeño es el incendio, mientras que es razonable pensar que los efectos sobre la geometría sean independientes de las dimensiones del incendio. Por lo tanto, los efectos del viento, en general, deberían ser menos importantes cuanto más grandes sean las dimensiones del incendio. Blinov y Khudiakov [BLIN 1961] (ver apartado 2.2) propusieron la siguiente ecuación para cuantificar la influencia del viento sobre la velocidad de combustión:

$$\frac{\dot{m}_{viento}}{\dot{m}_{norm}} = 1 + C \frac{u}{D} \quad (\text{AI.3})$$

donde C es una constante empírica igual a 0,15 s. Realizando una interpolación lineal de los datos disponibles (los de la figura AI.6) y utilizando como \dot{m}_{norm} la interceptada entre la recta resultante y el eje de las ordenadas, se obtuvieron los valores de la constante C para los datos experimentales obtenidos en esta tesis, limitándose dicha interpolación a las “parejas” diámetro-combustible con un número de datos suficiente.

Los resultados se muestran en la tabla AI.3. Las constantes calculadas son comparables con los resultados obtenidos por Blinov y Khudiakov. Sin embargo, dichos autores obtuvieron un solo valor de C , igual a 0,15, como promedio de los datos de varios combustibles. En este sentido, el análisis actual es más específico, en cuanto incluye la influencia del tipo de combustible. Observando los resultados en la tabla, se pueden destacar dos consideraciones:

- A paridad de diámetro, los valores de C son más altos para la gasolina que para el gasóleo, lo que implica que la gasolina está más afectada por un aumento de la velocidad del viento.
- Para un mismo combustible, al variar el diámetro, solo cambia el valor de la velocidad de combustión sin viento (\dot{m}_{norm}), sin registrarse una variación apreciable de la pendiente de la recta de regresión ($\propto C/D$). Nótese que, excepto para los incendios de 6 m, el valor \dot{m}_{norm} tiende a crecer con el diámetro.

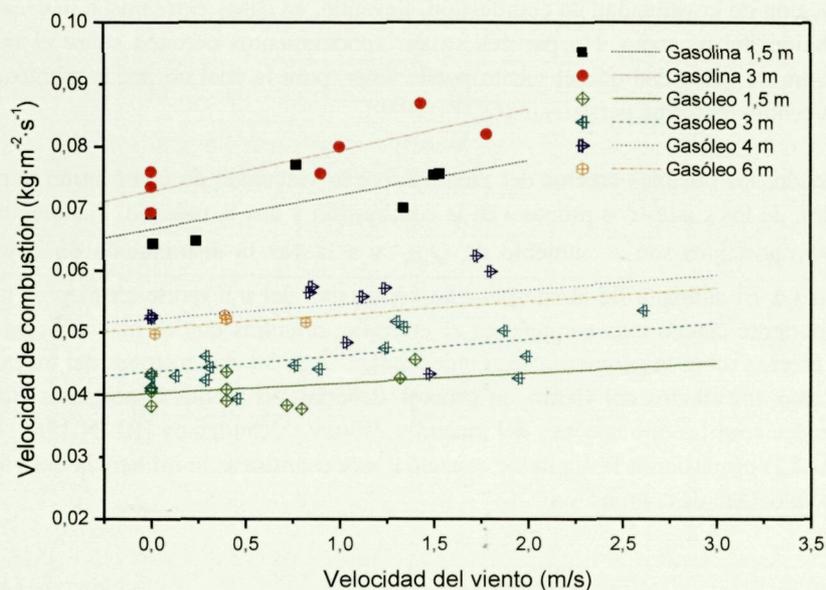


Figura A1.6. Análisis de la influencia del viento sobre la velocidad de combustión.

Tabla A1.3. Resultados para la constante C .

Combustible	Diámetro (m)	\dot{m}_{norm}	C (s)	C/D
Gasolina	1,5	0,067	0,12	0,08
Gasolina	3	0,073	0,27	0,09
Gasóleo	1,5	0,040	0,06	0,04
Gasóleo	3	0,044	0,18	0,06
Gasóleo	4	0,052	0,18	0,05
Gasóleo	6	0,051	0,25	0,04

En conclusión, la influencia de la velocidad del viento no se puede desestimar en los experimentos realizados. Por lo tanto, para la obtención de una correlación entre la velocidad de combustión y el diámetro de la balsa, sin la influencia de ninguna otra variable, es necesario excluir algunos incendios. Por ello, se ha decidido tomar un valor de velocidad del viento de 1,5 m/s, como límite superior a partir del cual los valores de velocidad de combustión de dichos incendios han sido descartados.

Espesor del combustible

El espesor inicial de combustible puede influir en la velocidad de combustión, en cuanto puede modificar los aspectos de intercambio térmico, específicamente:

- El termino conductivo: cuanto más grande es el espesor, mayor es la superficie lateral que puede dispersar calor hacia las paredes de la balsa, con la consecuente disminución de la velocidad de combustión; ahora bien, parece que para grandes diámetros y espesores pequeños —situación de los experimentos realizados en este estudio— el efecto es despreciable.
- El termino radiante: un espesor pequeño de hidrocarburo podría ser insuficiente para absorber el calor irradiado hacia el fondo por la llama; sin embargo, en el caso de combustibles opacos (como el gasóleo y la gasolina) es suficiente un espesor de pocos milímetros para hacer que dicha contribución sea completamente absorbida antes de alcanzar el agua que se encuentra por debajo de la capa de combustible, la cual entonces no sustrae calor al proceso de evaporación del combustible.

Estudios previos, realizados a pequeña escala [GAR1 1999], afirman que un aumento del espesor de combustible provoca un incremento de la velocidad de combustión. Cabe indicar que, esto ocurre cuando las relaciones entre el espesor del combustible y el diámetro del incendio son mayores que las utilizadas en la experimentación realizada en este trabajo (de 1 a 4 cm de espesor de hidrocarburo para diámetros iguales o superiores a 1,5 m). Además, el aumento de velocidad de combustión en [GAR1 1999], se registró solo para espesores iniciales inferiores a 10 mm. En la experimentación realizada no se ha observado ningún efecto en la velocidad de combustión al variar el espesor de combustible.

AI.4 Correlación experimental

En el apartado 2.2, se ha discutido detalladamente sobre los estudios previos que han analizado la influencia del diámetro sobre la velocidad de combustión. Entre las correlaciones existentes para la estimación de dicha velocidad, se ha decidido utilizar una correlación como la propuesta por Babrauskas [BABR 1983], del tipo:

$$m = m_{\max} (1 - e^{-kD}) \quad (\text{AI.4})$$

Para el calculo de los valores de velocidad de combustión máxima (\dot{m}_{\max}) y del coeficiente de extinción (k) se utilizó el método de los mínimos cuadrados. Los datos empleados para dicha estimación proceden de las tres campañas experimentales, una vez eliminados los valores con velocidad de viento superiores a 1,5 m/s, como ya se ha explicado en el apartado precedente. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas AI.4 y AI.5 para gasóleo y gasolina, respectivamente, donde, además, se realiza la comparación con los valores de Babrauskas, Rew y Chatris.

Tabla AI.4. Parámetros de la correlación velocidad de combustión-diámetro para incendios de gasóleo.

Estudio	\dot{m}_{\max} (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	k (m ⁻¹)
Babrauskas [BABR 1983]	0,034	2,8
Rew <i>et al.</i> [REWH 1997]	0,054	1,3
Chatris [CHA1 2001]	0,057	0,57
Resultados actuales	0,052	0,95

Tabla AI.5. Parámetros de la correlación velocidad de combustión-diámetro para incendios de gasolina.

Estudio	\dot{m}_{\max} (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	k (m ⁻¹)
Babrauskas [BABR 1983]	0,055	2,1
Rew <i>et al.</i> [REWH 1997]	0,067	1,5
Chatris [CHA1 2001]	0,077	1,35
Resultados actuales	0,081	1,25

Por lo tanto, las ecuaciones obtenidas, en unidades SI, resultan:

$$\text{Gasolina} \quad \dot{m} = 0,081(1 - e^{-1,25D}) \quad (\text{AI.5})$$

$$\text{Gasóleo} \quad \dot{m} = 0,052(1 - e^{-0,95D}) \quad (\text{AI.6})$$

Las ecuaciones AI.5 y AI.6 son aplicables solo en régimen dominado por la radiación, es decir para diámetros superiores a 1 m.

Las correlaciones obtenidas pueden verse en la figura AI.7, donde aparecen también los datos experimentales utilizados para su cálculo.

En la prueba FOC3_19_M3, realizada utilizando una mezcla compuesta de un 50% en volumen de gasóleo y un 50% de gasolina en la balsa de 3 metros de diámetro, se obtuvo un valor experimental de 0,077 kg·m⁻²·s⁻¹. Promediando los valores proporcionados por las ecuaciones (AI.5) y (AI.6) para la balsa de 3 metros de diámetro, se obtiene un valor de 0,081 kg·m⁻²·s⁻¹. El pequeño error relativo (4% respecto al dato experimental), indica que la combinación de las dos correlaciones es apta para la determinación de la velocidad de combustión de mezclas de los dos combustibles empleados.

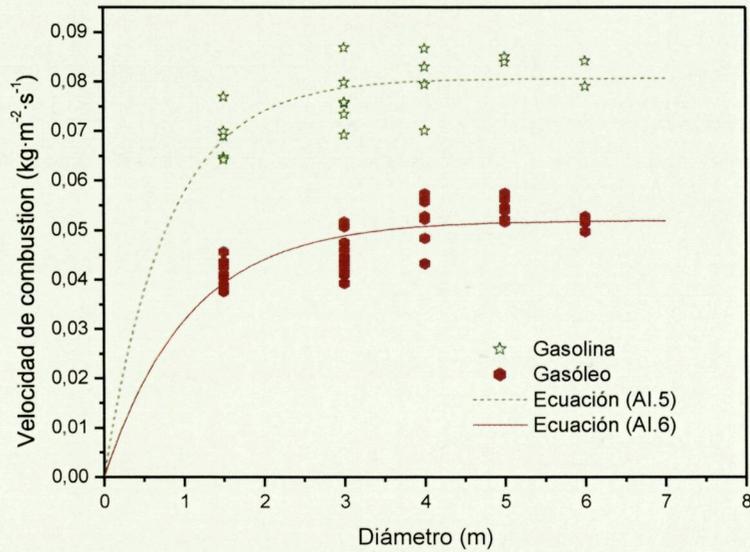


Figura A1.7. Correlaciones finales y datos experimentales de la velocidad de combustión en función del diámetro del incendio sin presencia de viento.

La obtención de una velocidad de combustión fiable en el estado estacionario, así como de la correlación de ésta con el diámetro en ausencia de viento, es necesaria para tener una buena referencia de dicho parámetro, ya que interviene en la mayoría de los análisis que contemplan la comparación de los efectos del *boilover* sobre el comportamiento de un incendio de balsa (intensidad de ebullición, longitud de la llama, etc.).

ANEXO II CORRELACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL PODER EMISIVO

El número de modelos y ecuaciones existentes en la literatura, para estimar el poder emisivo medio de la llama en el período estacionario es muy elevado. A continuación, se describen las correlaciones empleadas en el análisis de los efectos térmicos de los experimentos realizados (apartado 5.7).

En [MUÑO 2005], trabajo dedicado específicamente al estudio de las propiedades de emisión de la radiación de incendios de hidrocarburos, se muestra un amplio panorama de las ecuaciones existentes para estimar el antedicho parámetro.

Entre la gran cantidad de metodologías disponibles en la literatura, se han escogido, en base a criterios de su grado de utilización, sencillez y condiciones operativas empleadas en las pruebas, las seis que se presentan en la tabla AII.1 y que se describen a continuación.

Tabla AII.1. Resumen de los métodos utilizados para determinar el poder emisivo de la llama.

Método	Referencia	Combustibles	Notas
E-SHOKRI	[SHOK 1989]	resultados experimentales previos	
E-MUDAN	[MUDA 1984]	gasóleo, queroseno y JP5	
E-REW_MOD	[REWH 1996, REWH 1997]	resultados experimentales previos	El modelo original de dos zonas se ha convertido a un nuevo modelo de una zona
E-TNO/EFFECTS	[TNO 1997, TNO 2003]		Utilizado en el programa EFFECTS [TNO 2003]
E-MUÑOZ	[MUÑO 2005]	gasolina, gasóleo	Desarrollado a partir de los datos experimentales de esta tesis
E-FRAC_RAD	[MUÑO 2005]	gasolina, gasóleo	Desarrollado a partir de los datos experimentales de esta tesis

AII.1 Modelo E-SHOKRI

La NRC (U.S. Nuclear Regulatory Comisión) propone en sus manuales de cálculo, el uso de la correlación (AII.1) para la estimación del poder emisivo medio de la llama:

$$E = 58(10^{-0,00823D}) \quad (\text{AII.1})$$

La ecuación, propuesta por Shokri y Beyler en 1989 obtenidos a partir de datos experimentales previos con varios combustibles, predice un poder emisor de la llama que depende solamente del diámetro del incendio, y fue determinada asumiendo una geometría de llama cilíndrica [SHOK 1989]. La fórmula prevé un poder emisor siempre decreciente al aumentar el diámetro de la balsa, atribuyendo dicha disminución a la mayor producción de humo.

AII.2 Modelo E-MUDAN

Este modelo, deducido por Mudan [MUDA 1984] a partir de ensayos con gasóleo, queroseno y JP5, determina el poder emisor medio de la llama mediante la ecuación:

$$E = 140 \exp(-0,12 \cdot D) + 20(1 - \exp(-0,12 \cdot D)) \quad (\text{AII.2})$$

Dicha ecuación predice un poder emisor, que como en la ecuación anterior también decrece al aumentar el diámetro, entremedio del de la llama luminosa —al cual se le atribuye un valor de 140 kW/m²— y el del hollín —que se caracteriza con un valor de 20 kW/m²—. Pese a que el método es ampliamente utilizado en los cálculos de efectos de incendios de balsas de hidrocarburos (exceptuando LPG y LNG), y de otros combustibles, los resultados proporcionados por la ecuación (AII.2) son, generalmente, muy elevados, como muestra el análisis llevado a cabo en el antedicho apartado 5.7.

AII.3 Modelo E-REW_MOD

En [REWH 1996, REWH 1997] se propuso un modelo de dos zonas que considera que en la zona superior del incendio puedan aparecer porciones de llama luminosas. Si se asume que la zona inferior de la llama está completamente libre de humo, el poder emisor de dicha zona se determina mediante la siguiente correlación:

$$E_l = E_{lum} = E_{max} (1 - e^{-k_m D}) \quad (\text{AII.3})$$

Por otro lado, el poder emisor de la zona superior, se calcula mediante la ecuación (AII.4), la cual considera la contribución de los puntos luminosos que aparecen dentro del humo y que ocupan una porción de espacio igual a U_R .

$$E_u = E_{lum} U_R + E_{soot} (1 - U_R) \quad (\text{AII.4})$$

La longitud de la zona de llama libre de humo, se estima a partir de la ecuación de Pritchard y Binding (1992):

$$L_c/D = 11,404(m^*)^{1,13} (u^*)^{0,179} (C/H)^{-2,49} \quad (\text{AII.5})$$

Rew (1997) determinó los parámetros de las ecuaciones (AII.3), (AII.4) y (AII.5) para varios combustibles; en la tabla AII.2 se muestran los valores para el gasóleo.

Tabla AII 2 Valores de los parámetros para el método de Rew (1997)

Combustible	E_{lum} (kW/m ²)	k_m (m ⁻¹)	U_R (-)	E_{soot} (kW/m ²)	C/H (-)
Gasóleo	130	100	0,02	20	0,530

En este estudio, para simplificar los cálculos, se ha utilizado un solo poder emisivo medio para toda la llama. Por ello, se ha convertido el modelo de Rew de dos zonas en uno de una zona, según la ecuación (AII.6).

$$E = E_l(L_c/L) + E_u(1 - L_c/L) \quad (\text{AII.6})$$

Dicha ecuación pondera la contribución de la zona inferior (subíndice l) y superior de la llama (u), según el espacio ocupado por cada porción.

AII.4 Modelo E-TNO/EFFECTS

Este método propone el empleo de la siguiente ecuación, para determinar el poder emisivo de la zona luminosa de la llama:

$$E = \frac{\eta_{rad} m \Delta H_c}{(1 + 4 L/D)} \quad (\text{AII.7})$$

El poder emisivo medio de toda la llama se calcula como:

$$E = E_{max}(1 - \zeta) + E_{soot} \zeta \quad (\text{AII.8})$$

donde E_{max} se determina mediante la ecuación (AII.7), siendo $E_{soot} = 20 \text{ kW/m}^2$ y $\zeta = 0,8$.

El cálculo de E_{max} requiere el conocimiento de la fracción de energía irradiada, η_{rad} , definida como la relación entre el calor total emitido en forma de radiación y el calor teórico de combustión (ecuación AII.9). Este parámetro, normalmente, se determina de forma experimental.

$$\eta_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{\dot{m}\Delta H_c} \quad (\text{AII.9})$$

donde \dot{Q}_{rad} representa la energía emitida al entorno por radiación.

En el manual de predicción de efectos físicos del CPR (Committee for Prevention of Disasters) de 1997 [TNO 1997], se proponen valores de η_{rad} del orden del 0,13-0,14, valores que, como ha sido observado por [MUÑO 2005], parecen más aptos para la estimación de un poder emisor medio que de uno máximo, al haber sido determinados a partir de datos experimentales de radiómetros ubicados a gran distancia del incendio. Por lo tanto, siguiendo el ejemplo del software EFFECTS, desarrollado por TNO (The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), se propone utilizar una η_{rad} más alta y siempre igual a 0,35 [TNO 2003].

AII.5 Modelo E-MUÑOZ

En 2005, Muñoz, a partir de los experimentos realizados en esta tesis, propuso el empleo del método de cálculo explicado a continuación [MUÑO 2005]. El poder emisor medio de la llama se determina según:

$$E = x_{lum} E_{lum} + (1 - x_{lum}) E_{soot} \quad (\text{AII.10})$$

En dicho método, se asocia un poder emisor E_{soot} a la porción de incendio oscurecida por el humo (que cubre una fracción de llama igual a $1 - x_{lum}$) y un poder emisor E_{lum} a la zona luminosa (que cubre una fracción de llama igual a x_{lum}). Por otro lado, mientras que a E_{soot} se le atribuye un valor de 40 kW/m², independientemente del tamaño del incendio, E_{lum} crece con el diámetro del incendio alcanzando un valor constante para diámetros de 5 metros:

$$E_{lum} = \begin{cases} a'' D^{b''} & D < 5 \\ 115 & D \geq 5 \end{cases} \quad (\text{AII.11})$$

Tabla AII.3. Valores de los parámetros para la ecuación (AII.11).

Combustible	a'' (kW/m)	b'' (-)
Gasóleo	53,64	0,474

La fracción de llama luminosa, x_{lum} , se calcula mediante la ecuación (AII.12), cuyos parámetros se indican en la tabla AII.4. El modelo establece que el efecto de bloqueo

del humo se mantiene constante hasta los 5 metros de diámetro (x_{lum} no varía), y que, a partir de este valor, dicho bloqueo aumenta con el diámetro del incendio hasta los 20 metros (x_{lum} decrece); finalmente, también establece que, a partir de estos 20 m, el incendio está totalmente obscurecido por el humo (x_{lum} es cero).

$$x_{lum} = \begin{cases} c'' & D \leq 5 \\ d'' D^{e''} - f'' & 5 \leq D \leq 20 \\ 0 & D > 20 \end{cases} \quad (\text{AII.12})$$

Tabla AII 4 Valores de los parámetros para la ecuación (AII 12)

Combustible	c'' (-)	d'' (m ¹)	e'' (-)	f'' (-)
Gasóleo	0,45	2	-0,44	0,53

Al juntar las ecuaciones (AII.10), (AII.11) y (AII.12), se obtiene un modelo que determina que el poder emisor medio de la llama, E , crece hasta los 5 metros de diámetro, decrece entre los 5 y los 20 metros, momento en el cual alcanza el valor mínimo (igual a E_{soot}) que se mantiene ya para cualquier incendio de tamaño superior.

AII.6 Modelo E-FRAC_RAD

Este método, también desarrollado por Muñoz [MUÑO 2005], consiste en utilizar la ecuación (AII.7) para calcular el poder emisor medio total de la llama. El modelo se basa en la observación de que los valores experimentales de η_{rad} obtenidos son más adecuados para dicha predicción, al haber sido determinados a partir de datos de flujo de calor a una distancia menor de la fuente emisora.

La fracción irradiada, η_{rad} , a emplear en el modelo, obtenida a partir de la observación experimental de los experimentos de esta tesis, se determina, tanto para el gasóleo como para la gasolina, según:

$$\eta_{rad} = \begin{cases} 0,158 D^{0,15} & D \leq 4 \\ 0,436 D^{-0,58} & D > 4 \end{cases} \quad (\text{AII.13})$$

Por lo tanto, también este modelo establece un diámetro límite, antes del cual el poder emisor medio total de la llama crece y después del cual, dicho poder emisor decrece.

