

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



cables de los aparatos de medida hasta el sistema de adquisición de datos, sin que los mismos quedaran en contacto directo con el fuego.

### 3.2.2 Estructuras de soporte de los termopares

Como ha puesto de manifiesto el análisis bibliográfico, la temperatura en el interior de la llama es un parámetro fundamental para caracterizar un incendio. El estudio ha sido realizado por medio de una serie de termopares que se ubican a diferentes alturas y posiciones radiales por medio de dos estructuras:

- Una torre metálica, que se utiliza para medir la temperatura de la zona más elevada de la llama. Una serie de barras de acero con perfil en T, distribuidas a lo largo de la torre, sirven de soporte para los termopares hasta alturas de aproximadamente 12 m.
- Dos estructuras, que permiten sujetar una serie de cables de acero a diferentes alturas, hasta un máximo de tres metros, diseñadas para determinar la distribución de temperatura de la zona de llama continua.

Además, para analizar el mecanismo de formación del *boilover*, resulta importante conocer el perfil de temperatura en el interior del líquido: para ello se ha utilizado una pieza que permite mantener en posiciones predefinidas varios termopares dentro de las mismas balsas. A continuación, se describe cada uno de los tres elementos de soporte mencionados.

#### Torre metálica

La torre metálica, donada por la empresa FECSA, se compone de dos secciones diferentes, una de 8 m de largo y una de 5 m. La altura de 12 m se eligió en base a la observación experimental de estudios precedentes, ya que, según dichos estudios, la altura de la llama visible supera un valor de dos veces el diámetro solo para balsas muy pequeñas [BLIN 1957].

La estructura fue construida sobre una base de cemento a una distancia de 1 m de la pared de la balsa más externa. Como ya se ha explicado antes, la torre metálica sirve para sujetar las barras de soporte de los termopares. En la primera serie de experimentaciones (1999) se utilizaron 13 barras cerámicas móviles. En el año 2001 se decidió usar 9 barras de acero fijas con perfil en T, debido a que las barras cerámicas habían resultado demasiado frágiles. En el año 2003 se remplazaron las dos barras inferiores, que se habían doblado por el efecto del calor, creando el sitio para una nueva estructura de soporte, descrita en el siguiente apartado.

Un esquema de la torre como aparece actualmente se muestra en la figura 3.9. Para una descripción de la instalación experimental antes de las modificaciones realizadas en el 2003 pueden consultarse [CHA1 2001] y [ORTE 2001], que describen como era la instalación en el proyecto FOC1, mientras que los trabajos [FERR 2002] y [RONZ 2002], describen la instalación para el proyecto FOC2.

Durante los ensayos experimentales las barras se usaron para situar los termopares en correspondencia al eje de las balsas, ya que una distribución radial solo interesaba en la zona de llama continua, en la cual se utilizó la estructura con cables. Los termopares se posicionaron hasta una altura de 12 m, cota a la cual se encuentra la barra superior.

La estructura dispone de un pararrayos y fue recubierta con lana de roca Spraywool-F, cuyas propiedades ya se han mostrado en la tabla 3.2. Además, la torre se colocó en la dirección perpendicular a la dirección predominante del viento, de manera que no resultara directamente expuesta a la acción de la llama.

### Estructura soporte de alambres

La realización de esta nueva parte de la instalación experimental deriva de la necesidad de intensificar el número de termopares en la zona de llama continua, al fin de obtener una distribución radial y axial de la temperatura más precisa en esta zona del incendio.

La estructura se compone de dos torres metálicas, de tres metros de altura, situadas de manera diametralmente opuesta respecto al centro de las balsas, a un metro de la pared de la balsa mayor. Las torres se construyeron con tubos cuadrados de acero soldados a una platina que sirve de soporte. A lo largo de la parte frontal de cada torre, un conjunto de veintinueve anillos, separados 10 cm entre sí, permite sujetar los cables de acero que sostienen los termopares. En uno de los extremos de la estructura, un sistema de pesos y poleas contrarresta las dilataciones de los alambres y los mantiene tensionados durante los ensayos experimentales. Para protegerlas de la acción de las llamas, las torres fueron pintadas con una pintura resistente al calor y cubiertas con tubos de lana de roca de 3" de diámetro. En la figura 3.5 se observa el esquema de una de las torres y una foto del montaje de los alambres.

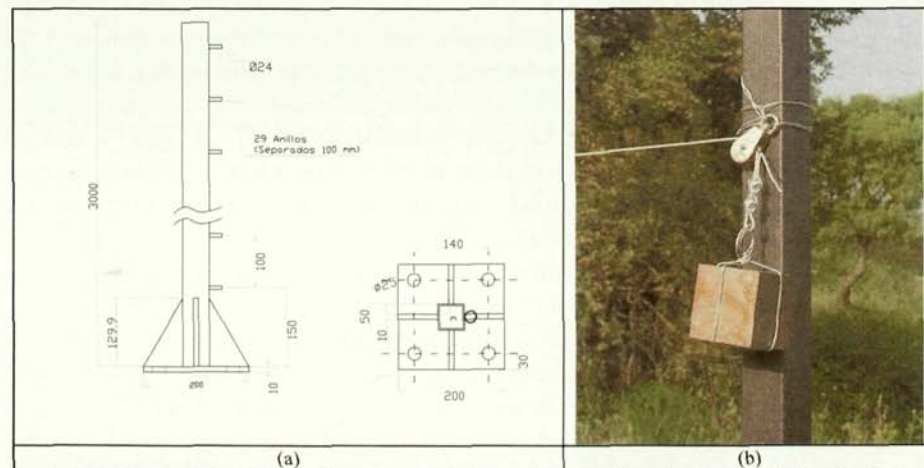


Figura 3.5. (a) Esquema de la torre soporte de alambres. (b) Detalle de la sujeción de los alambres.

La decisión de construir un soporte con una altura máxima de 3 metros se debe al tener en cuenta que la altura de la zona de llama continua, según estudios precedentes [KOSE 1996], no es nunca superior a la mitad del diámetro. Consecuentemente, en el peor de los casos (fuegos de 6 m de diámetro), la altura de la llama continua podría alcanzar como mucho 3 m. A parte de ser inútil, a fines experimentales, la construcción de unos soportes más altos habría comportado notables problemas prácticos y unos costes elevados.

#### Soporte interno en el líquido

El posicionamiento de termopares en el interior del líquido, indispensable para el análisis de la formación y de la evolución del *thin layer boilover*, ha comportado la necesidad de diseñar una estructura de soporte apropiada, esquematizada y fotografiada en la figura 3.6.

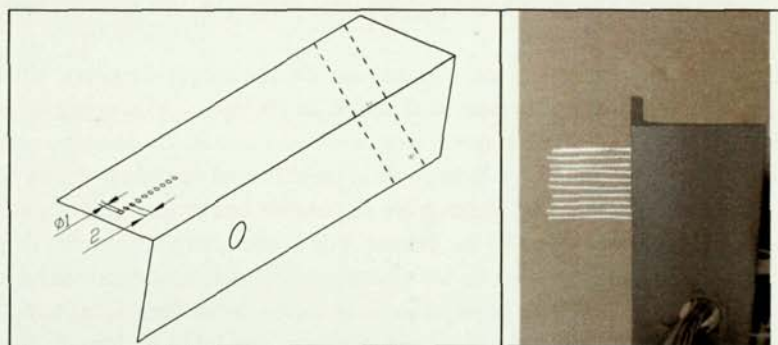


Figura 3.6. Esquema y foto de la pieza de soporte de los termopares para la medición de la temperatura en el interior del líquido.

La pieza se construyó a partir de un perfil de acero en L, que fue agujereado para disponer de diez huecos de 1 mm de diámetro, separados por un 1 mm entre sí, y así permitir el ajuste de los termopares. Durante los ensayos experimentales, la pieza se posicionó en el interior de la balsa por medio de un pie de sujeción y se ajustó al mástil mediante un tornillo, ubicado en la parte posterior del perfil, de manera que, al comienzo de la prueba, quedara un igual número de termopares en el agua y en el combustible. A medida que el incendio avanza, los termopares superiores quedan primero sumergidos en la fina película de vapor que separa el combustible de la mezcla de gases calientes que conforman la llama propiamente dicha y, posteriormente, dentro de la llama misma. Por otro lado, al comienzo de la prueba un termopar está colocado justo en la interfase combustible-agua, y allí permanece hasta la ebullición de parte de la capa de agua. El objetivo de este diseño es determinar la temperatura de tres regiones muy importantes para el desarrollo del incendio y del *boilover* de capa fina:

- gases calientes y película de vapor;
- capa de combustible;
- interfase combustible-agua y agua.

Además, examinando el número de termopares libres antes y después de la prueba, se puede tener una idea de la cantidad de agua evaporada durante el *boilover*.

### 3.2.3 Otras obras civiles

Por otra parte, para llevar a cabo los experimentos fueron necesarias las siguientes estructuras:

- dos construcciones de madera, usadas una como sala de control y la otra como almacén;
- dos arquetas para la recogida de los residuos y una estación de depuración;
- una construcción para el posicionamiento y la protección de la balanza electrónica;
- una estación meteorológica;
- una estación de bombeo del agua;
- un depósito de almacenamiento de combustible.

#### *Salas de control y almacén*

En el desarrollo de la experimentación se usó como sala de control una pequeña construcción de madera de 4 m<sup>2</sup> de superficie, posicionada, aproximadamente, a 35 m del eje de las balsas, distancia que garantiza una completa seguridad de ejecución de las pruebas. La sala de control dispone de un enlace a la red eléctrica, al cual se conecta el ordenador portátil para la adquisición automática de los datos y el cuadro de visualización de la estación meteorológica. Además, un panel solar exterior, de 10 W de potencia, proporciona la alimentación energética a la estación meteorológica.

Una construcción de madera de 1,76 x 2,67 m, situada al lado de la sala de control, se utilizó para almacenar el material en los días en los cuales no se efectuaban pruebas. El almacén dispone también de un enlace a la red eléctrica.

#### *Arquetas de recogida de residuos*

Al fin de recoger el líquido al final de las pruebas, se construyeron dos arquetas, en las cuales se vierte el conjunto de agua e hidrocarburo que queda al final de cada prueba. La primera, construida en 1999, es una cavidad cúbica de 1 m de lado, que se encuentra aproximadamente a 4 m del eje de las balsas, en dirección norte. Debido a la ampliación de la obra experimental en el año 2001, a dicha arqueta a la que le llegan los tubos de desagüe de las tres cubetas más pequeñas (1,5, 3 y 4 m), se le añadió una segunda, de 60 cm de ancho por 77 cm de largo, a la cual confluyen los residuos líquidos de las balsas de 5 y 6 m. El flujo proveniente de las balsas se controla mediante 5 válvulas, una para cada conducto. El conjunto fue construido de manera que los líquidos contenidos en la balsa más externa pasen a la primera por simple gravedad, y desde esta, mediante un tubo de acero con una pendiente del 2%, a la estación depuradora del campo de pruebas "Can Padró".

### Construcción de protección de la balanza

Para posicionar la balanza de medida de la velocidad de combustión, se construyó una caseta fabricada de cemento situada a 4 m del eje de las balsas en dirección norte. La construcción fue aislada térmicamente con lana de roca Spraywool-F.

### Estación meteorológica

Para fijar la estación meteorológica GroWeather —véase el apartado 3.3.4— se usó un soporte de metal, constituido por dos tramos de 3,5 m y uno de 4 m, al fin de poder sujetar el dispositivo a una altura de 10 m.

### Estación de bombeo

La estación de bombeo de agua propia del centro “Can Padró” se utilizó para aprovisionar el agua necesaria a la preparación y el control de los ensayos. Dicha estación sirve para mantener la presión de las tuberías del sistema antiincendio, que dispone de una red de hidrantes distribuida en todo el campo de pruebas. Las diferentes partes de la estación son:

- dos bombas eléctricas en paralelo en el circuito principal;
- una bomba mecánica de seguridad, que entra en acción en caso de interrupción de la alimentación eléctrica.

### Depósito de combustible

La mayoría de las pruebas experimentales contempló el uso de gasóleo, combustible con el cual se produce el fenómeno de *boilover* de capa fina. Las grandes cantidades utilizadas durante la experimentación comportó la necesidad de instalar un depósito para su aprovisionamiento. Las características principales se dan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características del depósito de almacenamiento de gasóleo.

<b>Deposito de combustible para exterior</b>	
Fabricante	TR-LENTz
Capacidad	1500 litros
Construcción	Doble Pared: Interior: Polietileno alta densidad autoportante Exterior: Polietileno alta densidad (protección UV)
Dimensiones	1,6 x 0,6 x 1,8 m
Aspiración	Tubería de 34 " con filtro
Otros	Sonda de nivel Aviso de sobrellenado Posibilidad de montaje en batería Tapas de conexión 2"
Equipo de bombeo	Bomba de aspiración: Monofásica 40-60 l/m Caudalímetro total y parcial Manguera con boquerol (4 m de largo) Armario metálico con llave y anclaje para boquerol



El depósito es de polietileno de doble pared y tiene una capacidad de 1500 litros. El mismo está homologado y cuenta con un recubrimiento especial, de color verde oscuro, que previene su deterioramiento por rayos UV. El equipo de bombeo se compone de una bomba de aspiración, un caudalímetro y un boquerol automático, todos colocados en un armario ubicado a un lado del depósito, el cual se asegura con llave para evitar la manipulación del combustible por personal no autorizado. La figura 3.7 presenta una foto del depósito, una vez instalado en el campo de pruebas.



*Figura 3.7. Depósito de combustible.*

### 3.3 Sistemas de medida

La instrumentación fue apropiadamente elegida para permitir la medición de los siguientes parámetros:

- la velocidad de combustión, deducida a partir de los datos de peso registrados mediante una balanza electrónica (apartado 3.3.1);
- la temperatura de la llama y la temperatura del líquido, en particular del combustible y de una parte de la capa de agua (apartado 3.3.2);
- la radiación procedente de la llama (apartado 3.3.3);
- las principales variables atmosféricas (apartado 3.3.4);
- la longitud de la llama (apartado 3.3.5);
- el residuo no quemado al final de la prueba (apartado 3.3.6).

### 3.3.1 Velocidad de combustión

La velocidad de combustión es un parámetro fundamental en el modelado de los incendios de balsa. Su estimación se efectúa a partir del nivel de combustible contenido en la balsa, mediante un proceso de derivación del espesor de combustible respecto al tiempo (ecuación 3.1). De esta manera, se obtiene la velocidad de disminución de la superficie del combustible, expresada normalmente en mm/s:

$$\dot{y} = \frac{dh}{dt} \quad (3.1)$$

Una obtención directa del nivel de combustible en las balsas es imposible, ya que un sistema de medida directo no aguanta las temperaturas a las cuales estaría expuesto. Basándose en el hecho de que el nivel de combustible superior a la capa de agua es directamente proporcional al peso ejercido por el mismo combustible sobre una superficie, se pensó obtener el parámetro deseado mediante la medida del peso de una columna de agua en comunicación, según el principio de los vasos comunicantes, con la balsa. En la figura 3.8, se presenta un esquema del sistema de medición; cabe destacar que, debido a la diferente densidad de los dos líquidos, el nivel en el recipiente sobre la balanza no es el mismo que en las balsas y, en particular, es más bajo en el primero.

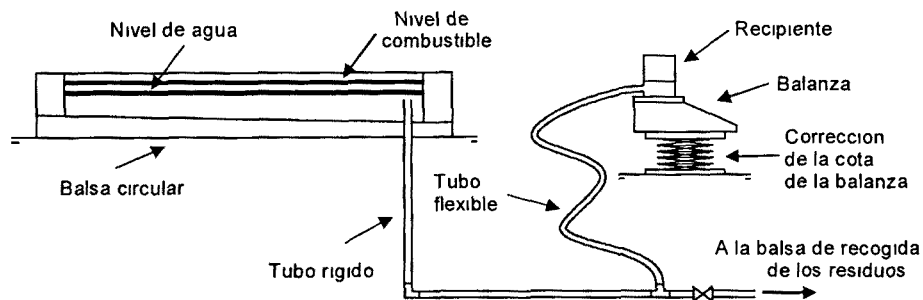


Figura 3.8 Sistema de medida de la velocidad de combustión

La conexión entre la balsa y el recipiente se realizó mediante cinco tubos independientes, uno para cada balsa. Cada tubo se compone de un primer trozo en acero de 3/8" de diámetro que va desde las balsas hasta la construcción de protección de la balanza, y de una segunda parte en plástico flexible del mismo diámetro conectada con el recipiente situado sobre la balanza. La parte final del tubo se afirma oportunamente, de manera que las tensiones, que se generan en el mismo al llenarse y vaciarse de agua, no influyan en la medida. Los tubos de acero se llenan de líquido desde el fondo de las balsas, así que en el recipiente sólo hay agua, siendo la cantidad de combustible muy pequeña en comparación. Además, la balanza se apoya sobre un dispositivo que permite regular la cota a la cual se encuentra, para garantizar una cantidad de agua en el recipiente, evitando, al mismo tiempo, posibles vertidos.



Como prueba de la validez del sistema elegido, se demuestra a continuación como las variaciones de peso registradas por la balanza son directamente proporcionales a las variaciones de nivel de combustible en la balsa. Una variación de nivel del combustible en el tiempo, por ejemplo debido a la combustión de parte de dicho combustible, comporta un trasvase de un volumen de agua  $\Delta V_{MIG}$  del recipiente a la balsa. Por el principio de los vasos comunicantes resulta:

$$\frac{\Delta V}{A} \rho_f - \frac{\Delta V_{MIG}}{A} \rho_w = \frac{\Delta V_{MIG}}{A_R} \rho_w \quad (3.2)$$

donde:

$\Delta V$  = variación volumétrica del combustible en la balsa.

$A$  = área de la balsa.

$A_R$  = sección del recipiente puesto sobre la balanza.

$\rho_f$  = densidad del combustible.

$\rho_w$  = densidad del agua.

De la ecuación (3.2) se obtiene:

$$\frac{\Delta V}{A} = \Delta V_{MIG} \frac{\rho_w}{\rho_f} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A_R} \right) \quad (3.3)$$

Siendo el grupo  $\Delta V_{MIG} \cdot \rho_w$  igual a  $\Delta W$  —diferencia de peso registrada por la balanza— y la relación  $\Delta V/A$  a la variación de nivel de combustible  $\Delta h$ , así la ecuación (3.3) se puede escribir como:

$$\Delta h = \frac{1}{\rho_f} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{A_R} \right) \Delta W \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) demuestra claramente que las variaciones de nivel del combustible producen variaciones proporcionales en el peso medido por la balanza. Como el área del recipiente es muy pequeña en comparación con el área de balsa, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\Delta h = \frac{\Delta W}{A_R \rho_f} = F_B \Delta W \quad (3.5)$$

El coeficiente  $F_B$  es entonces directamente calculable y depende esencialmente del área de la balsa y de la densidad del combustible. No obstante, se prefirió efectuar en cada prueba un proceso de tara, para asegurarse del correcto funcionamiento del sistema. La tara se realizó vertiendo el combustible en cantidades conocidas y observando las variaciones de peso correspondientes.

Para medir la pérdida de peso se utilizó una balanza electrónica de la marca METTLER TOLEDO, modelo PL-1501-S, cuyas especificaciones se presentan en la tabla 3.4. La pérdida de peso se registra en una computadora por medio del software de adquisición de datos, que calcula en tiempo real la velocidad de combustión, multiplicando la diferencia de peso por el factor de conversión  $F_B$  calculado en la fase de tara.

Tabla 3.4. Especificaciones técnicas de la balanza.

METTLER TOLEDO, modelo PL-1501-S	
Capacidad	1510 g
Precisión	0,1 g
Repetibilidad	±0,08 g
Linealidad	±0,2 g
Diámetro de platillo	160 mm
Interfase	RS232
Otras características	Unidad de pesada seleccionable Pesada en porcentaje Pesaje dinámico



### 3.3.2 Temperatura

Al fin de medir la temperatura se utilizaron dos diferentes tipos de sistemas de medida, por contacto o sin contacto. Una comparación entre los dos tipos de medidores se indica en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Comparación entre los diferentes sistemas de medida de temperatura empleados.

Termopares (medida por contacto)	Cámara termográfica (medida sin contacto)
<b>CONDICIONES</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen contacto térmico entre el detector y el objeto a medir.</li> <li>• La temperatura del objeto a medir no debe variar al ponerse en contacto con el detector.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocimiento de la emisividad del objeto a medir.</li> <li>• Se debe eliminar el ruido de fondo.</li> <li>• El detector debe recibir una radiación suficiente desde el objeto.</li> </ul>
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La temperatura de un objeto pequeño tiende a cambiar debido al contacto.</li> <li>• La medida de la temperatura de un objeto móvil es difícil.</li> <li>• Los tiempos de respuesta son relativamente lentos, resultando no apropiados para la medida de la temperatura en los periodos transitorios.</li> <li>• Para grandes superficies se deben utilizar muchos detectores.</li> <li>• Se puede medir la temperatura interna de un objeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al no existir contacto, el comportamiento del objeto no es alterado.</li> <li>• Se puede medir con facilidad la temperatura de objetos móviles.</li> <li>• La constante de tiempos es del orden de microsegundos, resultando apropiados para la caracterización de fenómenos transitorios.</li> <li>• Un solo detector permite medir toda una superficie.</li> <li>• La medida se limita a la temperatura de la superficie del objeto.</li> </ul>

### Termopares

Durante las pruebas fueron utilizados 32 termopares con las siguientes finalidades

- medición de la temperatura en el eje de las balsas en toda la llama visible,
- obtención de un perfil de temperatura en la zona de llama continua,
- medición de la temperatura en el interior del líquido

En todos los casos se utilizaron termopares de *tipo K* (cromo y aluminio), ya que son instrumentos aptos para funcionar en ambientes oxidantes y a temperaturas entre 500 °C y 1250 °C, gracias a un aislamiento interno con Inconel 600. Sin embargo, en cada situación, se utilizaron sensores con diferentes diámetros —parámetro influyente sobre la merca del sistema— y diferentes estructuras de soporte.

La señal registrada por los termopares se gestiona con los módulos de FieldPoint y se analiza en tiempo real con el software FireALL (véase el apartado 3.4).

A continuación, se detallan las características de los termopares usados en cada una de las situaciones.

#### *a) Zona de llama intermitente/Penacho de humo*

Se utilizaron termopares de *tipo K*, de 3 mm de diámetro (aislamiento Inconel 600 incluido), con una fuerza electromotriz de 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Debido al diámetro bastante grueso, estos sensores tienen un tiempo de respuesta elevado. Sin embargo, en la zona de llama considerada —intermitente y/o el penacho de humo según el incendio— no tiene mucho sentido tratar de individualizar el seguimiento instantáneo de la temperatura, en cuanto el termopar se encuentra alternativamente en contacto con la llama y con el humo.

Los termopares se distribuyeron en las 7 barras de acero de la torre metálica —véase el apartado 3.2.2—, en correspondencia con el eje de las balsas. En la figura 3.9 se puede observar una representación esquemática de la posición de los sensores, constante para todas las pruebas.

En la tabla 3.6 se indica la composición química de los termopares usados en este trabajo.

*Tabla 3.6 Composición química de los termopares puestos en la torre metálica*

	Elemento positivo KP-cromel	Elemento negativo KN-alumel
Ni	90%	95%
Cr	10%	---
Al	---	2%
Mn	---	2%
Si	---	1%

A alturas elevadas, desde 4 m hasta 12 m, el montaje y desmontaje de los termopares no es fácil; por lo tanto, se decidió posicionarlos al principio de la serie de experimentación y de quitarlos al final del estudio (el proceso de montaje y el desmontaje requiere casi un día entero).

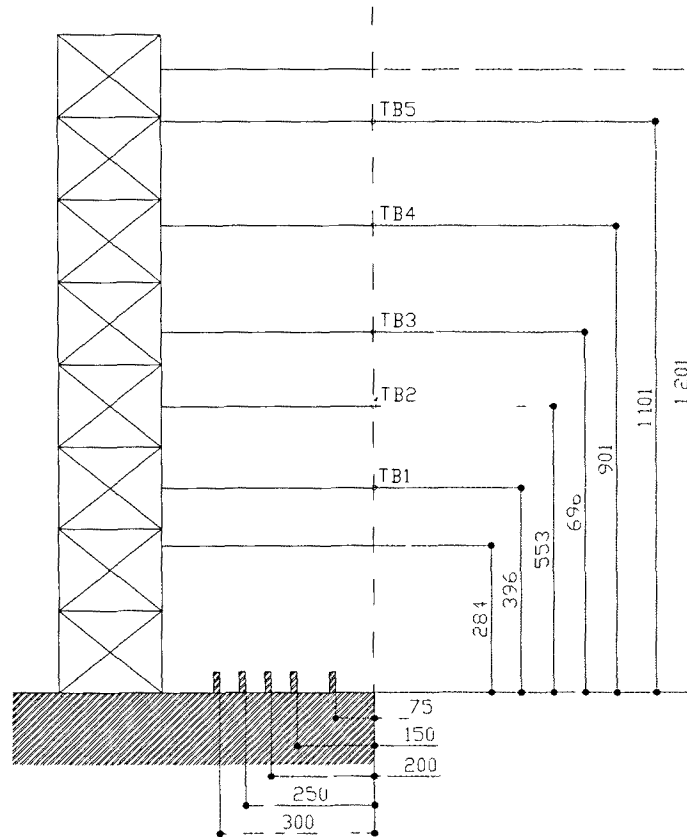


Figura 3 9 Posicionamiento de los termopares a lo largo de la torre metálica (medidas en centímetros) Los círculos rojos representan los termopares

#### b) Zona de llama continua

En esta parte del incendio, las llamas tienen un carácter constante, es decir, no pulsan, así que medir las variaciones de temperatura con el tiempo asume una connotación importante en el marco de las identificaciones de las fases del incendio. Los termopares utilizados tienen que tener una inercia suficientemente baja como para poder reaccionar rápidamente a las variaciones de temperatura. Se eligieron sensores de *tipo K* de 1 mm y 1,5 mm de diámetro (aislamiento de Inconel 600 incluido).

Estos termopares se sujetaron con cables puestos en tensión mediante la estructura metálica descrita en el apartado 3.2.2. Un esquema de la misma se ofrece en la figura 3.10.

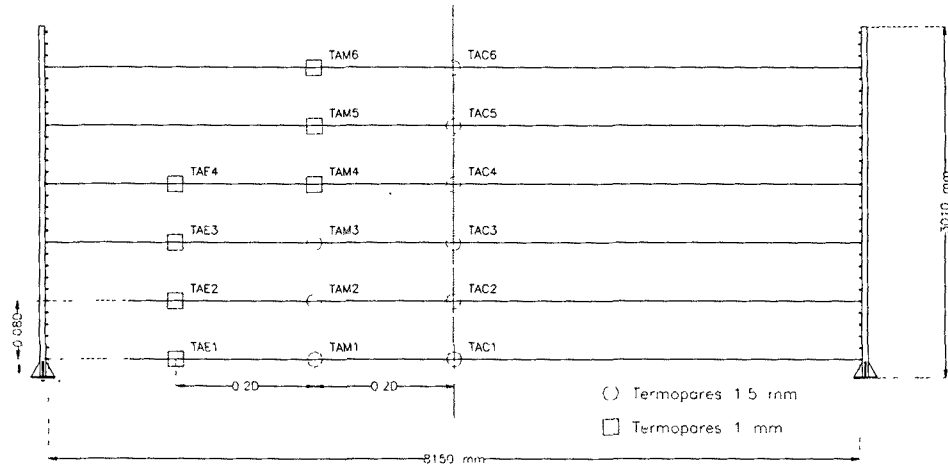


Figura 3.10. Posicionamiento de los termopares en los alambres de soporte.

La posición de los termopares fue elegida de manera que éstos cubrieran el perfil entero de la zona de llama continua. Consecuentemente, las distancias entre los sensores varían con el diámetro de la balsa utilizada en la prueba. Los valores que asumen dichas distancias se indican en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Distancias entre los termopares en la zona de llama continua.

Diámetro	Distancia axial (cm)	Distancia radial (cm)
1,5	10	30
3	20	60
4	30	80
5	40	100
6	50	120

### c) Interior del líquido

En las pruebas del proyecto FOC3 se incrementó el número de termopares en el interior del líquido respecto a los dos trabajos precedentes, para tener más información sobre la temperatura del combustible, del agua y de la interfase entre los dos. Se utilizaron sensores, siempre de *tipo K*, de 1 mm de diámetro, aislamiento Inconel 600 incluido, que, debido a las pequeñas dimensiones, garantizan una inercia muy baja, indispensable para mediciones rápidas en el interior del líquido.

Como ya se ha explicado en el apartado 3.2.2, para colocar los termopares se usó una pieza metálica oportunamente diseñada. Los sensores fueron nombrados con una numeración progresiva desde TL1 hasta TL10, empezando por el termopar puesto más



abajo. Durante los ensayos, la pieza fue colocada de manera que, al comienzo del incendio, el termopar TL5 (el quinto empezando a contar desde abajo) quedara en la interfase agua-combustible.

### Cámara Termográfica

En los tres proyectos llevados a cabo por el CERTEC se utilizó, para captar imágenes térmicas para la representación de la distribución de temperatura superficial de la llama, una cámara termográfica de rayos infrarrojos modelo Thermovision 570 Pro, de la empresa FLIR Systems, cuyas especificaciones técnicas se indican en la tabla 3.8.

*Tabla 3.8 Especificaciones de la cámara termográfica Thermovision 570 Pro*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Rangos de medida	-20 ± 500 °C 300 ± 800 °C 350 – 1500°C
Precisión	± 2% del rango o ± 2 °C
Sensibilidad térmica	< 0,15 °C
Campo de visión (H × V)	24° × 18°
Distancia de enfoque mínima	0,5 m
Tipo de detector	FPA (Focal Plane Array) 320×240 pixel
Rango espectral	7,5 – 13 μm
Temperatura de trabajo	-15 °C ± 50 °C
Temperatura tolerable	-40 °C ± 70 °C
Peso (con batería)	2,3 kg

La cámara, calibrada para un rango espectral comprendido entre 7,5 y 13 μm, crea las imágenes termográficas —en escalas de color o de grises— mediante un sistema Focal Plane Array (FPA) que, trabajando con una matriz bidimensional 320 × 240, capta simultáneamente el valor de todos los puntos de la imagen termográfica, proporcionando fotografías de resolución elevada.

Las imágenes pueden ser almacenadas en una tarjeta de memoria PCMCIA de 170 MB, con una capacidad de 1000 imágenes, pero se prefirió, debido a la gran cantidad de información registrada durante las pruebas, desarrollar un programa que permitiese memorizar los datos en un ordenador portátil. El programa, nombrado FireALL, se describe en el apartado 3.4.1. El software interno de la cámara permite elegir el rango de medida, para optimizar la resolución de color de las imágenes registradas. Gracias a un filtro adicional, el dispositivo puede registrar temperaturas de hasta 1500 °C.

La cámara, con campo de visión de 24° × 18° y distancia mínima de enfoque de 0,5 m, está provista de zoom electro-óptico con capacidad de hasta 4 aumentos. Funciona con una batería recargable de 90 minutos de autonomía o con alimentación eléctrica y también está provista de un trípode de aluminio para posicionarla y sujetarla.

### 3.3.3 Radiación

Para el proyecto FOC3 se adquirieron tres medidores de flujo de calor, de la empresa Medtherm, utilizados para la medición de:

- el flujo de calor irradiado a los alrededores;
- el poder emisivo de la llama;
- el calor transferido desde la llama al combustible.

Se utilizaron sensores del tipo Schmidt-Boelter. El principio de funcionamiento se basa en que la transferencia de calor en una lámina unidimensional, que separa una fuente fría y una fuente caliente, es proporcional a la diferencia de temperatura entre las mismas. La diferencia de temperatura se mide por medio de termopares, sensores que tienen la ventaja de generar un voltaje, correspondiente a la diferencia de temperatura entre dos uniones metálicas. Una termopila se construye conectando en serie varios termopares, para amplificar el voltaje correspondiente a una cierta diferencia de temperatura. Normalmente estas termopilas se realizan envolviendo una lámina de resistencia térmica con un cable conductor y luego plateando uno de los lados con un metal diferente. En la figura 3.11 se esquematiza el funcionamiento de una termopila y se enseña la construcción de un sensor del tipo Schmidt-Boelter.

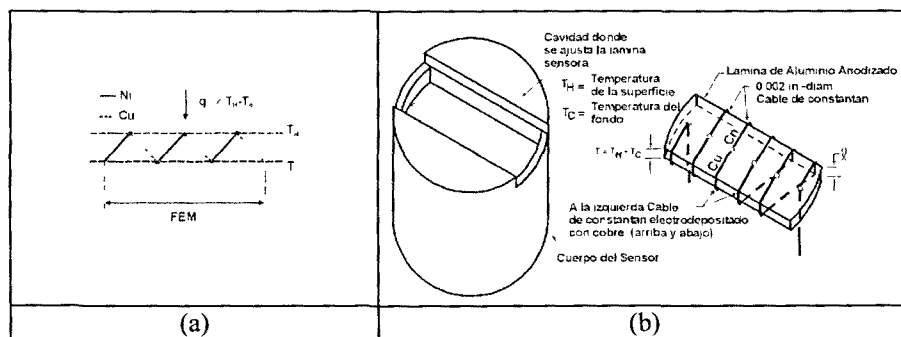


Figura 3.11. (a) Esquema de funcionamiento de una termopila. (b) Construcción de un sensor Schmidt-Boelter.

Dos de los sensores utilizados son transductores de flujo de calor modelo 64-2-16 y uno es un dispositivo dual modelo 64-20T-20R(S). Como elemento opcional se adquirió un limitador de visión que se acopla a uno de los transductores. Todos los sensores, incluso el sensor con limitador de visión, fueron calibrados de acuerdo con los estándares ISO/IEC 17025, que se pueden encontrar en el NIST (National Institute of Standards and Technology). Las características de los dispositivos se presentan en la tabla 3.9.

Los transductores de flujo de calor total miden la suma de calor por radiación y convección. Por el contrario, un radiómetro es un medidor de flujo de calor diseñado de tal manera, que al mismo llegue solamente el calor transferido por radiación. Esto se logra aislando el sensor por medio de una ventana, transparente a la radiación infrarroja y que impide la transferencia de calor por convección. Las ventanas más utilizadas son

las de zafiro, ya que son muy económicas y no requieren cuidados especiales, pero también se utilizan otros materiales, como el sulfuro de selenio.

Los sensores 64-2-16 son medidores del flujo de calor total, que soportan hasta 23 kW/m<sup>2</sup>. La señal de salida generada es un voltaje, directamente proporcional a la cantidad de calor recibida. El sensor está recubierto de una película negra de alta absorbancia, al fin de captar toda la radiación que recibe. Dado que, durante las pruebas, estos dispositivos se ubican lejos de la llama, solo reciben el calor de radiación, es decir funcionan como radiómetros. Por esta razón, en algunas ocasiones no se hará distinción entre el tipo de sensor, y a todos se los denominará radiómetros. La figura 3.12 muestra un esquema de las dimensiones y una foto de los transductores del tipo 64-2-16.

Los medidores tipo 64-2-16 tienen la posibilidad de ser acoplados a un limitador de visión, que tiene la función de disminuir el ángulo de visión y permite, una vez calibrado el conjunto, medir el poder emisor de un objeto. Para la campaña experimental se adquirió un limitador de visión modelo VR-7C, con un ángulo de visión de 7°, calibrado para utilizarse adjunto a uno de los dos sensores 64-2-16 disponibles. El limitador de visión se constituye por un cuerpo cilíndrico de acero que contiene varios diafragmas en su interior. El sensor se introduce por su parte posterior y se fija mediante tornillos, como se observa en la figura 3.12 (b). La calibración se efectuó colocando el conjunto 64-2-16/VR-7C dentro de un cuerpo negro de cavidad esférica, de manera que la fuente de calor llenara el campo de visión del sensor. El cuerpo negro, de emisividad 0,999, se mantuvo a temperatura constante, medida con un termopar tipo S en equilibrio térmico con el mismo cuerpo.

El dispositivo dual modelo 64-20T-20R(S) cuenta con dos sensores: un transductor de calor total y un radiómetro. Durante las pruebas se coloca atravesando la capa de combustible, con la cara hacia arriba, mirando hacia el interior de la llama, con la finalidad de medir el flujo de calor que alcanza la superficie del combustible. Dado que el sensor estará inmerso en las llamas, dispone de un sistema de refrigeración por conducción de agua, que consiste en unos tubos que conducen el agua de enfriamiento por el interior del cuerpo y mantienen la fuente fría a una temperatura lo suficientemente baja como para que no disminuya el intercambio de calor y no quede afectada la medida. El modelo 64-20T-20R(S) tiene las mismas dimensiones que el 64-2-16; su tamaño reducido hace que no se creen interferencias apreciables en la capa de combustible.

Durante los ensayos experimentales, los dispositivos se instalaron en pies de sujeción verticales, formados por una base y un mástil de acero, al cual se aseguraron mediante pinzas de laboratorio. Se construyeron dos tipos de pies de sujeción:

- Uno de una altura de 40 cm, para ajustar el transductor 64-20T-20R(S) que se coloca en el interior de las balsas de manera que los sensores queden, aproximadamente, a 2 mm sobre la superficie libre del combustible;

- Dos de 1,80 metros de altura, para sujetar los sensores 64-2-16 a las distancias definidas según el plan de experimentos (véase la tabla 3.16).

Tabla 3.9. Características de los sensores de flujo de calor.

	64-2-16	64-20T-20R(S)-20898
Rango de medida	0 – 23 kW/m <sup>2</sup> (0 – 2 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0 – 227 kW/m <sup>2</sup> (0 – 20 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Señal de salida	Lineal, de 0 a 12 mV al valor de escala máximo.	Lineal, de 0 a 15 mV al valor de escala máximo.
Máxima temperatura de trabajo	200 °C en el cuerpo del sensor	200 °C en el cuerpo del sensor
Repetibilidad	± 0,5 %	± 0,5 %
Incertidumbre de la calibración	± 3% de la respuesta al flujo de calor incidente, con un factor de cobertura k=2 y un nivel de confianza de ~95%	± 3% de la respuesta al flujo de calor incidente, con un factor de cobertura k=2 y un nivel de confianza de ~95%
Absorbancia del recubrimiento del sensor	0,94 nominal, de 0,3 a 15,0 μm.	0,94 nominal, de 0,3 a 15,0 μm.
Cables de conducción	Tipo: 24 AWG, dos filamentos de cobre plateado. Aislamiento de TEFLON para cada hilo, mallado metálico y recubrimiento de TEFLON del conjunto 36" de largo.	Tipo: 24 AWG, filamentos de cobre plateado. Aislamiento de TEFLON para cada hilo, mallado metálico y recubrimiento de TEFLON del conjunto 36" de largo.
Polaridad de los cables	Blanco: Positivo Negro: Negativo Conductores aislados del cuerpo del sensor.	Blanco: Positivo Negro: Negativo Conductores aislados del cuerpo del sensor.
Constante de tiempo (típicas)	Salto de 568 – 1136 kW/m <sup>2</sup> (50 – 100 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 120 ms Salto de 23 – 341 kW/m <sup>2</sup> (2 – 30 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 250 ms Salto de 2 – 11 kW/m <sup>2</sup> (0,2 – 1 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 350 ms	Salto de 568 – 1136 kW/m <sup>2</sup> (50 – 100 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 120 ms Salto de 23 – 341 kW/m <sup>2</sup> (2 – 30 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 250 ms Salto de 2 – 11 kW/m <sup>2</sup> (0,2 – 1 BTU·ft <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ): 350 ms
Tipo de sensores	Medtherm termopila Schmidt-Boelter	Medtherm termopila Schmidt-Boelter
Impedancia	Menor que 1000 Ω (250 Ω nominal)	Menor que 1000 Ω (250 Ω nominal)
Presión límite de operación	Invulnerable a alta presión o vacío	Invulnerable a alta presión o vacío
Refrigeración	No refrigerado	Por agua
Tipo de montura	Cuerpo pulido con pestaña	Cuerpo pulido con pestaña
Radiómetro	-	Ventana de zafiro Ángulo de visión de 180° Transmitancia ~ 0,85 (para una longitud de onda de 0,2 a 4 μm y un espesor de 0,5 mm)

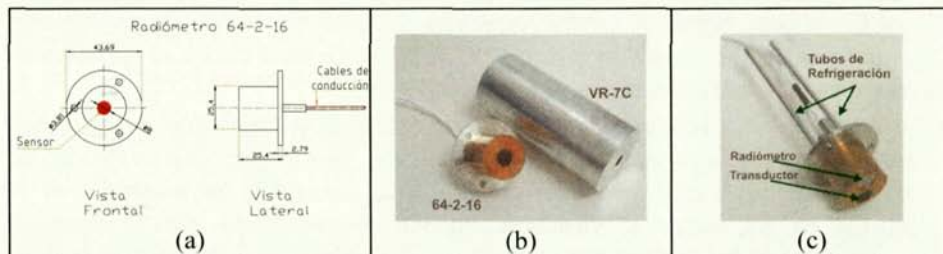


Figura 3.12. (a) Esquema de un sensor 64-2-16. (b) Foto de un sensor 64-2-16 y del limitador de visión. (c) Foto del sensor dual 64-20T-20R(S).

Además se diseñaron, para facilitar la sujeción de los sensores por medio de las pinzas, unos soportes cilíndricos de aluminio que se aseguran mediante tornillos a la pestaña del dispositivo. La foto de la figura 3.13 muestra como quedaba instalado el sensor dual.

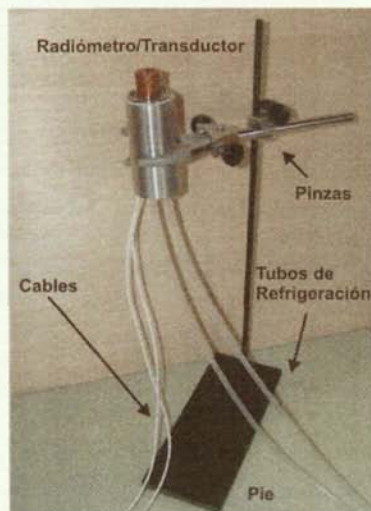


Figura 3.13. Foto del dispositivo dual 64-20T-20R(S) instalado en el pie de sujeción.

### 3.3.4 Variables atmosféricas

Utilizando la torre meteorológica GroWeather, de la empresa Davis Instruments, de la cual se presenta una foto en la figura 3.14, se determinaron:

- la temperatura del aire y del suelo;
- dirección y velocidad del viento, gracias a un anemómetro integrado;
- la radiación solar;
- la presión atmosférica;
- la humedad relativa;
- el punto de rocío.

El equipo registra automáticamente un dato cada 30 minutos pero, mediante el software FireALL, puede llegar a grabar aproximadamente un dato cada segundo. Consecuentemente la estación, situada a 10 m de altura y a 40 m del eje de las balsas en dirección oeste, se utilizó en dos modalidades distintas:

- Antes de empezar la experimentación y en los días en los cuales no se efectuaban pruebas, la estación registró datos cada 30 minutos, para conocer cual es el curso de la velocidad del viento durante el día, al fin de determinar los momentos de la jornada en los cuales el viento es mínimo. Se estableció que la dirección predominante del viento es hacia el este por el día y hacia el oeste durante la noche y que las horas mejores para realizar los experimentos son las de la mañana.



- En los periodos de desarrollo de las pruebas, el aparato registró datos a la máxima velocidad para determinar la evolución exacta de las variables meteorológicas en el desarrollo del incendio.



Figura 3.14. Torre meteorológica GroWeather.

La estación meteorológica, alimentada con energía solar, está provista de un visualizador/gestor de datos en comunicación con el ordenador portátil mediante el software integrado GroWeatherLink (véase el apartado 3.5.2) y de una memoria propia que le permite almacenar información también sin conexión. Para la gestión en tiempo real de los datos, se utiliza el programa FireALL, elaborado por el CERTEC (apartado 3.4.1).

Los cables de los sensores se protegen de los agentes atmosféricos y de posibles interferencias de naturaleza eléctrica con una caja de plástico, ya suministrada por la empresa.

### 3.3.5 Longitud de llama

Al fin de estudiar la longitud de llama, durante las pruebas se filmaron los incendios con dos videocámaras, dispuestas perpendicularmente entre sí, de manera de tener en cuenta la inclinación de la llama. A parte del estudio de la geometría de la llama, las cámaras se emplearon para:

- Utilizar la grabación del sonido de los videos para determinar con exactitud el instante de comienzo del *boilover*.
- Observar en que periodos los termopares están completamente comprendidos en el perfil de la llama, o sea las fases en las cuales la medida de temperatura es más fiable por la ausencia de viento.
- Controlar empíricamente el comportamiento del fuego y permitir el análisis de la parte de la llama oscurecida por el humo.

Las cámaras poseen, a parte de la salida de video convencional, una salida S-Video, la cual permite transferir la grabación a un ordenador, sin perder calidad de imagen.

Una de las cámaras de video se ubica al lado de la termográfica, ambas en posición perpendicular a la dirección predominante del viento, en el momento de la prueba. La otra videocámara, se coloca perpendicular respecto a las anteriores. Los tres dispositivos se montan sobre trípodes y se posicionan de manera que el campo de visión cubra por completo la altura máxima visible de la llama. Las dos videocámaras se alimentan con batería o mediante alimentación eléctrica.

Los videos de las experiencias, además de almacenarse y catalogarse en casetes, se digitalizan por medio de una tarjeta capturadora de video y se almacenan en discos compactos, para ser sucesivamente analizados mediante un algoritmo específico desarrollado en MATLAB.

### 3.3.6 Sistema de recogida de residuos no quemados

Para recoger los residuos no quemados una vez acabado el fuego, se utilizaron una bomba y un compresor. El conocimiento de ésta cantidad de residuos es indispensable para la obtención de la velocidad de combustión durante el *boilover*.

La bomba usada es de tipo neumático a doble membrana accionada mediante aire. El modelo es Elima-Matic E5, Metal ½", de la empresa Versa-Matic, de especificaciones:

- caudal entre 0 ÷ 53 l/min;
- presión máxima del aire de 6,9 bar;
- altura de elevación de 69 m de columna de agua;
- temperatura de trabajo entre -12 °C y 82 °C.

El compresor es de tipo portátil alternativo, modelo PROpack 250 100 de la empresa CompAir, enfriado con aire. Las características se resumen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Características técnicas del compresor.

Parámetro	Valor
Modelo	PROpack 250 100
Potencia del motor (hp)	2
Presión máxima de trabajo (psig)	130
Caudal (m <sup>3</sup> /min)	0,254
Alimentación (V)	230, monofase
Estadios de compresión	1
Numero de cilindros	2
Largo (mm)	1070
Altura (mm)	800
Ancho (mm)	390
Peso (kg)	~ 62

El *kit* comprende:

- el compresor: alternativo, lubricado, con 2 cilindros y 1 estadio de compresión;
- un tanque de aire comprimido de 100 litros de capacidad, horizontal, armado sobre ruedas, provisto de manómetro y válvula de seguridad;
- filtro de aire en la aspiración: de tipo seco para la eliminación de partículas, con silenciador;
- refrigerador posterior aire-aire con ventilador coaxial al motor principal;
- transmisión a correa;
- válvula reductora de presión con manómetro a la salida;
- motor: eléctrico monofase horizontal con una potencia de 2 HP, un régimen de 1500 rpm y una tensión de 230 V.

El compresor envía el aire comprimido al tanque a través de un colector y una válvula antiretorno; una vez alcanzado el valor de 130 psig (9 bar relativos), un presostato interrumpe la alimentación al motor. La válvula de seguridad, tarada a 11,5 bar relativos, en directa conexión con el tanque, interviene en caso de malfuncionamiento y garantiza la integridad del aparato.

### 3.4 Sistema de adquisición de datos

El número elevado de aparatos de medida comportó la necesidad de desarrollar un software de adquisición de datos, que permitiese gestionar y almacenar en tiempo real la información procedente de los dispositivos.

El software se diseñó para:

- automatizar el proceso de recogida de datos y controlar los dispositivos desde una interfase común;
- sincronizar la adquisición de datos de equipos de naturaleza muy diferente, como por ejemplo la balanza y la cámara termográfica;
- controlar todo el proceso desde uno o más terminales, conectados en red.

Además del software, el sistema posee un hardware, específicamente diseñado para adquisición de datos desde ordenadores. En este caso, se utilizó un sistema modular de entrada/salida, el FieldPoint, que se encargaba de la lectura y conversión digital de los datos provenientes de termopares y radiómetros.

#### 3.4.1 Software de adquisición FireALL

El software de adquisición es un programa que permite gestionar el proceso de recolección de datos provenientes de diferentes equipos de medida, visualizar los resultados en tiempo real y almacenar en ficheros la información adquirida durante el transcurso de las experiencias.

El software se denomina FireALL y fue desarrollado en Visual Basic versión 6.0.

Dicho software fue pensado para sincronizar y gestionar los dispositivos de medida y almacenar los datos provenientes de estos, desde una interfase común. Sin embargo, dado que no todos los dispositivos pueden conectarse a un mismo ordenador, debido a las limitaciones en el número de puertos o tarjetas PCMCIA y a la distancia que separa a los instrumentos durante las pruebas experimentales, el programa se proyectó para sincronizar la toma de datos desde varios ordenadores conectados en red. En la figura 3.15 se indican los equipos que el programa es capaz de controlar y los puertos o interfases de comunicación que cada uno de éstos utiliza, y, a la vez, se ejemplifica una de las posibles configuraciones de red. Cabe indicar, que esta misma disposición fue empleada en la mayoría de los ensayos experimentales.

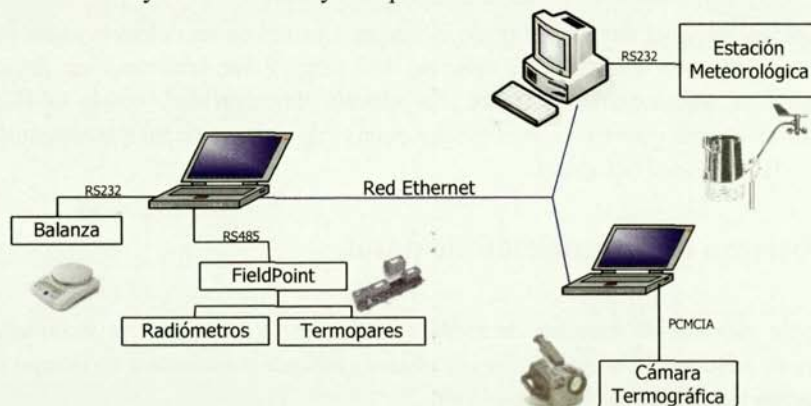


Figura 3.15. Dispositivos y sus interfases de comunicación.

Entre las características en lo que se refiere a la programación y al modo de adquisición de datos, se puede destacar el uso de:

- relojes multimedia de alta precisión;
- múltiples hilos de ejecución (del término en inglés *multithreading*).

Por medio de los relojes de alta precisión se consigue una resolución de una milésima de segundo, que no se puede alcanzar utilizando los relojes estándares de Windows. El término multihilos se refiere a la habilidad del sistema operativo de ejecutar diferentes partes de un programa, denominadas hilos o procesos, simultáneamente, compartiendo el tiempo de proceso entre cada uno de ellos. Dado que la comunicación entre los dispositivos y el ordenador puede tomar mucho tiempo en comparación a la velocidad de proceso de este último, en un programa de un único hilo el ordenador permanecería inactivo esperando la respuesta de datos del dispositivo. De esta forma, solo se podrían recibir datos de un dispositivo por vez, ya que cada proceso se ejecutaría en forma secuencial. Por el contrario, en un programa multihilos el ordenador puede consultar varios dispositivos prácticamente al mismo tiempo. Mientras que un proceso (hilo) espera recibir o enviar datos a algún dispositivo, por ejemplo, la lectura/escritura en un

puerto de comunicaciones o un archivo al disco duro, el sistema operativo continúa ejecutando otra tarea del mismo programa pero en un hilo separado.

Con respecto a la comunicación en red, el programa funciona como una aplicación cliente/servidor, donde un ordenador seleccionado como maestro controla y sincroniza el proceso de recolección de datos con los restantes. Una vez seleccionado el ordenador que actuará como maestro (servidor) y especificado cuales serán los clientes, el ordenador maestro informa a dichos clientes cuando y como se deberán almacenar los datos durante la experiencia. Por otro lado los clientes informan al servidor de los dispositivos que tienen conectados. No existe ninguna limitación en cuanto al número de ordenadores o al número de dispositivos que se puedan conectar a un ordenador. De esta forma, el programa ofrece máxima flexibilidad en lo que respecta a la conexión y distribución de los equipos.

La ventana principal del programa se presenta en la figura 3.16. En la parte superior de la pantalla se encuentran las fichas de control que permiten configurar los parámetros de la experiencia y de los dispositivos conectados. Por otro lado, la parte inferior de la ventana muestra las fichas de resultados y gráficos, así se podrá ir siguiendo en tiempo real la evolución de las variables que se desean medir. A continuación, se describen brevemente las características de las fichas de control:

- Ficha **Balanza**: se visualiza el peso en tiempo real y se puede realizar una tara. Además, permite especificar los parámetros de conversión utilizados para calcular la velocidad de combustión. La velocidad de combustión se evalúa utilizando un método de *smoothing* para filtrar el ruido del peso y derivando los datos resultantes.
- Ficha **FieldPoint**: se puede visualizar la lectura de cada uno de los canales de los módulos, para observar los valores de temperatura procedentes de los termopares y de calor determinado con los radiómetros. Es posible, además, configurar los canales y seleccionar de cuales se grabarán los valores durante la experiencia.
- Ficha **GroWeather**: se enseñan en pantalla los datos provenientes de la estación meteorológica en tiempo real. Durante el transcurso de la prueba se registran: la temperatura del aire, la velocidad y dirección del viento y la radiación solar. Los valores de la presión barométrica y de la humedad relativa solo se almacenan al comienzo de la prueba.
- Ficha **IR**: el programa se encarga de capturar las imágenes termográficas, que se almacenan en archivos en un formato propio de la cámara y pueden leerse utilizando el software suministrado a tal efecto (Thermacam Researcher). Desde la ficha IR se accede al cuadro de control de la cámara termográfica, donde se especifican los parámetros que ésta utiliza para calcular la temperatura del objeto y, además, se configura como se almacenarán las imágenes —a la máxima velocidad posible o a la velocidad de adquisición de datos de la prueba—.



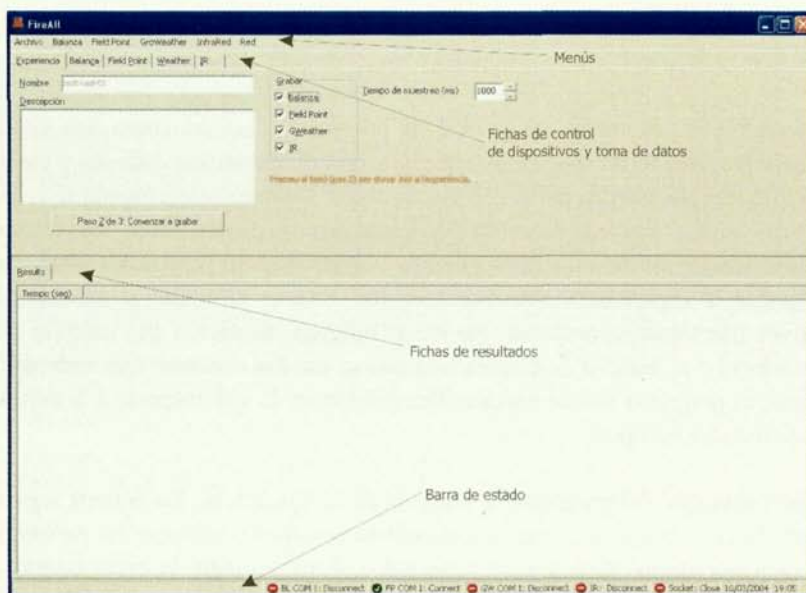


Figura 3.16. Pantalla principal del programa de adquisición de datos FireALL.

Antes de comenzar una experiencia el programa se encuentra en modo de espera, en el cual se pueden ir conectando los dispositivos y, en su caso, establecer las conexiones de red. Como paso previo al inicio de la recolección de datos, se debe especificar el nombre de la experiencia, de manera que el programa cree la carpeta donde se almacenan los archivos de datos y las imágenes termográficas. A parte de los datos adquiridos desde los equipos de medida, el software crea también un archivo de memoria, en el cual se memorizan las características de la experiencia: tiempo de inicio, equipos conectados, etc. En [MUÑO 2005] se presenta el manual operativo completo del programa de adquisición de datos.

### 3.4.2 Módulos del FieldPoint

Para recoger los datos de voltaje procedentes de los termopares y de los radiómetros, se utilizó el sistema FieldPoint, de la empresa National Instruments (figura 3.17). Se trata de un sistema modular distribuido de entradas/salidas para la adquisición de señales analógicas o digitales, constituido por las siguientes partes:

- módulo de comunicación;
- módulos de entrada/salida;
- terminales de conexión.

La figura siguiente muestra una posible configuración del sistema FieldPoint; se pueden observar dos terminales de conexión y un módulo de comunicación. Los módulos de entrada/salida deben ser montados sobre los terminales de conexión.

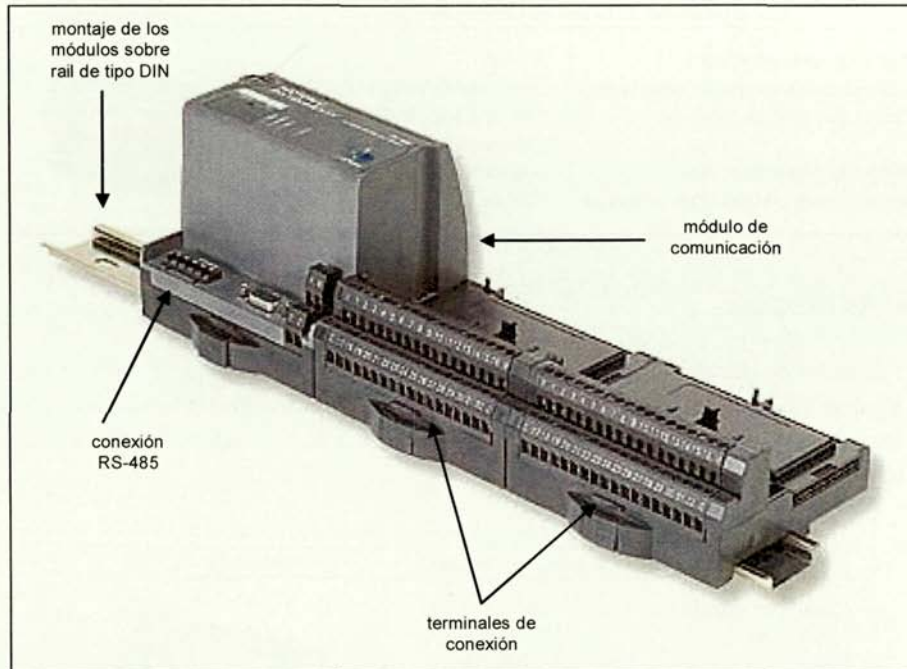


Figura 3.17. Ejemplo de configuración de un sistema FieldPoint.


### Módulo de comunicación

El módulo de comunicación, modelo FP-1001, tiene la función de unir los módulos de entrada/salida con el puerto de comunicación RS-485, a través de un bus local a alta velocidad integrado en los terminales de conexión. El dispositivo puede gestionar hasta 9 módulos de entrada/salida en la misma serie; por otro lado, una red de FieldPoint puede consistir en un máximo de 25 módulos de comunicación, así que se pueden conectar hasta 225 módulos de entrada/salida al mismo puerto de comunicación RS-485.

Durante las pruebas se usó un solo módulo de comunicación y 5 módulos de entrada, de los tipos descritos en los párrafos siguientes. El módulo FP-1001 utiliza el protocolo de comunicación Optomux, de tipo ASCII, para dialogar con los módulos de entrada y salida.

El módulo puede transmitir la señal a velocidades fijas —elegidas mediante un conmutador presente en el mismo módulo— comprendidas entre 300 bps y 115,2 kbps. La tabla 3.11 resume las características del módulo FP-1001.

Tabla 3.11. Especificaciones del módulo de comunicaciones FP-1001.


Características de la red de comunicaciones		Módulo FP-1001
Puerto de comunicaciones	RS-485	
Velocidad de transmisión de la señal	Configurable hasta 115,2 kbps	
Parámetros de comunicación	1 bit de inicio, 8 bits de datos 1 bit de parada, sin paridad	
Protocolo comunicaciones	Optomux estándar	
Distancia máxima desde el ordenador	1200 m	

Módulos de entrada

Los módulos de entrada son de dos tipos:

- Modelo FP-TC-120, apto para recibir los valores en milivoltios procedentes de los termopares y transformarlos en datos de temperatura. Las características principales se resumen en tabla 3.12.


Tabla 3.12. Especificaciones del módulo de entrada FP-TC-120.

Características de la señal de entrada		Módulo FP-TC-120
Canales de entrada	8	
Resolución	16 bits	
Filtro	50/60 Hz	
Actualización de la nueva señal	0,8 s	
<b>Tipo de termopares</b>	<b>Rango</b>	
K	-270 °C ÷ 1372 °C	

Cada módulo posee 8 canales de entrada, configurables independientemente entre ellos, en los cuales se reciben señales de tipo analógico. Como ya se ha indicado anteriormente, en las pruebas fueron utilizados 32 termopares, en consecuencia, se necesitaron 4 módulos FP-TC-120. Los módulos disponen de un filtro que elimina el ruido de fondo (en la banda de frecuencia entre 50 y 60 Hz) y son autocompensados, garantizando una buena precisión en las medidas de temperatura.

- Modelo FP-AI-110 (tabla 3.13), para obtener los parámetros procedentes de los radiómetros. Durante las pruebas fueron utilizados 4 de los 8 canales de un módulo de este tipo.

Tabla 3.13. Especificaciones del módulo de entrada FP-AI-110.

Características de la señal de entrada		Módulo FP-AI-110
Canales de entrada	8	
Resolución	16 bits	
Filtro	50/60 Hz	



### Terminales de conexión

Los terminales de conexión sirven como base donde conectar los módulos de I/O. Las bases, a parte de garantizar la alimentación, constituyen el bus local de alta velocidad que conecta los módulos de I/O con el módulo de comunicaciones. En este caso, se utilizaron terminales universales de conexión de tipo FP-TB-1 (figura 3.18).



Figura 3.18. Terminal de conexión para FieldPoint, modelo FP-TB-1.

El sistema de adquisición de datos FieldPoint, una vez montado, se posicionó dentro de un armario metálico, el cual protegía el sistema y los cables de los agentes atmosféricos. El armario, ubicado tras la torre respecto a las balsas, se protegió de la acción de la llama mediante revestimiento con lana de roca; dicho armario disponía de un enlace a la red eléctrica. El módulo de comunicación FP-1001, se conectaba a una fuente de alimentación, para proporcionar energía a todo el sistema. Mediante la interfase en serie PCMCIA-485/2 se conectaba el ordenador portátil con el puerto RS-485 del módulo de comunicación FP-1001. Alternativamente, la conexión podía realizarse mediante puerto USB, utilizando un conversor específico.

## 3.5 Software

En la tabla 3.14 se resume el software utilizado en el transcurso de la experimentación y del análisis de datos.

Tabla 3.14. Software utilizado.

Software	Empresa	Empleo y notas
FireALL	CERTEC	adquisición en tiempo real de los datos procedentes de los equipos de medida
FieldPoint Explorer	National Instruments	instalación, configuración y gestión de los módulos del FieldPoint; adjunto al mismo sistema de adquisición de datos
GroWeatherLink	Davis Instruments	memorización y gestión de los datos atmosféricos provenientes de la estación meteorológica
Thermacam Researcher	FLIR Systems	análisis de las secuencias de imágenes termográficas registradas
Cool Edit 2000	Syntrillium Software	análisis de las pistas sonoras de las grabaciones de la videocámara, en particular para determinar el periodo del <i>boilover</i>
Excel	Microsoft	análisis de los datos en hojas de calculo, gráficos
Origin	Microcall	análisis de los datos, gráficos

A continuación, se resume la descripción de los empleos de los programas listados en la tabla precedente. Se dejan a parte, el software de adquisición FireALL, ya ampliamente descrito en el apartado 3.4.1, y los programas de análisis Excel y Origin, ya que son conocidos por cualquiera que trabaje en los campos de la ingeniería o de las ciencias.

### **3.5.1 FieldPoint Explorer**

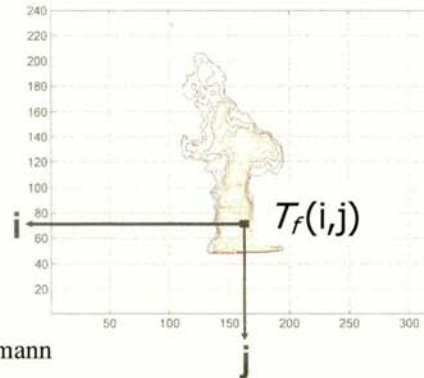
La instalación, la configuración y la gestión de los módulos de FieldPoint se realizaron con el software de programación FieldPoint Explorer versión 3.0, de la empresa National Instruments, que lo proporcionó con el mismo hardware. El programa permite configurar de forma interactiva un banco entero de módulos mediante cuadros de diálogo de fácil comprensión. La interfase usuario presenta dos ventanas de diálogo: a la izquierda de la pantalla se presenta el esquema jerárquico de los módulos del FieldPoint, mientras que a la derecha se puede controlar en tiempo real el correcto funcionamiento de cada una de las señales de entrada y, además, también configurarlas. Por otra parte, el programa contiene una librería de herramientas virtuales (subrutinas) que facilitan la comunicación entre los módulos de I/O y el software de adquisición FireALL.

### **3.5.2 GroWeatherLink**

El programa GroWeatherLink, proporcionado por la empresa Davis Instruments con la misma estación meteorológica, permitió la transmisión, memorización y tratamiento automático de los datos registrados por el dispositivo, antes y durante la realización de las pruebas. Durante la transmisión, el programa reconoce eventuales errores y protege entonces la integridad de los datos. El software GroWeatherLink fue utilizado para almacenar en la memoria interna de la estación las variables atmosféricas, en los días en los cuales no se efectuaron pruebas. Por otra lado, durante los ensayos experimentales, se empleó el programa FireALL que, utilizando las librerías contenidas en el GroWeatherLink, sincroniza la grabación de las variables atmosféricas con los datos registrados por los otros aparatos.

### **3.5.3 Thermacam Researcher**

Este software, proporcionado con la misma cámara termográfica, permite obtener la distribución de temperatura de la imagen grabada. Como se observa en la figura 3.19, la imagen captada es una matriz de puntos, cada uno con un valor de temperatura asociado  $T_T(i,j)$ , a partir del cual se puede, mediante la ley de Stefan-Boltzmann, obtener el poder emisivo.



$$E(i, j) = \epsilon \sigma T_f^4(i, j) \quad \text{=< ley de Stefan-Boltzmann}$$

Figura 3.19. Imagen IR capturada y matriz de temperatura correspondiente.

### 3.5.4 Cool Edit

El software Cool Edit de la empresa Syntrillium fue utilizado para analizar las pistas sonoras de las grabaciones de las videocámaras, al fin de establecer el instante de comienzo del *boilover*. El Cool Edit es un programa pensado para gestionar archivos sonoros de varios formatos. Tiene la gran ventaja de mostrar en pantalla la evolución de la presión acústica con el tiempo (figura 3.20).



Figura 3.20. Ventana principal del programa Cool Edit.



La unidad de medida de la curva puede ser elegida entre varias opciones, incluida la posibilidad de usar los decibelios. Sin embargo hay que destacar que:

- En el momento que las pistas analizadas provenían desde una grabación y tenían que ser transportadas de una videocinta a un archivo en formato .wav, el sonido resultaba ser “virtual”, es decir una imagen del sonido original producido por el fenómeno físico; por lo tanto, medirlo en decibelios no habría sido correcto.
- La curva enseñada por el Cool Edit no representa el nivel de presión acústica, sino el valor absoluto de presión acústica; dicho en otras palabras conserva las informaciones de frecuencia del sonido y de su intensidad.

En consecuencia, se eligió, como unidad de medida, una escala relativa de intensidad del sonido. De hecho, el análisis efectuado no tiene el fin de caracterizar los niveles sonoros de la llama en función del tiempo, sino la determinación del instante del comienzo del *boilover*; por lo tanto, la única característica que necesita el software elegido es mostrar cuanto más claramente posible el momento en el cual se verifica el fuerte cambio en la intensidad del sonido debido al inicio del fenómeno. Dicha característica, como se ve en la figura 3.20, está bien definida por el Cool Edit; es bastante evidente que, en el incendio considerado, el *boilover* empieza, aproximadamente, a 1 minuto y 25 s desde el inicio de la combustión (instante a partir del cual se nota el incremento de la intensidad acústica).

### 3.6 Combustibles utilizados

Los combustibles utilizados en las pruebas fueron *gasóleo* y *gasolina*, dos hidrocarburos para los cuales no se dispone de información suficiente para estimar adecuadamente las características de los incendios de grandes dimensiones. En la literatura específica en el ámbito de los incendios de balsas, muy pocos son los trabajos que se han ocupado de gasóleo y gasolina. No obstante, estos dos combustibles presentan algunas ventajas importantes respecto a otros hidrocarburos:

- Su uso está ampliamente extendido, tanto industrialmente como en el sector doméstico, con fácil disponibilidad e interés práctico debido al elevado número de zonas de almacenamiento y a la importancia del transporte a gran escala.
- La gasolina y el gasóleo son fracciones petrolíferas constituidas por mezcla de hidrocarburos; por esto, presentan motivos de interés científico no peculiares en las sustancias combustibles puras, en cuanto originan una destilación que procede simultáneamente con la combustión. La consecuencia es una disminución progresiva de la velocidad de combustión con el tiempo y, sobre todo, la posibilidad del desarrollo del *boilover* y del *thin layer boilover*, cuyo análisis constituye el objetivo principal del presente trabajo.
- El gasóleo y la gasolina son representativos de un amplio rango de hidrocarburos: la gasolina presenta las características típicas de los hidrocarburos ligeros —está constituida básicamente por hexano—, y el gasóleo de las fracciones petrolíferas pesadas.

En la tabla 3.15 se resumen las principales características del gasóleo y de la gasolina empleados. La información ha sido proporcionada por REPSOL, empresa proveedora del combustible.

*Tabla 3.15 Propiedades de los combustibles usados*

Propiedad	Gasolina	Gasóleo
Nombre comercial	REPSOL 98 sin plomo	REPSOL tipo C
Densidad a 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	725 – 780	820 – 860
Curva de destilacion		
65 % (°C)		min 250
85 % (°C)		min 350
95 % (°C)		min 370
temperatura final (°C)	max 215	
residuo (%vol)	max 2	
cantidad evaporada a 70 °C (%vol)	15 – 45	
cantidad evaporada a 100 °C (%vol)	40 – 65	
cantidad evaporada a 180 °C (%vol)	min 85	
Viscosidad cinematica a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	-	2 – 4,5

La densidad proporcionada por la empresa es en realidad un rango bastante amplio y, por lo tanto, fue también medida con un densímetro, resultando prácticamente igual a la media aritmética de los dos extremos indicados por REPSOL. Por ello y a los fines del cálculo, se asumieron los valores de 752 kg/m<sup>3</sup> para la gasolina y 840 kg/m<sup>3</sup> para el gasóleo.

Durante la preparación de las pruebas, el gasóleo se vertía por medio del surtidor incorporado al depósito de polietileno, descrito en el apartado 3.2.3. Por otro lado, la gasolina se almacenaba en tanques de acero de 200 litros y se traspasaba a bidones portátiles antes del llenado de las balsas. Inmediatamente antes de la experiencia, los bidones se vertían en la balsa, para acelerar el proceso de llenado y minimizar la evaporación del combustible. En [CHA1 2001] se demuestra que, con las precauciones descritas, la cantidad de gasolina evaporada era despreciable. Hay que destacar que en una de las pruebas se empleó una mezcla 50% gasolina y 50% gasóleo, con la idea de comprobar las características de un combustible intermedio entre estos dos extremos y, a la vez, de disponer de un combustible con un rango de temperaturas de ebullición más amplio. Las propiedades químico-físicas de la mezcla se simularon mediante el software HYSYS.

### 3.7 Diseño y metodología experimental

El objetivo de la última campaña experimental y de esta tesis, es la mejora del conocimiento del mecanismo de formación y propagación del *boilover* de capa fina y la contribución al modelado de incendios de balsa de hidrocarburos de gran escala. El número de pruebas llevadas a cabo durante dicha campaña experimental fue de 22. En

la tabla 3.16 se indican las características principales de los ensayos. Los incendios han sido nombrados de manera que se pueda directamente conocer el diámetro de la balsa y el combustible utilizado en la prueba, para una más fácil identificación.

En el diseño del plan de experimentos se tuvo en cuenta que el número de pruebas a llevar a cabo depende principalmente de la cantidad de variables a estudiar (velocidad de combustión, temperatura de llama, etc.) y de los parámetros que influyen sobre dichas variables (diámetro de las balsas, tipo y espesor de combustible, etc.). Sin embargo, en esta fase de diseño se trató de minimizar el número de pruebas a efectuar, debido a:

- factores económicos: las grandes cantidades de combustible utilizado, sobretodo en los ensayos con diámetros mayores, elevan notablemente el coste de los ensayos.
- factores medioambientales: en incendios de gran escala, se producen grandes cantidades de humo y hollín.
- factores de seguridad: con el progresar de la campaña experimental, la instalación se deteriora y aumenta la posibilidad de riesgo de accidentes.

También fueron valorados los siguientes aspectos de carácter práctico:

- Las pruebas tenían que ser realizadas en condiciones de viento que no comprometieran el éxito de las mismas. Analizando previamente las variables atmosféricas mediante la estación meteorológica, se observó que el momento ideal para la realización de los ensayos era a primera hora de la mañana.
- Tras la experiencia adquirida en años de estudio de los incendios de balsas, fue calculada previamente, para cada combustible, la cantidad mínima necesaria para alcanzar el estado estacionario de la combustión (periodo de tiempo durante el cual la velocidad de combustión es aproximadamente constante). De esta manera se ha podido estudiar la influencia del espesor de la capa de combustible, minimizando la cantidad consumida.
- Al comienzo de la serie de experimentos, se llevaron a cabo algunas pruebas preparatorias, en la balsa de 3 m de diámetro, con la finalidad de comprobar el funcionamiento del sistema y determinar el funcionamiento óptimo de los aparatos. Sin embargo, en la realización de la campaña experimental, se adoptó, cuando era posible, el criterio de realizar las pruebas por orden decreciente de diámetro, con el objetivo de minimizar el deterioro de las balsas.
- Se realizó una sola medida de poder emisivo de la zona de llama continua, para cada pareja combustible-diámetro. El sensor fue colocado a distancias calculadas de manera que el campo de visión del limitador incluyera exclusivamente la zona de interés.
- Los medidores de flujo de calor total fueron posicionados a distancias de 3 y 5 veces el diámetro desde el centro de las balsas, para poder comparar sus datos con los datos de la bibliografía. Como ya se ha explicado en el apartado 3.3.3, a estas distancias el calor por convección es despreciable y el transductor funciona como un radiómetro.

- Debido a que, al variar el diámetro de la experiencia, se modificaba la posición de la mayoría de los aparatos de medida, en una misma mañana se realizaron pruebas con una sola balsa, al fin de optimizar el tiempo transcurrido entre dos ensayos consecutivos y aumentar el número diario de pruebas.
- Durante las pruebas se tomaron todas las precauciones necesarias para trabajar en condiciones de máxima seguridad. En primer lugar, cada incendio estaba asistido por una persona específicamente entrenada en la intervención en caso de accidentes, que realizaba también la refrigeración del suelo de alrededor de las balsas. A parte, todo el personal y los equipos se mantuvieron a distancias apropiadas y los cables no enterrados fueron recubiertos con revestimientos de lana de roca.

Tabla 3.16. Plan de experimentos.

N° Prueba	Nombre	Diámetro	Combustible		Temopares	Radiómetro	Poder Emisivo		Radiómetro		Radiómetro		IR **
			Tipo	Esesor (cm)	Líquido	Dual	91+VR **		91 *		92 *		
					Pos. Radial (X/R)*	Pos. Radial (X/R)*	X (m)	Y (m)	X/D	Y/D	X/D	Y/D	X (m)
1	Foc3_01_D3	3	Gasóleo	1,27	0	0	12,3	0,9			3	0	26,5
2	Foc3_02_D3	3	Gasóleo	1,5	0	0			5	0	5	0	26,7
3	Foc3_03_G3	3	Gasolina	2	0	0	12,3	0,8			5	0	26,7
4	Foc3_04_D3	3	Gasóleo	2	0	0	12,3	0,8			5	0	26,7
5	Foc3_05_D3	3	Gasóleo	2,5	0	0			7	0,5	5	0,5	26,7
6	Foc3_06_G6	6	Gasolina	1,5	0	0	14,7	0,9			3	0	53,0
7	Foc3_07_D6	6	Gasóleo	1,5	0	0	14,7	0,9			3	0	53,0
8	Foc3_08_G5	5	Gasolina	1,5	0	0	12,3	0,8			3	0	46,9
9	Foc3_09_D5	5	Gasóleo	1,5	0	0	12,3	0,8			3	0	46,9
10	Foc3_10_D5	5	Gasóleo	2	0	0			5	0	3	0,2	46,9
11	Foc3_11_D5	5	Gasóleo	2	0	0			5	0,3	3	0,3	46,9
12	Foc3_12_D6	6	Gasóleo	2	0	0			5	0	3	0,27	56,3
13	Foc3_13_G4	4	Gasolina	1,5	0	0	9,8	0,6			3	0	44,5
14	Foc3_14_D4	4	Gasóleo	1,5	0	0	9,8	0,6			3	0	44,5
15	Foc3_15_D4	4	Gasóleo	2	0	0			5	0	3	0,25	44,5
16	Foc3_16_D4	4	Gasóleo	2,5	0	0			5	0,4	3	0,4	44,5
17	Foc3_17_G3	3	Gasolina	1,5	0	0			5	0,5	3	0,5	28,1
18	Foc3_18_D3	3	Gasóleo	1,2	0,8	0,8			5	0,5	3	0,5	28,1
19	Foc3_19_M3	3	Mezcla	2	0	0	12,3	0,8			3	0	28,1
20	Foc3_20_D3	3	Gasóleo	1,2	0	0			5	0	3	0	28,1
21	Foc3_21_G1.5	1,5	Gasolina	2	-	-	3,7	0,2			3	0	14,1
22	Foc3_22_D1.5	1,5	Gasóleo	2	-	-	3,7	0,2			3	0	14,1

\* Medido desde el eje de las balsas

\*\* Medido desde la pared de las balsas

La descripción de las tareas a realizar para llevar a cabo las pruebas, la necesidad de personal, así como la asignación de las tareas específicas de cada miembro del equipo de trabajo constituyeron un paso importante para reducir el tiempo de actuación y operar con la máxima seguridad y simplicidad. La preparación y el desarrollo de cada uno de los ensayos implicaban la realización de las siguientes operaciones:

1. Preparación y verificación del funcionamiento del sistema de extinción. En concreto, se utilizaban mangueras de agua de 45 mm y 6 extintores de polvo químico. Una de las mangueras se conectaba, mediante reductores, a los tubos que proporcionaban el agua de refrigeración al radiómetro colocado en el interior de las balsas.
2. Limpieza de las balsas. Después de la abertura de las válvulas de las tuberías que conducen a la balsa de los residuos y de la válvula del sistema de vasos comunicantes, se hacía circular agua a presión en el sistema de balsas, utilizando una de las mangueras del sistema de extinción.

3. Instalación de los aparatos de medida. Esta operación comprendía la colocación de la balanza y su puesta en la cota correspondiente en función del diámetro de la balsa a usar en el experimento, el posicionamiento y la conexión a los módulos del FieldPoint. A la vez, otros miembros del equipo colocaban las videocámaras y la cámara termográfica en su posición y se realizaba la conexión de todos los cables necesarios.
4. Puesta en marcha del sistema de adquisición de datos. Después de haber proporcionado corriente eléctrica a todos los dispositivos que la necesitaban, se accionaba el sistema de adquisición de datos, mediante el cual se podía comprobar el estado de las conexiones y el funcionamiento de los dispositivos.
5. Llenado de las balsas con agua. La balsa en la cual se efectuaba el experimento debía ser llenada con una capa de agua que, como ya se ha indicado, servía como base para el combustible y para proteger la estructura de las balsas y, a parte, permitía la medición de la velocidad de combustión y el estudio del fenómeno del *boilover*. El nivel de agua se elegía de modo que los bordes de contención de las balsas interiores estaban completamente sumergidos, así que ni influían en las mediciones, ni impedían eventuales fenómenos de convección en la capa de agua. Además, se tenía que procurar que quedase sitio suficiente para el vertido de combustible. Una pequeña capa de agua se añadía también en las balsas exteriores a la utilizada para el experimento, para refrigerar las paredes y para proteger la estructura de la posible proyección de gotas de combustible inflamado hacia el exterior. Al mismo fin, se mojaba el terreno de alrededor.
6. Especificación de los parámetros necesarios del sistema de adquisición de datos e inicio de la captura de los mismos.
7. Adición del combustible. Encima de la capa de agua se añadía el combustible, en la cantidad necesaria para alcanzar el nivel definido por el diseño del experimento. El combustible se vertía en diferentes etapas, para cumplir la operación de calibración de la balanza.
8. Ignición y realización de las pruebas. La ignición se llevaba a cabo mediante una antorcha encendida con gasolina. En el caso de los experimentos de gasóleo era necesario añadir una pequeña cantidad de gasolina para facilitar el proceso.
9. Limpieza de la instalación y desmontaje de los aparatos de medida. Después de cada prueba se tenía que esperar unos minutos antes de poder preparar el incendio siguiente, para que la instalación se enfriase. Antes de preparar la prueba sucesiva se recogía en bidones el hidrocarburo no quemado mediante el grupo de bombeo; durante el proceso, se aspiraba obviamente también una gran cantidad de agua, así que se tenía que dejar decantar el líquido para poder medir el volumen de combustible presente. Después de la última prueba del día se desmontaban todos los equipos, se vaciaban y



limpiaban las balsas. Se dejaban los termopares posicionados según las especificaciones de la primera prueba del día siguiente.

El orden en el cual han sido descritas las tareas no es estrictamente cronológico; por ejemplo, el proceso de posicionamiento de los aparatos se hacía al mismo tiempo que el llenado de las balsas. Además, algunas de estas operaciones requerían más de una persona para realizarlas. El diagrama de Gantt de la figura 3.21 presenta la cantidad de personal asignado a cada tarea y el tiempo requerido por cada operación.



Figura 3.21. Diagrama de Gantt de las actividades de preparación/ejecución de los ensayos.

Como muestra el diagrama, la realización de una experiencia requiere 5 personas y un tiempo de, aproximadamente, dos horas y cuarto. Obviamente, dicho valor es solo indicativo, ya que el tiempo de algunas tareas pueden variar según la prueba a realizar. Al fin de disminuir el tiempo necesario en la preparación del experimento, algunas de las actividades se realizaban el día anterior a la prueba, como, por ejemplo, la colocación de los termopares en los cables de sujeción.



