Informe nº: **S-AT-00492-0002-12 M1**
Páginas: 20

Denominación del trabajo:
Optimización energética de consumos mediante obtención de perfiles de temperatura en horno de panadería de una instalación industrial.
Evaluación del comportamiento energético y de los perfiles térmicos mediante la utilización de distintos combustibles.

SALVADOR ROQUE MORA Y OTRO, C.B.
Pol. Ind. La Llave de Andalucía, Nave 2
23710 Bailén (Jaén)

Bailén, 2 de Agosto de 2012

innovarcilla
CENTRO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

Página

1. INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA 2

2. PERFILES TÉRMICOS OBTENIDOS 7

3. ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO DE CURVAS DE MÁXIMO INTERÉS 11

3.1. EVALUACIÓN DE SONDAS UBICADAS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN (8, 6 Y 14) 11

3.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CHIMENEA DE EXTRACCIÓN (SONDA 11) 14

3.3. EVALUACIÓN DE LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA DEL PRIMER PASO DE HUMOS (SONDAS 1, 16 Y 15) 16

4. CONCLUSIONES 19

1. INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA

El presente informe técnico se emite, a petición de D. Salvador Roque Mora, en representación de la empresa Salvador Roque Mora y Otro, C.B. ubicada en Bailén (Jaén), como resultado del estudio del comportamiento térmico de distintos combustibles realizado entre los días 26 de Junio y 3 de Julio de 2012 en un horno de carro rotativo modelo CAT 810, con un volumen de 10,94 m^3, fabricado por la empresa Hornos AGB, y ubicado en las instalaciones productivas de Hornipan Rangel, S.L. de Bailén (Jaén).

Figura 1. Horno rotativo objeto del presente estudio (fuente: www.hornosagb.com).

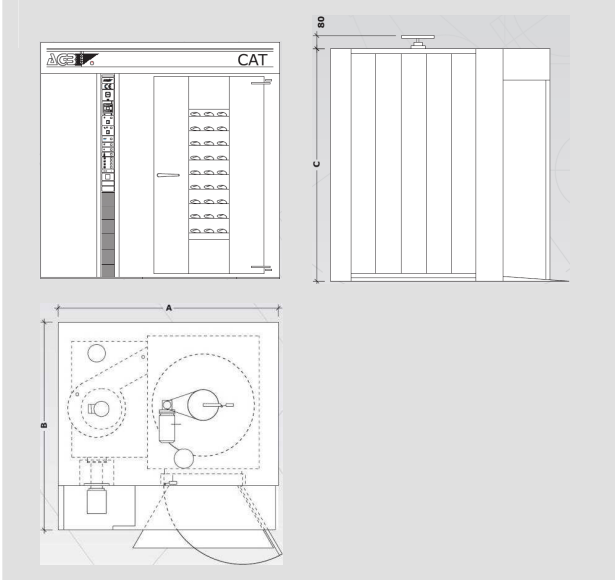


Figura 2. Estructura del horno CAT 810 evaluado (fuente: www.hornosagb.com).

Mediante el presente estudio, se ha pretendido evaluar el comportamiento térmico originado en los distintos elementos del interior del horno como consecuencia de la utilización de tres combustibles:

- **Gasóleo;**
- **Pellets,** de 6 mm. de diámetro y longitud comprendida entre 10 – 30 mm.;
- **Hueso de aceituna.**, de diámetro comprendido entre 2 y 3 mm.

Figura 3. Aspecto del pellet utilizado durante el presente estudio.

Figura 4. Aspecto del hueso de aceituna utilizado durante el presente estudio.

El quemador utilizado para la combustión de la biomasa (pellet y hueso), modelo **Y-70**, con una potencia comprendida entre 40 y 90 kW, fabricado por la empresa NATURAL FIRE, S.L., se presenta en la Figura 5 siguiente:

Figura 5. Quemador Y-70, fabricado por Natural Fire, S.L., utilizado para la combustión de las dos biomasas empleadas como combustibles.

En el caso de la combustión del gasóleo se evaluarán los perfiles térmicos obtenidos con dos tipos de quemadores:

- Quemador FLAXMER modelo **FL-15**, con una potencia térmica comprendida entre los 50.000 y 150.000 kcal/h.
- Quemador FLAXMER modelo **FL-8**, de potencia térmica comprendida entre los 35.000 y 80.000 kcal/h.

Figura 6. Quemador Flaxmer FL-15 utilizado para la combustión del gasóleo, de potencia térmica elevada.

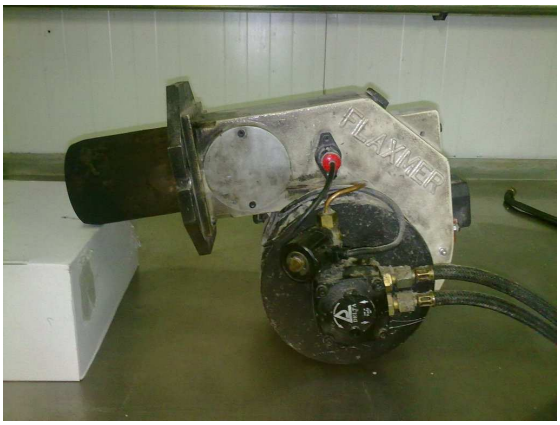


Figura 7. Quemador Flaxmer FL-8 utilizado para la combustión del gasóleo, de potencia térmica media.

En la Figura 8 siguiente se presente, a modo comparativo, la diferencia en tamaño relativo existente entre los tres quemadores utilizados durante la realización del presente trabajo.

Figura 8. Imagen de los quemadores de gasóleo FL-15 (izquierda), FL-8 (centro) y del quemador de biomasa (derecha).

Para llevar a cabo el estudio de los distintos perfiles térmicos obtenidos, se ha utilizado un data logger VACQ II, de TMI Orion, como el mostrado en la Figura 9. El equipo se ha equipado con **16 termopares tipo K estándar**, de temperatura máxima de trabajo 1300ºC. Además, se han registrado las temperaturas del blindaje térmico y de los componentes electrónicos mediante dos sondas PT1000, incorporadas en el propio equipo.

Figura 9. Data logger VACQ II utilizado para la obtención de los distintos perfiles térmicos.

En cada una de las cinco mediciones realizadas, y antes de llevar a cabo el montaje del registrador, se procedió a su programación, dando comienzo a la toma de datos a partir de las 22:30 horas y finalizando aproximadamente a las 09:00 de la mañana siguiente, en cada uno de los casos, y utilizando una frecuencia de toma de datos de 4 segundos.

La distribución de las 16 sondas disponibles se llevó a cabo en consenso con Salvador Roque Mora, en representación de la empresa solicitante, el cual indicó las zonas de máximo interés para registrar su temperatura. La fijación de los termopares en el interior de la cámara de combustión se realizó con la ayuda de un tubo de cobre en forma de "V", para evitar el desplazamiento de los mismos y facilitar su correcta ubicación.

En las siguientes imágenes se presenta, de forma esquemática, el montaje de las sondas llevado a cabo para el horno CAT 810 analizado, en el que estas han sido ubicadas en la **cámara de combustión**, en los **tubulares del intercambiador** y en la **chimenea de evacuación**. Según información proporcionada por el propio fabricante del horno, el intercambiador de calor está construido en inox AISI 310-L, lo que proporciona un elevado rendimiento del equipo.

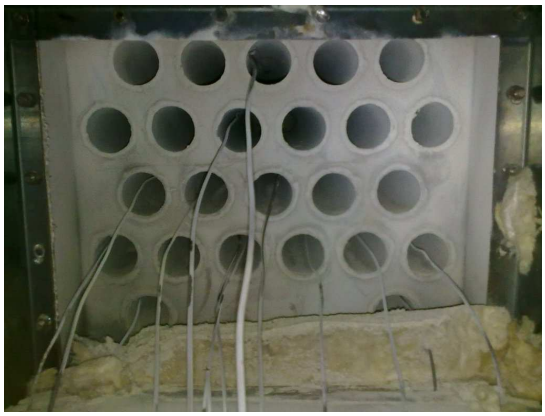


Figura 10. Disposición de los termopares en el interior de los tubulares.

Figura 11. Disposición de los dos termopares en el interior de la cámara de combustión, utilizando con sujeción un tubo de cobre en forma de "V".

Figura 12. Aspecto de los termopares una vez colocado el aislamiento térmico.

Figura 13. Imagen general del horno, con el data logger y los termopares colocados.

La ubicación de las 16 sondas en el interior del equipamiento de combustión del horno se ha llevado a cabo tal y como se muestra en la Figura 14.

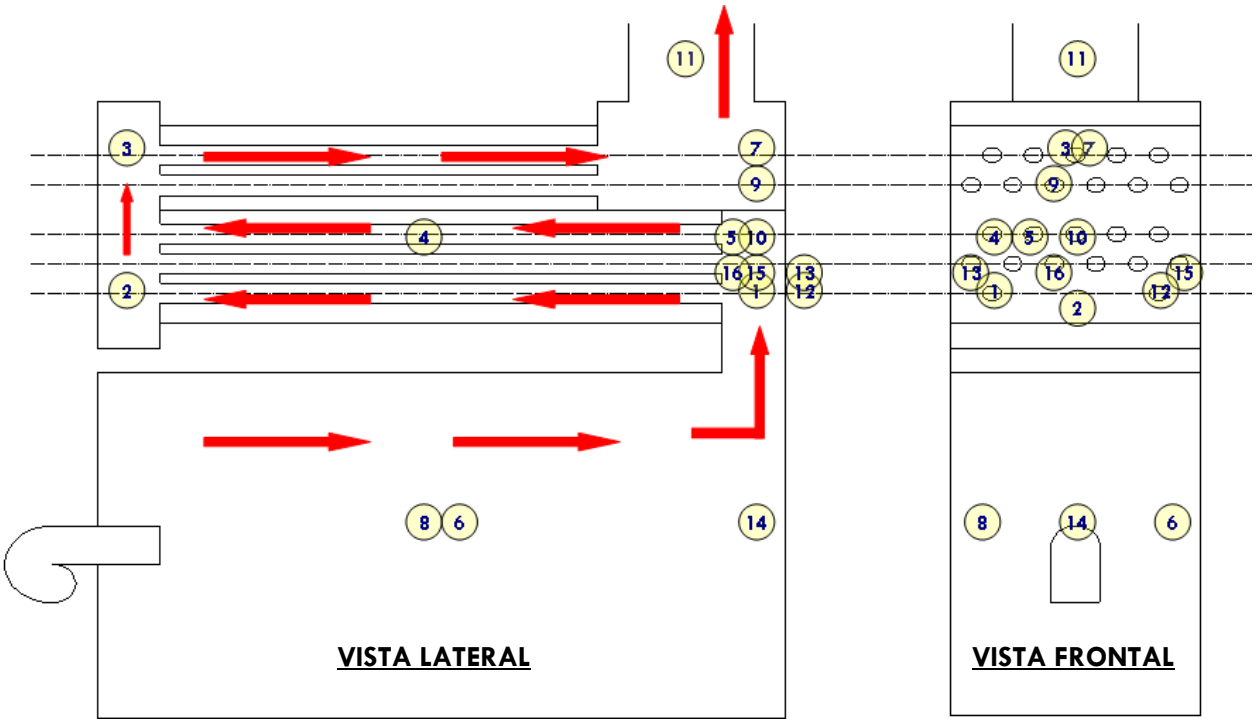


Figura 14. Ubicación de los 16 termopares en el interior del horno.

Comenzando por la cámara de combustión, los termopares 8 y 6 se encuentran a, aproximadamente, 50 cm. del quemador, con una separación de 3 cm. con las paredes de la cámara. El termopar 14 se encuentra en el fondo de la cámara de combustión, a unos 3 cm. del mismo.

Las sondas 12 y 13, en el primer y segundo tubular del paso de humos, respectivamente, se encuentran en contacto con la superficie del fondo del horno. Por su parte, las sondas 1, 15, 16, 5 y 10 se encuentran colocadas a 3 cm. del fondo del horno, y a distintas alturas dentro de los tubos, como se aprecia en la Figura 14 y en la Figura 10. La sonda 4 se encuentra en el centro de la longitud del tubular indicado, mientras que la sonda 2 se ha colocado a aproximadamente 3 cm. de la chapa frontal por la que se han introducido las sondas.

En la zona superior del paso de humos, la sonda 3 se ha ubicado a la misma distancia de la chapa frontal que la número 2, mientras que las sondas 7 y 9 se han colocado a una distancia aproximada de 3 cm. del fondo del horno.

Finalmente, la sonda 11 se ha ubicado en el centro de la parte inferior de la chimenea de evacuación de humos.

2. PERFILES TÉRMICOS OBTENIDOS

Los perfiles térmicos obtenidos para cada una de las cinco configuraciones analizadas se presentan en las siguientes figuras:

CONFIGURACIÓN 1: QUEMADOR FLAXMER FL-8 / GASÓLEO / 26-06-2012

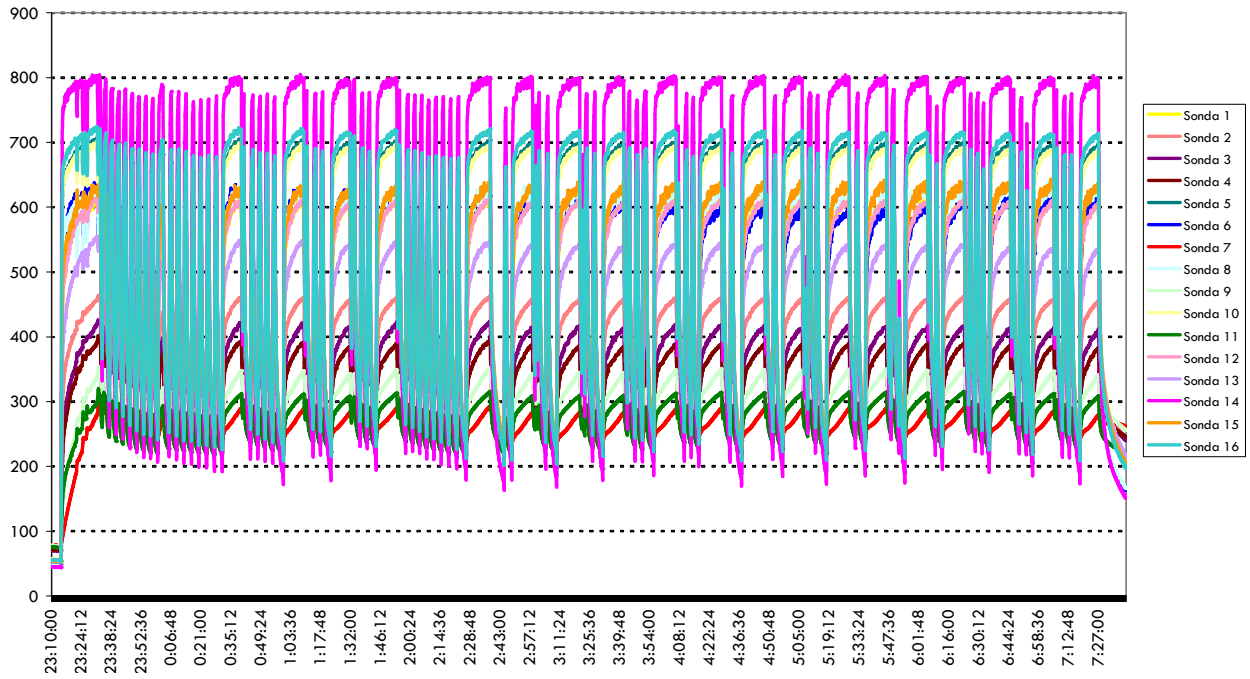


Figura 15. Curvas obtenidas durante la combustión de gasóleo con el quemador FL-8.

CONFIGURACIÓN 2: QUEMADOR MEDIA VENTILACIÓN / PELLET / 27-06-2012

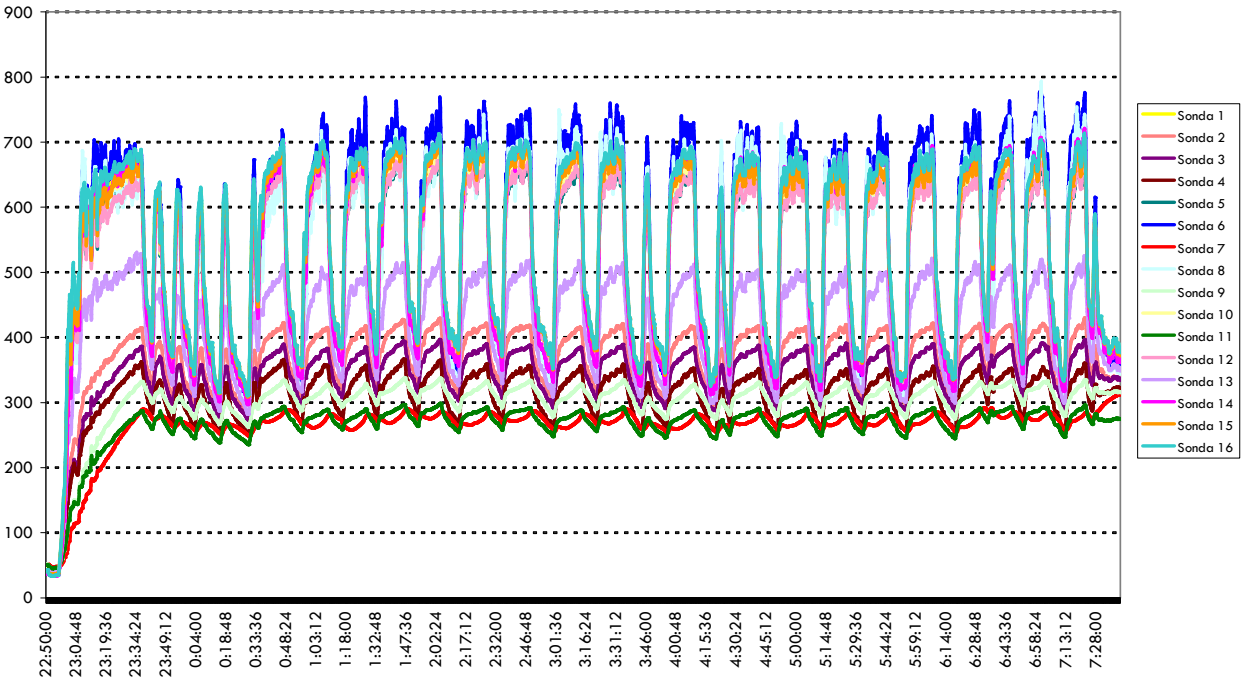


Figura 16. Curvas obtenidas durante la combustión de pellet con una ventilación media del quemador Y-70.

CONFIGURACIÓN 3: QUEMADOR ALTA VENTILACIÓN / PELLET / 28-06-2012

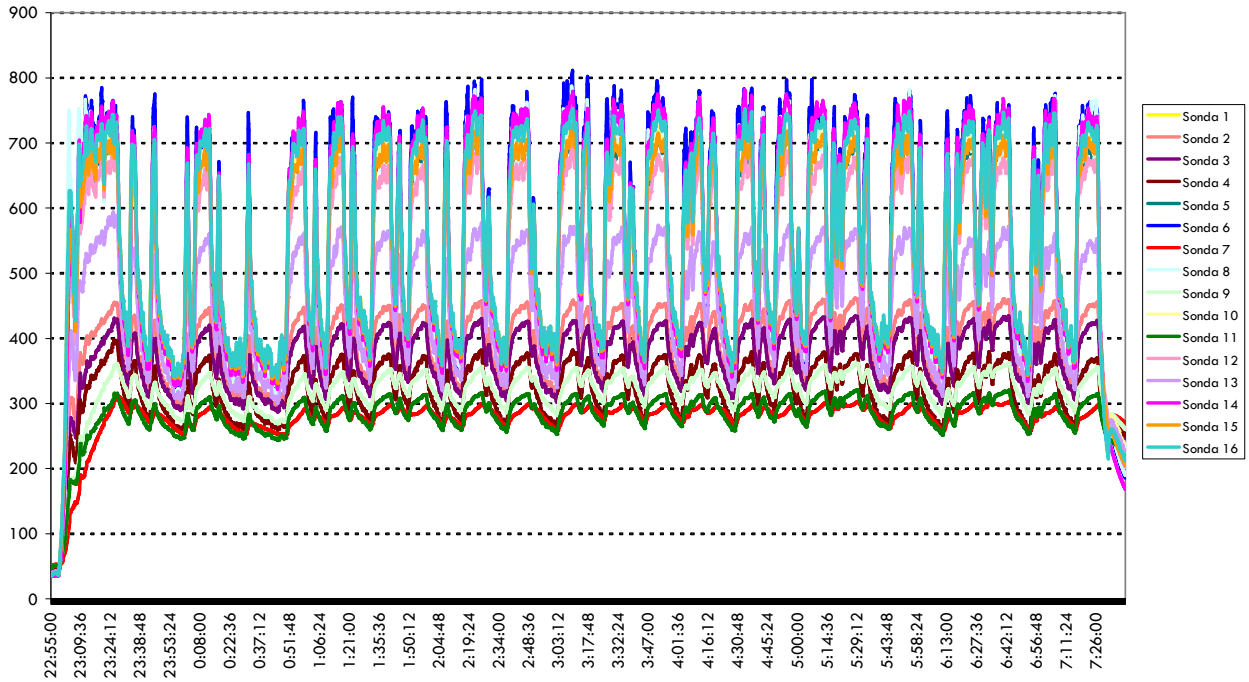


Figura 17. Curvas obtenidas durante la combustión de pellet con una ventilación alta del quemador Y-70.

CONFIGURACIÓN 4: QUEMADOR BIOMASA / HUESO ACEITUNA / 29-06-2012

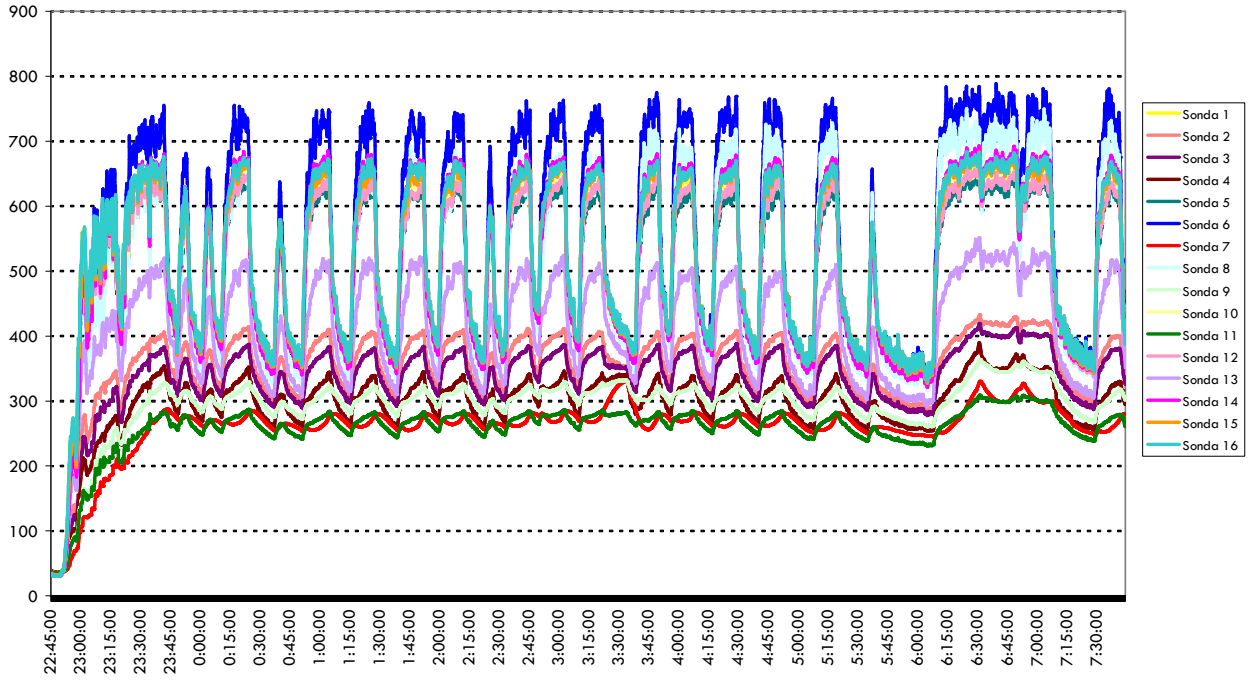


Figura 18. Curvas obtenidas durante la combustión de hueso de aceituna con el quemador Y-70.

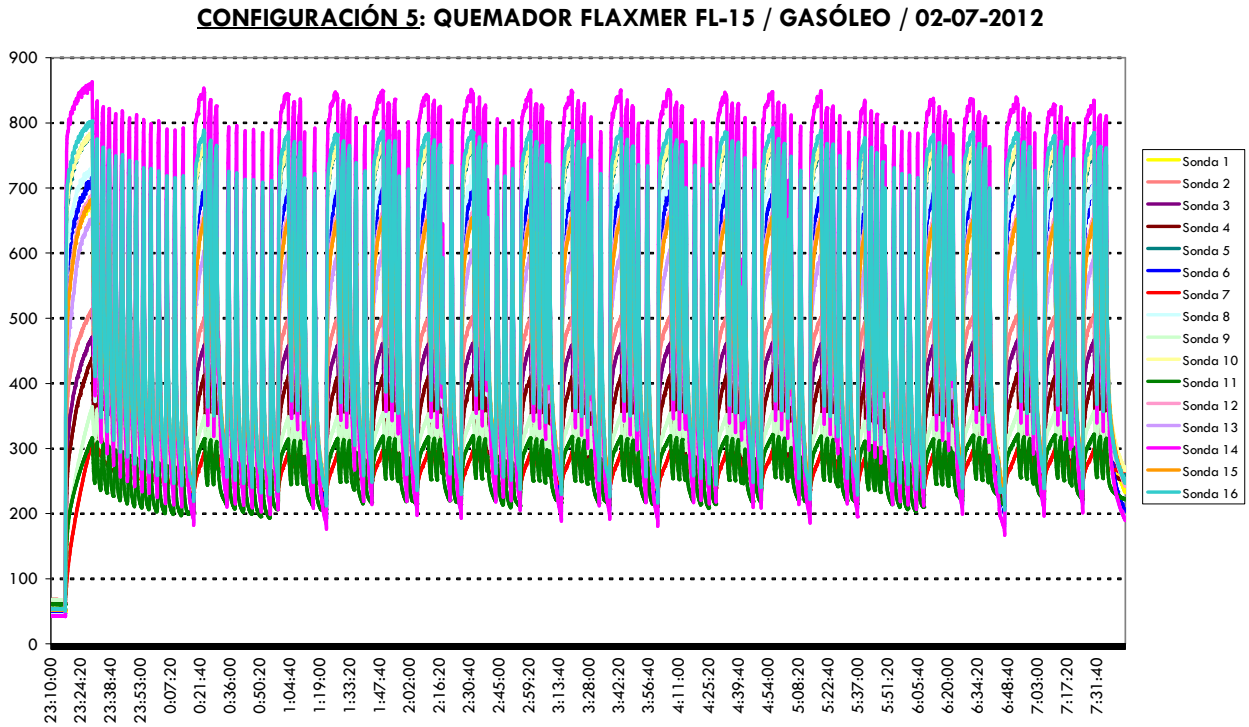


Figura 19. Curvas obtenidas durante la combustión de gasóleo con el quemador FL-15.

En la Tabla 1 siguiente se presenta un resumen de las temperaturas máxima y promedio aproximadas para cada una de las sondas de las distintas configuraciones analizadas, con el objetivo de facilitar el análisis de los resultados obtenidos.

Nº DE TERMOPAR	Configuración 1 GASÓLEO QUEMADOR FL-8		Configuración 2 PELLET - MEDIA VENTILACIÓN QUEMADOR Y-70		Configuración 3 PELLET - ALTA VENTILACIÓN QUEMADOR Y-70		Configuración 4 HUESO DE ACEITUNA QUEMADOR Y-70		Configuración 5 GASÓLEO QUEMADOR FL-15	
	MAX	MEDIA	MAX	MEDIA	MAX	MEDIA	MAX	MEDIA	MAX	MEDIA
Sonda 1	613,44	458,10	698,43	526,55	753,35	545,52	680,13	509,05	677,71	444,90
Sonda 2	463,90	368,63	429,94	361,82	462,10	382,46	432,65	352,26	514,05	371,05
Sonda 3	425,75	338,81	396,98	339,71	434,72	363,50	419,61	335,19	471,04	343,81
Sonda 4	401,79	315,98	366,95	307,91	398,12	318,37	389,75	296,79	439,18	309,71
Sonda 5	706,61	515,28	678,55	519,72	721,89	530,92	649,76	500,54	783,18	507,47
Sonda 6	638,10	444,69	777,29	536,37	811,83	542,78	788,41	546,10	716,36	450,31
Sonda 7	296,36	260,79	312,42	262,97	311,12	276,36	331,73	260,33	311,00	264,16
Sonda 8	643,50	452,36	793,33	511,75	787,54	528,19	750,36	502,58	731,27	457,83
Sonda 9	354,25	299,91	337,65	299,90	362,45	316,52	364,14	294,58	364,55	298,98
Sonda 10	701,93	514,73	692,15	529,28	729,93	537,07	662,53	509,14	786,02	510,46
Sonda 11	320,13	266,67	298,58	265,61	320,84	281,86	308,90	258,70	322,28	257,07
Sonda 12	616,36	463,31	673,51	513,50	698,98	513,64	666,20	500,09	689,73	454,95
Sonda 13	554,71	421,67	530,79	416,99	594,24	444,74	551,85	409,81	652,35	426,69
Sonda 14	804,97	559,94	721,08	524,07	782,07	548,87	692,83	512,38	863,04	523,47
Sonda 15	643,87	475,63	700,65	530,89	730,55	532,84	683,16	515,97	683,53	452,74
Sonda 16	725,14	524,00	713,67	541,35	753,11	549,50	683,29	520,03	803,23	515,74

Tabla 1. Temperaturas máxima y promedio obtenidas para las cinco configuraciones analizadas, expresadas en °C.

Las diferencias entre las temperaturas promedio encontradas entre los quemadores FL-8 y FL-15 se debe a que durante la cocción con el más pequeño (FL-8) se introdujeron un total de 19 carros, mientras que con el segundo (FL-15) la producción fue de 18 carros, lo que disminuye las temperaturas promedio en éste último caso.

3. ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO DE CURVAS DE MÁXIMO INTERÉS

En las siguientes figuras se analizarán las diferencias de temperatura encontradas en las zonas críticas del horno. Para llevar a cabo dicho análisis, y con el objetivo de simplificar la visualización de los resultados, se procederá a realizar un estudio comparativo entre las dos configuraciones siguientes:

- **Configuración 5: Quemador Flaxmer FL-5, utilizando como combustible gasóleo.**
- **Configuración 3: Quemador Natural Fire Y-70, utilizando como combustible pellet con elevada ventilación.**

3.1. EVALUACIÓN DE SONDAS UBICADAS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN (8, 6 y 14).

En la Figura 20 se representa el gradiente de temperatura encontrado en dos de las tres sondas ubicadas en el interior de la cámara de combustión. Ambas sondas (8 y 6) se encuentran a igual distancia del quemador, aproximadamente 50 cm., y separadas aproximadamente 3 cm. de las paredes laterales de la cámara de combustión.

En la Figura 21 se representa, por su parte, el gradiente de temperatura obtenido en la sonda ubicada en el fondo de la cámara de combustión (14) ubicada en la zona en que la temperatura máxima es crítica. En dicha figura se representa la importante temperatura máxima existente en el caso de la utilización de gasóleo (863,04°C) con respecto a la máxima temperatura determinada durante la combustión de pellet (782,07°C) en esa zona de la cámara.

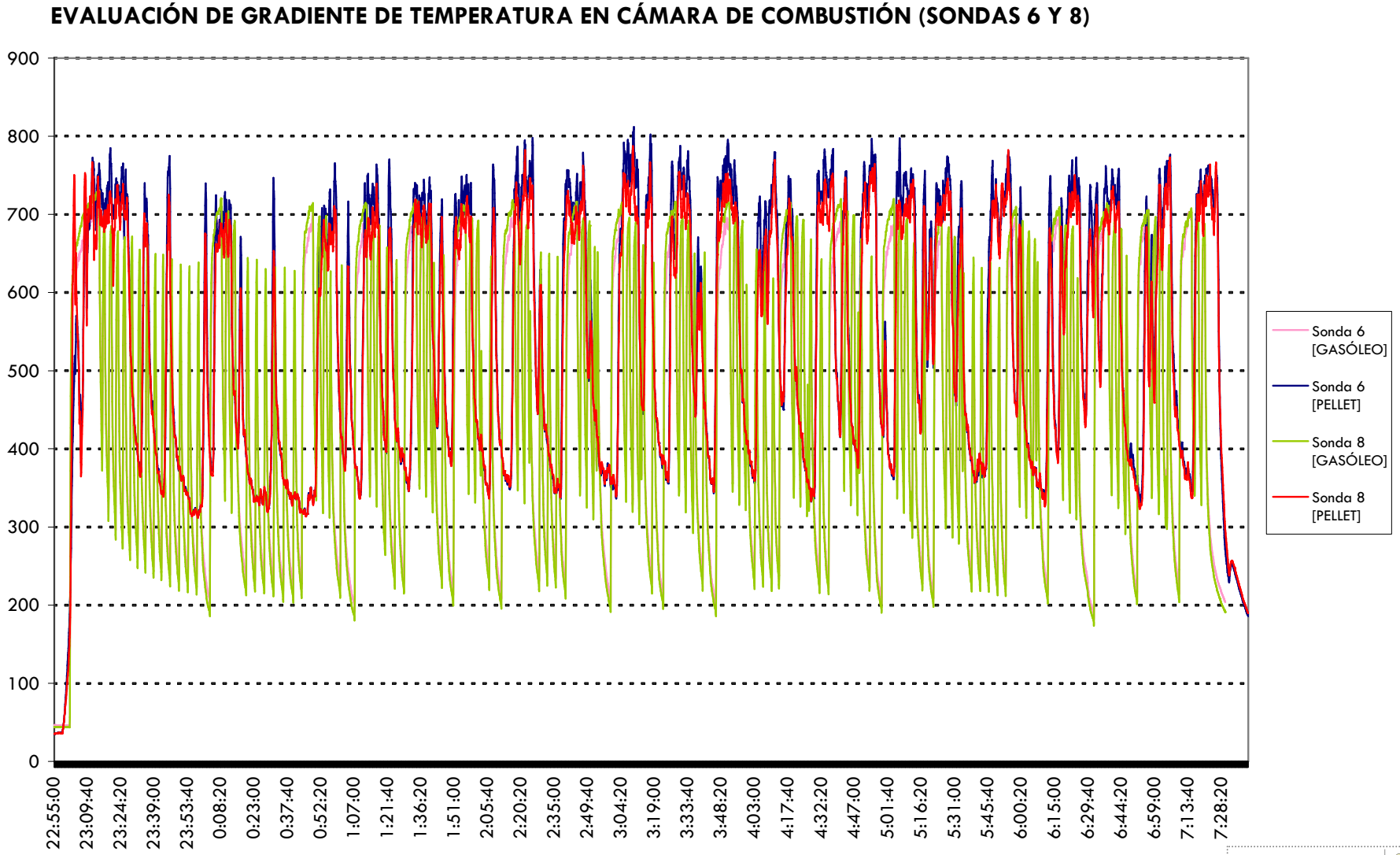
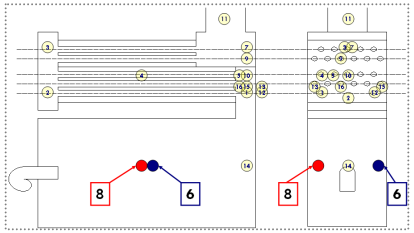


Figura 20. Curvas obtenidas para los termopares 6 y 8 utilizando como combustible gasóleo y pellet.



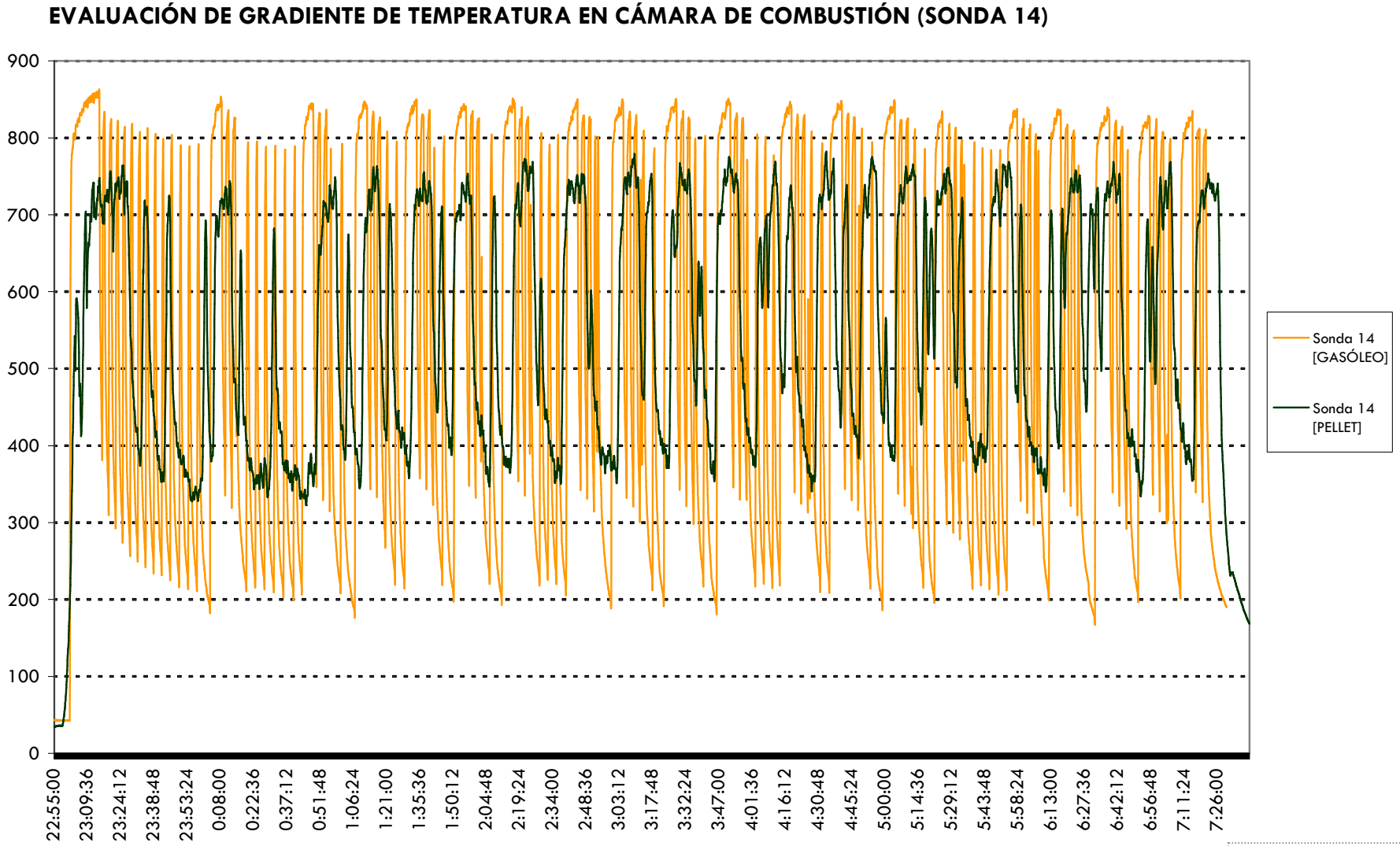
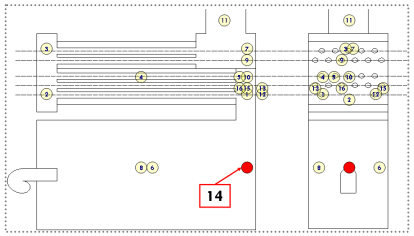


Figura 21. Curvas obtenidas para el termopar 14 utilizando como combustible gasóleo y pellet.



3.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CHIMENEA DE EXTRACCIÓN (SONDA 11).

La temperatura de la chimenea de salida de humos proporciona una valiosa información acerca del rendimiento de la instalación térmica. Además, la temperatura en dicho punto debe optimizarse de forma que no sea excesivamente elevada, disminuyendo el rendimiento térmico de la instalación, ni excesivamente baja, debido al riesgo de fenómenos de precipitación ácida en casos extremos.

En la Figura 22 de la página siguiente se representa la temperatura obtenida en la sonda colocada en la chimenea de evacuación de humos del horno evaluado, utilizando como combustibles gasóleo y pellet. Como se puede observar, la temperatura máxima obtenida en ambos casos es aproximadamente la misma, adoptando un valor de 322,28ºC en caso de combustión de gasóleo y de 320,84ºC en la combustión de pellet. No obstante, la combustión de dicha biomasa genera un intervalo térmico menor en dicha zona del horno, tal y como se puede apreciar en la Figura 22.

EVALUACIÓN DE TEMPERATURA DE CHIMENEA DE SALIDA DE HUMOS (SONDA 11)

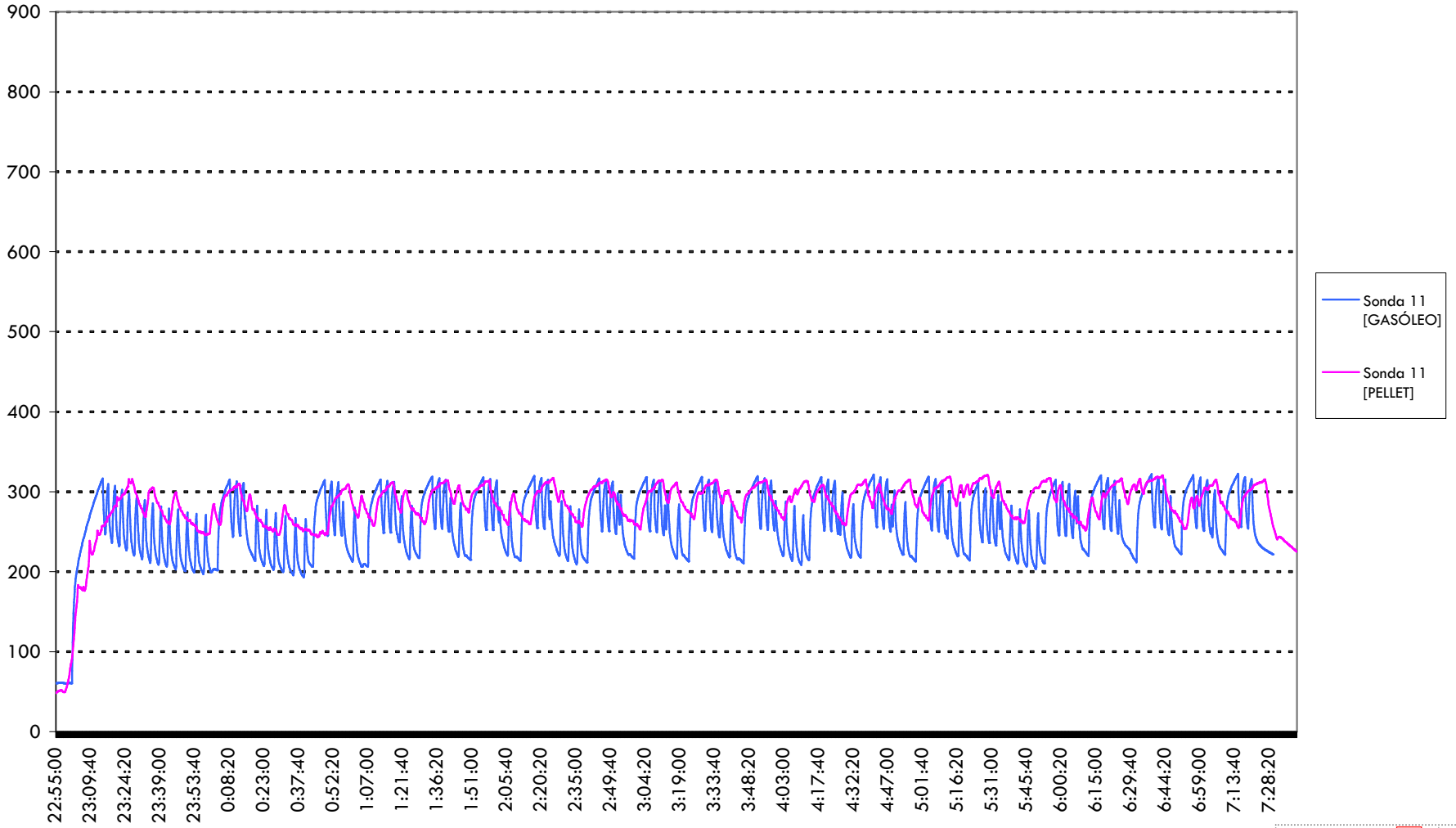
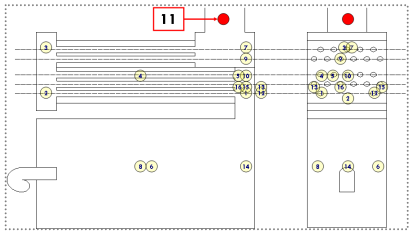


Figura 22. Curvas obtenidas para el termopar 11 utilizando como combustible gasóleo y pellet.



3.3. EVALUACIÓN DE LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA DEL PRIMER PASO DE HUMOS (SONDAS 1, 16 y 15).

La temperatura en el denominado "primer paso de humos" es la que determina el aporte térmico que tiene lugar a la cámara de cocción. En las Figuras 23 y 24 se presentan las temperaturas obtenidas para las sondas 1 (izquierda), 16 (centro) y 15 (derecha) del primer y segundo tubular, en sentido vertical. La división en dos figuras de las curvas obtenidas responde a la facilidad de interpretación de los resultados obtenidos.

Como se puede comprobar en las figuras, la combustión de gasóleo genera una corriente gaseosa de mayor heterogenidad que la obtenida con la combustión de biomasa, en los casos analizados. Así, la combustión de pellet proporciona una corriente gaseosa con unos gradientes térmicos de izquierda a derecha menores que en el caso de la combustión de gasóleo, lo que favorece una dilatación térmica de los componentes del horno menor y, por tanto, y a igualdad de temperatura, un menor deterioro con el paso del tiempo.

EVALUACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO EN PRIMER PASO DE HUMOS (SONDAS 1, 16 Y 15) / GASÓLEO

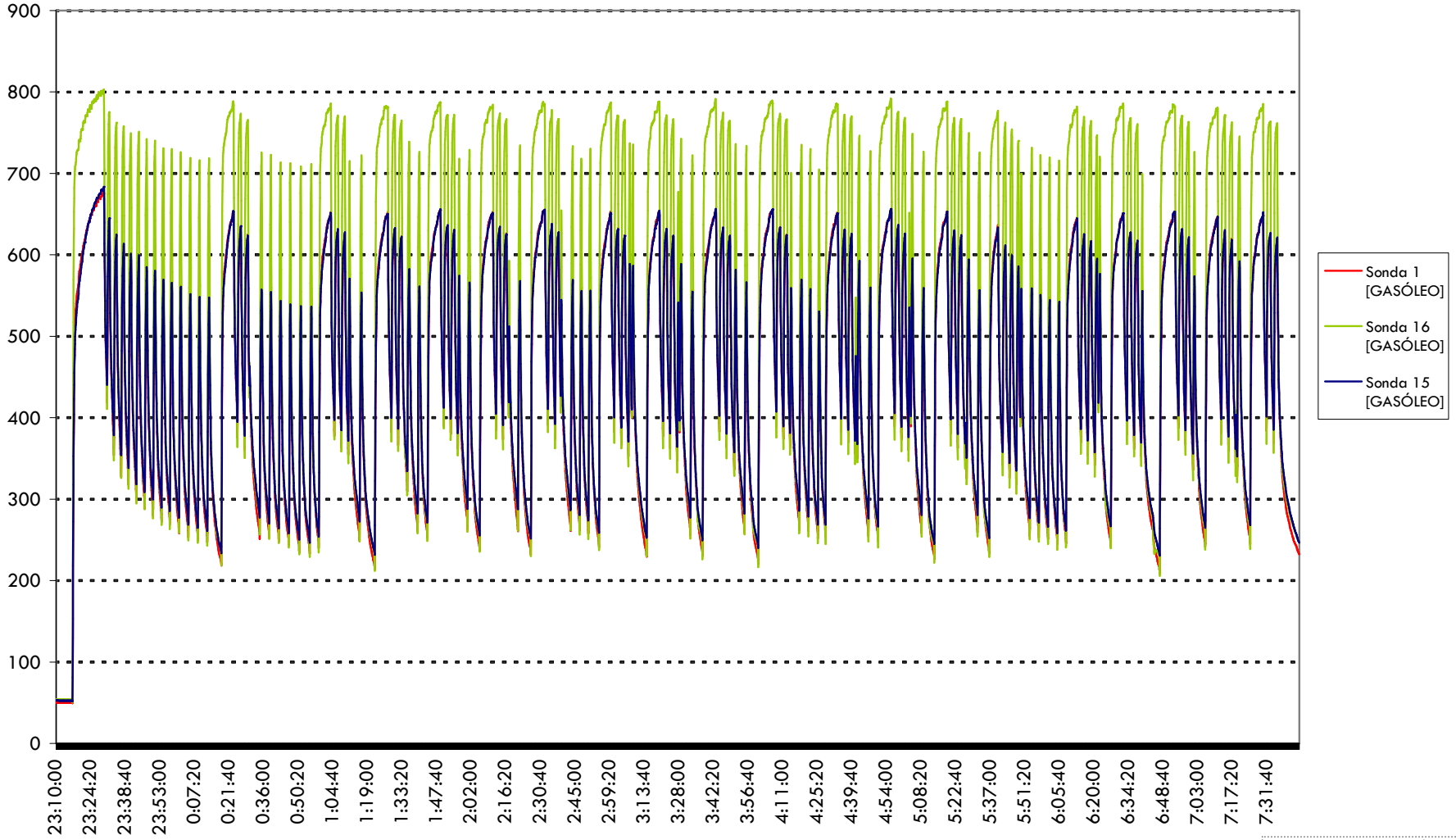
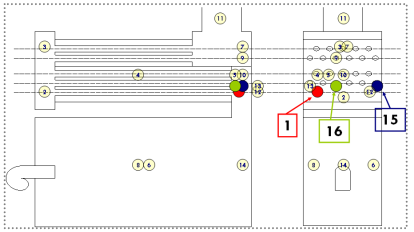


Figura 23. Gradiente térmico obtenido en el primer paso de humos con la utilización de gasóleo como combustible (sondas 1, 16 y 15).



innovarcilla
CENTRO TECNOLÓGICO

EVALUACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO EN PRIMER PASO DE HUMOS (SONDAS 1, 16 Y 15) / PELLET

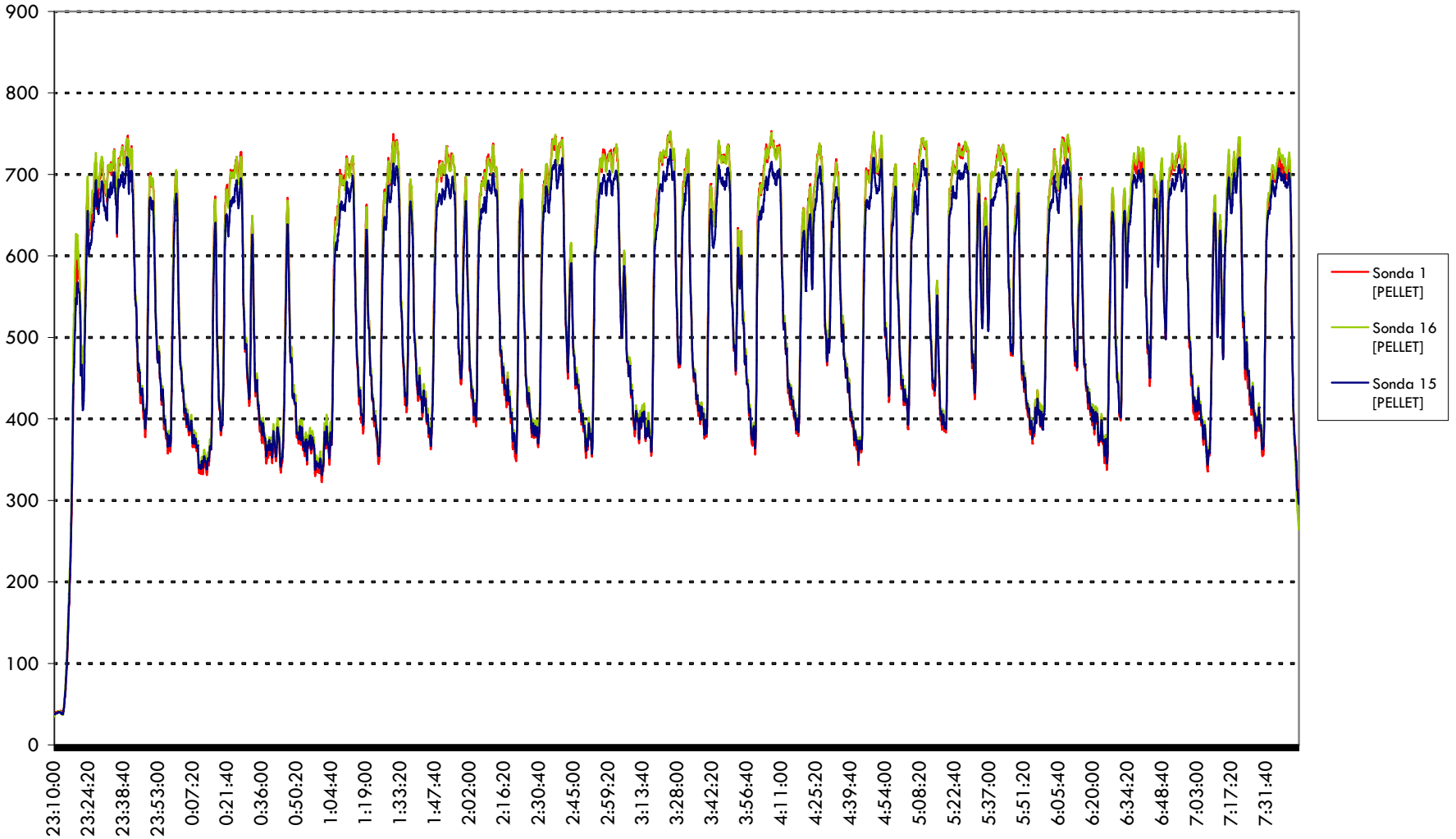
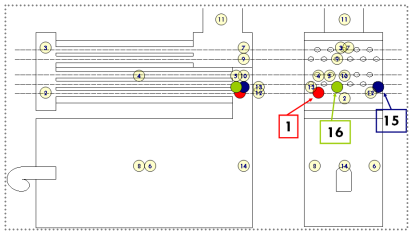


Figura 24. Gradiente térmico obtenido en el primer paso de humos con la utilización de pellet como combustible (sondas 1, 16 y 15).



innovarcilla
CENTRO TECNOLÓGICO

4. CONCLUSIONES

El análisis del comportamiento térmico del horno para cocción de pan evaluado revela el óptimo rendimiento obtenido mediante la sustitución de combustibles derivados del petróleo (gasóleo) por los derivados del uso de biomasa.

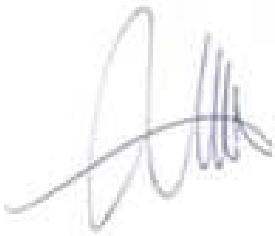
Así, la evaluación del funcionamiento del horno con gasóleo revela una elevada temperatura en el interior de la cámara de combustión, sobre todo en el fondo de la misma, y una mayor heterogeneidad en el interior de dicha cámara. Las temperaturas obtenidas en esa zona a partir de la combustión de pellet presentan mayor homogeneidad, por lo que se puede predecir que la utilización de dicha biomasa como combustible llevará asociada una **mayor durabilidad de la cámara de combustión debido a un menor estrés térmico por la dilatación sufrida por los materiales con los que ha sido fabricada**.

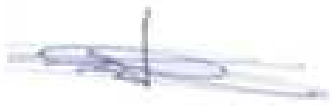
Además, la utilización de pellet revela una mayor homogeneidad térmica en el denominado "primer paso de humos", en el que tiene lugar la principal transferencia térmica para llevar a cabo el aporte energético del horno a la cámara de cocción, ya que durante la cocción con gasóleo la temperatura es superior en el centro de los tubulares que en los extremos, en su sentido longitudinal, tal y como se puede apreciar en la Figura 23.

En lo que se refiere a la temperatura de la chimenea de evacuación de humos, los valores máximos son similares con la utilización de gasóleo o biomasa, con las regulaciones utilizadas durante las evaluaciones térmicas llevadas a cabo, encontrándose un intervalo térmico más acotado en el caso de la cocción con pellet.

El presente informe, nº **S-AT-00492-0002-12 M1** expedido a petición de **SALVADOR ROQUE MORA Y OTRO, C.B.,** consta de una portada y **20** páginas.

Bailén, 2 de Agosto de 2012





Jose Ángel Laguna Martínez
Gerente

Javier Álvarez de Diego
Responsable Área de Materiales

CLÁUSULAS DE RESPONSABILIDAD

- Los resultados, conclusiones y/o recomendaciones contenidos en este informe se han obtenido a partir de los ensayos realizados y/o de la información suministrada por el peticionario.
- No se admite ninguna responsabilidad referente a la exactitud y representatividad del muestreo a menos que éste haya sido efectuado bajo nuestra propia supervisión. Salvo mención expresa, las muestras y sus referencias han sido elegidas libremente por el peticionario.
- Reservados todos los derechos. El contenido de este informe goza de la protección que le otorga la ley. No podrá ser comunicado, transformado, reproducido o distribuido públicamente en todo o en parte, sin la autorización expresa de la Fundación Innovarcilla. La reproducción de este informe solamente está autorizada bajo forma de facsímil íntegro fotográfico, para el envío puntual y no masivo a clientes y/o proveedores del peticionario, con el único objetivo de informar y siempre citando la autoría de la Fundación Innovarcilla.
- La Fundación Innovarcilla no se hace responsable del uso que el peticionario u otra persona o entidad haga de los datos o indicaciones contenidos en el presente informe, en perjuicio o en beneficio de las marcas comerciales que el peticionario haya podido citar como identificación de las muestras sometidas a estudio.
- Este informe tiene carácter exclusivamente comercial y no podrá ser utilizado en cualquier procedimiento judicial o administrativo, ni como dictamen pericial ni como prueba documental, salvo autorización expresa de la Fundación Innovarcilla. La autorización por parte de la Fundación Innovarcilla estará condicionada, cuando así se requiera, al abono por parte del cliente, incluso con carácter previo, de los fondos necesarios para cubrir los gastos asociados a la defensa de este informe. La Fundación Innovarcilla se reserva el derecho de tomar las oportunas acciones legales en caso de incumplimiento de esta cláusula.
- La Fundación Innovarcilla podrá incluir en sus informes análisis, comentarios o cualquier otra valorización que juzgue necesaria, aún cuando ésta no hubiese sido expresamente solicitada.
- La Fundación Innovarcilla garantiza la confidencialidad del contenido del presente informe.