

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



## ANEXO III CALOR DE RETROALIMENTACIÓN

En el presente anexo se presentan los valores de flujo de calor registrados, durante los experimentos realizados en esta tesis, por el sensor dual puesto en el interior de la balsa, tomando como referencia la superficie libre del combustible. Para una descripción detallada del aparato vease el apartado 3.3.3. En la tabla AIII.1, se indican los datos de

- flujo de calor total intercambiado entre el incendio y la superficie del combustible,  $\dot{q}_{tot}$ , (calor total de retroalimentación),
- flujo de calor transferido por radiación,  $\dot{q}_{rad}$ , (retroalimentación por radiación),
- relaciones entre los flujos de calor descritos y la cantidad de calor desprendida por la combustión ( $\dot{q}_{tot}/m\Delta H_c$  y  $\dot{q}_{rad}/m\Delta H_c$ )

Hay que destacar que los datos presentados son valores medios a lo largo del periodo estacionario, tanto para los incendios de gasóleo como para los de gasolina. En las fases finales del incendio se ha registrado un aumento de la radiación, probablemente debido a que la llama tenía menos presencia de humo durante esta fase. Por lo tanto, para los incendios de gasóleo, no ha sido posible un estudio de los efectos del *boilover* sobre el aumento de radiación durante el mismo, ya que dicho aumento podría deberse al fenómeno anteriormente mencionado y no al *boilover* en sí.

Cabe indicar, que para los incendios de 1,5 m no hay datos, ya que no se pudo colocar el radiómetro debido a una imposibilidad práctica.

Tabla AIII.1 Resultados experimentales

Experimento	Combustible	D (m)	h <sub>0</sub> (mm)	q <sub>tot</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	q <sub>rad</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	q <sub>tot</sub> /mΔH <sub>c</sub> (%)	q <sub>rad</sub> /mΔH <sub>c</sub> (%)
FOC3_01_D3	Gasoleo	3	12,7	55,83	8,32	5,28	1,57
FOC3_02_D3	Gasoleo	3	15,0	69,06	10,64	4,72	0,87
FOC3_04_D3	Gasoleo	3	20,1	80,94	11,48	3,95	0,59
FOC3_05_D3	Gasoleo	3	24,9	63,77	22,09	3,72	1,08
FOC3_18_D3	Gasoleo	3	12,0	69,25	6,89	4,27	1,33
FOC3_20_D3	Gasoleo	3	12,0	89,32	21,25	5,51	1,04
FOC3_14_D4	Gasoleo	4	15,0	55,02	8,74	5,26	2,68
FOC3_15_D4	Gasoleo	4	20,0	64,20	26,39	3,40	2,33
FOC3_16_D4	Gasoleo	4	25,0	57,84	21,61	3,38	1,38
FOC3_09_D5	Gasoleo	5	15,0	63,96	16,24	4,91	0,84
FOC3_10_D5	Gasoleo	5	20,0	77,07	17,98	4,02	0,83
FOC3_11_D5	Gasoleo	5	20,4	90,10	14,14	5,54	2,78
FOC3_07_D6	Gasoleo	6	15,0	47,66	3,50	3,59	0,60
FOC3_12_D6	Gasoleo	6	20,0	49,02	21,47	3,36	0,99
FOC3_03_G3	Gasolina	3	19,9	28,77	9,25	2,47	0,64
FOC3_17_G3	Gasolina	3	15,0	46,80	27,50	2,40	1,18
FOC3_13_G4	Gasolina	4	15,0	37,51	20,95	2,30	0,95
FOC3_08_G5	Gasolina	5	15,0	31,11	15,77	2,76	1,29
FOC3_06_G6	Gasolina	6	14,9	22,86	4,57	2,52	0,80
FOC3_19_M3	Mezcla	3	20,1	73,09	23,71	2,70	1,09

### AIII.1 Discusión de los resultados

En la bibliografía actual existen muy pocos trabajos sobre esta temática que hayan realizado experimentación usando gasóleo o gasolina. Además, en muy pocos de dichos trabajos los datos experimentales se obtuvieron con balsas superiores al metro. Por lo tanto, una comparación directa con datos previos no es posible. Sin embargo, puede decirse que los datos obtenidos en esta tesis son del mismo orden de magnitud que los determinados por otros autores, tal como muestra la tabla AIII.2.

Tabla AIII 2 Estudios previos sobre calor de retroalimentación

Estudio	Combustible	D (m)	$q_{tot}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$q_{rad}$ (kW/m <sup>2</sup> )
Inamura <i>et al</i> (1992)	Tolueno	0,074-0,12	-	12,5
[INAM 1992]	n-decano	0,074-0,12	-	18,6
Garó y Vantelon (1999)	Crudo	0,15-0,30	-	3-16
[GAR1 1999]				
Koseki (1994)	Crudo	3,05*	69	-
[KOSE 1994]	Crudo	1	65	-
	Crudo	0,6	54	-
Breockmann (1995)	Crudo	0,19	-	16
[BROE 1995]	Gasóleo	2	-	40
	Heptano	0,30	-	80
Hamins <i>et al.</i> (1994)	Alcohol metílico	0,30	-	16,8
[HAMI 1994]	MMA	0,30	-	50
	Tolueno	0,30	-	91

\*diámetro equivalente de una balsa cuadrada de 2,7 m de lado.

Los resultados más interesantes son los que se refieren a la relación entre el calor total de *retroalimentación* y el calor de combustión, ya que este parámetro proporciona información sobre el mecanismo de retroalimentación. Los valores son del orden del 2-4% para el gasóleo y de 0,5-1,5% para la gasolina. Koseki obtuvo valores del orden de 4,5-6% para crudo [KOSE 1994].

Como muestran los valores de la tabla AIII.1, el flujo de calor total de *retroalimentación* es mayor para el gasóleo que para la gasolina y, además, presenta una tendencia a decrecer con el diámetro. La explicación de que dicho flujo sea mayor para el gasóleo que para la gasolina se encuentra observando las propiedades de los dos combustibles, las cuales se muestran resumidas en la tabla AIII.3.

Tabla AIII 3 Propiedades de los combustibles usados

Propiedad	Gasóleo	Gasolina
Calor de combustión (kJ/kg)	41870	43960
Densidades (kg/m <sup>3</sup> )	840	752
Temperatura de ebullición (media) °C	265	126
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	233	350
Masa molecular (kg/kmol) (HYSIS)	318,6	142,2
Calor específico (kJ·kmol <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) (HYSIS)	670	240

Si se desprecian las pérdidas por reradiación y a través de las paredes de la balsa ( $\dot{q}_{loss}$ ), el flujo de calor de *retroalimentación* teórico coincide con el calor de vaporización del combustible,  $\dot{q}_{fuel}$ , según la ecuación (AIII.1) [HAMI 1995]. La fracción de calor de *retroalimentación*,  $\chi_s$ , es la relación entre el flujo de calor de *retroalimentación* y el calor que se libera en la combustión,  $\dot{q}_{chem}$ , el cual está definido por la ecuación (AIII.2).

$$\dot{q}_{fuel} = m(H_v + C_p(T_s - T_0)) \quad (\text{AIII.1})$$

$$\dot{q}_{chem} = m \cdot \Delta H_c \quad (\text{AIII.2})$$

Como muestran las ecuaciones anteriores, la fracción de *retroalimentación* teórica es independiente de la velocidad de combustión y, simplemente, es función de las propiedades del combustible:

$$\chi_{s,teorico} = \frac{\dot{q}_{fuel} + \dot{q}_{loss}}{\dot{q}_{chem}} \approx \frac{\dot{q}_{fuel}}{\dot{q}_{chem}} = \frac{\Delta H_v + C_p(T_s - T_0)}{\Delta H_c} \quad (\text{AIII.3})$$

Suponiendo como temperatura superficial del combustible,  $T_s$ , la temperatura de ebullición media del mismo y 20 °C como temperatura inicial,  $T_0$ , se obtiene un  $\chi_{s,teorico}$  de 1,79 para el gasóleo y de 1,21 para la gasolina. Esto explica porque el gasóleo presenta valores más altos, pese a tener una velocidad de combustión menor. Las discrepancias entre los valores teóricos y los experimentales, se deben probablemente a no haber considerado las pérdidas y al hecho de que las reacciones de combustión no tienen un 100% de eficacia.

En el párrafo anterior se ha comentado que  $\chi_{s,teorico}$  depende simplemente de las propiedades del combustible; por lo tanto, parece que no debería variar con el diámetro del incendio. Sin embargo, otros factores —como el bloqueo del flujo de calor de radiación por parte del vapor de combustible, de las partículas de hollín, de los productos intermedios de pirolisis, etc.— juegan un papel importante al interferir sobre el calor de *retroalimentación* por radiación; además, la interferencia de estos factores sobre la radiación aumenta al aumentar el diámetro. Estudios previos [HAMI 1995], obtuvieron valores de la fracción de *retroalimentación* decrecientes con la velocidad de combustión; esto concuerda con los datos experimentales aquí obtenidos.

Observando la tabla AIII.1, la fracción total de *retroalimentación* no está afectada por el espesor inicial de combustible. Esto se explica, si se supone que la capa de vapores que se encuentra por arriba de la capa de combustible no varía su espesor al variar el antedicho espesor de combustible. De esta forma, como la velocidad de combustión en los experimentos realizados en este trabajo es también independiente del espesor inicial, el calor recibido por el combustible no varía al aumentar o disminuir este parámetro.





