



INFORME FINAL DE LA CONSULTORÍA:

Desarrollo y Aplicación de un proceso experimental para calificar el funcionamiento térmico de un Horno de Leña

PARA: Proyecto ENDEV/GTZ
ATENCIÓN DE: Ángel Verástegui Gubler

DE: Rafael Espinoza
Centro de Energías Renovables
Universidad Nacional de Ingeniería

FECHA: 12 de mayo de 2011

CONTENIDO:

- I. ANTECEDENTES
- II. PERIODO QUE ABARCA
- III. PERSONAL PARTICIPANTE
- IV. ACTIVIDADES DESARROLLADAS
- V. RESULTADOS OBTENIDOS
- VI. CONCLUSIONES
- VII. RECOMENDACIONES

APÉNDICES:

1. CURVAS DE COMPORTAMIENTO
2. TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES
3. SERIE FOTOGRÁFICA



I. ANTECEDENTES

Términos de Referencia recibidos de la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional GIZ, con las motivaciones pertinentes que explican y avalan la necesidad y conveniencia de desarrollar artefactos cuyo funcionamiento guarde armonía, de un lado con las políticas y programas de los gobiernos nacional y regionales y, de otro, con los objetivos y propósitos de EnDev, “sociedad entre el Reino de los Países Bajos y Alemania que tiene el objetivo de proveer acceso sostenible a servicios de energía modernos para 3.1 millones de personas hasta el 2015. Es por esta razón que GIZ ha creído por conveniente desarrollar una consultoría que califique las iniciativas de diseño y construcción de hornos de leña, la misma que ayudará a afianzar y mejorar el avance en proyectos comprometidos a mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales, con lo cual se aporte a la sostenibilidad de dichas iniciativas.”

Experiencia desarrollada por el CER-UNI en actividades tecnológicas orientadas a contribuir con el mejoramiento de la calidad de vida de pobladores en comunidades alejadas carentes buenas prácticas que coadyuvan al uso racional de sus recursos naturales y protección del ambiente.

En este escenario, la GIZ encarga al CER-UNI la ejecución de la Consultoría **Desarrollo y Aplicación de un proceso experimental para calificar el funcionamiento térmico de un Horno de Leña** ajustada a los Términos de Referencia referidos arriba.

II. PERIODO QUE ABARCA

La Consultoría fue programada para desarrollarse desde el 27 de abril hasta el 09 de mayo, sin embargo, razones de orden técnico orientadas a mejorar el rendimiento térmico del Horno, generaron el alargue del periodo de pruebas por tres días más, extendiendo el plazo total hasta el jueves 12 de mayo de 2011.

III. PERSONAL PARTICIPANTE

Responsable de la Consultoría:	Rafael Espinoza.
Equipo técnico de desarrollo:	Gonzalo Saavedra Abel Deza Juan Molina Álvaro Gómez



IV. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Las pruebas experimentales se realizaron en ambientes del Laboratorio de Energía, N° 5 de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UNI. Este laboratorio tiene un área aproximada de 1500 m² y tiene aberturas en todo el contorno superior como se aprecia en la figura A4, de la serie fotográfica.

4.1 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación utilizada fue la siguiente:

Item	Nombre	Características	Cant.	Observaciones
1	Termocupla	<400 °C (0.75% +/- 2.5 °C)	14	Colocadas al interior del horno y chimenea.
2	Hobo Data Logger 1 entrada	-20 C a +70 , 5% a 95% HR	1	Medición de la temperatura del aire.
3	Hobo Data Logger 4 entradas	-20°C a +70°C , 0%-95%HR	3	Colocadas en la superficie exterior de la horno.
4	Termómetro para termocuplas		1	Medición de un diferencial de temperatura
5	Balanza	0 - 2610 g	1	
6	Analizador de Gases de combustión	BEA 250-EU	1	Mayormente utilizado en equipos automotrices.

4.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental cubrió las partes importantes del Horno involucradas en su funcionamiento, tal como se aprecia en la figura N° 1 que sigue a continuación.

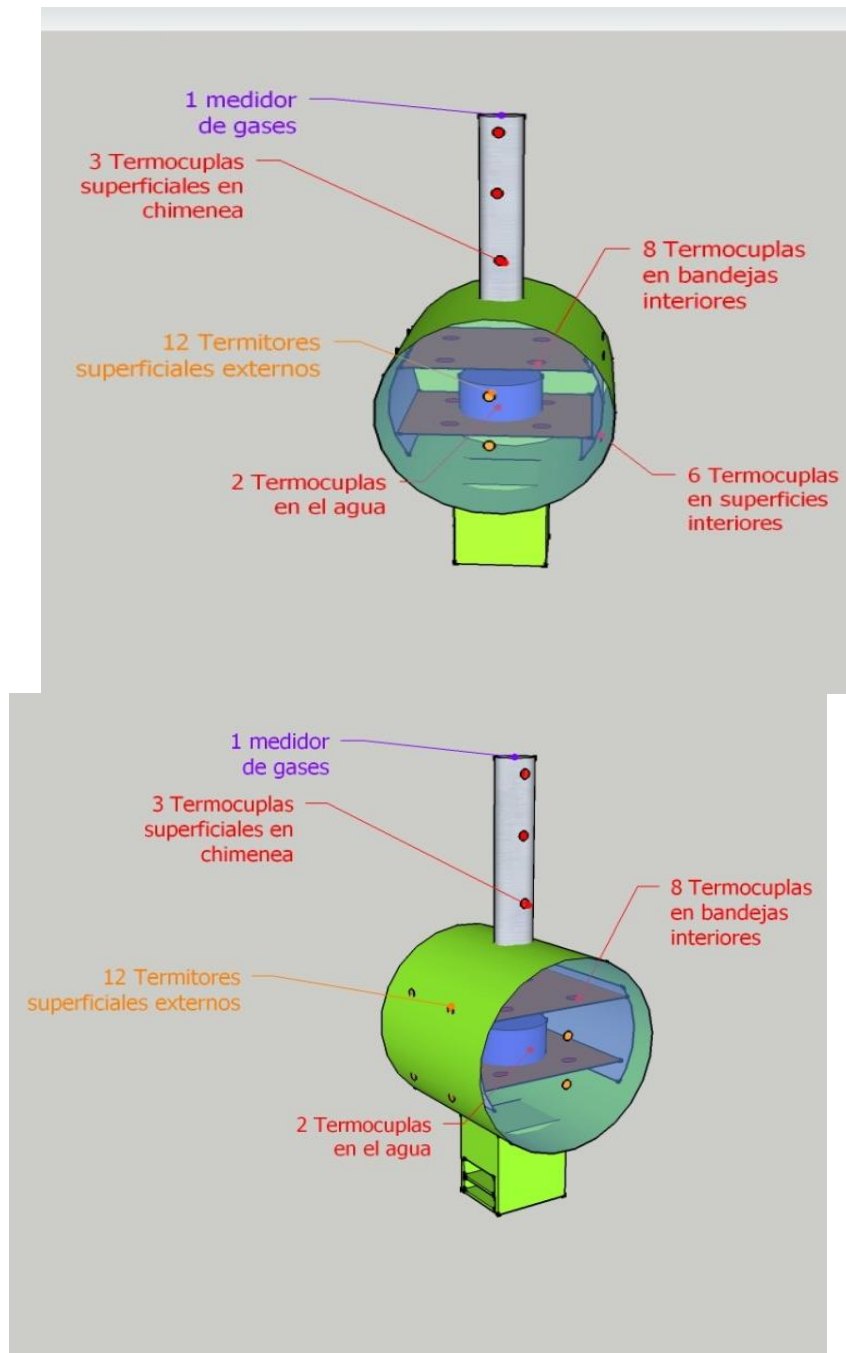


FIG. 1 El esquema de la figura muestra la ubicación de sensores e instrumentos utilizados en las seis (06) pruebas experimentales realizadas con registro de información.

En el esquema de la figura N° 1 se señala la cantidad, tipo y ubicación de los sensores de



temperatura utilizados a lo largo de los ensayos experimentales a los que fue sometido con el objeto de determinar con suficiente detalle información relativa a los siguientes aspectos.

- a. Grado de calentamiento
- b. Distribución del calor
- c. Indicadores de desempeño
- d. Balance térmico

4.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES

N°	FECHA	DETALLES	OBSERVACION
1	18/04	Prueba de observación general del funcionamiento del horno.	<ul style="list-style-type: none">-Con la presencia de la Srta. Verónica Pilco de GIZ, experta en cocinas mejoradas; recomendó procedimientos precisos para el quemado de leña.-Se quemó leña de uso típico en cocinas mejoradas (30cm de largo por 4cm de diámetro).-Se observó cantidades importantes (visibles) de humos, particularmente en el inicio de quemado.-Se observó fugas de gases de combustión a través de juntas del cuerpo exterior.
2	26/04	Prueba inicial con registro de datos y observación del desempeño del horno, en vacío.	<ul style="list-style-type: none">-Se hizo carga constante de leña en función del incremento de temperatura interior relativamente constantes.-Se detuvo el ensayo cuando la temperatura interior alcanzó 150°C aproximadamente.-Se decidió alimentar la cámara de combustión con leña de dimensiones ajustadas con la de la cámara.
3	27/04	Prueba en vacío a máxima potencia (cámara de combustión constantemente alimentada).	<ul style="list-style-type: none">-Se alimentó con leña pequeña manteniendo la cámara de combustión constantemente "lleno".-Con leños pequeños (del tamaño del interior de la cámara) se observó menor humeado y sin llamas por la boca de la cámara de combustión.
4	28/04	Primeras pruebas de calentamiento con una carga de 5 litros de agua y registro de temperatura importantes.	<ul style="list-style-type: none">-Se decidió usar agua como masa de referencia para efectos de comparación con otros artefactos de la misma línea (cocina).-Se observó el calentamiento del agua y se decidió graduar la alimentación de leña.



5	29/04	Segunda prueba de calentamiento de agua con carga máxima (20 litros de agua) en tres bandejas.	<ul style="list-style-type: none">-Se graduó la alimentación de la leña empezando con máxima alimentación, luego mínima alimentación, terminando con máxima alimentación.-Este procedimiento servirá para relacionar velocidad de carga de leña con la respuesta del horno calentando el agua, concluyendo que es recomendable alimentar al horno a velocidad alta.-El desempeño observado aconsejó el uso de un solo deposito con agua ubicado sobre el piso inferior. El uso de depósitos en ambos pisos merma la transferencia de calor en el espacio que queda entre bandejas.
6	05/05	Prueba de calentamiento con un solo deposito (olla) de agua y registro de datos	<ul style="list-style-type: none">-Se alimentó el horno a máxima potencia.-El humeado es mínimo, solo se intensifica por algunos segundos al cargar la leña.-En general mejoró el comportamiento del horno.
7	06/05	Prueba final de calentamiento con un sólo depósito de agua	<ul style="list-style-type: none">-Se decidió mejorar el rendimiento del horno pintando de negro su superficie interior, ennegreciendo la superficie exterior de la olla y manteniendo la tapa de esta puesta en todo instante.

V. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan resultados gráficos del comportamiento de las temperaturas registradas en las pruebas experimentales realizadas, correspondientes a las partes principales del horno:

- superficie exterior e interior del cuerpo,
- ambiente interior,
- superficie exterior de la chimenea
- masa de agua calentada



Ensayos del 28 de Abril de 2011

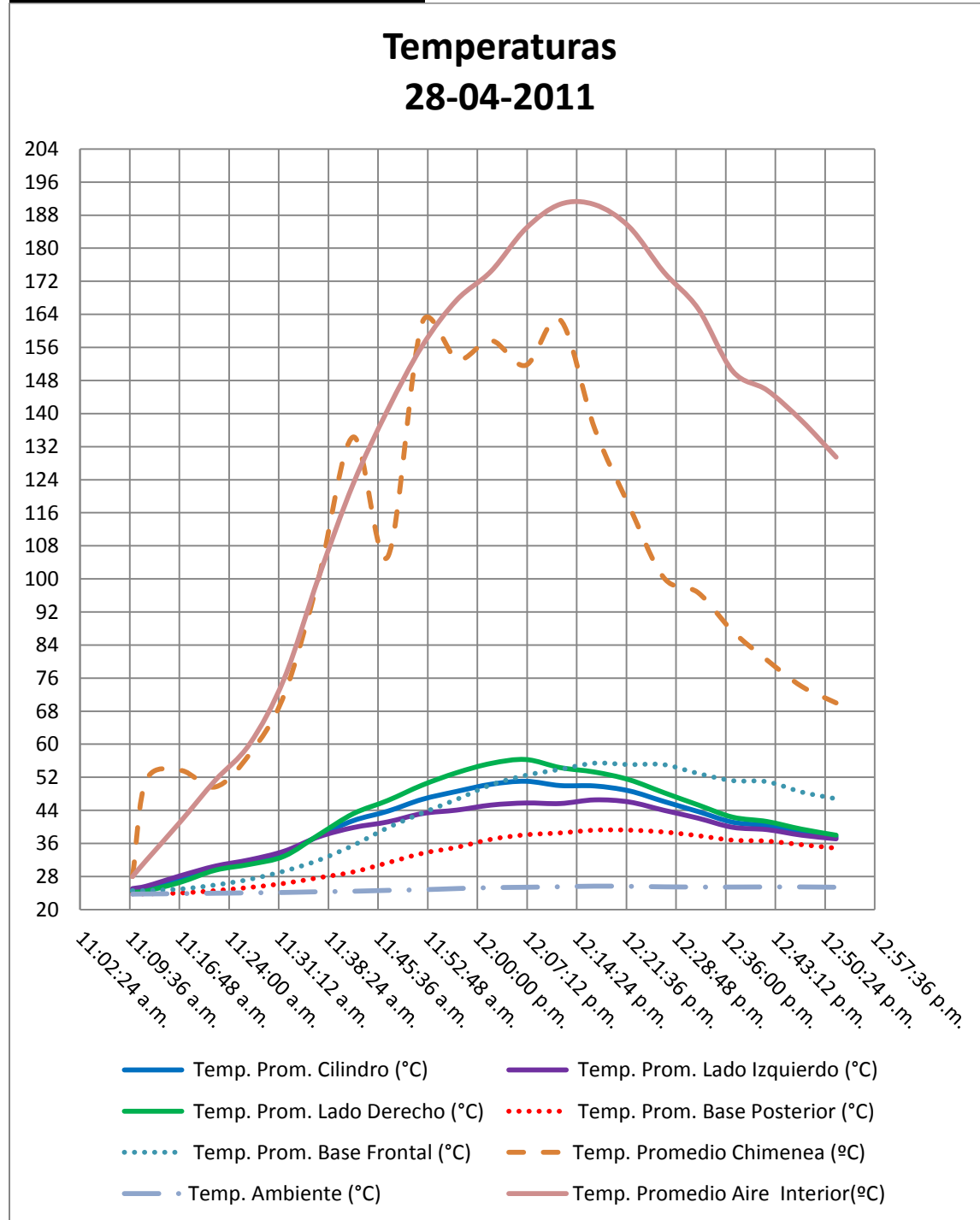


Figura 1. Comportamiento Térmico de Ambientes y Superficies del Horno el día 28-04-2011.



Ensayos del 29 de Abril de 2011

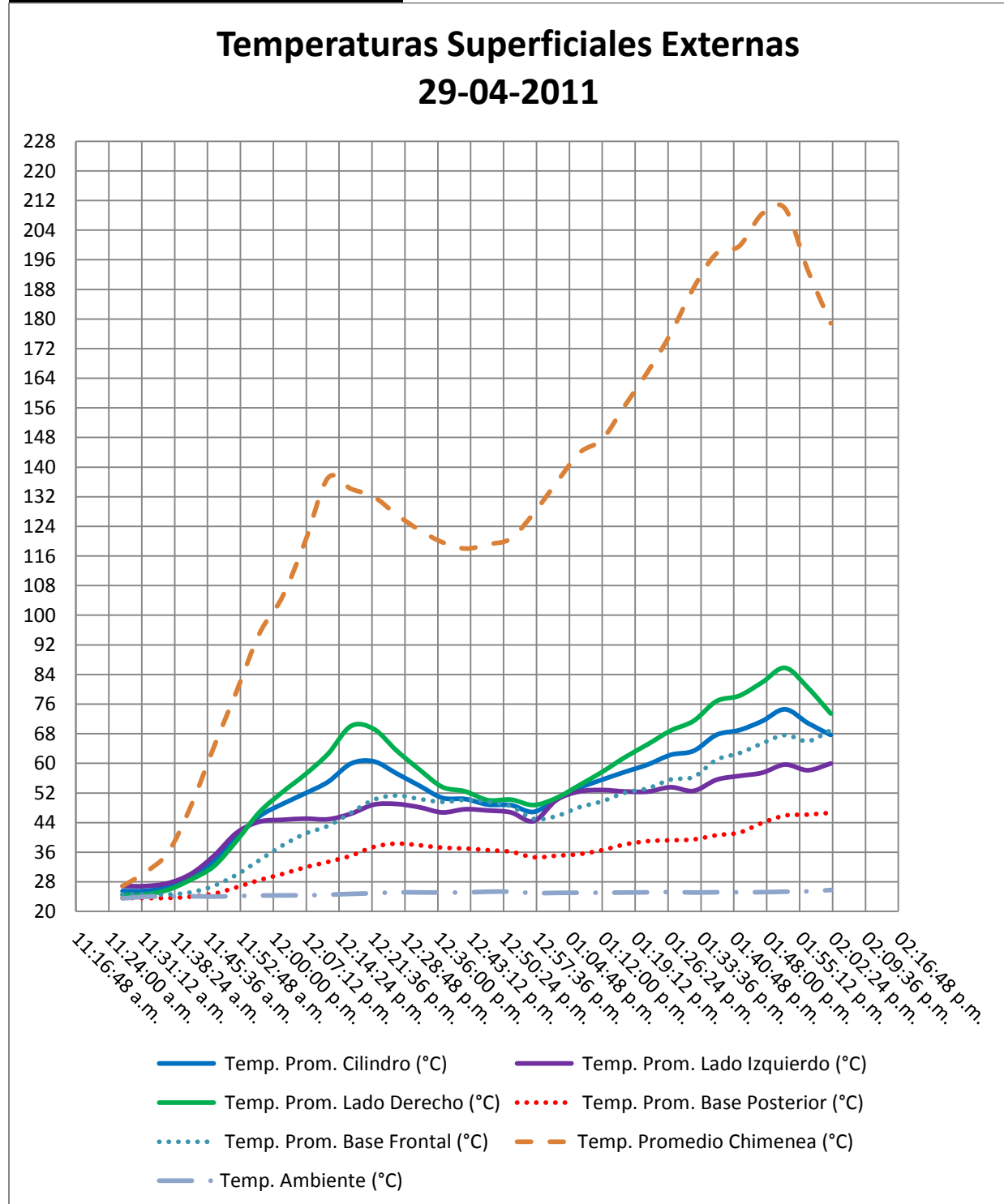


Figura 2. Comportamiento Térmico de las Superficies Externas del Horno el día 29-04-2011.

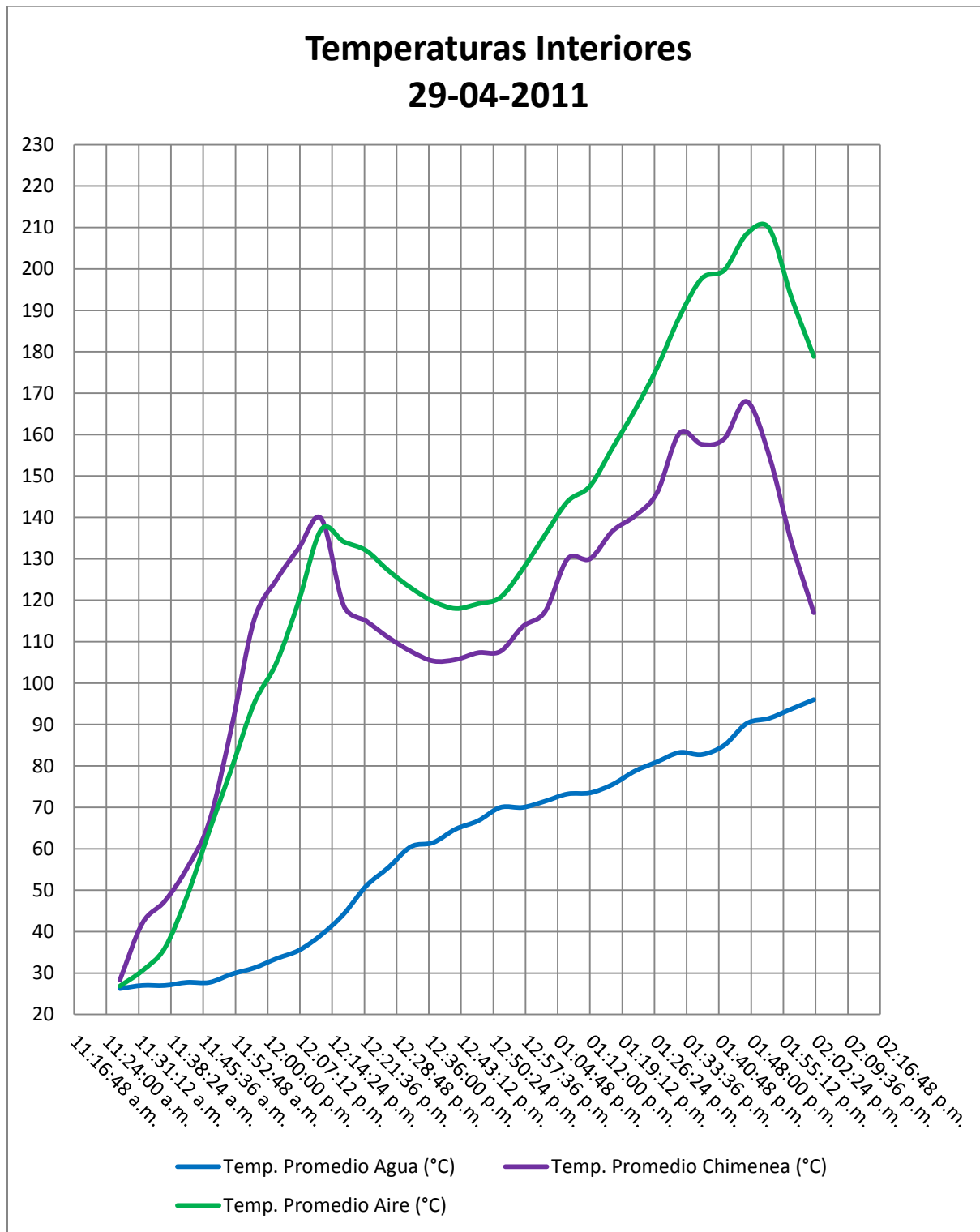


Figura 3. Comportamiento Térmico de los Ambientes Interiores del Horno el día 29-04-2011.



Ensayos del 05 de Mayo de 2011

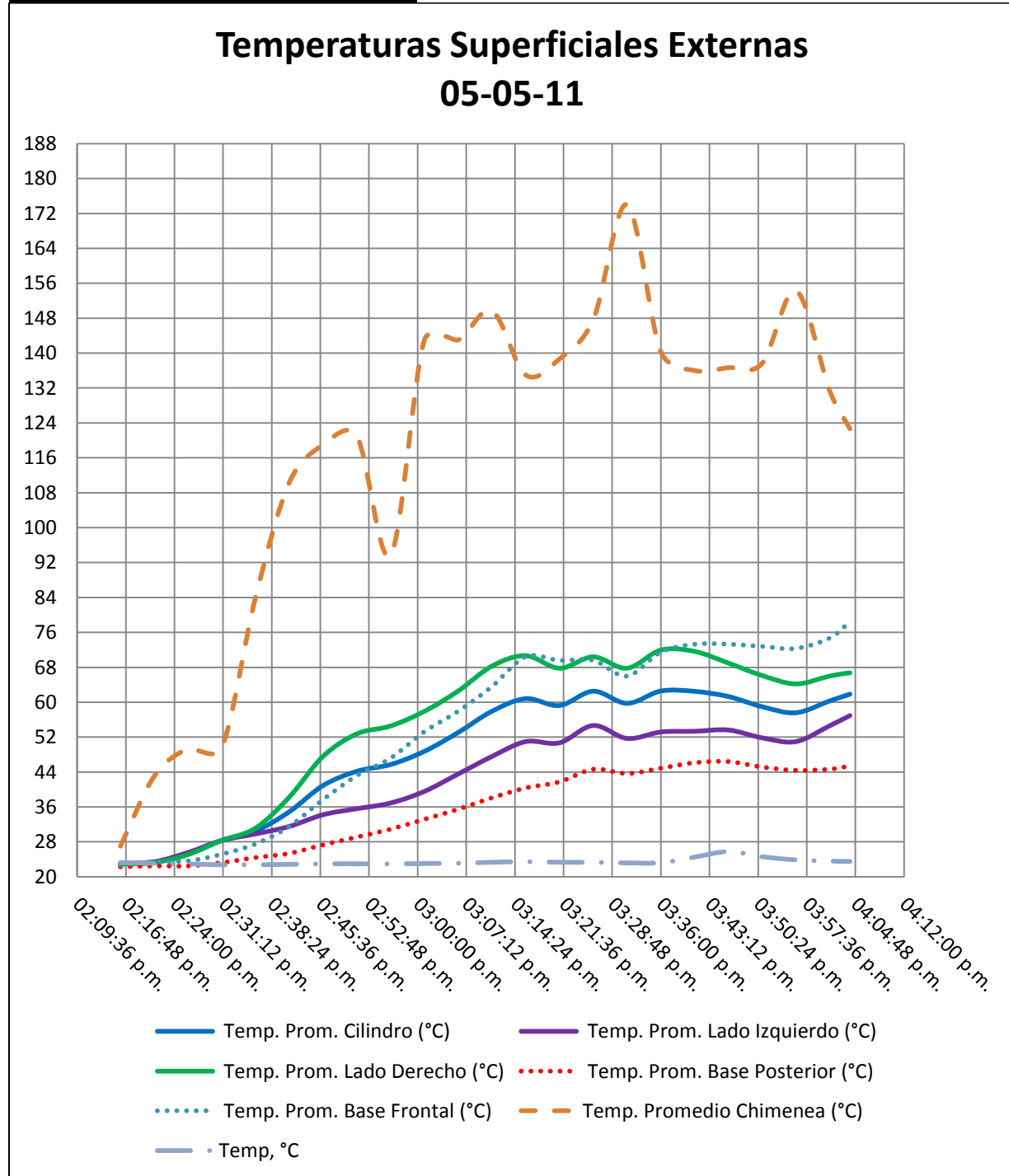


Figura 4. Comportamiento Térmico de las Superficies Externas del Horno el día 05-05-2011.

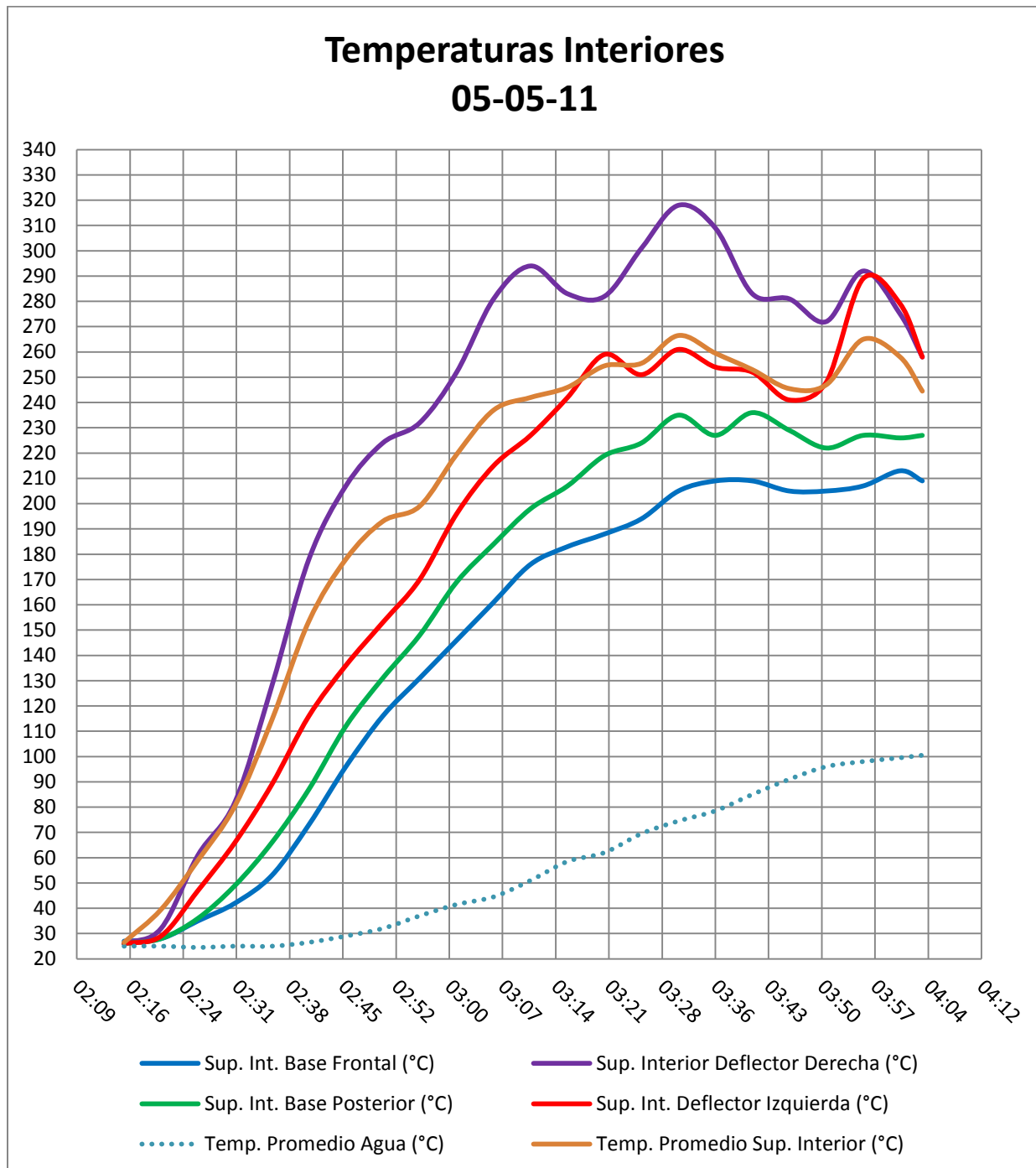


Figura 5. Comportamiento Térmico de los Ambientes y Superficies Interiores del Horno el día 05-05-2011.



Ensayos del 06 de Mayo de 2011

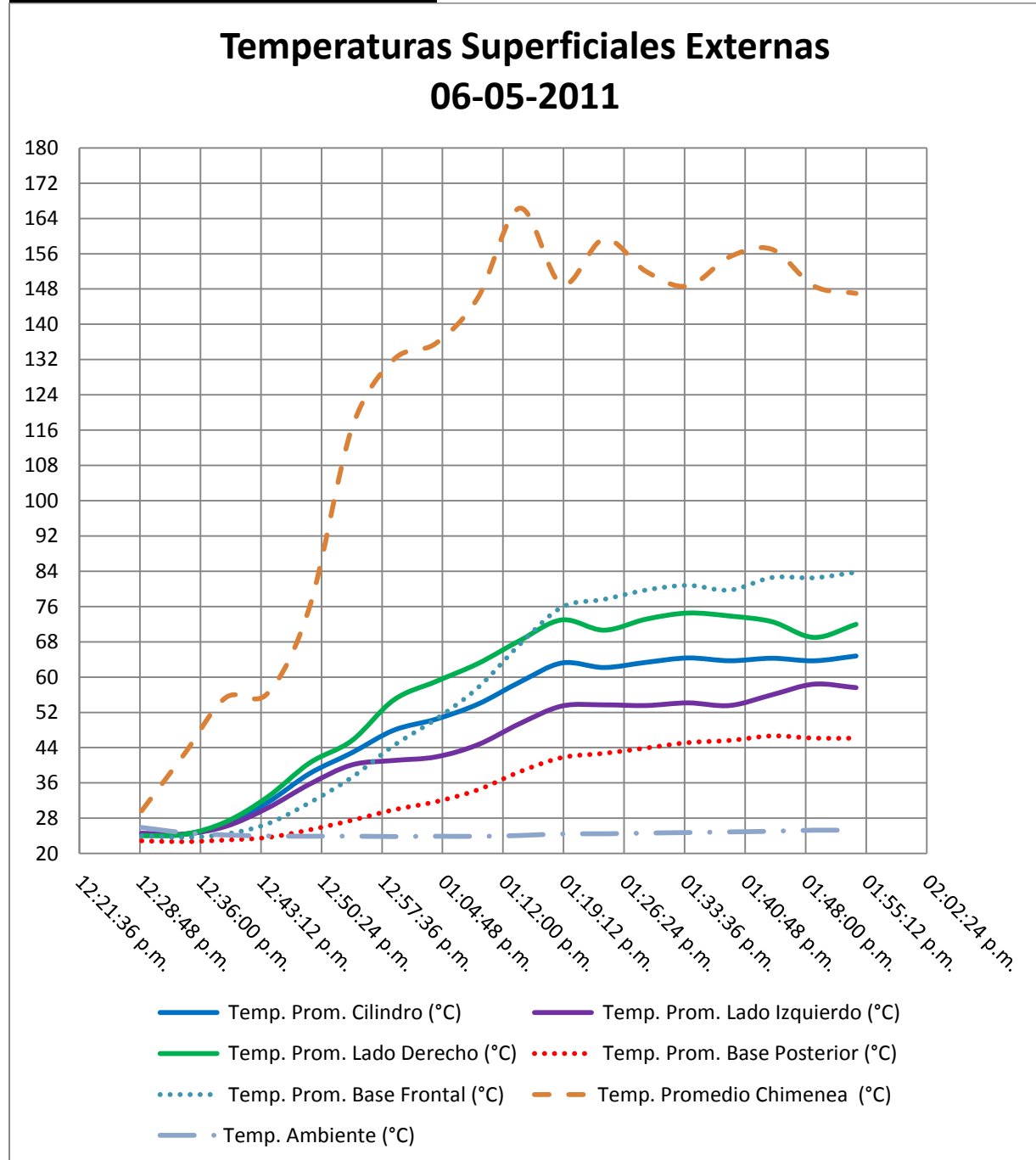


Figura 6. Comportamiento Térmico de las Superficies Externas del Horno el día 06-05-2011.

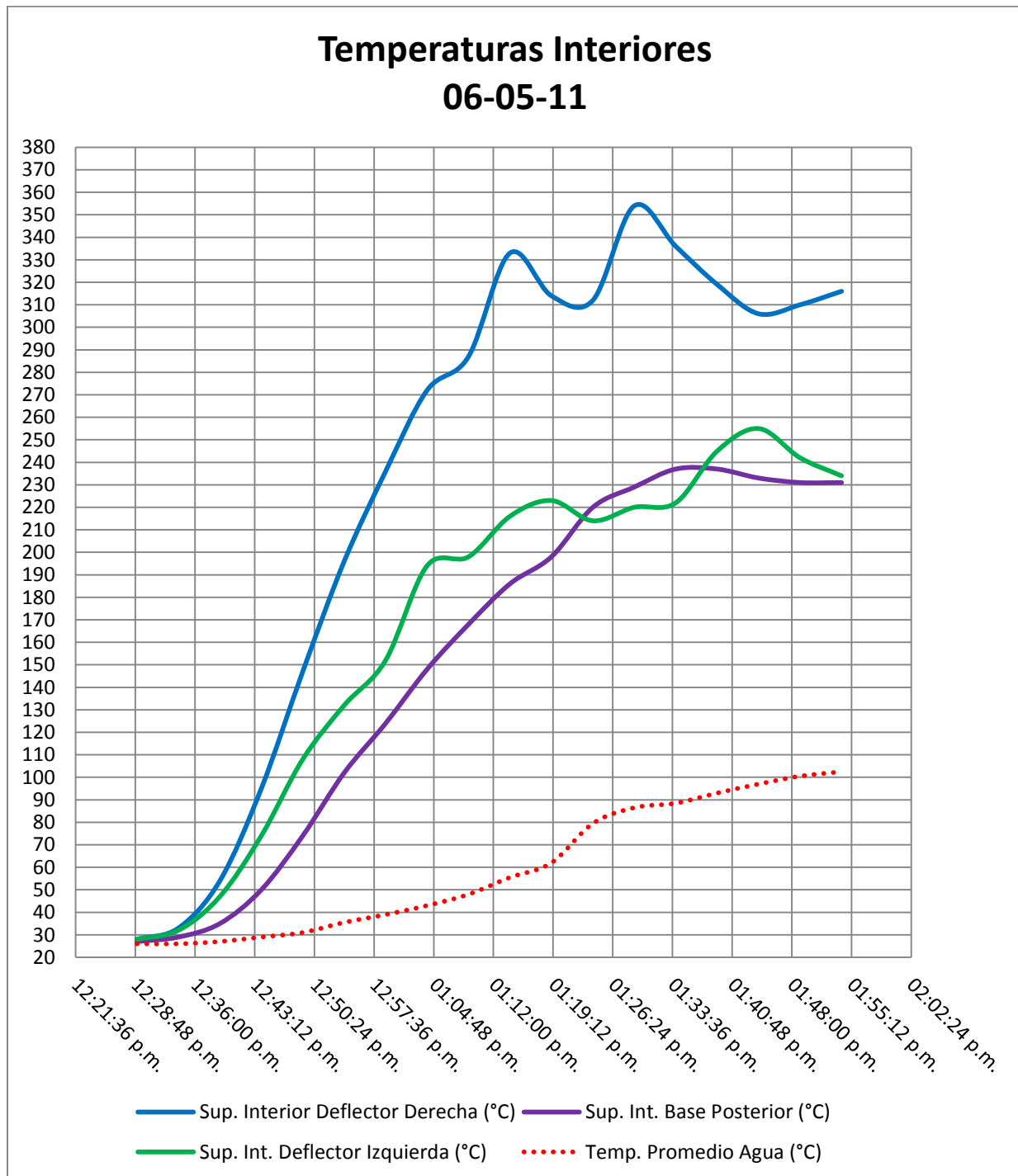


Figura 7. Comportamiento Térmico de los Ambientes y Superficies Interiores del Horno el día 06-05-2011.



Las temperaturas de la cubierta cilíndrica se encuentra entre 85 y 43°C en modo de operación y las de la chimenea en promedio superan los 170°C.

Así mismo, se incluye una tabla de indicadores de performance para los cuatro ensayos de calentamiento de agua simulando una carga de cocción.

Esta tabla de indicadores que se incluye a continuación es el epílogo numérico del resultado final del proceso experimental desarrollado que revelan global y detalladamente el comportamiento del Horno y permiten establecer las conclusiones pertinentes detalladas en el ítem 6 siguiente.

INDICADORES				
unidades	28-abr	29-abr	05-may	06-may
Tipo de leña	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto
% humedad leña	10%	10%	10%	10%
kg leña	3.35	4.58	4.01	3.14
Poder Calor: MJ/kg de leña	15.00	15.00	15.00	15.00
Mjoule en leña	50.25	68.72	60.15	47.07
kg de agua	5.00	20.41	13.91	15.28
[kJ/kg.K]-agua	4.19	4.19	4.19	4.19
°C de aumento	74.00	73.00	75.00	74.00
Mjoule en agua	1.55	6.24	4.37	4.73
minutos total	100.00	141.00	108.00	80.00
grleña/min	33.50	32.49	37.13	39.23
KJ/min	502.50	487.34	556.94	588.38
KWatts	8.38	8.12	9.28	9.81
grleña/°C	45.27	65.62	53.47	42.41
kg leña/kg agua	0.67	0.22	0.29	0.21
grleña/°C-litro	9.05	3.22	3.84	2.78
eficiencia térmica, %	3.08	9.08	7.26	10.06

Cabe mencionar que se destaca el resultado del día 06 de mayo por las características del ensayo referidas al equipo y a la masa de agua calentada, consideradas como las más adecuadas a los fines perseguidos.

En lo que se refiere a la composición de los gases de combustión de la leña utilizada, que fue eucalipto con un mínimo de contenido de humedad, se ha utilizado un equipo analizador marca BOSCH versión BEA V1.13-EURO; versión AMM 5575, aplicándolo en condiciones de sensibilidad a gasolina, GLP y GNC de utilización en MCI. La elevada sensibilidad del instrumento utilizado permite suponer que los registros obtenidos son sensiblemente representativos para el caso de gases de escape de combustión lenta de leña como es el caso



actual.

Los resultados obtenidos de esta manera son promedio de los resultados con sensibilidad a gasolina y GNC y se presenta a continuación.

Coefficiente de mezcla:	1,837
CO	: 0,175 % vol
CO ₂	: 0,397 % vol
HC	: 85 ppm vol
O ₂	: 12,50 % vol
CO _{cor}	: 0,656 % vol

Estos resultados indican un nivel de contaminación bastante bajo e inocuo para el medioambiente, con respecto al usuario, al ser operado el horno en exteriores no genera un efecto significativo.

VI. CONCLUSIONES

Ante la necesidad de establecer una metodología reproducible y sistemática y ante la inexistencia de este instrumento, se desarrolló un protocolo, anexo 1, en base a la experiencia en evaluación de cocinas.

FICHA TECNICA QUE CARACTERIZA AL HORNO DE LEÑA

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Dimensiones externas	1,04 de altura, 85,4 de largo y 59,4 de diámetro
Dimensiones de la cámara de cocción	79,5 de largo y 47 de diámetro
Dimensiones de la cámara de combustión	14 de ancho, 14 de fondo y 8,75 de alto
Dimensiones de la chimenea	133,5 de longitud y 11,8 diámetro
Capacidad nominal de carga de cocción	1,715 dm ³ (litros)
Capacidad de carga de leña	0,6 a 0,7 kg
Tamaño de los leños	10 a 14 de longitud y 3 a 5 en la dimensión transversal máxima
Carga de cocción de prueba	15,28 kg (litros) de agua
Consumo de leña	3,14 kg
Calor de cocción disponible	47,07 MJ
Potencia térmica equivalente	10,06 KW
Empleo de leña	0,21 kg leña/kg agua
Empleo específico de leña	2,78 gr leña/°C-litro de agua
Eficiencia térmica	10,06%



VII. RECOMENDACIONES

A partir de la observación del Horno en su conjunto y en detalle de las pruebas experimentales y sus correspondientes resultados, se han elaborado las siguientes recomendaciones respecto a cada uno de los aspectos subtitulados en seguida.

7.1 DISEÑO

- a. Aumentar el espesor de aislante utilizado en el cuerpo en la cámara de cocción, espesor total al menos 10 cm (de conductividad 0.04 W/m-K, por ejemplo lana de vidrio).
- b. Mejorar el empaque de juntas de la superficie circunferencial y las superficies planas de la cámara de cocción, para la zona de desplazamiento de gases de combustión.
- c. Pintar la superficie interior del horno de color negro
- d. Revisar la función térmica de los llamados deflectores
- e. Elevar todo el sistema, cámara de combustión y horno, 25 cm aprox, para mejorar el confort del operador.

7.2 MONTAJE

- a. Ajustar los empalmes correspondientes a las partes referidas en 7.1 b.
- b. Considerar la posibilidad de dotar de ruedas con traba a las patas del horno.

7.3 OPERACIÓN

- a. Mejorar el deslizamiento de la carga de cocción
- b. Mantener la palanca reguladora de la chimenea a 45° respecto al eje vertical para asegurar el máximo tiro.

7.4 USO Y MANTENIMIENTO

- a. Se debe usar trozos de leña de 3x4x14cm aproximadamente.
- b. Leña seca rajada es lo recomendable.
- c. Para el encendido utilizar papel y astillas de leña para obtener una llama que permita el encendido de, al menos, un trozo de leña.
- d. Agregar trozos llenando la cámara de combustión (cc).
- e. Mantener el fuego vivo agregando trozos de leña de modo que la cc se vea, al menos, medio llena.
- f. disponer de una mesa auxiliar para la fuente e introducirla en el horno 15 a 20 minutos de iniciado el encendido de leña.
- g. Es preferible el uso del portabandeja superior.
- i. Limpiar la superficie interior del horno luego de concluida la tarea de cocción y enfriado el horno.
- j. Evacuar las cenizas resultantes del quemado de la leña.



k. limpiar toda la superficie exterior del horno, incluida la chimenea.

7.5 SEGURIDAD

- a. Proteger el mango de la puerta del calentamiento de la misma.
- b. Colocar un símbolo de alerta sobre la superficie del horno respecto al riesgo de quemado accidental de personas.
- c. Proceder de forma similar con la chimenea.

7.6 PROSPECTIVA

No obstante haber cumplido técnicamente con el compromiso de la consultoría respecto a la evaluación del comportamiento térmico del Horno de Leña operado, el CER-UNI somete a la consideración de GIZ continuar con ensayos adicionales de comportamiento del Horno variando algunos parámetros o condiciones importantes para evaluar su rendimiento, tales como caudal de aire, longitud de chimenea, depósitos de barro (ollas típicas), y otros. Estas pruebas suplementarias no involucrarían más gastos que los que generen el uso de leña, que lo asumiría el CER-UNI, y los correspondientes a cambios físicos en el Horno que serían cargo de GIZ.

VIII. COMENTARIOS

8.1 No es técnicamente posible opinar con consistencia sobre la duración o envejecimiento de la parte de la cámara de cocción que recibe directamente el fuego de la leña. Una respuesta precisa requeriría de ensayos de uso progresivo y análisis físico de la zona comprometida.

8.2 Como alternativa a la situación de 8.1, sería la opinión experimentada de operaciones muy similares con hornos idénticos.

8.3 Con relación al rendimiento alcanzado con el horno (eficiencia térmica igual a 10,6%) incluimos resultados equivalentes correspondientes a una cocina mejorada (sobre la base de información proporcionada por Verónica Pilco Mamani) y de un horno de cocina de GLP experimentado en el mismo lugar que el horno de leña (figura N° A22 de la serie).

En la tabla siguiente se aprecia que la eficiencia calculada para la cocina mejorada resulta iguala 6,98% y para el horno de GLP 37,65%.

Para el horno experimentado resultó 10,06%; eficiencia mayor que la cocina mejorada y naturalmente menor que la de una tecnología mucho mejor acabada como la correspondiente al horno de GLP.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE ENERGIAS RENOVABLES
Y USO RACIONAL DE LA ENERGIA



INDICADORES unidades	COCINA	HORNO GLP	
	MEJORADA		
kg leña	1.50	0.24	kg GLP
MJ/kg de leña	15.00	48.40	MJ/kg de GLP
Mjoule en leña	22.50	11.62	Mjoule de GLP
kg de agua	5.00	15.04	kg de agua
[J/kg.K]-agua	4.19	4.18	[J/kg.K]-agua
°C de aumento	75.00	69.50	°C de aumento
Mjoule en agua	1.57	4.37	Mjoule en agua
minutos total	15.00	87.00	minutos total
grleña/min	100.00	2.76	grGLP/min
KJ/min	1500.00	133.52	KJ/min
KWatts	25.00	2.23	KWatts
grleña/°C	20.00	3.45	grGLP/°C
kg leña/kg agua	0.30	0.02	kg GLP/kg agua
grleña/°C-litro	4.00	0.23	grGLP/°C-litro
eficiencia	6.98	37.65	s/u

UNI, mayo 12 de 2011

Rafael Espinoza
CER-UNI