

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



T 06 / 51
14 00 642 847



Biblioteca Rector Gabriel Ferrate
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

*A Isabel,
mis padres,
y mi abuela*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al Profesor Joaquim Casal el haberme aceptado en su grupo de investigación y dado la posibilidad de realizar la presente tesis doctoral. Agradezco también a mi tutor, el Profesor Josep Arnaldos, la ayuda proporcionada durante la escritura de la tesis y el esfuerzo adicional al tener que trabajar con un doctorando de nacionalidad extranjera. Además, quisiera agradecer a todos los otros profesores y colaboradores del CERTEC que directamente o indirectamente han colaborado a desarrollar este trabajo: la Profesora Eulalia Planas, el Profesor Juan Antonio Vilchez, el Profesor Jesús Quintela y Sergi Carol.

Quiero dar gracias a todos mis compañeros del CERTEC, con los cuales he compartido estos años: Alba, Ana, los Andreas, Elsa, Iván, Luis, Jordi, Mercedes, Miguel, Pau, Rosa Mari, Sergio y Yolanda, y de los que ahora probablemente me olvido. A Rosa Mari agradezco su enorme simpatía y a Yolanda su amistad y su apoyo en algunos momentos difíciles.

A Miguel le debo un GRACIAS con letras mayúsculas por todo lo que me ha enseñado en este tiempo, por su ayuda insustituible durante la realización de los ensayos experimentales, por los mates, pero por encima de todo por su amistad, ya que, gracias a ella, ha soportado y resuelto mis dudas durante casi cuatro años y durante la escritura de mi tesis. Quiero agradecer a Andrea Ronza, de cuya amistad espero gozar por muchos años más y con el cual he madurado en este tiempo, el haber compartido con él la experiencia de vivir en el extranjero.

Por lo que se refiere a la realización de los experimentos efectuados en esta tesis, agradezco la ayuda recibida de, además del Profesor Joaquim Casal por su enorme trabajo, Adolfo Peña y Joan Manyà, el primero en la fase de ejecución de los ensayos y el segundo en el proceso de puesta en marcha de la instalación. Agradezco también al Ministerio de Ciencia y Tecnología la concesión de la financiación que ha permitido la realización de la campaña experimental (Proyecto nº PPQ2002-00572) y la oportunidad de efectuar una estancia en el Instituto Federal para la Investigación y Ensayo de Materiales (BAM) de Berlín. Les doy las gracias a los Profesores Willi Hansel y Ulrich Krause por haberme aceptado en su grupo de investigación, y a todos sus colaboradores, de manera especial a Sven Radzewitz, por su tenacidad y sus ideas.

Agradezco de manera especial al Profesor Bulent Kozanoglu, de la Universidad de las Américas, el compartir conmigo su experiencia en el campo de la transferencia de calor, haciendo posible el desarrollo del modelo matemático presentado en esta tesis.

No puedo terminar sin dejar de agradecer a mi familia (mis padres y mi abuela) su continuo soporte, que en ningún momento se ha visto limitado por la lejanía.

Por último y de forma muy especial, a quien más debo agradecer es a Isabel, por haberme animado siempre, aguantado, haberme dado confianza en mi mismo en los momentos en que más me faltaba; y sobre todo, gracias por los sacrificios hechos para hacer que nuestra relación funcionara a distancia.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Incendios	2
1.2	Características de las llamas difusivas	9
1.3	<i>Boilover</i>	11
1.4	Objetivos de la tesis	15
2	ANTECEDENTES	17
2.1	Introducción	17
2.2	Velocidad de combustión	17
2.3	Geometría de la llama	30
2.4	<i>Boilover</i>	39
3	INSTALACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL	57
3.1	Ubicación de la instalación experimental	57
3.2	Descripción general	59
3.3	Sistemas de medida	67
3.4	Sistema de adquisición de datos	81
3.5	Software	87
3.6	Combustibles utilizados	90
3.7	Diseño y metodología experimental	91
4	<i>BOILOVER</i>: PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS Y EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN Y LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN	97
4.1	Identificación del fenómeno	97
4.2	Parámetros característicos	100
5	EFECTO DEL <i>BOILOVER</i> SOBRE LA GEOMETRÍA DE LA LLAMA Y LA RADIACIÓN EMITIDA	127
5.1	Metodología de medida de la longitud de la llama	127
5.2	Adquisición de los datos	129
5.3	Análisis cualitativo de la longitud de la llama	133
5.4	Determinación de una correlación para el cálculo de la longitud de la llama	137
5.5	Inclinación de la llama	147
5.6	Frecuencia de pulsación	149
5.7	Modelo para el cálculo de la radiación incidente y estimación de las distancias de seguridad durante el <i>boilover</i>	153

6	EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CAPA LÍQUIDA.....	165
6.1	Evolución de la temperatura con el tiempo	165
6.2	Distribución de la temperatura en la capa de líquido	173
6.3	Discusión final	186
7	MODELADO DEL FENÓMENO <i>BOILOVER</i>	189
7.1	Modelado del <i>thin layer boilover</i>	189
7.2	Extensión del modelo al <i>hot zone boilover</i>	199
7.3	Velocidad de las corrientes convectivas en función de la temperatura de ebullición y del espesor inicial de combustible.....	208
8	CONCLUSIONES / <i>CONCLUSIONS</i>.....	211
	NOMENCLATURA	219
	BIBLIOGRAFÍA	225
	ANEXO I VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN.....	235
AI.1	Metodología de cálculo	235
AI.2	Identificación de las fases del incendio	238
AI.3	Análisis del periodo estacionario.....	240
AI.4	Correlación experimental	245
	ANEXO II CORRELACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL PODER EMISIVO.....	249
AII.1	Modelo E-SHOKRI.....	249
AII.2	Modelo E-MUDAN	250
AII.3	Modelo E-REW_MOD	250
AII.4	Modelo E-TNO/EFFECTS.....	251
AII.5	Modelo E-MUÑOZ.....	252
AII.6	Modelo E-FRAC_RAD.....	253
	ANEXO III CALOR DE RETROALIMENTACIÓN.....	255
AIII.1	Discusión de los resultados	256

1 INTRODUCCIÓN

Como muestran todos los análisis históricos llevados a cabo en los últimos años, la incidencia de los incendios en la industria química es muy elevada; en, aproximadamente, un 30% de los accidentes ocurridos en instalaciones industriales y en el transporte de sustancias peligrosas se produjo incendio. Entre los diferentes tipos de incendios, los *pool fires* (incendios de balsa en la literatura anglosajona) resultan muy importantes por la frecuencia y el posible daño sobre personas e instalaciones [CHA1 2001].

El *boilover*, fenómeno que puede suceder en incendios de balsas en los cuales el combustible queme sobre una capa de agua, puede tener consecuencias trágicas; el ejemplo más grave es el accidente de Tacoa, Venezuela, de diciembre de 1982, en el cual hubo 154 muertos, más de 500 heridos y unos 40000 evacuados [MHID 2004].

En la presente Tesis Doctoral se propone mejorar el conocimiento del *boilover* y, en general, de los incendios de balsa de hidrocarburos a gran escala, mediante experimentación que permita medir los parámetros fundamentales para el modelado del fenómeno.

El trabajo se ha desarrollado en el CERTEC (Centre d'Estudis del Risc Tecnològic), centro de investigación dirigido por el profesor Joaquim Casal Fàbrega, el cual está ubicado en el departamento de Ingeniería Química (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona) de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya).

El CERTEC desarrolla su investigación, desde 1991, en el campo del análisis de riesgo y del impacto ambiental, con específico interés en los incendios de balsa de hidrocarburos, incendios forestales e infraestructuras portuarias.

Por lo que se refiere a los incendios de balsa, el centro dispone de una instalación específica en la cual, hasta la fecha, se han llevado a cabo tres campañas experimentales. La instalación y la metodología experimental se detallan en el capítulo 3.

A continuación, se realiza una presentación general de los principales tipos de incendios que pueden producirse en la industria química. Destacando la sección dedicada al *boilover*, siendo el estudio de dicho fenómeno el principal objetivo del presente trabajo.

1.1 Incendios

En la industria de proceso existen tres tipos de escenarios accidentales:

- escenarios que determinan efectos peligrosos de tipo térmico (incendios);
- escenarios que determinan efectos mecánicos (explosiones);
- escenarios que determinan efectos químicos (dispersión de producto tóxico).

Pese a que su radio de acción es generalmente limitado, los efectos de un incendio pueden ser terribles, ya que la radiación térmica desprendida puede afectar a otras partes de una planta, generando situaciones accidentales de mayor alcance, como explosiones u otros escapes e incendios —*efecto dominó*—. Las diferentes posibilidades de incendio se presentan en la figura 1.1 [CASA 1999]:

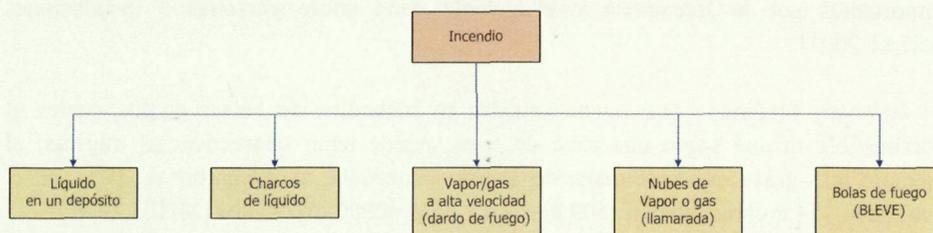


Figura 1.1. Distintas posibilidades de accidente grave con fuego.

En el análisis de riesgo es frecuente clasificar los incendios según el estado físico del combustible, mejor dicho, del sustrato que genera los vapores que alimentan la llama. El esquema de la figura 1.2 resume los accidentes generados por un sustrato líquido o gaseoso, sin considerar los incendios originados por ignición de sólido, menos comunes en la industria química.

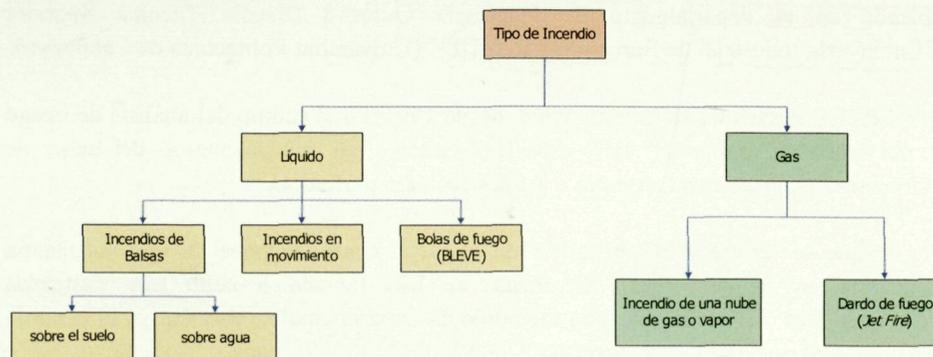


Figura 1.2. Clasificación de los incendios por el estado físico del combustible.

Hay que destacar que dicha categorización resulta muy rígida, ya que los escenarios accidentales no tienen por qué desarrollarse separadamente. Sin embargo, el esquema de

la figura 1.2 tiene en cuenta todas las posibles situaciones de incendios en la industria química y, por lo tanto, se utilizará en los siguientes apartados.

1.1.1 Incendios de líquido

Cuando se produce un derrame de líquido, se pueden generar diferentes tipos de incendio, dependiendo del tipo de fuga y del entorno en el cual se desarrolla el suceso:

- incendios de balsa al aire libre;
- incendios de balsa sobre el mar;
- incendios en movimiento;
- bolas de fuego.

Incendios de balsa al aire libre

Un incendio de balsa (*pool fire*) se define como un incendio en el cual el sustrato en combustión está en posición horizontal. Los incendios de balsas al aire libre se originan al producirse una fuga o un vertido de un combustible líquido sobre el suelo y al exterior. En el caso en que haya ignición, se producirá un fuego, con llamas de tipo difusivo (es decir, sin premezcla de aire y combustible), muy afectado por el tipo de fuga. En efecto, si la fuga es instantánea, el líquido se desparramará hasta encontrar un obstáculo, natural o artificial, o hasta que el combustible se quemara totalmente. En cambio, si el escape es continuo y no hay barreras, el tamaño de la balsa crecerá hasta un punto en el cual la velocidad de combustión iguala el caudal del vertido; es decir, se alcanza una situación de equilibrio, con un diámetro constante hasta que no se pare la fuga. Cuando el líquido queda retenido en un recipiente o en un área protegida, el desarrollo del fuego no está tan afectado por el carácter de la fuga.

El mecanismo que regula la combustión es de retroalimentación; el líquido recibe calor por radiación y convección desde la llama y gana o pierde calor por conducción a través del suelo y de las paredes de la balsa.

En la figura 1.3 se presenta una foto de un incendio de balsa al aire libre, realizado en la instalación experimental del CERTEC.

Se puede observar como la combustión no es completa, con producción de una enorme cantidad de humo, que absorbe parte de la radiación desprendida por la llama. En general, por lo menos para grandes diámetros, todos los combustibles dan llamas difusivas con gran cantidad de humo; sin embargo, se ha observado que algunos alcoholes originan una combustión completa [COTT 1989].



Figura 1.3. Incendio de balsa al aire libre.

El factor que más influye sobre el desarrollo de un incendio de este tipo es el tamaño de la balsa, siempre expresado en términos de diámetro equivalente [SCAN 1992]. En la revisión bibliográfica presentada en el capítulo 2, se pondrá en relevancia dicho aspecto.

Incendios de balsa sobre el mar

Históricamente son muy numerosos los casos de accidentes que han involucrado el vertido de combustible en la superficie del mar. Este tipo de escenario, que se produce como consecuencia de fugas en buques o plataformas petrolíferas, es muy similar al precedente, por lo que se refiere a las características del incendio. Sin embargo, las pérdidas de calor por convección hacia el agua pueden bajar la temperatura del combustible y reducir la evaporación (y consecuentemente la velocidad de combustión) tanto que, en algunas situaciones, la llama no puede autosustentarse. El comportamiento descrito no es válido en el caso en que se queme un combustible criogénico; en esta situación, el calor transferido por convección desde el agua hacia la mancha de combustible puede llegar a igualar la transferencia de calor desde la llama. Según algunos estudios [MUDA 1984], la velocidad de combustión de un líquido criogénico en el mar puede llegar a ser dos veces superior que en el caso de un incendio de balsa sobre el suelo.

Si la ignición no sigue inmediatamente al vertido, la mancha de combustible, siendo en general no confinada, se va expandiendo. Consecuentemente, su espesor disminuye, hasta ser tan pequeño como para no permitir la ignición; estudios relativamente actuales, sitúan el espesor mínimo para que haya ignición en 1,25 mm [SCAN 1992]. Los mismos estudios han mostrado que un incendio sobre el mar se extingue cuando el espesor de la capa de combustible desciende por debajo de 0,8 mm.

En el caso de vertidos sobre el mar, el combustible, para poderse incendiar, tiene que encontrarse a una temperatura superior a la de inflamabilidad (*flash point*), siempre y cuando no esté presente una fuente externa que lo caliente hasta tal punto. El modelado de este escenario accidental es muy complejo, sobre todo por causa del viento y a las corrientes marinas, que dificultan la ignición y varían notablemente la forma de la balsa. Además, las características del combustible cambian significativamente con el tiempo, debido a envejecimiento y posibilidad de formación de emulsiones con agua.



Figura 1.4. Incendio de balsa sobre la superficie del mar.

Incendios en movimiento

En el caso en que se produzca un vertido sobre un terreno con pendiente y que el combustible encuentre un punto de ignición, se origina un incendio en movimiento. En esta situación, el incendio se desplaza, consecuentemente, al deslizarse el mismo líquido, y crea una situación muy peligrosa, ya que en poco tiempo el fuego puede llegar a cubrir una superficie muy amplia, aumentando notablemente los riesgos asociados.

El comportamiento es similar a un incendio de balsa, debido a que las llamas son difusivas y se autosustentan mediante un mecanismo de retroalimentación. Sin embargo, este tipo de escenario es muy poco conocido; en la escasa literatura al respecto, la única consideración que merece destacar, es que para apagar un incendio en movimiento, se

necesita una mayor cantidad de material extintor a paridad de combustible [CASA 1999].

Bolas de fuego

Una bola de fuego —*fireball* en la literatura anglosajona— puede ser definida como la combustión rápida y turbulenta de una esfera ascendente de combustible. El suceso desencadenante de una bola de fuego puede ser un incendio de balsa que envuelva un tanque a presión o un incendio de chorro que incida sobre el depósito; en esta situación, puede ocurrir un BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*). El calor aportado aumenta la temperatura en el interior del depósito y, consecuentemente, la presión interna, hasta llegar a un momento en el cual las paredes del tanque ceden por ruptura mecánica, explotando dicho tanque. La despresurización a la cual se somete el líquido, que se encuentra en un estado de sobrecalentamiento (es decir, una temperatura a la cual no podría existir a presión atmosférica), provoca una vaporización brutal de parte del mismo, debido a un proceso de nucleación espontánea, generando una mezcla bifásica líquido-vapor. La subida extraordinaria de volumen del líquido, al vaporizarse, provoca una onda de presión que lanza fragmentos del recipiente hasta distancias de centenares de metros.

En el caso en que la sustancia contenida en el recipiente no sea inflamable, el fenómeno se clasifica simplemente como BLEVE, y los efectos son mecánicos (explosión y proyección de fragmentos); por ejemplo, el estallido de una caldera de agua. Por el contrario, si la sustancia es inflamable, la masa de líquido y vapor en el momento de la explosión se incendia, originando una bola de fuego que, en los primeros instantes, tiene forma hemisférica y tiende a moverse hacia el suelo. Esta masa inicialmente solo puede quemar en su superficie, ya que su parte interior, muy rica en combustible y prácticamente sin aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad. Posteriormente, cuando la turbulencia propia del incendio excede la expansión inicial de la bola de fuego, el aire entra en la masa de combustible y, a la vez, la radiación hace evaporar las gotas de líquido, calentando el conjunto. El proceso conlleva un aumento de la masa encendida, que va tomando una forma esférica y va ascendiendo, originando el perfil característico de una explosión nuclear (figura 1.5).

Las bolas de fuego pueden alcanzar dimensiones de centenares de metros, implicando también el desprendimiento de una radiación térmica muy fuerte. Debido a la breve duración del fenómeno (entre 5 y 30 segundos), la radiación, aunque es enorme, normalmente no produce daños estructurales graves a casas y edificios. Sin embargo, si puede perjudicar gravemente a las personas: el caso histórico más grave de BLEVE-*fireball* ocurrió el día 19 Noviembre de 1984 en San Juan Ixhuatepec, Mexico DF, cuando la ruptura de un tanque de GLP produjo una bola de fuego que causó aproximadamente 500 muertos [LEES 1996].

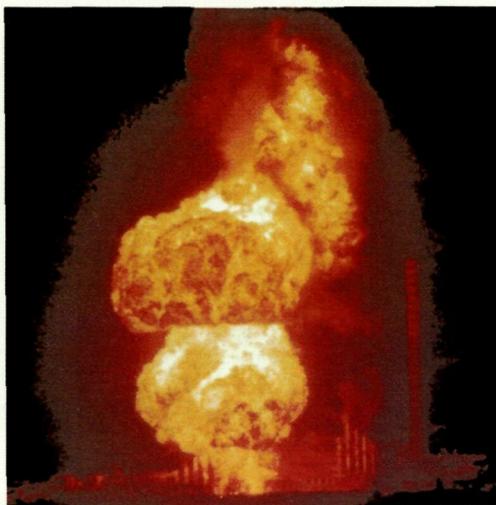


Figura 1.5. Bola de fuego.

1.1.2 Incendios de gas

Los incendios que se pueden producir como consecuencia de una fuga de combustible gaseoso, se distinguen en dos tipos:

- incendio de un chorro de gas (*jet fire*);
- incendio de una nube de gas.

Incendio de un chorro de gas

Cuando una fuga de vapores o gases inflamables a presión tiene contacto con una fuente de ignición, se genera un incendio de chorro de gas (figura 1.6). La situación puede presentarse por ruptura de una tubería en áreas de proceso o depósitos de almacenamiento. Por otro lado, también es un *jet fire* lo que se produce en antorchas, las cuales se suelen dividir en dos clases:

- Antorchas de producción: sirven para la eliminación de los gases que se generan durante la extracción del petróleo.
- Antorchas de proceso: se utilizan para eliminar los productos no deseados o los gases emitidos a través de las válvulas de seguridad en refinerías o plantas petrolquímicas.

Las características de las dos situaciones (incendios de chorro accidentales y provocados) son las mismas; la única diferencia es que, en el caso de un incendio controlado, los gases salen a través de una válvula y, consecuentemente, pueden alcanzar velocidades supersónicas.



Figura 1.6. Jet fires.

En un *jet fire* no hay retroalimentación de la llama y, por lo tanto, la cantidad de gas que sustenta la llama depende únicamente de las características de la fuga, es decir, del tipo de combustible y del caudal de salida.

La peligrosidad de un incendio de chorro accidental reside en la posibilidad de *efecto dominó*, es decir, la propagación del accidente a otras instalaciones cercanas. Por otro lado, en el caso de antorchas, el problema principal en términos de seguridad es la radiación; se han elaborado diversos modelos para estimar distancias de seguridad mínimas para evitar la incidencia de dichas antorchas sobre unidades de proceso cuando éstas entran en funcionamiento [MUDA 1988, CASA 1999].

Incendios de una nube de gas

Este tipo de incendio ocurre cuando una fuga de gas o vapor inflamable genera una nube que, antes de dispersarse completamente, tiene contacto con una fuente de ignición, produciendo una llamarada (*flash fire*). Si la nube contiene una cantidad de combustible suficiente, la situación anterior se describe en la literatura anglosajona como *Unconfined Vapour Cloud Explosion* (UVCE), ya que, inmediatamente después de producirse la ignición, la nube explota. Esta es la situación que puede ocurrir en caso de escapes de GNL (Gas Natural Licuado) o de GLP (Gas Licuado de Petróleo).

No es siempre fácil distinguir entre explosión e incendio de una nube de gas. Sin embargo, se puede decir que en el segundo caso los efectos de la presión pueden considerarse despreciables, siempre que no existan obstáculos al propagarse el frente de llama, el cual se mueve desde el punto de ignición hacia el punto de fuga, a través de las zonas que se encuentran entre los límites de inflamabilidad. Consecuentemente, en el caso en que el vertido que origina la nube de gas provenga de un tanque, existe la posibilidad de originar un *pool fire*, debido al retroceso de la llama.

1.2 Características de las llamas difusivas

Los incendios de balsa de hidrocarburos a cielo abierto pertenecen a la categoría que originan llamas de tipo difusivo turbulento. La palabra “difusión” se usa porque el comburente (el aire en la mayoría de los casos) y el combustible (los vapores procedentes de la superficie del sólido o del líquido que está quemando o que salen de un quemador en el caso de un combustible gaseoso) entran en contacto o difunden en una región del espacio donde ocurren rápidamente las reacciones químicas. La luminosidad que resulta es la llama.

Las llamas difusivas se diferencian de las de premezcla porque estas últimas se producen cuando el combustible y el comburente entran en contacto y se mezclan antes de ser enviados a un quemador, donde ocurre la reacción de combustión. Este tipo de llamas, muy común en antorchas de proceso, son calientes, poco luminosas, geoméricamente estructuradas y van acompañadas por una reducida cantidad de humo, contrariamente a las llamas difusivas, la cuales son altas, más frías, muy luminosas y geoméricamente irregulares. Además, las llamas difusivas se mueven hacia arriba con un movimiento caótico y desordenado y generan grandes cantidades de humo. En general, se puede afirmar [MCCA 1988] que, si una cantidad de combustible quema después de una premezcla con el comburente, se obtiene una pequeña masa de gas muy caliente, mientras si la misma cantidad de combustible quema mediante un incendio natural (difusivo), se genera una gran masa de gas más frío. El producto entre la masa de los gases generados y su temperatura es, en ambos casos, comparable y es igual al contenido energético propio del combustible, si se asume unitaria la eficacia de combustión, la cual es igual a la relación entre la energía total desprendida durante la combustión y el contenido energético propio del combustible. Lo que no se quema totalmente representa una disminución de la eficacia de combustión; entonces, la formación de productos que no sean los productos finales de combustión (vapor de agua o CO_2), como CO u hollín, son índices de una menor eficacia de combustión. Los incendios de tipo difusivo se caracterizan por una baja eficacia de combustión.

La energía desprendida por un incendio se puede dividir en dos contribuciones: energía desprendida por convección y por radiación. La contribución convectiva se debe a la temperatura de las llamas y se manifiesta bajo forma de gases calientes que suben por encima del incendio. La contribución radiante se manifiesta bajo forma de calor que puede ser percibido también sin tocar las llamas. En general, las llamas difusivas desprenden mucho más calor radiante que las llamas de premezcla y, por lo tanto, poseen una contribución convectiva menor. La luminosidad de la llama es, generalmente, proporcional a la cantidad de energía desprendida por radiación; en llamas difusivas de dimensiones razonables, la energía de radiación se debe a las partículas de hollín incandescentes, constituidas principalmente por productos intermedios de la pirolisis del combustible.

El movimiento ascendente de las llamas difusivas se debe exclusivamente al empuje de flotación, en cuanto que el caudal de los vapores de combustible en el interior de la llama, justo por encima de la superficie del combustible, es demasiado bajo para que la cantidad de movimiento asociada ejerza un efecto apreciable sobre el comportamiento de las llamas.

Al crecer el diámetro de la balsa y la velocidad de consumo del combustible, la estructura de las llamas se caracteriza por un grado más elevado de turbulencia que, a su vez, influye sobre el proceso de mezcla y combustión. Para incendios de diámetro superior a 1 m, las llamas generadas son totalmente turbulentas y para incendios del orden de decenas de metros, las llamas están, casi en su totalidad, cubiertas por humo y la zona luminosa aparece solo intermitentemente en el penacho de dicho humo. Sin embargo, también en este tipo de incendios, se nota la presencia de una zona continua de llama luminosa persistente, inmediatamente por encima de la superficie de líquido, como fue observado por McCaffrey [MCCA 1979]. McCaffrey, en el antedicho trabajo, mostró como un incendio natural se puede dividir en tres regiones diferentes, descritas a continuación:

- **Zona de llama continua:** es la región inferior del incendio, donde solo una pequeña parte de oxígeno puede penetrar. Se trata, por lo tanto, de una zona poco reactiva, muy rica en combustible y de productos intermedios procedentes de la pirólisis. Dicha zona, que ocupa aproximadamente el 20-30 % de la altura media de la llama, es sencillamente identificable por ser más brillante y estar caracterizada por una forma, estructura y temperatura constante (aproximadamente 900 K). McCaffrey también observó como en esta zona el flujo de vapores que dejaban el lecho de combustible tenía una velocidad prácticamente nula; posteriormente, dicha velocidad aumentaba proporcionalmente a la raíz cuadrada de la altura, desde la superficie del combustible, donde era medida.
- **Zona de llama intermitente:** es la región superior del incendio, caracterizada por una llama pulsante y turbulenta. En esta región ocurre la mayor parte de la reacción de combustión y se genera la mayor parte de calor y de los productos finales e intermedios. El carácter fluctuante se debe a la continua formación de vórtices, a causa del arrastre de aire producido por la inestabilidad entre la columna de fuego y el ambiente de alrededor. Los vórtices progresivamente crecen y ascienden, definiendo el límite superior de la llama, hasta que no haya más combustible por quemar o que la temperatura sea demasiado baja como para haber combustión. En este momento el vórtice se desprende de la columna y desaparece, dejando subir el vórtice siguiente, cuyo extremo superior va a definir los nuevos límites de la llama. McCaffrey registró que, en esta región del incendio, la temperatura decrece linealmente con la altura, mientras que la velocidad de los gases se establece alrededor de un valor constante.
- **Penacho de humos:** es la zona más alta del incendio y es visible sólo en el caso de que los humos no sean transparentes. En el penacho de humo no ocurren reacciones químicas y hay una renovación de aire frío que penetra desde el exterior, llevando a una caída exponencial de temperatura.

Como consecuencia de todo ello, la columna de fuego oscila verticalmente con una frecuencia que disminuye al aumentar el diámetro del lecho de combustible [PAGN 1989, BEJA 1991]. Este comportamiento pulsante característico de las llamas difusivas, indicado en la literatura inglesa como *shedding* o *flickering*, conlleva la necesidad de determinar una definición de longitud de llama. En el presente estudio, se ha utilizado el concepto de intermitencia, introducido por Zukoski [ZUKO 1995], que se describirá en el capítulo 5, dedicado al estudio de las características geométricas de la llama.

1.3 Boilover

Uno de los aspectos más peligrosos relacionados con los incendios de balsa es el *boilover*. Cuando un combustible líquido quema sobre una capa de agua puede ocurrir, en un determinado instante del incendio, la ebullición turbulenta de esta última, debido a la transferencia de calor procedente de la llama (*heat feedback*). El fenómeno se conoce, en la literatura anglosajona, como *boilover* y se puede presentar en dos tipologías distintas:

- *hot zone boilover*;
- *thin layer boilover*.

En ambos casos, para medir la entidad del fenómeno se utiliza un parámetro nombrado *intensidad de ebullición* (*boilover intensity*), que expresa el incremento (o la eventual disminución) de la velocidad de combustión respecto al periodo estacionario del incendio. La definición de la intensidad de ebullición no es unívoca y, en este estudio, se utilizará la siguiente:

$$I_b = \left(\frac{\dot{m}_b - \dot{m}_s}{\dot{m}_s} \right) \cdot 100 \quad (1.1)$$

Tal como muestra la ecuación (1.1), la intensidad de ebullición se define como el incremento porcentual de la velocidad de combustión durante el *boilover* respecto al valor medio del periodo estacionario. En el capítulo 4, para evaluar la influencia del *boilover* sobre la radiación desprendida por la llama, se utilizará la *intensidad de radiación* definida por:

$$I_{b,rad} = \frac{\dot{q}_b}{\dot{q}_s} \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) representa, por lo tanto, la relación directa entre el flujo de calor recibido por un objeto a una distancia determinada de la llama, durante el *boilover* y durante el estado estacionario.

A continuación, se hace una breve descripción del *boilover* en sus dos formas. En el capítulo 2, se presentará con más detalle cual es el grado de conocimiento del fenómeno hasta la fecha.

1.3.1 *Hot zone boilover*

Esta tipología de *boilover* puede producirse durante el desarrollo de un incendio de balsa, caracterizado por un gran espesor de combustible que quema sobre un sustrato acuoso. Esta es la situación que puede presentarse en incendios de larga duración en depósitos de almacenamiento de crudo, donde el agua contenida, debida a la limpieza de dichos depósitos, con la mezcla de hidrocarburos se estratifica en el fondo del tanque. El fenómeno se manifiesta en una violenta expulsión de agua y combustible en forma de una espuma inflamada hacia el exterior del recipiente, con un aumento considerable de la altura y de la radiación desprendida por la llama.

A partir de los estudios llevados a cabo hasta la fecha, se deduce que, para que pueda ocurrir el fenómeno, se requiere la formación de una capa isotérmica de combustible a elevada temperatura (*hot zone*) y, por eso, a menudo se habla de *hot zone boilover*.

En la figura 1.7 se muestran los posibles perfiles de temperatura de líquido en un incendio en un depósito de almacenamiento, para un combustible que no origina *hot zone* (a) y uno que la genera (b).

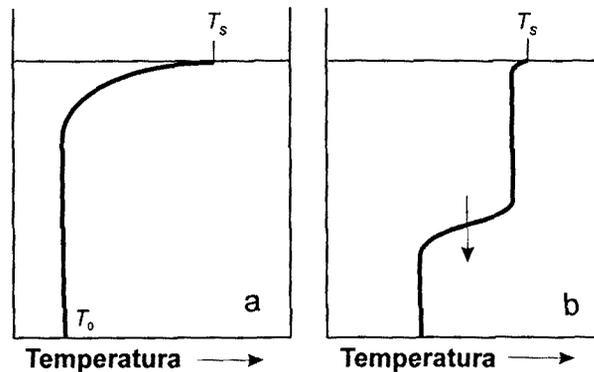


Figura 1.7. Perfil de temperatura en combustibles que no generan (a) y que generan (b) *hot zone*.

Se observa como, en el primer caso, la temperatura se eleva solo en la proximidad de la superficie, cuanto más profundidad la temperatura es igual a la temperatura inicial del combustible (T_0); en esta situación el agua no podrá alcanzar la temperatura de ebullición. Por el contrario, en el segundo caso, la temperatura llega a tener valores superiores a la temperatura inicial del combustible a mayor profundidad, debido a la propagación, mediante una onda de calor (*heat wave*), del frente de la capa isotérmica hacia el fondo del depósito.

Entonces, si:

- a) la temperatura de la capa isotérmica es superior a la de ebullición del agua (mayor que 100 °C, debido a la presión hidrostática), y
- b) la velocidad de propagación de la onda de calor es superior a la velocidad (lineal) de combustión [KOSE 1994],

en un determinado instante, la onda de calor alcanza el agua, la cual entra en ebullición, con la consecuente nucleación de burbujas de vapor, que puede ser homogénea o heterogénea. La nucleación homogénea ocurre en el interior del agua, mientras la heterogénea se produce en la interfase entre el agua y las partículas de impurezas dispersadas en el líquido. En ambos casos, como el agua se encuentra por debajo de una espesa capa de combustible, la ebullición ocurre de manera explosiva con una intensidad que depende principalmente de la geometría del tanque y de las condiciones ambientales —tensión de vapor de los dos líquidos, diferencia entre los puntos de ebullición, presión ambiente y humedad— [BROE 1995]. La violenta expulsión de burbujas de vapor de agua arrastra combustible al exterior de la balsa, siempre que éste sea lo suficientemente viscoso como para adherirse a la superficie de las burbujas. Al salir del tanque, la mezcla agua-combustible tiene contacto con la llama y quema de manera explosiva; se genera una fuerte crepitación y las dimensiones del incendio crecen.

En algunos casos las burbujas no consiguen salir inmediatamente, sino que quedan retenidas por un cierto tiempo, expandiéndose a medida que sigue la ebullición del agua. En un determinado instante son lo suficientemente grandes como para vencer la diferencia de presión y ascender. Puede ocurrir que las dimensiones de las burbujas sean notables y que entonces se produzca una enorme explosión al incendiarse; en este caso, se habla de BLEVE-*boilover*, fenómeno muy peligroso debido a su carácter fuertemente explosivo —en condiciones muy excepcionales puede hasta originarse una bola de fuego—, con la proyección de combustible inflamado a distancias considerables del tanque.

Por lo que se deduce, tras la interpretación teórica de los experimentos efectuados a partir de 1925, parece consolidado que la formación de la *hot zone* sea posible solo para los combustibles compuestos por mezcla de hidrocarburos con temperaturas de ebullición muy diferentes entre sí. El mecanismo de formación aún no ha sido establecido con precisión, pero es probable que involucre una evaporación selectiva de las fracciones ligeras. Hall propuso que la *hot zone* se genera por migración continua de los componentes ligeros a la superficie, seguida por una destilación [HALL 1925]. Burgoyne y Katan sugirieron que las fracciones ligeras volatilizan en la interfase *hot zone*-combustible frío y de forma sucesiva ascienden a la superficie [BURG 1947]. El mecanismo propuesto por Blinov y Khudiakov [BLIN 1961] prevé que la mezcla del hidrocarburo está provocada por la transferencia de calor a través de las paredes de la balsa; esto implica que la formación de la *hot-zone* depende del diámetro, contrariamente a cuanto se ha observado experimentalmente.

Pese a las dificultades encontradas en la caracterización del fenómeno se puede afirmar que, para que se produzca un *hot zone boilover*, se requieren las siguientes condiciones:

- presencia de agua;
- formación de una zona a elevada temperatura que se propaga hasta el fondo del tanque;
- el combustible debe ser lo suficientemente viscoso, como para dificultar el paso del vapor y ser arrastrado por él hacia la llama.

El caso histórico más grave de *boilover* es posiblemente el de Tocoa, Venezuela (19 de diciembre 1982), como ya se ha indicado anteriormente. En un tanque de almacenamiento de una mezcla de hidrocarburos, utilizada como combustible en una central térmica, se produjo un incendio, debido a una explosión provocada por unos operarios que trabajaban en el techo del depósito. Después de 6 horas de lucha contra el fuego, se produjo un *boilover* que proyectó el contenido del tanque a centenares de metros en todas las direcciones. El desconocimiento del fenómeno hizo que en el área estuvieran presentes muchas personas (bomberos, periodistas, y curiosos). Además, el terreno accidentado benefició la propagación del incendio; en total, como también ya se ha indicado, hubo 154 muertos, más de 500 heridos y unos 40000 evacuados.

1.3.2 *Thin layer boilover*

En el caso en que el espesor de combustible que quema sea pequeño, el *boilover* también puede ocurrir; en esta situación se habla de *thin layer boilover* o *boilover* de capa fina o delgada. El estudio del fenómeno es relativamente reciente y su interés está enfocado a los vertidos accidentales de hidrocarburos sobre el agua, normalmente en accidentes de buques petroleros en el mar. Una forma de eliminar los antedichos vertidos, utilizada desde hace pocos años, es quemando *in situ* el combustible, aunque evaluando siempre previamente el riesgo potencial de que se produzca un *boilover*. Otra posibilidad de *thin layer boilover* es por el agua que se acumula debajo del combustible que está quemando por la acción de los equipos de extinción.

El *thin layer boilover* se manifiesta en un aumento notable de las dimensiones y de la radiación de la llama, acompañado por una crepitación debida a la explosión de las burbujas de vapor cubiertas de combustible. Además, el incendio es más turbulento y puede causar vertidos accidentales. La diferencia principal respecto al *hot zone boilover* es que no parece ser necesaria la formación de una onda de calor [BROE 1992]. Debido a la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, se calienta una capa superficial de combustible de espesor constante, que transfiere calor hacia la superficie del agua situada debajo del combustible. Consecuentemente, la velocidad de propagación de esta capa superficial iguala la velocidad de combustión. En el momento en que la capa llegue a calentar el agua lo suficiente como para evaporarla, la cantidad de combustible residual es pequeña y los efectos son más reducidos. Evidentemente, para que pueda ocurrir un *thin layer boilover*, es necesario que la temperatura de

ebullición del combustible sea superior a la del agua; experimentalmente, se ha encontrado que la diferencia entre las dos temperaturas tiene que ser como mínimo de 20 °C.

Los estudios referidos al *thin layer boilover* se han realizado, generalmente, con diámetros pequeños, normalmente del orden de algunas decenas de centímetros, de manera que la transferencia de calor a través del combustible y de la interfase fuera constante. Sin embargo, los resultados obtenidos en estos trabajos podrían no tener aplicación práctica, debido a factores de escala. Por lo que se refiere al *hot zone boilover* los experimentos se han realizado con balsas de tamaño superior, de hasta 4,5 m de diámetro, pero sin realizar, muchas veces, una cuantificación apropiada de los efectos de la ebullición.

En este sentido, esta tesis propone ampliar el conocimiento del fenómeno a una escala más representativa de situaciones reales (mediante experimentos en balsas de hasta 6 m de diámetro), comparando los resultados experimentales obtenidos con los que se pueden encontrar en la literatura, analizando y, eventualmente, modificando los modelos actualmente existentes. Además, también se propone cuantificar, de manera sistemática, los efectos del fenómeno de ebullición.

Los experimentos efectuados, en principio, están pensados para estudiar el *thin layer boilover*, debido a factores económicos y de seguridad; aunque, de hecho, la frontera entre las dos tipologías de *boilover* no está todavía bien definida y se cree que los resultados obtenidos para el *boilover* de capa delgada se pueden extender al *hot zone boilover*.

1.4 Objetivos de la tesis

La presente tesis se propone como objetivo avanzar en el conocimiento del *boilover*, con especial atención al caso en que se trabaje con capas delgadas de hidrocarburos. La justificación de este trabajo surge de la necesidad, observable al examinar la bibliografía acerca del tema, de definir de forma más clara los mecanismos de formación y los efectos de este fenómeno, a una escala lo más grande posible representativa de una situación real.

En consecuencia, los objetivos específicos de la presente tesis son:

- Mejorar el conocimiento del *thin layer boilover* en incendios de balsa a gran escala, mediante la recogida de datos experimentales.
- Crear modelos que permitan estimar el comienzo del fenómeno, al fin de conocer el tiempo útil de intervención.
- Establecer una correlación que permita determinar el efecto del fenómeno sobre la velocidad de combustión.

- Establecer una correlación que permita determinar el efecto del fenómeno sobre la longitud de la llama.
- Establecer una correlación que permita determinar el efecto del fenómeno sobre la radiación desprendida hacia el exterior del incendio, para estimar como modificar las distancias de seguridad a respetar, en el caso en que se produzcan situaciones accidentales que contemplen la posibilidad de ocurrencia de *thin layer boilover*.
- Mejorar la descripción del mecanismo de formación del fenómeno, mediante el modelado matemático de la evolución de la temperatura en el interior de la capa líquida.
- Evaluar la posibilidad de extender los datos a situaciones de *hot zone boilover*, mediante la comparación con estudios previos.

2 ANTECEDENTES

2.1 Introducción

La finalidad del presente capítulo es proporcionar un resumen de los principales trabajos realizados hasta la fecha para caracterizar los incendios de balsa y, en particular, el *boilover*. La revisión bibliográfica efectuada se prevé útil para mejorar el grado de conocimiento acerca del fenómeno en estudio y para recopilar datos que puedan ser comparados con nuevas experimentaciones.

El capítulo se divide en varias secciones. Cada una de ellas se refiere a las diferentes variables que han sido examinadas durante la experimentación: la velocidad de combustión, la temperatura de llama y la geometría del incendio. A todas estas variables, hay que añadir la influencia de la velocidad del viento en el desarrollo del incendio.

Una parte destacada del capítulo se refiere a los trabajos que analizan el fenómeno de la ebullición de la capa de agua, eventualmente presente debajo del combustible. Durante la recogida de información se trató de dividir entre los estudios referidos al *hot zone boilover* y los referidos al *thin layer boilover*, a pesar de las dificultades inherentes a la diferenciación de ambos fenómenos. Especial atención se dedica a los resultados acerca de la temperatura en el interior del líquido.

Como ya se ha indicado en el capítulo 1, a partir de un análisis histórico realizado por el CERTEC [CHA1 2001], se deduce que el incendio de balsa es una de las situaciones accidentales más frecuentes en la industria química. Por este motivo, el número de trabajos publicados acerca de los *pool fires* es considerable. No obstante, durante la etapa de recopilación de información ha sido muy difícil encontrar estudios realmente útiles para la presente tesis; esto es debido a la notable variedad de las diferentes situaciones examinadas (tipo de combustible, forma y dimensiones de las balsas, etc.). En particular, hay muy pocos trabajos que hayan analizado los dos combustibles usados en las pruebas del presente proyecto —gasóleo y gasolina—, hecho que remarca la importancia del estudio.

2.2 Velocidad de combustión

Una de las primeras aportaciones al estudio de la velocidad de combustión hay que atribuirle a Blinov y Khudiakov (1957). Estos autores midieron experimentalmente la velocidad de combustión en incendios de balsas de hidrocarburos. En las pruebas, cuyos resultados se ilustran en la figura 2.1, se utilizaron balsas con diámetros comprendidos

entre 0,37 cm y 22,9 m para distintos combustibles: gasolina, keroseno, gasóleo y aceite solar [BLIN 1957].

Los resultados experimentales obtenidos por Blinov y Khudiakov fueron analizados algunos años más tarde por Hottel (1959), que dedujo que la relación entre la velocidad de combustión y el diámetro de balsa era muy similar para todos los combustibles utilizados. Como se puede apreciar en la figura 2.1, la velocidad de combustión depende del número de Reynolds [HOTT 1959].

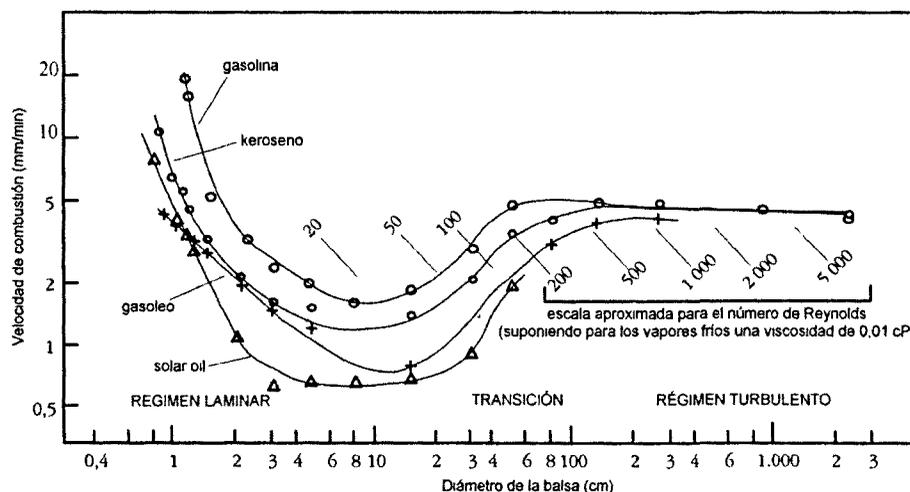


Figura 2.1. Velocidad de combustión en función del diámetro de la balsa (Hottel, 1959).

El gráfico muestra como la velocidad de combustión disminuye con el aumento del diámetro para $Re < 20$ (régimen laminar). Sin embargo, para valores del número de Reynolds comprendidos entre 20 y 200 (régimen transitorio), la velocidad de combustión aumenta con el diámetro. Finalmente, a partir de valores de Reynolds de aproximadamente 500 (régimen turbulento), la velocidad de combustión se mantiene en un valor prácticamente constante de 4–5 mm/min, independientemente del tipo de combustible utilizado.

El comportamiento de la variable analizada se puede relacionar, como ya hizo el propio Hottel, con el mecanismo de transferencia de calor, a partir del flujo de calor medio intercambiado por unidad de superficie entre la llama y la balsa, que se puede representar como la suma de tres términos diferentes:

- transferencia de calor por conducción a través de las paredes laterales de la balsa;
- transferencia de calor por convección;
- transferencia de calor por radiación.

La ecuación (2.1) define el mecanismo de transferencia de calor planteado.

$$\frac{\dot{Q}_{tot}}{\pi D^2/4} = \frac{4K}{D}(T_l - T_b) + H(T_l - T_b) + \sigma F(T_l^4 - T_b^4)(1 - e^{-kD}) \quad (2.1)$$

A partir del cociente entre el flujo de calor medio intercambiado por unidad de superficie (entre la llama y la balsa) y el calor de vaporización del combustible, se puede obtener la velocidad de combustión expresada como pérdida de masa del combustible por unidad de superficie ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$):

$$m = \left(\frac{\dot{Q}_{tot}}{\pi D^2/4} \right) / \Delta H_v \quad (2.2)$$

Durante su análisis cuantitativo, Hottel consideró constantes los coeficientes de transferencia de calor por conducción a través de las paredes y por convección — K y H , respectivamente—, el factor de vista F de la llama hacia la superficie de la balsa, la temperatura de la llama T_l y el coeficiente de extinción k . Los resultados obtenidos le permitieron deducir las conclusiones siguientes:

- En las balsas de dimensiones muy pequeñas (donde cabe atribuir un régimen laminar como controlante), el único término realmente importante es el conductivo, que es inversamente proporcional al diámetro de la balsa; esto explica porqué en esta primera fase la velocidad de combustión se reduce a medida que este diámetro aumenta.
- En balsas de dimensiones considerables (en las cuales se instaura un régimen turbulento), el término asociado a la transferencia de calor por conducción se puede considerar despreciable. Además, los términos de convección (por las hipótesis hechas) y los de radiación (porque el grupo kD es lo suficientemente elevado) se consideran constantes. Por todos estos motivos, para diámetros superiores a 1 metro, la velocidad de combustión resulta constante.
- Por último, para las balsas de dimensiones intermedias (desde 2 hasta 20-30 cm de diámetro), el mecanismo controlante es el correspondiente a la etapa de transición entre el régimen convectivo y el dominado por la radiación, con la consecuente aparición de un mínimo en la curva de velocidad de combustión en función del diámetro.

Resumiendo, el análisis de los datos experimentales de Blinov y Khudiakov llevado a cabo por Hottel, evidenció la existencia de dos mecanismos dominantes de transferencia de calor (si se excluye la primera fase de diámetros muy pequeños en la cual prevalece la conducción): un mecanismo dominado por la radiación para diámetros considerables ($D > 0,2$ m) y otro dominado por la convección para diámetros reducidos ($D < 0,2$ m). Como muestra la tabla 2.1, se pueden distinguir dos categorías diferentes de flujo en el mecanismo convectivo —laminar o turbulento— y dos clases diferentes de llamas —ópticamente delgadas o gruesas—, en el caso de que la radiación sea el mecanismo dominante.

Tabla 2.1. Mecanismo dominante de transferencia de calor en función del diámetro de la balsa.

Diámetro de la balsa (m)	Mecanismo de transferencia de calor
< 0,05	convectivo, laminar
0,05-0,2	convectivo, turbulento
0,2-1,0	radiación, llama ópticamente delgada
> 1,0	radiación, llama ópticamente gruesa ¹

A pesar de que el comportamiento para el régimen convectivo laminar no haya sido estudiado detalladamente —debido probablemente a su escaso potencial de aplicabilidad— algunos autores propusieron ecuaciones del tipo (2.3) para estimar la velocidad de combustión en función del diámetro de la balsa [BLIN 1957].

$$m = aD^{-n} + b \quad (2.3)$$

donde:

a, b = constantes características del tipo de combustible.

n = valor comprendido entre 0,1 y 1,5.

Por lo que se refiere al cálculo de la velocidad de combustión para el régimen convectivo turbulento, De Ris y Orloff (1972) dedujeron la ecuación (2.4) [DERI 1972]:

$$M^{**} = 0,15B \left[\frac{\ln(1+B)}{B} \right]^{2/3} \quad (2.4)$$

La ecuación anterior se determinó a partir de los resultados de los experimentos efectuados al final de los años 60 por Corlett [CORL 1965], experimentos que fueron llevados a cabo en una balsa de 10 cm de diámetro, con el objetivo de obtener datos en la zona correspondiente al mínimo de la curva de velocidad de combustión. M^{**} es la velocidad de combustión adimensional e igual también a:

$$M^{**} = \frac{m}{\mu_{\beta}} \left[\frac{\rho_{\gamma} v_{\gamma}^2 \text{Pr}^2}{(\rho_{\infty} - \rho_l)g} \right]^{1/3} \quad (2.5)$$

donde los subíndices indican respectivamente:

β = posición igual a un cuarto de la altura entre la superficie del combustible y la llama.

γ = posición igual a la mitad de la altura entre la superficie del combustible y la llama.

∞ = ambiente.

l = llama.

¹ Un cuerpo se dice ópticamente grueso si es casi totalmente opaco y deja, por lo tanto, pasar solo una pequeña parte de la luz que incide sobre él. Un cuerpo ópticamente delgado es, en cambio, casi completamente transparente y la luz incidente lo atraviesa prácticamente en su totalidad.

La correlación (2.4) —aplicable para un rango elevado de combustibles— muestra como la velocidad de combustión adimensional depende de otro parámetro adimensional B , correlacionado, a su vez, con las propiedades termoquímicas del hidrocarburo en cuestión y con la fuerza de empuje de la transferencia de materia.

El comportamiento de la velocidad de combustión en la zona de transferencia de calor dominada por la radiación (diámetros superiores a 1 m), ha sido estudiado con más detenimiento. Si se eliminan los términos relativos a la conducción y a la convección en la ecuación (2.1), se obtiene —suponiendo constantes la temperatura de llama T_l y el factor de vista F — la correlación siguiente [MUDA 1984]:

$$\dot{y} = \dot{y}_{\max}(1 - e^{-kD}) \quad (2.6)$$

Los valores del coeficiente de extinción k para un número notable de hidrocarburos fueron adquiridos por vía experimental en 1971 por Atallah y Allan [ATAL 1971]. Los resultados se indican en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores del coeficiente de extinción para algunos combustibles líquidos [ATAL 1971].

Combustibles	k (m ⁻¹)
Etanol	0,37
Xileno	1,2
Hexano	1,9
Gasolina	2,0
Benceno	2,6
Keroseno	2,6
Butano	2,7
Gas Natural Licuado	3,0
Metanol	4,6
Hidrógeno líquido	7,0

Entre los estudios efectuados acerca de la velocidad de combustión en régimen de transferencia de calor dominado por la radiación, sobresale el de Burgess *et al.* (1961) [BURG 1961]. Los combustibles utilizados fueron metanol, Gas Natural Licuado, hidrógeno líquido, 1,1 dimetilhidrazina (UDMH), dietilentriamina (DETA), xileno, hexano, benceno y butano. En el marco de este análisis se propuso el empleo de la correlación (2.7) para el cálculo del valor asintótico que alcanza la velocidad de combustión para diámetros suficientemente grandes.

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v} \quad (2.7)$$

La ecuación anterior, pese a su relativa sencillez, no tiene en cuenta el hecho de que la combustión podría ser incompleta, como evidencia la formación de hollín en varios incendios. Además, hay que destacar que la constante multiplicativa deriva de la

interpolación de los valores medios del grupo específico de combustibles usados en las pruebas, y, por lo tanto, podría no ser representativa de otros combustibles correspondientes a otro grupo.

Una atención particular merecen los combustibles formados por mezcla de varios componentes, ya que no muestran una velocidad de combustión uniforme: inicialmente la velocidad de combustión es consecuencia de la evaporación, y posterior alimentación de la llama, de los componentes más volátiles. A medida que avanza el incendio, la mezcla se enriquece de los componentes menos volátiles y su temperatura crece hasta valores suficientemente grandes para iniciar la evaporación de los componentes más pesados. En consecuencia, en la fase final del incendio, la velocidad de combustión estará controlada por los componentes con mayor temperatura de ebullición. En las páginas sucesivas se describen algunos de los trabajos experimentales realizados con el fin de estimar la velocidad de combustión en incendios de balsas con líquidos formados por mezclas de hidrocarburos.

En el año 1961 Grumer *et al.* realizaron una serie de experimentos con mezclas de UDMH y DETA, dos combustibles con temperaturas de ebullición muy diferentes. Los autores propusieron la utilización de la correlación siguiente [GRUM 1961]:

$$y_{\max} = 1,27 \cdot 10^{-6} \frac{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{c_i}}{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{v_i} + \sum_{i=1}^N m_i \int_{T_b}^{T_i} C_p(T) dT} \quad (2.8)$$

donde n_i y m_i son las fracciones molares en la fase vapor y líquido, respectivamente. La ecuación (2.8), si se excluyen los transitorios iniciales y finales del incendio, proporciona una buena estimación de la velocidad de combustión, expresada en mm/s, para mezclas de componentes con temperatura de ebullición muy diferentes. Por otro lado, Burgess y Zabetakis (1962) obtuvieron la ecuación (2.9) a partir de ensayos experimentales, para estimar la velocidad de combustión expresada en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [BURG 1962]:

$$m_{\max} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*} \quad (2.9)$$

donde ΔH_v^* es el calor de vaporización de la mezcla, definido por el numerador de la ecuación (2.8). La figuras 2.2 y 2.3 muestran como las ecuaciones (2.8) y (2.9) interpolan los datos experimentales. Hay que destacar que las dos expresiones son válidas en el caso en que el substrato sea el suelo: como observó Mudan [MUDA 1984], para combustibles criogénicos que queman sobre una capa de agua, la velocidad de

combustión puede alcanzar valores hasta dos veces superiores, debido a la convección de calor desde el agua hacia el combustible.

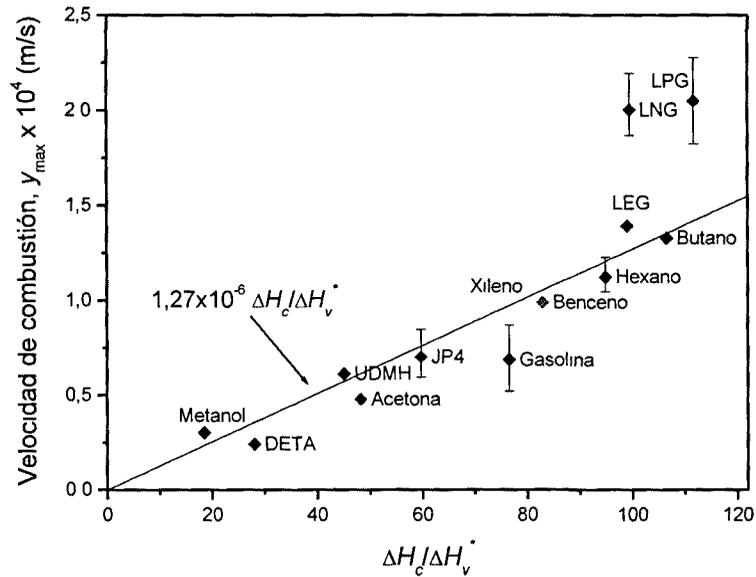


Figura 2.2 Relación entre la velocidad de combustión lineal y las propiedades termoquímicas del combustible [MUDA 1984]

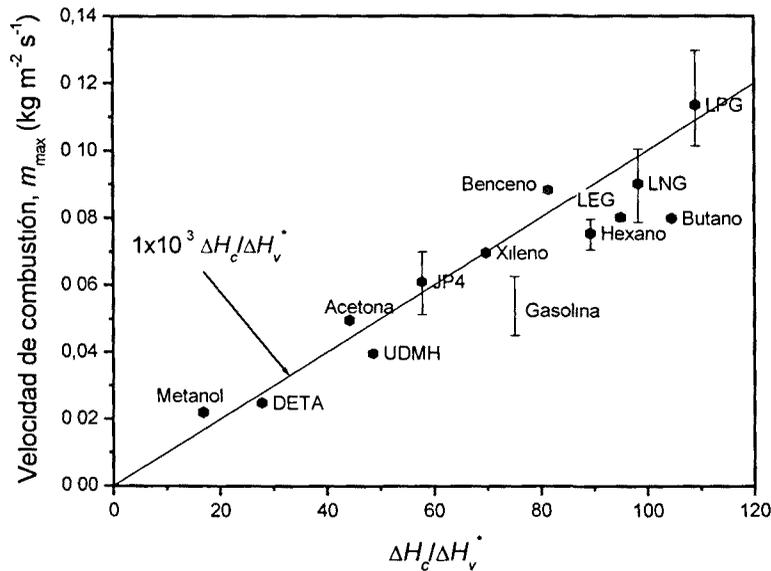


Figura 2.3 Relación entre la velocidad de combustión másica y las propiedades termoquímicas del combustible [MUDA 1984]

Un trabajo a gran escala —descrito en [YAMA 1986]— fue realizado en 1981 por Yamaguchi y Wakasa (utilizaron tanques de almacenamiento de 30, 50 y 80 m de diámetro). En el transcurso de las pruebas, en las cuales se empleó keroseno colocado sobre una capa de agua, se midió —a parte de la velocidad de combustión— la temperatura de la llama, el calor emitido en forma de radiación, la composición de los productos de la combustión y, por último, la geometría de la llama. La particularidad de esta serie de experimentos fue el empleo de una técnica novedosa para la medición de la velocidad de combustión: una videocámara sumergida filmaba la disminución de nivel de líquido y a partir de ello, se calculaba la velocidad de combustión de una manera relativamente simple (dividiendo la disminución de nivel por el tiempo de registro). Los valores obtenidos —calculados como promedio para toda la superficie del combustible— resultaron del orden de 4-7 mm/min, independientemente del diámetro de la balsa. Las grandes dimensiones de los tanques utilizados permitieron también la posibilidad de medir las variaciones locales del nivel de combustible, observando fluctuaciones de la velocidad de combustión entre 2 y 7 mm/min. Esta variabilidad fue atribuida a las oscilaciones de la superficie del líquido, consecuencia del carácter turbulento de la llama sobre la superficie.

En el año 1983 Babrauskas recopiló datos de velocidad de combustión obtenidos de trabajos experimentales previos (con diferentes combustibles en balsas de diámetro mayor de 0,2 m). A partir de un análisis semiempírico, el autor propuso utilizar la ecuación (2.10) para determinar, durante el periodo estacionario, la velocidad de combustión —expresada como pérdida de masa por unidad de superficie— en función del diámetro de la balsa y bajo condiciones de ventilación reducida [BABR 1983]:

$$m = m_{\max} (1 - e^{-k\beta D}) \quad (2.10)$$

La velocidad de combustión resultó constante a partir de, aproximadamente, 2 m de diámetro para todos los combustibles estudiados, a causa de la anulación del término exponencial:

$$m = m_{\max} = \frac{\sigma F (T_l^4 - T_b^4)}{\Delta H_v} \quad (2.11)$$

En el mismo trabajo, Babrauskas anotó en una tabla los valores de m_{\max} y del producto $k\beta$ para varios combustibles. Los resultados más interesantes se muestran en la tabla 2.3, donde se advierte que, en el caso de los alcoholes, la expresión (2.11) resultó válida para cualquier valor de diámetro en el régimen turbulento.

En el marco del proyecto FIREXP (1992), Mangiavalori y Rubino llevaron a cabo en Italia una serie de experimentos, en los cuales se utilizaron balsas circulares de diámetros comprendidos entre 1 y 6 m, y diferentes hidrocarburos (hexano, heptano,

tolueno, alcohol isobutílico y alcohol isobutílico saturado con agua) [MANG 1992]. Al margen de la velocidad de combustión, se estudiaron la geometría y el contorno térmico de la llama, la temperatura del líquido y de los gases, el poder emisor y el flujo de calor emitido. Con respecto a la velocidad de combustión, los resultados se compararon con los obtenidos por medio de la correlación de Burgess *et al.* En el análisis comparativo, se determinó un valor de $1,16 \cdot 10^6$ en lugar de $1,27 \cdot 10^6$ como coeficiente de la ecuación (2.7) y un valor de $8,64 \cdot 10^4$ en lugar de $1,0 \cdot 10^3$ como coeficiente de la ecuación (2.9). Hay que remarcar que la correlación anterior no ajustó los resultados obtenidos para el alcohol isobutílico puro ni para el saturado con agua, debido, probablemente, a las características particulares del hidrocarburo en cuestión.

Tabla 2.3 Valores de m_{\max} y del producto $k\beta$ para varios combustibles [BABR 1983]

Material	m_{\max} (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	$k\beta$
Alcoholes		
metanol	0,017	#
etanol	0,015	#
Combustibles orgánicos simples		
butano	0,078	2,7
benceno	0,085	2,7
hexano	0,074	1,9
heptano	0,101	1,1
xileno	0,090	1,4
acetona	0,041	1,9
dioxano	0,018*	5,4*
eter dietílico	0,085	0,7
Fracciones petrolíferas		
gasolina	0,055	2,1
JP-4	0,051	3,6
JP-5	0,054	1,6
fuel oil	0,035	1,7
petróleo	0,022-0,045	2,8

* Valores estimados a partir, tan solo, de dos valores experimentales

Valores independientes del diámetro en régimen turbulento

Recientemente, Rew *et al.* desarrollaron un modelo semiempírico para estimar la radiación térmica en incendios de hidrocarburos. El citado modelo se dedujo a partir de los datos experimentales disponibles hasta la fecha [REWH 1997]. Por lo que se refiere a la velocidad de combustión, se utilizó el mismo modelo de Babrauskas —ecuación (2.10)— con valores de m_{\max} y $k\beta$ ligeramente diferentes.

En el año 1998 Koseki dirigió en Japón una serie de experimentos con petróleo en balsas de 5, 10 y 20 m de diámetro [KOSE 2000]. Además de la velocidad de combustión (donde se observó una dependencia directamente proporcional con el diámetro), se midieron, durante la ejecución de las pruebas, el calor de radiación, la temperatura de la llama y la concentración de los gases emitidos.

Un año más tarde Hamins *et al.* (1999) [HAMI 1999] obtuvieron, a partir de los balances de energía en la superficie de la balsa, la ecuación siguiente para prever la velocidad de combustión (en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para los incendios de charco:

$$m = \frac{\dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{r,rad}}{A[\Delta H_v + C_p(T_s - T_b)]} \quad (2.12)$$

El CERTEC, en el marco de los proyectos FOC1 (1999) y FOC2 (2001), se ocupó de mejorar las regresiones lineales obtenidas por Babrauskas, utilizando gasóleo y gasolina en balsas de diámetro comprendido entre 1,5 y 6 m [CHA1 2001, RONZA 2002, FERR 2002]. En el presente estudio los resultados obtenidos se confrontarán con las correlaciones más significativas.

La tabla 2.4 muestra un resumen de los resultados obtenidos en experimentos efectuados en balsas de dimensiones considerables —donde la radiación es el mecanismo dominante de la transferencia de calor— y citados en anteriores trabajos, en los cuales se obtuvieron datos referidos a gasóleo o gasolina o se dedujo una correlación aplicable a estos dos combustibles. En dicha tabla se muestran, además de la velocidad de combustión, el diámetro y el tipo de combustible utilizados.

Tabla 2.4 Recopilación de valores experimentales de velocidad de combustión

Autor/Año	Diámetro de la balsa (m)	Combustibles	Velocidad de combustión máxima ($\text{m/s} \cdot 10^4$)
Blinov y Khudiakov, 1957	0,004-22,9	gasolina, keroseno, gasoleo	~ 0,67 – 0,83
Burgess y Zabetakis y otras pruebas del U S Bureau of Mines, 1962	0,07-2,4	metanol, Gas Licuado, hidrogeno, UDMH, DETA, hexano, xileno, benceno y butano	$y_{\max} = 1,27 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v}$
NWC, test de China Lake Field, Lind, no publicado	~36	gasolina	~ 0,82
Japan Institute For Safety Engineering, 1981	30-80	gasolina y keroseno sobre una capa de agua	0,8
Babrauskas, 1983	> 0,2	estudio teorico aplicable a alcoholes, disolventes puros, criogenicos, derivados del petróleo y solidos	gasolina. 0,74
Koseki, 1989	3-22,3	gasolina, keroseno, petróleo, heptano, hexano y tolueno	gasolina 0,8-1,2
Mangtjalavoti y Rubino, 1992	1-6	hexano, heptano, tolueno, alcohol isobutilico puro y saturado con agua	$y_{\max} = 1,16 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v}$

Tabla 2.4. (continuación).

Autor/Año	Diámetro de la balsa (m)	Combustibles	Velocidad de combustión máxima (m/s*10 ⁴)
Rew <i>et al.</i> , 1997	1,8-52	Gas Natural Licuado, Gas Licuado del Petróleo, hexano, heptano, petróleo, gasolina, keroseno, combustible para aviones y gasóleo	gasóleo: ~ 0,64 gasolina: ~ 0,89
Chatris, 2001	1,5, 3, 4	gasóleo y gasolina	gasóleo: 0,68 gasolina: 1,02
Ferrero, 2002 Ronza, 2002	1,5, 3, 5, 6	gasóleo y gasolina	gasóleo: 0,51-0,59 gasolina: 0,89-0,93

Al analizar la tabla anterior, se deduce fácilmente que el número de trabajos experimentales realmente útiles para el presente estudio se reduce notablemente, como consecuencia de limitar dicho estudio a balsas de grandes dimensiones (régimen turbulento) y a dos únicos combustibles: gasóleo y gasolina.

2.2.1 Influencia de la velocidad del viento

Si se analizan los resultados obtenidos en los diferentes trabajos realizados acerca de la velocidad de combustión de hidrocarburos en incendios de balsa, se puede afirmar que el viento tiene una notable influencia sobre la variable en cuestión. Sin embargo, muy pocos de dichos trabajos han tratado el problema de una manera intensiva. Además, a pesar de la escasez de datos, los resultados obtenidos han sido muy contradictorios, prueba de la complejidad del problema.

Una de las primeras aportaciones en este contexto cabe atribuirla a Burgess, Strasser y Grumer [BURG 1961]. En el trabajo experimental realizado por Burgess y colaboradores se utilizó benceno como combustible en condiciones de viento variables: desde viento inapreciable (~0,3 m/s) hasta valores de 4 m/s (viento fuerte). Los resultados obtenidos en el citado estudio pueden verse en la figura 2.4. La línea continua representa la velocidad de combustión en función del diámetro de la balsa, en condiciones de velocidad del viento inferior a 0,3 m/s. Por otro lado, el valor de velocidad de combustión para una balsa de diámetro infinito se representa por la línea discontinua. Finalmente, los puntos que se encuentran alrededor de la línea discontinua de forma dispersa, corresponden a las velocidades de combustión para experimentos con diferentes condiciones de viento (hasta 4 m/s).

A partir del gráfico se puede deducir que la velocidad de combustión aumentó con la velocidad del viento para las balsas pequeñas y medianas, alcanzando un valor constante para diámetros superiores a 1 metro. Este comportamiento está relacionado, como ya se ha explicado anteriormente, con los mecanismos de transferencia de calor que controlan la velocidad de combustión [HOTT 1959]; combinando las ecuaciones

(2.1) y (2.2) y despreciando los términos relativos a la transferencia de calor por conducción y convección, se obtiene la ecuación siguiente:

$$y = \frac{\sigma F (T_i^4 - T_b^4)}{\rho \Delta H_v} (1 - e^{-kD}) \quad (2.13)$$

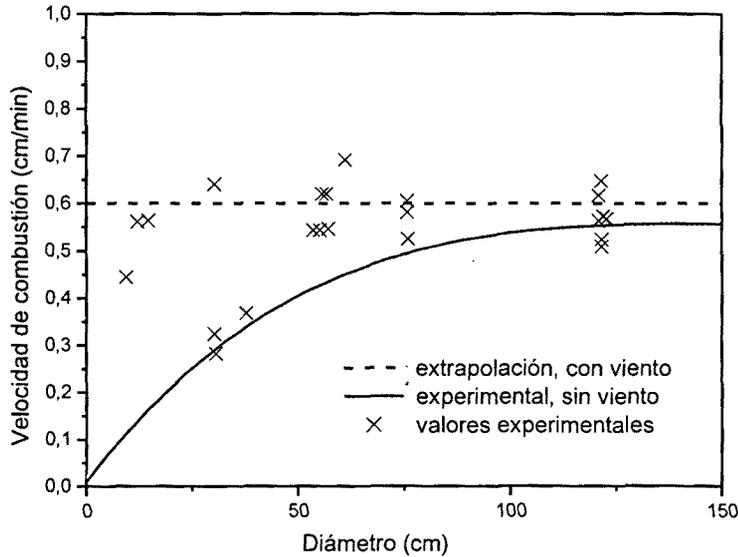


Figura 2.4. Influencia del viento sobre la velocidad de combustión en incendios de balsa de benceno.

La ecuación (2.13) —válida para diámetros superiores a 1 metro— proporciona el valor de la velocidad de combustión (en mm/s) en condiciones de viento inapreciable. Según dicha ecuación —representada por la línea continua de la figura 2.4— la velocidad de combustión está influenciada básicamente por tres parámetros:

- el factor de vista (F) de la llama hacia la superficie de la balsa;
- la temperatura de llama (T_i);
- el coeficiente de extinción (k).

A medida que el viento aumenta, su efecto deja de ser despreciable y se producen desviaciones de la curva de viento nulo —ecuación (2.13)—; si la velocidad del viento es lo suficientemente elevada para causar por sí sola un desplazamiento de la llama, su temperatura, el factor de vista y el coeficiente de extinción no se verán afectados. Sin embargo, en presencia de viento fuerte, se produce una gran agitación de la zona caliente de la llama con un consecuente aumento del coeficiente de extinción, debido a la mayor opacidad del fuego. El término e^{-kD} decrece y, por lo tanto, el efecto debido a un aumento de la ventilación es análogo al producido por un aumento del diámetro. En

otros términos, existe un valor máximo de velocidad del viento donde la velocidad de combustión alcanza un valor constante. Esta fue la explicación propuesta por Burgess *et al.* para justificar el aumento de la velocidad de combustión con el viento. Sin embargo, dicha explicación presenta limitaciones de carácter práctico, como observaron los mismos autores. Para el caso de un vertido ideal —donde el aire no tiene un gradiente de velocidad y la superficie del líquido es arrastrada por el viento— el valor máximo de la velocidad de combustión corresponderá al equivalente a un diámetro infinito. Por otro lado, si el líquido está contenido en una cubeta con una pared libre muy alta —caso típico de un tanque medio lleno— la mayor turbulencia puede elevar la temperatura T_i en centenares de grados. En estas condiciones, se pueden alcanzar velocidades de combustión superiores en dos órdenes de magnitud.

En los experimentos efectuados en 1966 por Welker y Sliepceвич, los resultados obtenidos fueron completamente distintos. Dichos autores observaron —para incendios en balsas circulares con hexano, ciclohexano y acetona— una disminución de la velocidad de combustión con el aumento de la velocidad del viento, mientras que los incendios con metanol proporcionaron datos de velocidad de combustión independientes del viento [WELK 1966]. Así mismo, los autores correlacionaron la disminución de la velocidad de combustión con la disminución del factor de vista F , causada por la inclinación de la llama por causa del viento. La explicación propuesta en este trabajo no consideró las posibles variaciones que podrían afectar a la temperatura de la llama y, además, no resultó válida para los casos donde el mecanismo de transferencia de calor dominante era la radiación (diámetros superiores a 1 metro).

También en 1966, Byram *et al.* dedujeron, para llamas luminosas de alcohol etílico en balsas con las mismas dimensiones que las utilizadas en los experimentos de Welker y Sliepceвич, una velocidad de combustión independiente con la velocidad del viento. Esto era debido a la elevada volatilidad del alcohol, el cual tiene una combustión completamente eficiente, incluso para diámetros reducidos y bajas velocidades del viento [BYRA 1966].

Blinov y Khudiakov propusieron el empleo de la ecuación (2.14) para el cálculo de la velocidad de combustión en presencia de fuerte viento [BLIN 1961].

$$\frac{\dot{m}_{\text{viento}}}{\dot{m}_{\text{norm}}} = 1 + 0,15 \frac{u}{D} \quad (2.14)$$

Según esta correlación, no aplicable a alcoholes, la velocidad de combustión aumenta proporcionalmente con la velocidad del viento. Este incremento es más notorio a medida que el diámetro de la balsa es menor.

Cottone (1989) estudió el efecto del viento sobre la velocidad de combustión y sobre la geometría de la llama [COTT 1989]. En dicho estudio se observó que, en general, la

velocidad de combustión no era uniforme en toda la superficie del charco. En concreto, se determinó que la velocidad de combustión era mayor en la periferia del incendio, donde la mezcla de aire y vapores combustibles era más eficaz. No obstante, para diámetros muy grandes, la velocidad de combustión resultó mayor en el centro de la balsa. Cottone atribuyó este comportamiento al hecho de que el efecto del aumento del diámetro sobre la radiación de retroalimentación es más importante, que el efecto del aumento del viento sobre dicho parámetro.

Tras analizar los resultados anteriores, se deduce que todavía no existe un conocimiento adecuado de la influencia del viento sobre las variables k , T_l y F , siendo la misma muy compleja y variable con las características del combustible y del aire. Por este motivo, recientemente Chatris (2001) trató de simplificar el problema, dando un límite máximo a la velocidad del viento (2 m/s), por arriba del cual los resultados experimentales no se pueden considerar fiables [CHA1 2001]. La simplificación de Chatris fue ampliada en estudios posteriores por Ferrero y Ronza [FERR 2002, RONZ 2002], los cuales fijaron, para la velocidad del viento, límites máximos variables según el diámetro de la balsa y el tipo de combustible.

2.3 Geometría de la llama

La geometría de llama ha sido objeto de estudio a partir de los años cincuenta, siendo dicho parámetro de notable interés práctico al fin de apreciar el impacto del fuego sobre instalaciones contiguas. Tras examinar la literatura acerca del tema, se puede afirmar que, en general, todos los autores que propusieron una correlación para predecir la altura de llamas difusivas turbulentas, utilizaron como base el número de Froude. Además, se destaca la necesidad de desarrollar experimentos a gran escala; desde los primeros análisis, los investigadores se dieron cuenta de la influencia de las dimensiones del incendio sobre su dinámica y de la substancial imposibilidad de adaptar datos procedentes de fuegos pequeños a sistemas más grandes (y reales).

En la revisión bibliográfica realizada se han usado indiferentemente los términos altura y longitud de llama. De hecho, pese a que las dos dimensiones coincidan solo en el caso en que la inclinación de la llama sea nula —es decir, en ausencia de viento— en muchos artículos la nomenclatura no es muy clara y se utilizan indiferentemente los dos términos. En el capítulo 6, dedicado al estudio de la geometría de la llama en los experimentos realizados para esta tesis, se hablará siempre de longitud de llama, ya que se ha tenido en cuenta la influencia del viento.

2.3.1 Altura/longitud de llama

Rasbash, Rogowski y Stark [RASB 1956] utilizaron alcohol, benceno, gasolina y keroseno en balsas de 30 cm de diámetro. En cada prueba se dispuso el combustible en una capa de 6 cm sobre agua. La forma de las llamas se describió basándose en

grabaciones a 30 imágenes por segundo, por un periodo de 10 s de cada minuto de incendio. Los autores dedicaron su atención en el comportamiento en la zona de llama continua y en la forma general de las llamas durante las pruebas realizadas, registrando una clara diferencia en términos de dimensiones, en base al combustible utilizado.

En el estudio de Blinov y Khudiakov [BLIN 1957], ya descrito en el apartado relativo a la velocidad de combustión, se analizaron fotografías tomadas durante las pruebas, evidenciando que, en función del diámetro, la estructura del incendio cambia, pasando desde una forma cónica estable a una llama caracterizada por un altura pulsante a partir de diámetros de 3 cm. Hottel [HOTT 1959], en su revisión de los datos experimentales de los científicos soviéticos, observó que en el régimen laminar, es decir para balsas muy pequeñas, el valor de la relación entre la altura de la llama y el diámetro de balsa era muy grande; al aumentar las dimensiones de las balsas dicha relación disminuía, hasta el momento en el cual se alcanzaba el régimen turbulento, donde (por lo menos para la gasolina, único combustible analizado en este régimen) se mantenía constante con un valor aproximadamente igual a 2. Una explicación se puede encontrar en el hecho de que la mezcla entre aire y combustible está regulada por la turbulencia y no por el transporte de materia.

El primero en proponer una correlación para estimar la altura de llama visible de llamas difusivas turbulentas en ausencia de viento fue Thomas [THOM 1963]. El estudio contempló la realización de experimentos a pequeña escala, en los cuales se quemaron listones de madera ordenados horizontalmente en una pila, y la extrapolación a gran escala de los datos obtenidos mediante consideraciones de análisis dimensional. Una vez fijado el largo de la pila D y variando la cantidad de madera y la disposición de los listones en el interior de la pila, Thomas midió la velocidad de combustión directamente a partir del peso de la pila antes y después de la prueba. Además, las pruebas fueron grabadas con una videocámara al fin de medir la altura de la llama, a partir da la base de la pila. Thomas supuso que la altura de llama difusiva turbulenta dependía del caudal volumétrico del combustible vaporizado \dot{V}_v y de la dimensión de la pila D , según la ecuación (2.15), donde q es un coeficiente empírico adimensional —normalmente, prácticamente igual a 1— dependiente de la forma de la llama.

$$\frac{L}{D} \propto \left(\frac{\dot{V}_v^2}{gD^5} \right)^{\frac{1}{2q+1}} \quad (2.15)$$

A partir de una interpolación de los datos experimentales, Thomas obtuvo la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{L}{D} = 42 \left[\frac{m}{\rho_a (gD)^{1/2}} \right]^{0.61} \quad (2.16)$$

En el mismo estudio, Thomas evaluó también el efecto del viento sobre la geometría de la llama, realizando una serie de pruebas en presencia de viento, a velocidades controladas entre 1,5 y 4,5 m/s. El análisis de los resultados obtenidos llevó a la obtención de la siguiente relación:

$$\frac{L}{D} = 70 \left(\frac{m^2}{\rho_a^2 g D} \right)^{0,43} \left(\frac{u^2}{g D} \right)^{-0,11} \quad (2.17)$$

La ecuación (2.17) fue reestructurada por el mismo Thomas en la forma:

$$\frac{L}{D} = 55 \left(\frac{m}{\rho_a (g D)^{1/2}} \right)^{0,67} \left(\frac{u \rho_a}{g \cdot m \cdot D} \right)^{-0,21} = 55 (m^*)^{0,67} (u^*)^{-0,21} \quad (2.18)$$

Las correlaciones (2.16), (2.17) y (2.18), aunque con un cierto error, se utilizan actualmente en los cálculos de alturas/longitudes de llamas de incendios de balsas de hidrocarburos, a pesar de que los experimentos de Thomas se realizaron con un combustible sólido. Por otro lado, parece ser que, más que la naturaleza del combustible, influya el tipo de llama; es suficiente que la llama sea difusiva y en régimen turbulento, para que las dos ecuaciones se puedan aplicar. Por ejemplo, en el ámbito del proyecto FIREXP [DITA 1992], la ecuación (2.16) se prefirió a las más recientes ecuaciones propuestas por Steward, Moorhouse y Heskestad.

Steward [STEW 1970] desarrolló un modelo matemático, dividiendo el incendio en dos secciones: la región donde se produce la reacción de combustión y la columna de gases calientes que contiene los productos de combustión. La primera zona contiene la parte de llama comprendida entre la superficie de la balsa y la cota en la cual se alcanza la relación estequiométrica entre el aire y el combustible, y la segunda se extiende desde este punto hacia el infinito.

El modelo propuesto por Steward, para predecir la altura visible, proporciona la siguiente correlación:

$$\frac{L}{D} = 14,72 \left[\frac{\omega}{(1-\omega)^5} \left(\hat{r}_0 + \omega \frac{\rho_a}{\rho_v} \right)^2 \right]^{1/5} (m^*)^{2/5} \quad (2.19)$$

En la ecuación (2.19), a parte de las variables químico-físicas del sistema (por ejemplo, la relación estequiométrica másica \hat{r}_0 entre aire y combustible) aparece la cantidad adimensional ω , definida como:

$$\omega = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_c}{\hat{h}_0 C_{p,v} T_a}} \quad (2.20)$$

Como se indica en [COTT 1989], las predicciones del modelo de Steward resultan menos exactas que las obtenidas a partir de las correlaciones de Thomas, pese a la mayor complejidad del modelo.

Una contribución remarcable se debe a Zukoski [ZUKO 1981, ZUKO 1984], que fue el primer autor en introducir, a principio de los años ochenta, el parámetro adimensional Q^* como factor de escala, al fin de obtener una correlación empírica para la altura de llama, definido como:

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a C_{p,a} T_a \sqrt{g D D^2}} \quad (2.21)$$

Q^* coincide con la raíz cuadrada del número de Froude expresado en términos de la potencia térmica desprendida por la combustión. Este parámetro ha sido utilizado muy frecuentemente en los estudios de dinámica de las llamas difusivas turbulentas, por ejemplo, en la clasificación realizada por McCaffrey [MCCA 1988]. Zukoski caracterizó las distintas zonas de la llama, mediante intervalos de Q^* , encontrando, para cada uno de ellos, una ley empírica que estima la altura de la llama:

- Régimen de llamas naturales ($Q^* < 0,15$):

$$\frac{L}{D} = 40 Q^{*2} \quad (2.22)$$

- Régimen intermedio ($0,15 < Q^* < 1$):

$$\frac{L}{D} = 3,3 Q^{*2/3} \quad (2.23)$$

- Régimen de *jet fire* ($1 < Q^* < 40$):

$$\frac{L}{D} = 3,3 Q^{*2/5} \quad (2.24)$$

Se observa que en el último régimen (*jet fire*) L es independiente del diámetro del sistema. Los experimentos de Zukoski se llevaron a cabo con gas natural en balsas de diámetro comprendido entre 10 y 50 cm.

Cox y Chitty [COXC 1985] realizaron experimentos a escala de laboratorio con balsas cuadradas de 30, 45 y 60 cm de lado, respectivamente, utilizando como combustible gas natural². Los resultados confirmaron las suposiciones de Zukoski: la relación entre altura de llama y diámetro de balsa varía respecto a Q^* con potencias que van desde 2/5 para valores de Q^* grandes a potencias cercanas a 2 para valores de Q^* pequeños. No obstante, los resultados de la altura de llama, para los incendios en la balsa de 45 cm de lado, fueron notablemente inferiores en valor absoluto a los obtenidos por interpolación de los resultados de Zukoski. Las correlaciones obtenidas por Cox y Chitty, en el rango de valores de Q^* analizado, fueron las siguientes:

$$\frac{L}{D} = \begin{cases} 15,1Q^{*2} & \text{si } 0,13 < Q^* < 0,28 \\ 3,2Q^{*2} & \text{si } 0,28 < Q^* < 0,55 \end{cases} \quad (2.25)$$

En sus estudios, Heskestad [HESK 1983, HES1 1998, HES2 1998] propuso un parámetro de escala distinto, elaborado a partir de experimentos de laboratorio con metano en una balsa de 52,5 mm de diámetro, con diferentes condiciones de temperatura ambiente. La finalidad principal del trabajo fue la determinación de los efectos sobre la altura de llama de las variaciones de las condiciones ambientales, en función de T_a .

El parámetro de escala N introducido por Heskestad se define como:

$$N = \frac{C_{p,v}T_a}{g\rho_a \left(\frac{\Delta H_c}{\hat{r}_0} \right)^3} \cdot \frac{\dot{Q}^2}{D^5} \quad (2.26)$$

A partir de los datos experimentales, Heskestad propuso la siguiente correlación:

$$\frac{L}{D} = -1,02 + 15,6N^{1/5} \quad (2.27)$$

válida para $10^{-6} < N < 10^5$. Nótese que N y Q^* son dependientes entre sí según la siguiente ecuación:

$$N = \left[\frac{C_{p,v}T_a\hat{r}_0}{\Delta H_c} \right]^3 Q^{*2} \quad (2.28)$$

² La forma cuadrada de las balsas de combustible utilizadas por Cox y Chitty no impide aplicar sus ecuaciones a incendios en balsas circulares. De hecho se pueden encontrar en la literatura [SCAN 1992] correlaciones para calcular el diámetro equivalente de balsas poligonales.

En la ecuación precedente, $\Delta H_c/\hat{r}_0$ representa el calor generado por kilogramo de aire estequiométrico y su valor se encuentra entre 2900 y 3000 kJ/kg. Como hizo McCaffrey [MCCA 1988], se puede entonces, utilizando un valor medio estándar de $\Delta H_c/\hat{r}_0$, expresar la ecuación (2.27) en función del parámetro adimensional Q^* :

$$\frac{L}{D} = -1,02 + 3,7Q^{*2/5} \quad (2.29)$$

La ecuación (2.29) es la forma más común de ver la correlación propuesta por Heskestad. Esta correlación también se puede escribir como la ecuación (2.30), donde se muestra la dependencia con el diámetro.

$$\frac{L}{D} = -1,02 + 0,235 \frac{Q^{*2/5}}{D} \quad (2.30)$$

En el año 1995, Hamins *et al.* [HAMI 1995] realizaron una serie de experimentos quemando acetileno, propano y metano en balsas de 0,1, 0,38 y 1 m de diámetro. Los datos obtenidos de altura de llama, normalizada por el diámetro, se confrontaron con la correlación de Heskestad y con la de Zukoski; la comparación puso en evidencia como las dos correlaciones dan alturas muy parecidas para valores de $N > 4 \cdot 10^{-5}$, mientras que para valores de $N < 4 \cdot 10^{-5}$, las alturas calculadas eran significativamente distintas. Además, parece que la correlación de Heskestad sea la más apropiada, con la excepción del caso de grandes incendios de acetileno que se caracterizan por una gran cantidad de humo y por una baja eficiencia de combustión. Los resultados obtenidos por Hamins sugieren, en general, que las correlaciones presentes en la literatura (Zukoski, Thomas, etc.) son tanto menos precisas cuanto más baja es la eficacia de combustión. Este hecho puede ser muy significativo para los combustibles utilizados en nuestros experimentos (gasóleo y gasolina), ya que queman con una eficacia relativamente baja; por tanto, se pueden encontrar diferencias entre los datos experimentales y las predicciones de los diferentes modelos.

Mangialavori y Rubino obtuvieron una correlación del tipo de la de Thomas [MANG 1992]:

$$\frac{L}{D} = 31,6(m^*)^{0,58} \quad (2.31)$$

Takahashi *et al.* [TAKA 1999] estudiaron el comportamiento de la zona luminosa de la llama intermitente de incendios de balsa a gran escala, desarrollando una técnica de análisis de imágenes que se aplicó en las grabaciones de video de los experimentos llevados a cabo en Japón en 1981 por la Japan Society for Safety Engineering (JSSE), con incendios de keroseno en balsas de 30 y 50 m de diámetro [JSSE 1981]. De cada

incendio se consideraron 30 s de la filmación, con una definición de 10 imágenes por segundo. La técnica de análisis se basa en los valores de RGB que asume cada píxel que compone la imagen digital; es posible entonces establecer condiciones algebraicas sobre los valores de RGB que definen razonablemente la pertenencia del píxel en el perfil de la llama. Examinando la serie de imágenes, a cada píxel se atribuye un valor de probabilidad de pertenencia a la zona luminosa, definida como la relación entre el número de imágenes en las cuales el píxel respeta las condiciones de luminosidad y el número de imágenes total. Los resultados del estudio de Takahashi *et al.* mostraron que la máxima probabilidad de existencia de la zona luminosa de llama se encuentra en el eje de la columna del incendio, a una distancia aproximadamente igual a la mitad del perfil medio; de forma más específica, la posición de máxima probabilidad se sitúa a 25 m sobre la superficie del combustible en el caso de diámetro de balsa de 30 m, y a 60 m, en el caso de la balsa de 50 m de diámetro, siempre sobre el eje. Independientemente del diámetro, alejándose del punto de máxima probabilidad, la misma disminuye hasta llegar a la zona de llama no luminosa, en la cual, obviamente, la probabilidad es 0. Por lo que se refiere a la influencia del diámetro, el valor de la probabilidad máxima de existencia de llama luminosa disminuye al aumentar el mismo, hecho que se relacionó con la evolución periódica del penacho de humo. Las llamas en incendios de gran escala se comportan de manera muy distinta respecto a las de incendios de pequeña escala, donde la probabilidad de existencia de la llama es igual a la unidad justo encima de la superficie de la balsa y disminuye con la altura. La conclusión, a la cual se llegó con este estudio, fue que un eventual método de estimación de la radiación desprendida por un incendio de balsa, basado en resultados procedentes de experimentos de pequeña escala, no puede ser aplicado a incendios de gran escala.

Koseki *et al.* [KOSE 2000], midieron la altura de llama para fuegos de 20 m de diámetro (los experimentos en balsas de 5 y 10 m de diámetro se descartaron, debido a la inclinación excesiva causada por el viento). La altura se obtuvo a partir de las imágenes registradas por una cámara termográfica, situada en un helicóptero, permitiendo la visión completa de la llama, lo cual era imposible con una cámara puesta en el suelo, debido a las grandes dimensiones del incendio. Estos autores supusieron que la temperatura de la zona ocupada por la llama era superior a 230 °C y, promediando las medidas procedentes de 12 imágenes IR, estimaron la altura en $1,9D$. El resultado, comparado con las correlaciones propuestas por Heskestad y Zukoski utilizando el parámetro adimensional Q^* , da una altura de llama mayor que lo obtenido mediante dichas correlaciones, confirmando lo indicado en el párrafo anterior que los modelos obtenidos a partir del análisis de experimentos de pequeña escala, pese a referirse a números adimensionales (como el Q^* de Zukoski), no son válidos para grandes incendios. Los autores postularon una posible razón de la mayor altura de llama en la dificultad de penetración en el interior de ésta de los flujos laterales de aire, debido a las grandes dimensiones transversales del incendio.

En la tabla 2.5 se resumen algunas de las correlaciones presentes en la literatura, formuladas en función del parámetro Q^* . La tabla se debe al estudio de McCaffrey que expresó las correlaciones en función de dicho parámetro, modificando las ecuaciones que originariamente se referían a otros parámetros (por ejemplo las de Thomas, Heskestad y Steward).

Tabla 2.5. Principales correlaciones de estimación de altura de llama de incendios de balsa [MCCA 1988].

Autor	Combustible	Geometría	Rango de validez	L/D
Thomas [THOM 1963]	listones de madera	pilas de 10 a 200 cm de lado	$0,75 < Q^* < 8,8$	$3,4Q^{*0,61}$
Steward [STEW 1970]	chorros de gas y datos bibliográficos	-	$1 < Q^* < 10^4$	$4,16Q^{*2/5}$
Becker y Liang [BECK 1978]	gases y datos bibliográficos	tubos entre 0,7 y 4,6 mm de diámetro	$Q^* < 1,7$ $1,7 < Q^* < 21$	$1,52Q^{*2}$ $3,6Q^{*2/5}$
Heskestad [HESK 1983]	metano	-	$0,12 < Q^* < 1,2 \cdot 10^4$	$3,7Q^{*2/5} - 1,02$
Zukoski [ZUKO 1984]	gas natural	balsas de 10 a 50 cm de diámetro	$Q^* < 0,15$ $0,15 < Q^* < 1$ $1 < Q^* < 40$	$40Q^{*2}$ $3,3Q^{*2/3}$ $3,3Q^{*2/5}$
Cox y Chitty [COXC 1985]	gas natural	balsas de 30, 45, 60 cm de lado	$0,13 < Q^* < 0,28$ $0,28 < Q^* < 0,55$	$15,1Q^{*2}$ $3,2Q^*$

A parte de los trabajos indicados en la tabla 2.5, merece la pena recordar los de Moorhouse [MOOR 1982] y Pritchard y Binding [PRIT 1992]. Moorhouse realizó una serie de experimentos de GNL (Gas Natural Licuado) en balsas de varios tamaños — utilizando porciones variables de una cubeta de contención de 12,2 m por 15,4 m—, con espesores de combustible entre 10 y 20 cm. Los incendios fueron grabados con dos videocámaras, puestas perpendicularmente entre si para estudiar la inclinación de la llama. El análisis contempló dos tipos de medidas de altura/longitud:

- En un caso, la forma de la llama se asimiló a un cono inclinado de base igual a la base de la llama y de largo definido por la distancia entre la base y la punta de la llama.
- En el otro tipo de medida, la forma de la llama se asimiló a un cilindro inclinado de base igual a la base de la llama y de largo definido por la distancia entre la base y la punta de la llama.

En el caso de forma cilíndrica, al utilizar la punta de la llama real se sobreestimaría notablemente el área de la llama; por ello, se eligió un vértice virtual, por el cual el área de la forma idealizada iguala el área observada a partir de las filmaciones. Las correlaciones obtenidas fueron:

$$\frac{L}{D} = 4,7(m^*)^{0,21}(u^*)^{-0,114} \quad (2.32)$$

para la forma cónica, y

$$\frac{L}{D} = 6,2(m^*)^{0,254}(u^*)^{-0,044} \quad (2.33)$$

para la forma cilíndrica.

Para tener en cuenta la sobreestimación que una forma cilíndrica puede ocasionar en un modelo de predicción de los niveles de radiación, Pritchard y Binding [PRIT 1992] utilizaron la forma exacta de llama real, llegando a la formulación de la ecuación:

$$\frac{L}{D} = 10,615(m^*)^{0,305}(u^*)^{-0,030} \quad (2.34)$$

En el análisis de los datos experimentales se utilizará la forma más conveniente de cada correlación.

2.3.2 Inclinación de la llama

Los estudios dedicados al análisis de la inclinación de la llama son muy pocos, ya que la mayoría de los trabajos experimentales acerca de la altura de llama contemplaron incendios de escala de laboratorio y, por lo tanto, en ausencia de viento. Por otro lado, es cierto que en un incendio en campo abierto, como puede ocurrir, por ejemplo, en plantas petrolquímicas, una llama inclinada puede llegar a tener efectos más graves que una llama sin inclinación, debido a que la llama inclinada tiene más posibilidades de incidir sobre una instalación cercana (*efecto dominó*). Las ecuaciones que se pueden encontrar en la bibliografía relacionan la inclinación de la llama con la velocidad del viento en forma adimensional como la ecuación (2.35), o también en función de los números de Froude y de Reynolds (ecuación (2.36)).

$$\cos(\theta) = a \left(\frac{u \rho_a}{g \cdot m \cdot D} \right)^b = a(u^*)^b \quad (2.35)$$

$$\frac{\tan(\theta)}{\cos(\theta)} = a' Fr^{b'} Re^{c'} \quad (2.36)$$

El número de Froude está definido según la ecuación (2.37), donde U representa la velocidad con que los gases se desprenden desde la superficie de la balsa.

$$Fr = U^2/gD \quad (2.37)$$

En la tabla 2.6, se presentan los valores de los parámetros que intervienen en las ecuaciones (2.35) y (2.36), para las correlaciones más comunes.

Tabla 2.6. Principales correlaciones para la estimación de la inclinación de la llama.

Forma de la correlación	Autor y valores de los parámetros		
$\cos(\theta) = a(u^*)^b$	Thomas, 1963	Moorhouse, 1982	
a	0,7	0,86	
b	-0,49	0,25	
$\frac{\tan(\theta)}{\cos(\theta)} = a' Fr^{b'} Re^{c'}$	Pritchard y Binding, 1992	Rew y Hulbert, 1997	Moorhouse, 1982
a'	0,666	3,13	1,9
b'	0,333	0,431	0,339
c'	0,117	0	0,05

2.4 Boilover

Como ya se ha descrito en el capítulo 1, en varias situaciones accidentales un combustible líquido puede arder sobre una capa de agua (incendios sobre la superficie del mar, incendios en tanques donde se haya depositado agua en el fondo, etc.). En esta situación puede tener lugar la ebullición parcial del agua a causa del calor transferido desde la llama (calor de *feedback*). El fenómeno puede ser de dos tipos:

- *hot zone boilover*, cuando el espesor de combustible es muy grande;
- *thin layer boilover*, cuando la capa de combustible es muy fina.

La mayoría de los trabajos experimentales publicados en los últimos años analizaron el fenómeno conocido como *boilover (hot zone boilover)*, que se origina en incendios de duración muy larga en tanques de grandes dimensiones, como ya se ha explicado en el apartado 1.3.

Sólo una pequeña parte de los trabajos publicados, la mayoría de ellos muy recientes, se refieren al fenómeno conocido como *thin layer boilover*. Como ya se ha indicado anteriormente, los experimentos en este campo han sido efectuados en balsas de dimensiones relativamente reducidas (a escala de laboratorio), para lograr una transferencia de calor prácticamente constante entre la capa de combustible y la interfase combustible-agua, condición que comporta una ebullición uniforme de la capa de agua.

En el presente estudio se propone ampliar el conocimiento del fenómeno con el objetivo de proporcionar indicaciones útiles en la lucha contra los incendios de balsa. Para ello, el trabajo se basará en los resultados obtenidos en las tres series de experimentaciones llevadas a cabo por el CERTEC.

En el apartado siguiente se realiza un resumen bibliográfico, en el cual se trata de distinguir entre los trabajos experimentales relativos al *hot zone boilover* y los referidos al *thin layer boilover*, a pesar de que la frontera entre las dos situaciones no esté aún

bien definida. A partir de las primeras observaciones de *boilover* o de *thin layer boilover*, fue claro que el fenómeno se conecta a la transferencia de calor en profundidad, lo cual determina la evolución de la temperatura en el líquido. Por lo tanto, en el análisis bibliográfico se pondrá especial atención en este aspecto.

2.4.1 *Hot zone boilover*

Como ya se ha citado en apartados anteriores, el fenómeno de ebullición de la capa de agua en un incendio de balsa fue observado por primera vez por Hall en 1925, en pruebas realizadas con gasolina, petróleo y destilados provenientes de refinería y balsas de 0,69 m, 1,07 m y 4,5 m de diámetro [HALL 1925].

Según la teoría propuesta por este autor, la aparición del fenómeno requiere tres condiciones:

- presencia de agua;
- formación de una capa isotérmica (*hot zone*) que se propaga hacia el fondo del tanque mediante una onda de calor;
- el combustible debe ser bastante viscoso.

En estudios sucesivos, varios autores [BURG 1947, KOSE 1994] estuvieron de acuerdo en que la formación de la onda de calor —*heat wave* en la literatura anglosajona— está relacionada con procesos de destilación y que su propagación es proporcional a la diferencia entre la velocidad de propagación aparente de la propia onda y la velocidad de combustión. La formación y la propagación de la onda de calor ya se han descrito detalladamente en el apartado 1.3.

Blinov y Khudiakov (1961) sugirieron que la causa de la formación de la onda de calor era la transferencia de calor a través de la pared de la balsa, zona donde, según estos autores, empieza el fenómeno [BLIN 1961]. Dichos autores también propusieron la siguiente ecuación, de tipo exponencial, para el cálculo del espesor de la onda de calor en función del tiempo:

$$h_{hz} = h_{hz,max} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{j}\right) \right) \quad (2.38)$$

El término j representa una constante de tiempo característica, función del combustible y de la balsa.

En trabajos sucesivos [IDEM 1985], se observó, en cambio, que el incremento del espesor de la onda de calor con el tiempo era lineal, mientras dicha onda se propaga hacia el fondo del tanque.

En el año 1969 un equipo de investigación sueco (SKUM) estudió el fenómeno utilizando fracciones pesadas de petróleo en balsas de 3,8 m de diámetro y 3,7 m de altura. La finalidad de este análisis fue observar la interfase entre la onda de calor —donde el combustible se encuentra a la temperatura de ebullición— y la zona inmediatamente inferior —donde el combustible está relativamente frío— [SKUM 1969].

Algunos años más tarde, Petty (1983) utilizó en su estudio mezclas de 7 fracciones diferentes de petróleo como combustibles en balsas de 2 m de diámetro [PETT 1983]. Este autor propuso que es necesario un espesor mínimo de capa de combustible (de pocos milímetros) para que la combustión pueda ser posible. Petty, además, obtuvo resultados contradictorios con respecto a los que consideran el *boilover* como un proceso de destilación; la temperatura superficial del combustible resultaba constante durante todo el incendio en lugar de aumentar, como una destilación requeriría.

En 1987 Hasegawa analizó la formación de la onda de calor en incendios con mezclas de gasóleo y gasolina —en balsas de diámetros comprendidos entre 63 y 1250 mm—, y la relacionó a fenómenos propios de la destilación. Para diámetros inferiores a 800 mm, la aparición de la *heat wave* resultó fuertemente dependiente del material de construcción de la pared de la balsa, que llegó a influir en la temperatura superficial del líquido en combustión. Sin embargo, para balsas de diámetro superior a 900 mm, la formación de la *hot zone* dependió solo de la temperatura superficial [HASE 1987]; en particular, se obtenía *hot zone*, si la temperatura de combustión era tal que en la superficie quedaba una cantidad a destilar superior al 40%, según la curva de destilación propia del combustible.

En otro estudio experimental realizado en el año 1991, Koseki *et al.* utilizaron fracciones de petróleo y keroseno en cinco balsas; cuatro de ellas circulares de acero (de 0,3, 0,6, 1 y 2 m de diámetro, respectivamente) y una cuadrada de 2,7 m de lado, también de acero [KOSE 1991]. Las pruebas se realizaron con espesores de combustible comprendidos entre 10 y 100 mm y se midieron varios parámetros: la velocidad de combustión y de regresión de la onda de calor, la radiación emitida por la llama, la temperatura en el interior de la capa de combustible y en el interior de la llama y, por último, el residuo de combustible. Tras el análisis de los resultados, estos autores advirtieron que la formación de la onda de calor podría ser el mecanismo clave para la formación del *boilover* y que, a su vez, la aparición del fenómeno podría depender del diámetro de la balsa y del espesor inicial del combustible. Se describen a continuación las conclusiones más destacables del estudio:

- Los valores de velocidad de regresión de la onda de calor se determinaron en aproximadamente 3 mm/min independientemente del diámetro del incendio, en el rango de 0,3 hasta 1 m de éste. Para un determinado espesor de combustible, el incremento relativo de velocidad de combustión (en otras palabras la intensidad de ebullición) en el *boilover* resultó decrecer con el diámetro.

- En el inicio de la ebullición del agua, la radiación aumentaba rápidamente, las llamas eran mucho más grandes y el agua se encontraba sobrecalentada. Para espesores superiores a los 50 mm, se registraron grandes aumentos de velocidad de combustión y radiación (hasta 10 veces) y del combustible no quemado al final de la prueba (hasta 7 veces). El resultado sugiere la transición desde un *thin layer boilover* a un *hot zone boilover* para espesores iniciales de crudo de 50 mm.
- Otras variables, como el tiempo hasta la ebullición y la intensidad de la misma, definida como la relación entre la máxima velocidad de combustión durante el *boilover* y la máxima velocidad de combustión en el periodo estacionario, mostraron una gran dispersión. No obstante, y como norma general, todas estas variables obedecían a una dependencia directamente proporcional con el espesor inicial de la capa de combustible y con el espesor de la *hot zone*. Una *hot zone* mínima de 5-10 mm fue necesaria para la aparición del *boilover*.

En un estudio de 1994, el mismo Koseki [KOSE 1994], a partir de los datos del estudio de 1991 y de nuevos experimentos a cielo abierto en balsas de hasta 17,2 m de diámetro equivalente, obtuvo muchos resultados remarcables que a continuación se resumen:

- Los valores de temperatura del combustible proporcionaron datos coincidentes con una posible destilación en el interior del combustible. Al aumentar la cantidad de combustible consumido, la temperatura de la *hot zone* crecía, de acuerdo con la curva de destilación del crudo quemado. En efecto, los combustibles con ancho rango de ebullición (como el crudo) presentan la más alta tendencia al *boilover*.
- La propagación de la onda de calor hacia el fondo del tanque se relacionó con la diferencia entre la velocidad de avance de la *hot zone* y la velocidad de combustión; solo en el caso en que la *hot zone* avance más rápidamente que el consumo de combustible se puede ocasionar el *boilover*, en cuanto el caso contrario, el combustible quemaría antes de alcanzar una temperatura suficiente para sobrecalentar el agua presente en el fondo. La figura 2.5 resume el comportamiento explicado.
- El espesor de la onda de calor en el momento de aparecer el *boilover* fu definido por la siguiente expresión:

$$h_{hz} = (\dot{r} - \dot{y})t_b = h_0 \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{r}} \right) \quad (2.39)$$

- Como ya fue observado en [KOSE 1991], la intensidad de ebullición era tanto mayor cuanto más grande era el espesor de la *hot zone* al inicio del *boilover*.
- La energía utilizada para la formación de la *hot zone* era siempre inferior al 5% de la radiación procedente de la llama y la misma disminuía al crecer el diámetro, pese a que el calor total normalmente aumentaba.
- La cantidad de agua presente bajo la capa de combustible no influía en el *boilover*, encontrándose la mayor parte de la misma a baja temperatura.

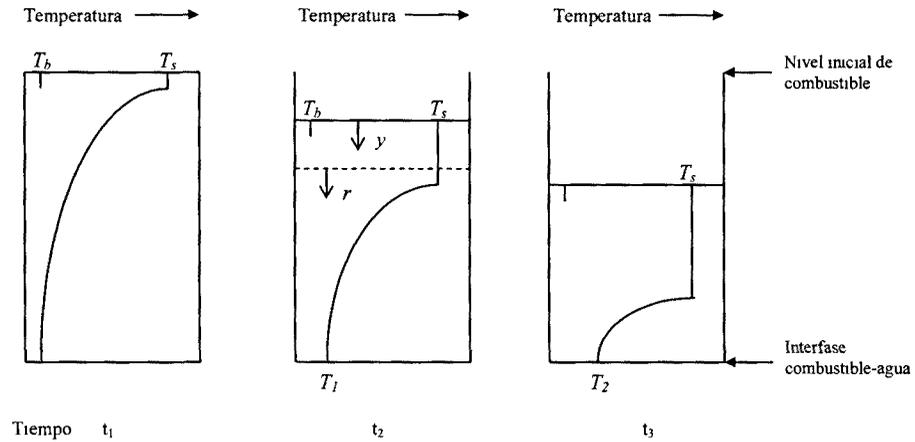


Figura 2.5 Esquema de la propagación de la onda de calor

El gráfico de la figura 2.6, presentado por Koseki en una reseña de trabajos sobre *pool fires* [KOSE 1999], compara el comportamiento de la velocidad de combustión y de la propagación de la onda de calor, al variar el diámetro de balsa, a partir de los resultados experimentales de su estudio del 1994 [KOSE 1994].

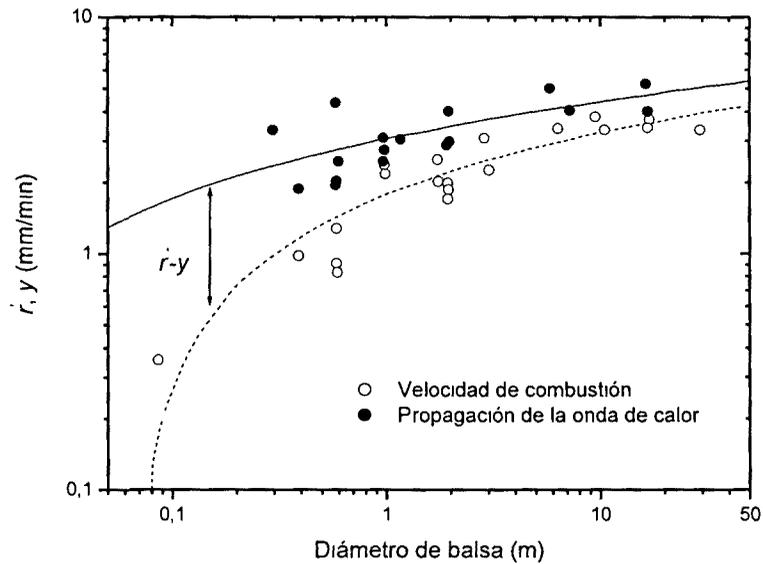


Figura 2.6 Dependencia de la velocidad de combustión y de propagación de la onda de calor con el diámetro de balsa

Se puede observar como ambos parámetros crecen con las dimensiones de las balsas. Además, la velocidad de combustión, controlada por el calor de radiación que llega a la

superficie del combustible, crece en mayor manera que la propagación de la onda de calor, regulada por la convección y conducción en el interior del combustible. Como ya se ha explicado, la diferencia entre los dos parámetros ($\dot{r} - \dot{y}$) determina la posibilidad de formación del *boilover*; consecuentemente, en un tanque de gran diámetro es más difícil que ocurra el fenómeno, debido a las pequeñas diferencias entre los dos valores.

Fan *et al.* (1995) llevaron a cabo una serie de pruebas a escala reducida con diferentes combustibles —petróleo, keroseno y aceite para máquinas—. En estos experimentos se visualizó la estructura de la llama mediante el empleo de videocámaras y se midió la temperatura del combustible y del agua, así como el sonido durante el incendio [FANH 1995]. El proceso de ebullición se dividió en tres etapas distintas caracterizadas por un nivel de sonido característico, como se puede ver en la figura 2.7:

- *Quasi-steady state* (AB): representa la fase inicial del incendio, en la cual no hay ebullición del agua y el espectro sonoro es prácticamente una línea.
- *Premonitory period* (BC): en este estado, la ebullición de la capa de agua empieza a ocurrir pero de forma no muy intensa. En consecuencia, las burbujas son expulsadas inmediatamente. El espectro sonoro no es uniforme, ya que se observan algunos picos atribuibles al fenómeno llamado “*micro-explosion noise*”, es decir, la explosión de pequeñas burbujas de vapor cubiertas de combustible.
- *Boilover* (CD): se observa que en el momento a partir del cual la ebullición es muy intensa, las burbujas no pueden escapar inmediatamente, sino que deben alcanzar antes una cierta dimensión para poder ser expulsadas. Por este motivo, se percibe un ruido intenso, conocido como “*vapour-explosion noise*”, asociado a la explosión de grandes burbujas de vapor recubiertas de combustible.

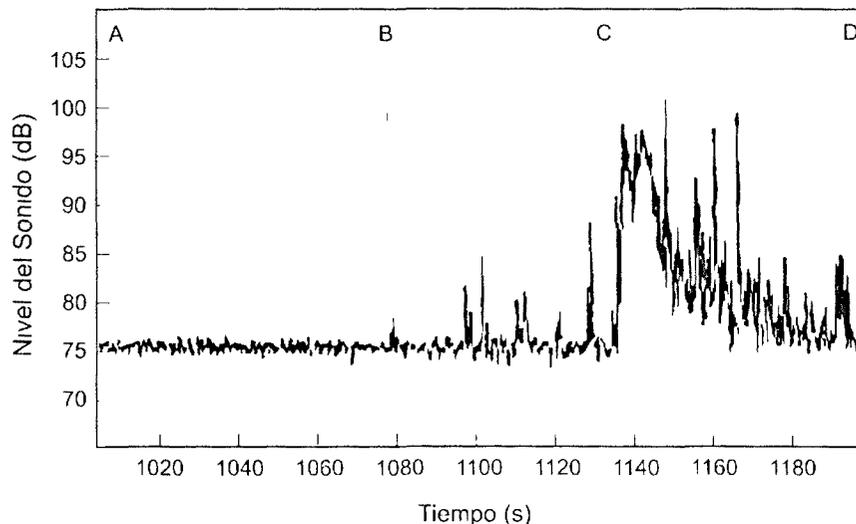


Figura 2.7. Evolución de la intensidad del sonido con el tiempo para incendios de balsa [FANH 1995]

A partir del hecho de que el nivel de sonido asciende fuertemente al producirse el *boilover*, los autores propusieron la utilidad del “*micro-explosion noise*” como instrumento para detectar el inicio del *boilover* desde una posición remota.

En el mismo año (1995), Broeckmann y Schecker [BROE 1995] analizaron las causas de la formación del *boilover* en tanques de almacenamiento —de diámetro comprendido entre 0,19 y 1,91 m—. En los experimentos, un grupo de termopares se dispuso a diferentes alturas en correspondencia al eje del tanque. Los sensores eran de NiCr/Ni de 1,5 mm de diámetro. Los efectos de la evaporación del agua se registraron mediante una cámara de video, la temperatura de las llamas se observó a través de una cámara termográfica y, finalmente, la velocidad de combustión se midió de acuerdo al tiempo en que la superficie del combustible tardaba en alcanzar los termopares. Fruto de dicho análisis, estos autores establecieron que los combustibles podían clasificarse en dos grandes categorías:

- *Fuels non forming hot zone*: a esta clase pertenecen los combustibles que no dan origen a una onda de calor y que, por consiguiente, no pueden causar *boilover* como disolventes o compuestos puros.
- *Fuels forming hot zone*: estos combustibles, en cambio, pueden producir *boilover* cuando la onda de calor alcanza la capa de agua. Es el caso de los combustibles formados por varios hidrocarburos que presenten puntos de ebullición bastante diferentes entre si.

Durante los ensayos, en el caso de los combustibles que no formaban una *hot zone*, la temperatura variaba de forma exponencial, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{y} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{K}{\rho C_p} \dot{q}_{rad} \exp(-\gamma x) \quad (2.40)$$

La ecuación precedente se distingue de la usada por Inamura *et al.* [INAM 1992], ya que en ella se presenta la constante a_e (conductividad térmica modificada), la cual conjunta en un solo término la conducción y los movimientos irregulares por convección. Por otro lado, la absorción por radiación está representada con una ley exponencial a partir del flujo de calor de *feedback* desde la llama en la superficie (\dot{q}_{rad}).

El coeficiente de absorción en profundidad γ no fue medido, sino fijado en 100 o 150 m^{-1} , estimación efectuada a partir del dato proporcionado por [INAM 1992] (148 m^{-1}). El segundo término de la ecuación (2.40) representa el movimiento de la superficie del líquido. La conductividad térmica modificada (a_e) se fijó en 30 mm^2/min en la zona de ebullición donde la convección es más intensa, de acuerdo con evaluaciones previas [BROE 1992]. A mayor profundidad de la capa de líquido, la conductividad se estableció en 4,5 mm^2/min , valor obtenido tras eliminar el efecto de la convección. Entre las dos zonas, se asumió una reducción lineal de la a_e . Tras realizar una comparación entre la correlación (2.40) y los datos experimentales, el resultado fue el

que se observa en la figura 2.8. Broeckmann y Schecker atribuyeron la diferencia de temperatura en profundidad al flujo de calor adicional aportado por las paredes del tanque, término que el modelo no contempla, por lo cual da una temperatura menor.

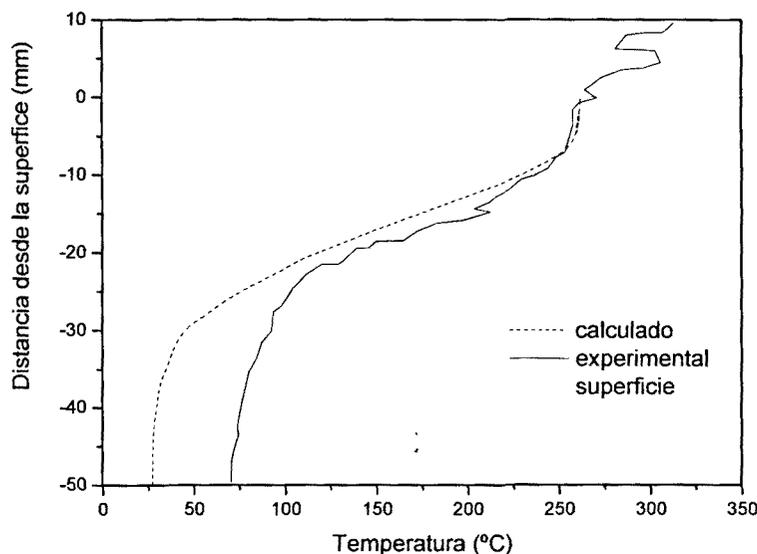


Figura 2.8. Comparación entre el perfil de temperatura medida y calculada, para un fuel non forming hot zone (combustible: disolvente creado ad hoc).

En el caso de combustibles que originan *hot zone*, la evolución de temperatura fue totalmente distinta, en cuanto que los perfiles presentan una homogenización de dicha temperatura en el interior de la capa de combustible y no una evolución exponencial (figura 2.9). La temperatura a la cual se observó dicha estabilización fue siempre superior a los 100 °C, valor, sin embargo, influenciado por factores ambientales (temperatura inicial, presión, humedad), factores geométricos (dimensiones del tanque) —los cuales modificaron también el mecanismo de transferencia de calor—, y por la composición del combustible. Broeckmann y Schecker fijaron en 150 °C el intervalo mínimo de temperaturas de ebullición para el inicio de la destilación que lleva a la *hot zone*. Además, por una cuestión de seguridad, afirmaron que la temperatura de ebullición de los componentes más ligeros que conforman la mezcla de hidrocarburos había de ser inferior a los 40 °C, para no provocar una evaporación y expansión hacia los alrededores con el peligro de una ignición imprevista.

La velocidad de propagación de la *hot zone* se estimó en valores comprendidos entre 8 y 15 mm/min y en casos extremos en 30 mm/min. En todos los casos, una vez alcanzada la interfase combustible/agua, no se producía inmediatamente su ebullición; el retraso se debe a que es necesario un tiempo para calentar las capas inferiores de combustible (formadas por componentes de elevado punto de ebullición que sedimentan durante el

almacenamiento) y el estrato de agua hasta su temperatura de ebullición. En esta fase, el calentamiento es solo por conducción y, consecuentemente, en este periodo la *hot zone* continúa aumentando su temperatura sin crecer de tamaño.

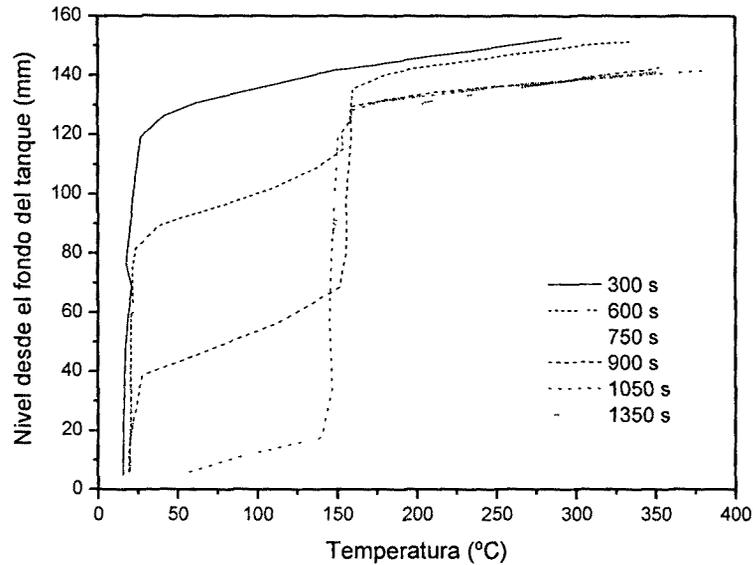


Figura 2.9. Evolución de la temperatura para un fuel forming hot zone (combustible: crudo en un tanque de 1 m con un espesor de líquido de 151 mm).

Además, Broeckmann y Schecker representaron el crecimiento de la *hot zone* con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\dot{Q}_{tot}}{A} \frac{M_0/\rho_0}{\Phi[\Delta H_v + H(T_{e,v}) - H(T_0)] + (1 - \Phi)[H(T_{hz}) - H(T_0)]} \quad (2.41)$$

donde:

A = área de la balsa.

$H(T)$ = entalpía a la temperatura T .

ΔH_v = calor latente de vaporización.

\dot{Q}_{tot} = calor total intercambiado entre llama y superficie de la balsa.

$T_{e,v}$ = temperatura de ebullición de la fracción vaporizada.

T_{hz} = temperatura de la *hot zone*.

Φ = fracción vaporizada.

ρ_0, M_0, T_0 = densidad, masa molecular y temperatura inicial del hidrocarburo.

La temperatura durante el proceso se obtuvo a partir de los datos registrados por los termopares insertados en la *hot zone*; dicha temperatura no era uniforme, sino oscilaba a causa de la formación de burbujas de vapor y, además, aumentaba a medida que la *hot zone* se propagaba hacia el fondo del tanque.

Por lo que se refiere a las consecuencias de la vaporización del agua, estos autores observaron que:

- En el caso de combustibles que originaban la *hot zone*, la altura de la llama aumenta notablemente hasta valores de 12 a 15 m para ambos tanques de 1 y 2 m, con una gran posibilidad de expulsión de combustible fuera del recipiente. Los autores observaron también la formación de bolas de fuego a grandes alturas, junto a un notable incremento de la radiación emitida. En zonas próximas a la base del incendio, el aumento de la radiación fue absorbido por la gran formación de humo y hollín.
- En el caso de combustibles que no formaban una *hot zone*, la vaporización del agua causa un aumento de la altura de la llama con un factor de 2 o 3, con un consecuente incremento de la radiación emitida. En este tipo de incendios, debido a las peculiares características del combustible, se calienta solo una pequeña capa de líquido, la cual progresivamente baja hacia el fondo del tanque con una velocidad igual a la regresión de la superficie libre del mencionado líquido (2-4 mm/min). Por ese motivo, cuando se produce la ebullición del agua, sólo un estrato muy pequeño de combustible estará presente, por lo cual los efectos serán menores, aunque no despreciables.
- La cámara termográfica registró temperaturas de llama entre 800 y 1000 °C antes del *boilover*, mientras que durante la ebullición del agua se alcanzaban valores entre 1100 y 1300 °C. Consecuentemente, la radiación emitida por la superficie de la llama hacia el exterior aumentaba desde 45 a 120 KW/m² durante el *boilover*. Combinado con el aumento de las dimensiones de la llama (longitud y diámetro debido a la proyección), resultó que la distancia de seguridad para prevenir quemaduras y daños a equipos debía aumentarse en un factor de 6.
- Durante las pruebas se observó una zona, muy próxima a la superficie del combustible, con una temperatura igual a la de ebullición del hidrocarburo, que se nombró *boiling zone*.

Los resultados del estudio de Broeckmann y Schecker llevan a pensar que un combustible que no forma *hot zone*, solo puede presentar un *thin layer boilover*, cualquiera que sea el espesor inicial de dicho combustible.

Estudios recientes se han concentrado en el análisis de la influencia del contenido de agua sobre las propiedades del *boilover*. Entre ellos, uno de los más significativos es el de Koseki de 2004 [KOSE 2004], que realizó 4 experimentos en una balsa de 1,9 m con espesores de combustible de 100, 200, 300 y 400 mm, respectivamente. En las pruebas se utilizó un crudo con un elevado contenido de agua (0,3% volumen). El resultado más

sorprendente fue la aparición del *boilover* a tiempos notablemente inferiores, justamente a causa del elevado contenido de agua. La velocidad de expansión de la *hot zone* se registró alrededor de 32 mm/min, valor de hasta 10 veces superior a los obtenidos en estudios previos del mismo Koseki [KOSE 1991].

2.4.2 *Thin layer boilover* (boilover de capa fina o delgada)

Como ya se ha indicado anteriormente, este fenómeno de ebullición puede aparecer durante el desarrollo de un incendio de balsa donde una capa fina de combustible cubre una capa de agua. El *thin layer boilover* es menos violento y destructivo que el *hot zone boilover*, debido al menor espesor del combustible. Sin embargo, la transición desde el proceso de combustión normal hasta el proceso con ebullición es muy rápida y, en consecuencia, se pueden producir vertidos de combustible inflamado. Además, las dimensiones y la radiación desprendida por la llama generalmente crecen.

Los estudios acerca de este fenómeno se han enfocado hacia la predicción del tiempo transcurrido antes del inicio de la ebullición de la capa de agua y sobre la intensidad del fenómeno.

El primer estudio acerca del *thin layer boilover* fue llevado a cabo por Twardus y Brzustowski [TWAR 1981], los cuales desarrollaron un modelo unidimensional que permitió relacionar la ebullición de la capa de agua con la transferencia de calor desde la llama hacia la superficie del combustible, a medida que disminuía el espesor de éste. Hay que advertir que el modelo no considera los transitorios relativos a la transferencia de calor. Algunos años más tarde, los mismos autores mejoraron dicho estudio gracias a la incorporación de un modelo pseudo estacionario para la radiación en el interior de la capa de hidrocarburo y a la consideración del efecto del viento sobre los flujos radiantes que inciden sobre la superficie del combustible [TWAR 1982].

En 1990 Alramadhan *et al.* desarrollaron un modelo mucho más realista [ALRA 1990], el cual permitía estimar la velocidad de combustión y el espesor mínimo de hidrocarburo para garantizar una combustión autosustentada. No obstante, el modelo presentaba serias limitaciones para describir la evolución de la velocidad de combustión en incendios producidos con un espesor inicial de combustible inferior a 10 mm.

También en 1990, varios autores, entre ellos Arai y Saito, realizaron una serie de pruebas a escala reducida en balsas de acero inoxidable de 4,8, 9,8 y 20,3 cm de diámetro [ARAI 1990]. El objetivo de la experimentación, en la cual se utilizaron 16 combustibles diferentes con un espesor inicial de hidrocarburo igual a 10 mm, fue la medición de la temperatura del combustible y del agua, la velocidad de combustión, la altura de la llama y la radiación térmica desprendida en el transcurso del incendio. En completo contraste con los análisis previos relacionados con balsas relativamente grandes, se registró una disminución de la velocidad de combustión, de la altura media de la llama y de la radiación generada durante el proceso de ebullición. Los autores

correlacionaron la intensidad del fenómeno con la temperatura de ebullición del combustible mediante una relación de proporcionalidad directa. Otro resultado sorprendente fue que no se detectaron corrientes convectivas en la capa de hidrocarburo.

Un estudio de Koseki de 1991 [KOSE 1991] evidenció la importancia del espesor de la capa de combustible. Cuanto más grande era dicha variable, la ebullición era más violenta. En esta serie de experimentos se observó también un posible sobrecalentamiento de la capa de agua al producirse el *thin layer boilover*.

En el mismo año, Ito *et al.*, usando ocho hidrocarburos diferentes en balsas de Pyrex en un contenedor de 10 cm de largo, 5 cm de ancho y 9 cm de altura, estudiaron en detalle la estructura física y la temperatura que se alcanzaba en el interior de la capa de combustible y de la de agua [ITOI 1991]. Los experimentos se llevaron a cabo en tres balsas de Pyrex de diferente tamaño, con los siguientes hidrocarburos: pentano, heptano, octano, nonano, benceno, tolueno, etilbenceno y keroseno. El análisis se realizó utilizando 12 termopares dispuestos en rectángulo en un plano situado a 0,4 cm debajo de la superficie del combustible y un interferómetro holográfico (*holographic interferometer*). Todas las pruebas se efectuaron con una capa inicial de combustible comprendida entre 0,6 y 1,0 cm y una capa de agua de 3 cm. Las dimensiones de las tres balsas se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 2.7 Dimensiones de las balsas utilizadas en las pruebas de Ito *et al* [ITOI 1991]

Recipiente	Altura (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
a	0,5	3,6	4
b	1	3,6	4
c	5	9	10

En las primeras fases del incendio (los primeros 30-40 segundos), los interferogramas mostraron un gran gradiente de temperatura entre el centro de la balsa y la pared interior de la misma, por lo cual los valores del índice de refracción pueden presentar desviaciones respecto al valor medio. Por lo tanto, los antedichos investigadores, en estos primeros instantes, utilizaron el instrumento no para obtener temperaturas puntuales, sino para determinar si se producían corrientes convectivas en el líquido.

El examen del rectángulo de termopares a diferentes instantes del incendio para una prueba con n-decano evidenció, a los 40 segundos, que el perfil de temperatura era plano, es decir, no se evidenciaba convección. En instantes sucesivos, entre los 80 y los 120 segundos, los sensores presentaban los gradientes más elevados, indicando la ocurrencia de una convección de Rayleigh concentrada localmente. Luego, entre los 160 y los 240 segundos, los gradientes de temperaturas comenzaban a disminuir hasta que el perfil de temperaturas registrado por los sensores volvía a ser uniforme; esto cabe atribuirlo al crecimiento de la convección de Rayleigh a lo largo del eje vertical, lo cual comporta una mayor mezcla de líquido, con una consecuente homogenización de

temperatura. Mientras que el interferómetro registraba el inicio del fenómeno de convección a los 40 segundos desde el inicio del experimento, con el conjunto de termopares esto se detectó a los 60 segundos y, aproximadamente, a 0,15 cm debajo de la superficie del líquido, debido a la colocación de los termopares (0,4 cm debajo de la superficie libre del combustible). Al final de las pruebas realizadas por Ito *et al.*, se confirmó la aparición de una convección de Rayleigh en el líquido en todos los hidrocarburos utilizados. Sin embargo, en el caso del tolueno y del etilbenceno, la convección era más débil, desapareciendo a medida que el incendio avanzaba. El fenómeno se atribuyó a la formación de una capa de hollín en la superficie del hidrocarburo, la cual producía un aumento de absorbancia térmica durante el incendio.

La temperatura máxima obtenida durante las pruebas, se alcanzó entre los 0,1 y los 0,15 cm debajo de la superficie libre del hidrocarburo, producida por la gran absorción, en profundidad, de la radiación. Por lo que se refiere a la temperatura de la superficie del hidrocarburo, se mantuvo siempre en la de saturación de éste. La interfase combustible/agua, al inicio del *boilover*, resultó siempre sobrecalentada unos 3 o 5 grados centígrados (103-105 °C) respecto a la temperatura de ebullición del agua; esto producía una inestabilidad dinámica en la capa de agua, con gotas de ésta y de combustible que eran expulsadas fuera de la superficie del líquido.

Un año más tarde, Inamura *et al.* (1992) analizaron los resultados del estudio de Koseki de 1991 [KOSE 1991], con el fin de establecer un modelo unidimensional para predecir el tiempo necesario para la ebullición de la capa de agua [INAM 1992]. Los autores identificaron la causa de la transferencia de calor hacia el interior del líquido con un mecanismo de conducción y otro de absorción de la radiación en profundidad, proponiendo un modelo transitorio. Dichos autores atribuyeron las discrepancias entre el modelo y los resultados experimentales, al haber despreciado la convección de Reyleigh en su simulación. Por otro lado, durante el análisis se confirmó que, para la aparición del *thin layer boilover*, es necesario que la temperatura de ebullición del combustible sea superior a la temperatura de ebullición del agua y, en particular, mayor que 120 °C.

La mayor contribución al estudio del *boilover* de capa fina son posiblemente los trabajos de Garo y Vantelon [GARO 1996, GAR1 1999, GAR2 1999]. En el primero de ellos (1996), los autores utilizaron varios combustibles —tolueno, n-octano, xileno, petróleo, n-decano, aceite térmico y hexadecano—, en una balsa de acero inoxidable de 15 cm de diámetro, con un espesor inicial de combustible siempre igual a 13 mm, al fin de evaluar la importancia del punto de ebullición sobre el *boilover*. Las conclusiones principales fueron:

- El *thin layer boilover* es debido a la nucleación heterogénea del agua en la interfase agua-combustible.
- La velocidad de combustión en la fase de *pre-boilover* decrece con la temperatura de ebullición del combustible; consecuentemente, resulta mayor el espesor de agua

sobrecalentada y el combustible al comienzo del fenómeno y, por tanto, su intensidad.

- La cantidad de combustible quemada al inicio del fenómeno decrece con la temperatura de ebullición de éste, debido a una mayor penetración de calor; por lo tanto, el espesor de combustible al comienzo de la ebullición es mayor. Pese a la mayor transferencia de calor, el tiempo de inicio del *thin layer boilover* aumenta con la temperatura de ebullición del combustible, debido a la mayor diferencia entre dicha temperatura y el punto de ebullición del agua.

Además, estos autores supusieron que una mayor presión hidrostática, debida, por ejemplo, a un espesor más grande de combustible, podía causar un retraso en el inicio del fenómeno, ya que las burbujas requieren un grado superior de sobrecalentamiento para crecer, esto, además, implicaría una ebullición más intensa.

Con el objetivo de aclarar los interrogantes planteados en el estudio previo, en 1999 Garo y Vantelon realizaron una serie de pruebas, a pequeña escala, con los mismos combustibles en balsas de acero inoxidable de 15, 23, 30 y 50 cm de diámetro y con espesores variables de líquido entre 2 y 20 mm [GAR1 1999]. En este trabajo se analizó la influencia del espesor inicial de combustible, del diámetro de la balsa y de la temperatura de ebullición sobre las variables siguientes:

- velocidad de combustión,
- tiempo requerido para que se produzca el *thin layer boilover*,
- cantidad de combustible consumido hasta el inicio del *thin layer boilover*,
- intensidad de la ebullición,
- temperatura del combustible y del agua.

El análisis de los resultados experimentales permitió deducir las consideraciones siguientes:

- La ebullición se volvía más intensa con el aumento del espesor inicial de la capa de combustible y de la diferencia entre la temperatura de ebullición del combustible y del agua.
- La intensidad de la ebullición disminuía con el aumento del diámetro. Se observó, además, un comportamiento análogo para el tiempo de inicio de la ebullición. Los autores justificaron el hecho con el progresivo incremento de calor hacia la superficie (*heat feedback*) al crecer el diámetro de la balsa; es decir, a paridad de espesor inicial, el calor alcanza antes la capa de agua y el *boilover* aparece antes y con una menor intensidad, debido a la menor cantidad de agua sobrecalentada.
- La evolución de la velocidad de combustión era directamente proporcional al espesor inicial del combustible, hasta que dicha velocidad alcanzaba un valor prácticamente constante. Dicho valor, característico para cada diámetro específico, se alcanzó para espesores de 1 cm o superiores. Los autores también notaron que la combustión no era posible para espesores inferiores a 0,5 mm, independientemente del diámetro de la balsa, debido a la pérdida de calor hacia la capa de agua.

En el mismo estudio se propuso utilizar el modelo siguiente para predecir la distribución de temperatura en la fase líquida:

$$\frac{(T - T_0)}{(T_e - T_0)} = \exp\left(\frac{-\alpha \cdot y}{x}\right) \quad (2.42)$$

donde:

T_0 = temperatura inicial del líquido.

T_e = temperatura de ebullición del combustible.

x = profundidad desde la superficie del combustible.

α = difusividad térmica del combustible.

y = velocidad de combustión.

La ecuación anterior sólo es aplicable en condiciones de régimen estacionario y, además, asume la hipótesis de que la transferencia de calor desde la superficie del combustible hacia la fase líquida es únicamente atribuible a la conducción; es decir, no toma en consideración los efectos de convección y de radiación absorbida en profundidad. Estas limitaciones, unidas al hecho de haber considerado constante la difusividad térmica, motivaron que este modelo se aplicara sólo para incendios de combustibles muy viscosos y formados por varios componentes, con espesores iniciales de la capa de combustible superiores a 8-10 mm. En dichas condiciones, la ecuación (2.42) puede ser utilizada para calcular el máximo espesor de residuo x_{bm} al comienzo del *thin layer boilover*, imponiendo a la temperatura del líquido un valor de 120 °C. Además, si se asume que la difusividad térmica del agua es similar a la del combustible, la ecuación se puede aplicar a toda la fase líquida; consecuentemente, fijando la temperatura a 100 °C, se obtiene la profundidad x_w a la cual el agua está a 100 °C. La diferencia entre x_{bm} y x_w corresponde al espesor de agua sobrecalentada.

En un trabajo posterior, los mismos Garo y Vantelon, junto a Fernández-Pello, propusieron el empleo de la ecuación (2.43) para tener en cuenta la evolución de la temperatura del combustible y del agua con el tiempo [GAR2 1999]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad (2.43)$$

donde $q_r(x)$ representa el flujo de calor por radiación a una profundidad x y K la conductividad térmica del combustible. La experimentación se realizó con balsas de diámetros comprendidos entre 150 mm y 1,5 m y con una profundidad de 60 mm. La capa de combustible varió entre 2 mm y 15 mm. La evolución de la temperatura en el líquido se registró mediante termopares de Cr/Al, dispuestos horizontalmente a través de la pared de la balsa. El flujo de calor por radiación se midió mediante radiómetros. Los combustibles utilizados cubrieron un gran rango de puntos de ebullición.

La citada ecuación considera el régimen transitorio y se obtuvo basándose en las siguientes hipótesis:

- La transferencia de calor a través de la capa de combustible y agua es prácticamente unidimensional.
- El modelo incluye la conducción y la absorción en profundidad de la radiación, pero desprecia la convección en el líquido.
- El flujo de calor desde la llama hacia el líquido es principalmente por radiación.
- La densidad, el calor específico, la difusividad térmica y el coeficiente de absorción son constantes.
- En las pruebas, las balsas son suficientemente profundas para considerar el líquido como un cuerpo ópticamente grueso.

Las ecuaciones para el combustible (cuyas propiedades se indican con el subíndice f) y para el agua (subíndice w) fueron:

$$\rho_f C_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} = K_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \dot{q}_{rad} \exp[-\gamma_f \{(h_0 - X) - x\}]}{\partial x} \quad (2.44)$$

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial T}{\partial t} = K_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \dot{q}_{rad} \exp[-\gamma_f (h_0 - X) - \gamma_w x]}{\partial x} \quad (2.45)$$

donde los términos \dot{q}_{rad} y $\dot{q}_{rad} \exp[-\gamma_f (h_0 - X)]$ representan, respectivamente, los flujos de calor por radiación en la superficie del combustible y en la interfase combustible/agua, siendo $X(t)$ el espesor de combustible quemado hasta el instante t .

Por lo que se refiere a la evolución de la temperatura en el líquido, se realizó una comparación entre el perfil de temperatura calculado con la ecuación (2.44) y el perfil experimental, encontrando una cierta concordancia, sobre todo en las capas de combustible más cercanas a la superficie de la balsa. En la figura 2.10, se aprecia gráficamente dicha comparación entre los dos perfiles, para un incendio de crudo con un grueso inicial de 13 mm y un diámetro de balsa de 150 mm. Como puede verse, las predicciones son bastante aceptables; sin embargo, los cálculos prevén una temperatura en la proximidad de la superficie libre del combustible, la cual no coincide con los valores reales registrados, esto es probablemente debido a la aparición de corrientes convectivas cerca de la superficie generadas por la absorción de radiación en profundidad, hecho que el modelo no contempla. Además, el parámetro más importante, es decir, la temperatura en la interfase combustible/agua, no es siempre estimado con exactitud, sino, a menudo, sobreestimado.

Por lo que se refiere al flujo de radiación en la superficie, éste aumentó con el grueso inicial del combustible hasta que dicho espesor llegó a los 10 mm, para, posteriormente, alcanzar un valor constante, dependiente del diámetro de la balsa utilizada. La figura 2.11 muestra el resultado en forma gráfica.

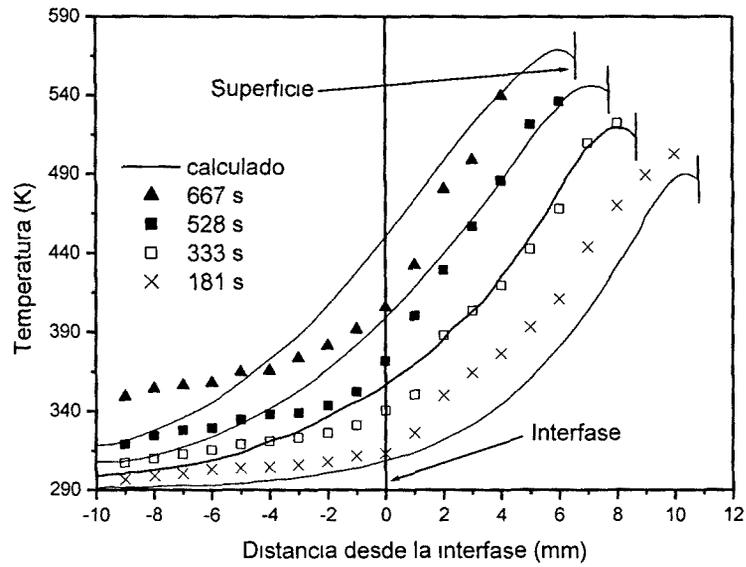


Figura 2 10 Comparación entre el perfil de temperatura medida y calculada, a diferentes instantes del incendio, para un incendio de crudo (15 cm de diámetro, 13 mm de espesor inicial)

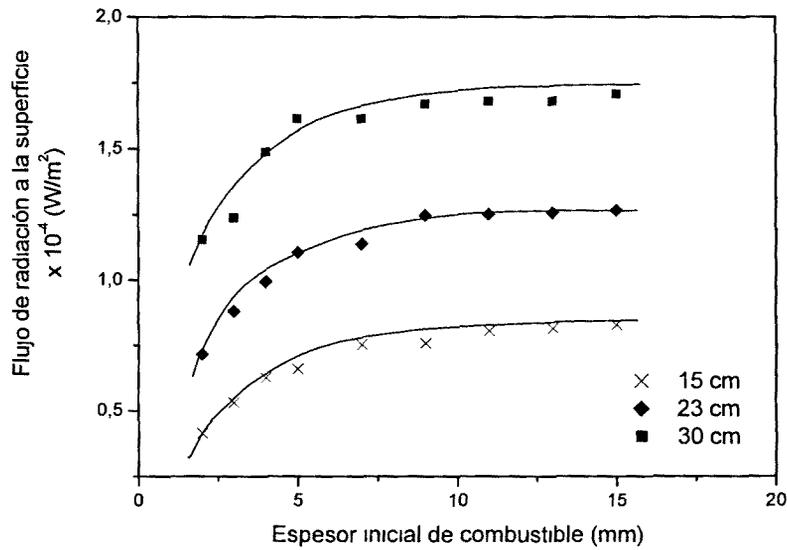


Figura 2 11 Flujo de calor por radiación en la superficie del combustible en función del espesor inicial (combustible crudo)

Al final del estudio, los propios Garo y Vantelon, comentaron la necesidad de desarrollar un modelo más preciso para simular la evolución de la temperatura, así como el tiempo requerido para la aparición del *thin layer boilover*.

En un estudio reciente, Hristov (2001) analizó varios modelos existentes y redefinió dichos modelos adimensionalmente, con el objetivo de detectar los parámetros más importantes que influían en el tiempo de inicio del *thin layer boilover* [HRIS 2001]. Según este estudio, dicho parámetro resultó relacionado con el número de Fourier.

En las pruebas experimentales realizadas por el CERTEC, el *thin layer boilover* fue detectado sólo en el caso de incendios de gasóleo, analizándose especialmente el tiempo de inicio del fenómeno y su intensidad [CHA1 2001, FERR 2002, RONZ 2002].

La conclusión que se puede deducir tras examinar la bibliografía presentada es que el fenómeno de la ebullición de la capa de agua, en sus dos formas posibles, no está todavía suficientemente caracterizado. El motivo de tal carencia es, principalmente, la complejidad y la variedad de aspectos involucrados en el proceso. En este sentido, el presente trabajo puede ser muy importante, ya que pretende obtener datos experimentales útiles para avanzar en la caracterización de dicho fenómeno. En particular, la revisión bibliográfica muestra de manera evidente como, pese al gran número de estudios acerca de los incendios de balsas, es escaso el conocimiento y la cuantificación de los efectos del *boilover* sobre los parámetros fundamentales de dichos accidentes. Este trabajo se propone avanzar en ese aspecto, al fin de aumentar el factor de seguridad en el manejo y almacenamiento de combustible en instalaciones industriales.

3 INSTALACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En este apartado se procede a la descripción de la instalación experimental mediante la cual han sido realizados los ensayos de incendio, poniendo una mayor atención en los aspectos estructurales. Se detallan también los equipos de medida, el sistema de adquisición de datos y el software utilizado. Finalmente, se proporcionan las características de los combustibles empleados y se describe el modo en el cual las experiencias han sido concebidas y efectuadas.

La instalación fue construida en el año 1999, fue ampliada y perfeccionada en 2001 y, posteriormente, entre los años 2003 y 2004. La descripción que se ofrece en el capítulo se refiere al estado actual de la instalación.

En total han sido realizadas tres campañas experimentales, nombradas FOC1, FOC2 y FOC3, respectivamente. Todos los estudios han sido realizados por el CERTEC, bajo la dirección de los profesores Joaquim Casal y Josep Arnaldos.

En esta tesis se han utilizado los datos recopilados en las tres campañas experimentales, al fin de mejorar el conocimiento de los incendios de balsa y, en particular, del *boilover*.

3.1 Ubicación de la instalación experimental

Las actividades experimentales han sido llevadas a cabo en el campo de pruebas del Centro de Formación de Seguridad “Can Padró”, en las cercanías de Sant Vincenç de Castellet, en la comarca del Bages, provincia de Barcelona.

El centro dispone de varias estructuras para la formación de personal en el campo de la lucha contra los incendios y del tratamiento de las situaciones de emergencia. Las actividades normalmente desarrolladas comprenden ejercicios prácticos de naturaleza diversa, desde la extinción de pequeños fuegos al control de grandes incendios en instalaciones concebidas para emular los ambientes industriales más comunes, como depósitos, tanques, edificios, etc. Se efectúan también cursos de conducción segura para camiones y uso de transportes pesados y/o peligrosos, de seguridad marítima, seguridad privada y formación específica para bomberos.

La figura 3.1 muestra un mapa topográfico del campo de pruebas, donde se pueden observar los distintos sectores que comprende el centro.



Figura 3.1. Mapa topográfico de "Can Padró".

La instalación experimental se sitúa en la zona oeste del centro, dedicada al entrenamiento de la lucha contra incendios y a la gestión de situaciones de emergencia (figura 3.2). La ubicación ha sido elegida debido a la orografía suave del terreno y al amplio espacio alrededor de la instalación experimental; esto permite operar sin interferencia alguna durante los ensayos y, al mismo tiempo, garantiza la seguridad de las personas y de las otras instalaciones del centro.

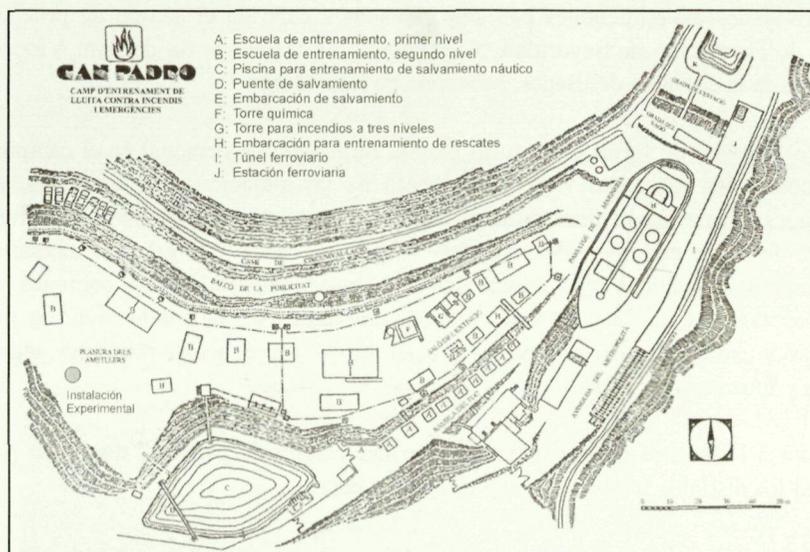


Figura 3.2. Zona de "Can Padró" dedicada al entrenamiento de la lucha contra incendios.

3.2 Descripción general

La instalación experimental, que se muestra fotografiada en la figura 3.3, ha sido diseñada para permitir el estudio de incendios de balsa de hidrocarburos al aire abierto sobre un sustrato acuoso. Como ya se ha citado anteriormente, la instalación se construyó en el año 1999 [CHA1 2001] y ha sido modificada y ampliada en dos ocasiones, la primera en el año 2001 y la segunda entre los años 2003 y 2004; esta segunda ampliación se realizó con el objeto de analizar con más profundidad el fenómeno de *boilover* de capa fina, en lo que respecta a los incendios de gasóleo, y las características de la radiación en general. Las ampliaciones y mejoras del conjunto se detallarán en el curso del capítulo, dedicado a la descripción del estado actual de la instalación.

Los componentes principales de la instalación son los siguientes:

- 5 balsas circulares concéntricas de hormigón armado (de 1,5 m, 3 m, 4 m, 5 m y 6 m de diámetro);
- Sistemas de soporte de los termopares situados en el perfil de la llama;
- Sistema de posicionamiento de los termopares en el interior del líquido;
- Salas de control y de almacenamiento;
- Instalaciones propias del campo de pruebas: unidad de recogida de los residuos líquidos, estación de bombeo del agua, hidrantes, enlace a la red eléctrica, etc.
- Equipos y sistemas auxiliares: extintores, cableado de comunicación con los equipos de medida, soporte de la estación meteorológica, recubrimientos aislantes de protección del instrumental, armarios de instrumentación, depósito y suministro de combustible, etc.

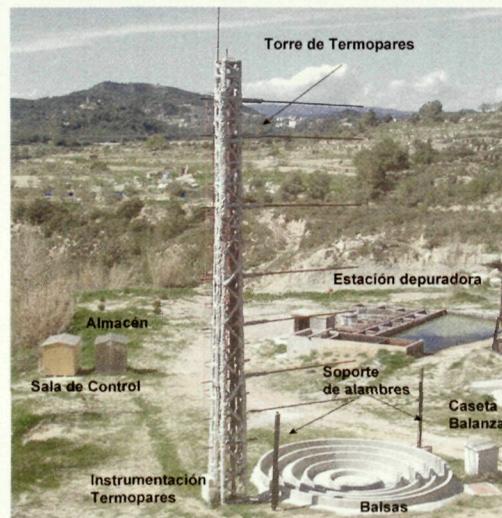


Figura 3.3. Vista global de la instalación experimental.

3.2.1 Balsas circulares

En el año 1999, en previsión del proyecto FOC1, se construyeron las balsas de 1,5 m, 3 m y 4 m de diametro. La obra fue ampliada en el año 2001 (proyecto FOC2), con la construccion de dos balsas de 5 m y 6 m de diametro, respectivamente. Estas dos balsas se realizaron alrededor de las precedentes, de manera que el conjunto de las cinco resultara coaxial. En el año 2003, para realizar una nueva serie de experimentos (proyecto FOC3), se procedió a la reparación e impermeabilización de las balsas que habían sido deterioradas por el uso, la impermeabilización se realizó removiendo completamente el recubrimiento de cemento exterior y aplicando sucesivamente una capa de cemento tixotropico y otra de un mortero elástico bicomponente.

Las balsas están constituidas de bloques de hormigon armado de aproximadamente 5 cm de ancho, y han sido diseñadas con una degradación de alturas creciente desde la balsa interior a la exterior, de manera que las paredes de las balsas interiores no interfieran con la capa de agua y combustible en las pruebas de diámetros superiores ni con los movimientos convectivos en el interior del líquido. El agua, además de proveer un soporte homogéneo al combustible, mantiene refrigerada la instalación. El conjunto de las cinco balsas está esquematizado en la figura 3.4.

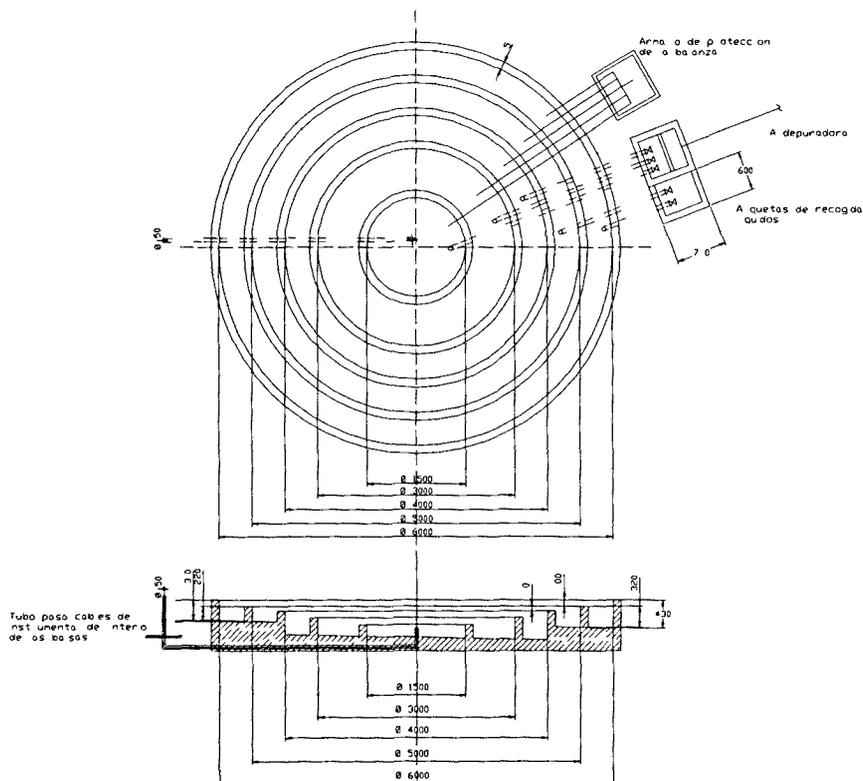


Figura 3.4 Vista superior y seccion transversal de las balsas (medidas en milímetros)

Las dimensiones de las balsas se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Dimensiones de las balsas.

Diámetro interior (m)	Diámetro exterior (m)	Área (m ²)
1,50	1,60	1,77
3,00	3,10	7,07
4,00	4,10	12,57
5,00	5,10	19,63
6,00	6,10	28,27

Cada una de las balsas dispone de un tubo de acero galvanizado de 3" de diámetro para el vaciado por gravedad del agua y de los residuos de la combustión. Los tubos de desagüe desembocan en una arqueta de recogida de líquido, donde se ubican las válvulas de cierre y la salida de residuos hacia la estación depuradora. La arqueta está constituida por una caja de cemento enterrada hasta el nivel del suelo, situada a medio metro de la balsa exterior, con una tapa abatible hacia arriba que da acceso a las válvulas. Tanto los tubos de vaciado como el fondo de las balsas presentan una pendiente del 2% para facilitar el desagüe.

Al mismo tiempo, un segundo tubo de acero de 3/8" se conecta, mediante un tubo flexible a un recipiente ubicado en una cabina de protección, con el fin de determinar la velocidad de combustión por medio de un sistema de vasos comunicantes (véase el apartado 3.3.1). La cabina, situada aproximadamente a un metro de la pared de la balsa exterior, es una pequeña construcción de hormigón armado, revestida con lana de roca, que alberga el recipiente, la balanza, las válvulas y el tubo flexible, y los protege del calor procedente de la llama. La lana de roca utilizada es del tipo Spraywool-F de la empresa Diaterm, y sus propiedades se indican en la tabla siguiente.

Tabla 3.2. Características de la lana de roca Spraywool-F.

Características	
Composición química:	
SiO ₂	42-48%
Al ₂ O ₃	13-17%
FeO	3-11%
CaO	13-25%
MgO	7-15%
Na ₂ O	2-4%
Densidad (kg/m ³)	800
Combustibilidad	M0-Incombustible
Temperatura límite	1200 °C

Durante las modificaciones del 2003, con el objetivo de determinar la temperatura del líquido y el calor transferido desde la llama al combustible, se instaló, por debajo del suelo de las balsas, un tubo de acero de 2,5". De este modo ha sido posible conducir los