

ANÁLISIS DEL “FOULING” PROCEDENTE DE LA COMBUSTIÓN DE PELLET DE PINO Y PELLET DE PAJA EN UNA CALDERA DE BAJA POTENCIA: INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN

GRANADA ÁLVAREZ, Enrique ⁽¹⁾; FEBRERO GARRIDO, Lara ⁽¹⁾; EGUÍA OLLER, Pablo ⁽¹⁾;
REGUEIRO PEREIRA, Araceli ⁽¹⁾; PATIÑO VILAS, David ⁽¹⁾

egranada@uvigo.es

⁽¹⁾ Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

El “fouling”, es decir, la formación de depósitos sobre las superficies sometidas principalmente a convección, es uno de los principales problemas en las calderas de combustión de biomasa. La acumulación de estos depósitos puede causar una significativa pérdida de eficiencia energética. Su principal causa es la propia composición inorgánica de la biomasa utilizada. Sin embargo, en las calderas de baja potencia, donde los intercambiadores de calor están relativamente cerca de la cámara de combustión, se observa cómo los depósitos están compuestos por una gran parte de material orgánico, existiendo pocos estudios al respecto. Además, no sólo la composición química de la biomasa repercute en la formación de depósitos sino también los parámetros de la combustión, obteniéndose un punto óptimo de operación de la caldera.

El estudio realizado consistió en la evaluación de la materia orgánica e inorgánica que componen el “fouling” procedente de la combustión de dos tipos de pellet diferentes, uno de madera de pino y otro de paja, en una caldera de lecho fijo y baja potencia. Primero, se compararon teóricamente ambos tipos de combustibles a través de índices de deposición teóricos. A continuación, se realizaron distintas combustiones variando los siguientes parámetros operativos: la duración de la combustión, la distribución del caudal de aire primario y secundario y el caudal de aire total suministrado. De cada uno de estos ensayos, se recogieron los depósitos del tubo intercambiador de calor. Se distinguieron dos capas; el “fouling adherido”, que se corresponde con la capa más interior pegada al tubo y el “fouling depositado”, que se corresponde con la capa más superficial depositada sobre la anterior. Se observó que ambas capas tenían comportamientos y composiciones ligeramente diferentes. A través de termogravimetría (TG-DSC) se determinó cuantitativamente el contenido de materia orgánica presente en las muestras y su comportamiento térmico. El análisis químico se llevó a cabo usando microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS) determinando la composición elemental total de cada muestra. Los resultados indicaron que los depósitos tenían una gran cantidad de materia orgánica. Además, en general, en los depósitos de pino, el contenido en materia orgánica de las muestras disminuye cuando la duración de la combustión, el caudal de aire total y el caudal de aire primario aumentan. Lo cual queda corroborado por la cantidad de C obtenido en las muestras con SEM-EDS. Asimismo, se obtuvo una mayor cantidad de Si, sobre todo, pero también de Cl y K, en los depósitos de paja, causando los mayores problemas de combustión experimentados.

Palabras clave: Fouling, TG-DSC, SEM-EDS

1. Introducción

Las calderas de combustión de biomasa presentan ciertos problemas operacionales asociados a la formación de depósitos. Uno de los más preocupantes es el ensuciamiento en los tubos intercambiadores de calor, comúnmente llamado “fouling” [1, 2]. El “fouling” se define como la formación de depósitos sobre las superficies sometidas principalmente a transferencia de calor por convección [3]. La principal consecuencia de la acumulación de estos depósitos es la significativa pérdida de eficiencia energética al verse reducida la transferencia de calor, ya que estos depósitos actúan sobre los tubos como aislantes. Además, este ensuciamiento también puede provocar averías y daños en los equipos y, evidentemente, un aumento en labores de mantenimiento y limpieza de las calderas [4].

La principal causa de este ensuciamiento es la propia composición inorgánica de la biomasa utilizada como combustible, y así lo han reflejado algunos autores [3, 5]. Sin embargo, en las calderas de baja potencia, donde los intercambiadores de calor están relativamente cerca de la cámara de combustión, se observa cómo los depósitos están compuestos por una gran parte de material orgánico, existiendo pocos estudios al respecto. Además, no solamente la composición química de la biomasa repercute en la formación de depósitos, también los parámetros de la combustión tienen influencia sobre ella [6]. Se deben buscar unos parámetros operativos que permitan la obtención de un punto óptimo de operación de la caldera.

Varios autores han estudiado distintas maneras de determinar el potencial de un combustible al ensuciamiento a través de índices teóricos de deposición. Estos índices se basan en la composición química inorgánica de la biomasa para predecir su comportamiento. Sin embargo, la mayoría de estos índices han sido creados en un principio para ser aplicados al carbón [7], y han sido utilizados directamente o han sido modificados ligeramente para la biomasa [8, 9]. Realmente, son únicamente predicciones del potencial de ensuciamiento de un combustible, ya que es casi imposible predecir estos fenómenos inequívocamente debido a la influencia de otras variables como son las condiciones de la combustión; como por ejemplo, el diseño de la caldera, las temperaturas de operación o los caudales de aire introducidos.

El objetivo del estudio realizado fue la evaluación de la materia orgánica e inorgánica presente en el ensuciamiento procedente de la combustión de dos tipos de pellet, un pellet de madera de pino y un pellet de paja, en una caldera de lecho fijo y de baja potencia. Primeramente, se compararon teóricamente ambos tipos de combustibles a través de índices teóricos de deposición. A continuación, se realizaron combustiones variando los siguientes parámetros operativos: la duración de la combustión, la distribución del caudal de aire primario y secundario y el caudal de aire total suministrado. De cada uno de estos ensayos, se recogieron los depósitos del tubo intercambiador de calor. Se distinguieron dos capas; el “fouling adherido”, que se corresponde con la capa más interior pegada al tubo y el “fouling depositado”, que se corresponde con la capa más superficial depositada sobre la anterior. Finalmente, se caracterizaron las muestras térmicamente a través de termogravimetría y calorimetría de barrido diferencial (TG-DSC) y químicamente a través de microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS).

2. Experimental

2.1. Equipo y combustibles utilizados

Caldera de baja potencia

Las muestras se obtienen de la combustión de biomasa en una planta experimental que simula una caldera de lecho fijo de baja potencia. No se trata de un equipo comercial, ha sido construido con fines de investigación. Esta caldera genera entre 10 y 15 kW de potencia térmica. Está compuesta por un quemador de sección cuadrada con una parrilla fija inclinada, el combustible se alimenta al quemador a través de un tornillo sin fin y la entrada de aire se encuentra estratificada. El caudal de aire primario se introduce a través de la parte inferior del lecho mientras que el caudal de aire secundario se

introduce por encima del lecho. Además, se dispone de un tubo de intercambio por el que pasa agua, simulando una caldera acuotubular, y que puede ser extraído fácilmente para recoger las muestras de ensuciamiento. Existe la posibilidad de controlar y registrar múltiples parámetros como la temperatura de entrada y salida de agua, la temperatura en la chimenea o los caudales de aire primario y secundario, a través de un software Labview de National Instruments. Esta caldera experimental ha sido descrita en otros trabajos del grupo [10, 11].

Pellet de pino y pellet de paja

Para el presente estudio se utilizaron dos tipos de pellet, uno con una baja tendencia al ensuciamiento, el pellet de pino y otro con una tendencia más alta al ensuciamiento, el pellet de paja. El pellet de pino es de la marca “Pellets Asturias” suministrado por Grupo Saraita, S.L. y el pellet de paja fue suministrado por Molienda y Granulación S.L. En la Tabla 1 se muestra una caracterización completa de ambos combustibles.

Tabla 1: Análisis inmediato, análisis elemental y análisis de cenizas del pellet de pino y del pellet de paja.

	PELLET DE PINO	PELLET DE PAJA		PELLET DE PINO	PELLET DE PAJA
	<i>Análisis inmediato (% bs)</i>			<i>Análisis de cenizas (% sobre cenizas)</i>	
Humedad	6.71	7.43	Na₂O	0.39	0.03
Volátiles	74.27	67.75	MgO	10.47	1.62
Carbono fijo	25.28	23.23	Al₂O₃	5.69	0.46
Cenizas	0.45	9.02	SiO₂	32.96	68.21
	<i>Análisis elemental (% bs)</i>		P₂O₅	1.84	1.24
C	50.46	44.69	SO₃	5.94	2.78
H	6.53	6.03	Cl	0.84	0.74
N	0.19	0.55	K₂O	16.20	13.98
O*	42.37	39.72	CaO	21.32	10.67
			TiO₂	0.33	0.02
			MnO	1.38	0.04
			Fe₂O₃	2.21	0.18
			ZnO	0.30	0.01
			SrO	0.14	0.03

* El oxígeno se calcula por diferencia: $O = 100 - C - H - N - \text{Cenizas}$

a. Combustiones realizadas y muestras recogidas

Las combustiones realizadas con cada uno de los combustibles, especificando los parámetros utilizados se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Combustiones realizadas y parámetros operativos utilizados en cada una de ellas.

Combustión	Biomasa	Tiempo de combustión (h)	Caudal de aire (m ³ /h)	Reparto primario/secundario	Grupo de combustión *
1	Pino	3	20	20/80	A
2	Pino	3	20	25/75	A, B
3	Pino	3	20	30/70	A
4	Pino	6	20	25/75	B, C
5	Pino	12	20	25/75	B
6	Pino	6	14	25/75	C
7	Pino	6	23	25/75	C
8	Paja	2	23	50/50	A
9	Paja	2	23	60/40	A, B, C
10	Paja	2	23	70/30	A
11	Paja	1	23	60/40	B

12	Paja	3	23	60/40	B
13	Paja	2	20	60/40	C
14	Paja	2	25	60/40	C

** En las combustiones del grupo A el parámetro que varía es el reparto entre el aire primario y el aire secundario, en las del grupo B es el tiempo de combustión estable y en las del grupo C el parámetro variable es el caudal de aire suministrado.*

De cada una de estas combustiones se recogen muestras del ensuciamiento del tubo de agua y se dividen en dos capas; la capa más exterior a la que llamamos “fouling depositado” y se recoge sacudiendo el tubo y la capa más interior a la que llamamos “fouling adherido” y que debe ser despegada del tubo. Así, se obtienen dos muestras de cada una de las 14 combustiones de la Tabla 2.

2.2. Técnicas analíticas aplicadas

Cada una de las muestras recogidas es sometida a una caracterización térmica y química con las técnicas y los procesos que se explican a continuación.

TG-DSC (TermoGravimetría y Calorimetría de Barrido Diferencial)

El equipo utilizado fue una balanza termogravimétrica Labsys TG-DTA/DSC de SETARAM Instrumentation. Aproximadamente 10 mg de cada muestra fue sometida al siguiente programa térmico. Se calienta la muestra desde 20°C a 105°C a 20°C/min con 50 ml/min de N₂ como gas de barrido, luego esta temperatura se mantiene durante 10 minutos. A continuación, se sigue calentando la muestra desde 105°C a 550°C con un caudal de aire seco de 50 ml/min también a una velocidad de calentamiento de 20°C/min y luego esta temperatura se mantiene durante 45 minutos, con el objetivo de asegurar que toda la materia orgánica se oxide y se estabilice la masa.

SEM-EDS (Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X)

El equipo utilizado fue un Philips XL30 con EDAX PV9760 EDS. Las muestras se prepararon sobre un soporte circular de 12.5 mm de diámetro con una pegatina de carbono sobre la que se coloca la muestra en polvo. Se utilizó un detector de electrones retrodispersados (BSE). Las muestras fueron barridas con un voltaje de aceleración de 20 kV y una intensidad de haz de electrones de entre 35 y 45 μ A. El tamaño de punto fue de alrededor de 5.5 y la distancia de trabajo (WD) se mantuvo lo más cercana posible a 10 mm. El tiempo de medida fue de 30 segundos. Se realizaron 3 microanálisis de cada muestra en diferentes áreas con una magnificación de 150 aumentos. La metodología para escoger las áreas fue aleatoria pero sin superposición de zonas.

3. Resultados y discusión

3.1. Índices teóricos de deposición

Comparando la caracterización de ambos combustibles de la Tabla 1, se observa que el pino tiene mayores cantidades de carbono fijo y de volátiles, pero lo más significativo es la gran cantidad de cenizas que tiene el pellet de paja en comparación con el pellet de pino, más de 20 veces más. Esta es la principal razón por la cual el pellet de paja generó operativamente muchos más problemas que el pellet de pino. En cuanto a los elementos inorgánicos, el pellet de paja contiene una cantidad exageradamente alta de Si. Aparece como el elemento mayoritario con mucha diferencia, con casi un 70% de concentración. Esto hace que el resto de elementos aparezcan en menor proporción que en el pellet de pino. Sin embargo, en el pellet de pino se destaca la cantidad de Mg, Al y Ca en comparación con el pellet de paja. Lo cual se corresponde con lo que afirman otros autores [12]. Además, el pellet de pino también aparece enriquecido en S. Hay que tener en cuenta que los óxidos del análisis de cenizas se presentan como porcentaje en peso sobre las cenizas. Si se indicasen en cantidades

absolutas sobre el combustible, evidentemente el pellet de paja tendría más cantidad de todos los elementos.

Los índices teóricos de deposición calculados pueden ser observados en la Tabla 3. Uno de los índices más típicos para determinar el ensuciamiento es el ratio base-ácido, en el cual en el numerador se colocan los compuestos básicos que tienen generalmente un punto de fusión bajo y en el denominador se colocan los ácidos que tienen generalmente un punto de fusión más alto. Además, cuando se trabaja con biomasa es conveniente introducir la cantidad de P. El P debe introducirse en el numerador debido a su bajo punto de fusión, y se denomina ratio base-ácido (+P). Por otra parte, se calcula un índice concreto para el “fouling” y como el pellet de paja generó problemas de aglomeración en el lecho, se quiso comprobar a través del índice de aglomeración en el lecho (BAI) si este fenómeno se predecía correctamente.

Tabla 3: Índices teóricos de deposición y sus resultados para el pellet de pino y el pellet de paja.

Índice	Ecuación	Resultados	
		Pino	Paja
Ratio base-ácido (+P)	$B/A (+P) = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	1.34	0.40
Índice de “fouling”	$F_U = (B/A (+P)) \cdot (Na_2O + K_2O)$	22.31	5.65
Índice de aglomeración	$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O + K_2O}$	0.13	0.01

Discutiendo los resultados de la Tabla 3 se puede observar lo siguiente. En cuanto al ratio base-ácido no existe un consenso único en la literatura. Siguiendo los resultados de Teixeira et al. [13], el ensuciamiento será más alto para $B/A \approx 0.75$, más bajo cuando B/A aumente desde 0.75 a 2 o disminuya por debajo de 0.75. Así, el más cercano a 0.75 es el índice del pellet de paja que resultó ser el que generó más problemas de ensuciamiento. Por otra parte, los resultados del índice de “fouling” indican que cuando $F_U \leq 0.6$ el combustible tiene baja tendencia al ensuciamiento, cuando está entre 0.6 y 40 tiene una tendencia alta y cuando $F_U \geq 40$ el combustible tiene una tendencia extremadamente alta al “fouling” [8]. Los resultados de ambos combustibles indicaron una tendencia alta al “fouling”, aunque mayor para el pellet de pino, lo cual no se correspondía con la realidad. Por último, el índice de aglomeración del lecho revela que existe aglomeración cuando $BAI < 0.15$ [9], y observando los resultados se confirma la alta tendencia a la aglomeración en el lecho que presentó el pellet de paja. Sin embargo, estos índices de deposición deben ser utilizados con criterio. Antes de nada, hay que tener en cuenta que se utilizan concentraciones sobre las cenizas y no cantidades absolutas, lo que puede inducir a error en la interpretación. Además, en concreto el índice de aglomeración en el lecho no tiene en cuenta el Si, el cual demostró ser un elemento importante en este fenómeno [2].

3.2. Caracterización térmica

En la Figura 1 se observa la cantidad de materia orgánica presente en cada una de las muestras de “fouling” tanto depositado como adherido de las combustiones de la Tabla 2.

En las muestras de pellet de pino se observa como la materia orgánica disminuye a medida que aumenta el caudal de aire total y, específicamente, el caudal de aire primario suministrado tanto en muestras de ensuciamiento depositado como adherido. Esto se debe a que la materia orgánica se deposita junto a la materia inorgánica, pero si hay oxígeno disponible localmente es más fácil que esta materia orgánica se oxide [5]. Entonces, a mayor caudal, mayor cantidad de oxígeno disponible y menos cantidad de materia orgánica sin quemar en el ensuciamiento. También disminuye la cantidad de materia orgánica en el “fouling depositado” al aumentar la duración de la combustión, sin embargo, ocurre lo contrario en el “fouling adherido”.

En las muestras de pellet de paja no se observa ninguna tendencia clara en la cantidad de materia orgánica presente en el ensuciamiento. En general, en las combustiones con pellet de paja se utilizaron mayores caudales de aire total y mayores proporciones en el primario que en las combustiones con pellet de pino por motivos operacionales, lo cual tiene como consecuencia que en las muestras de “fouling” depositado y adherido de la paja haya menos materia orgánica que en las muestras de “fouling” de pino.

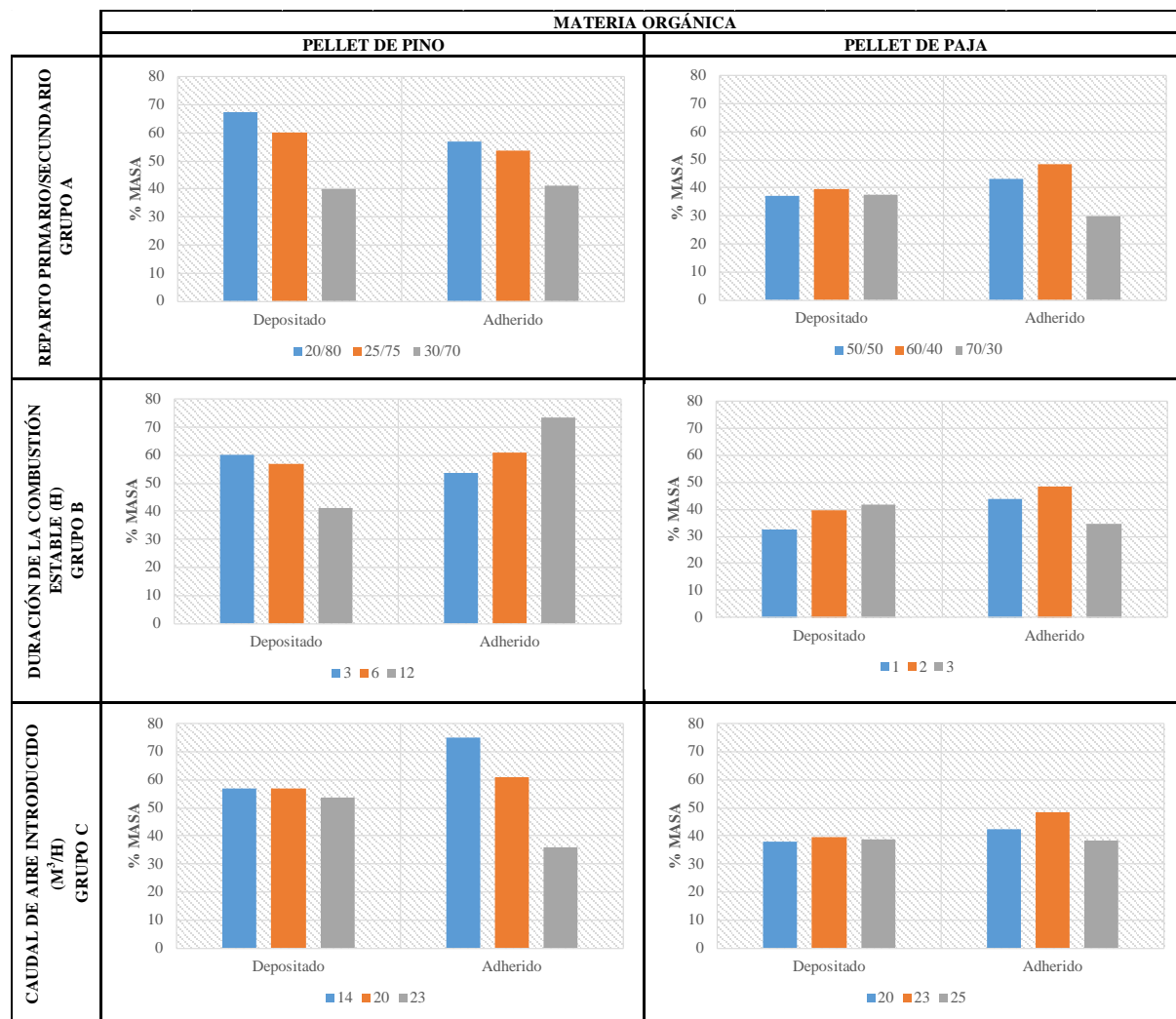


Figura 1: Materia orgánica presente en las muestras de ensuciamiento.

3.3. Caracterización química

En la Figura 2 se pueden observar los resultados obtenidos del microanálisis de las muestras. No se representaron el C y el O con el objetivo de observar mejor las tendencias y diferencias entre los elementos inorgánicos de cada una de las muestras.

Comparando las muestras de ensuciamiento de pino y de paja se puede observar lo siguiente. En las muestras de ensuciamiento de pino, en general, aparecen como elementos mayoritarios el Ca, K, Cl y S. En algunas zonas y con ciertos parámetros de combustión también son elementos importantes el Fe y el Si. Por otra parte, en las muestras de ensuciamiento de paja aparecen como elementos mayoritarios en general el Si, el Cl y el K. También, en algunas zonas y con ciertos parámetros de combustión son importantes el Ca y el S. Los metales alcalinos, en este caso el K, en combinación con otros elementos del combustible como el Si y el S, y facilitado por la presencia de Cl son los principales responsables del “fouling”. Además el Cl facilita la movilidad de compuestos inorgánicos como el K [14]. La concentración de Cl dicta la cantidad de K vaporizado en la combustión y el transporte hacia las superficies de la caldera [3]. Algunas veces el S tiene la capacidad de disminuir el

ensuciamiento por la sulfatación de cloruros [15]. Así, el pellet de pino que tiene más S generó menos ensuciamiento. Además, aparece más proporción de Fe y Zn en las muestras de pino que en las de paja.

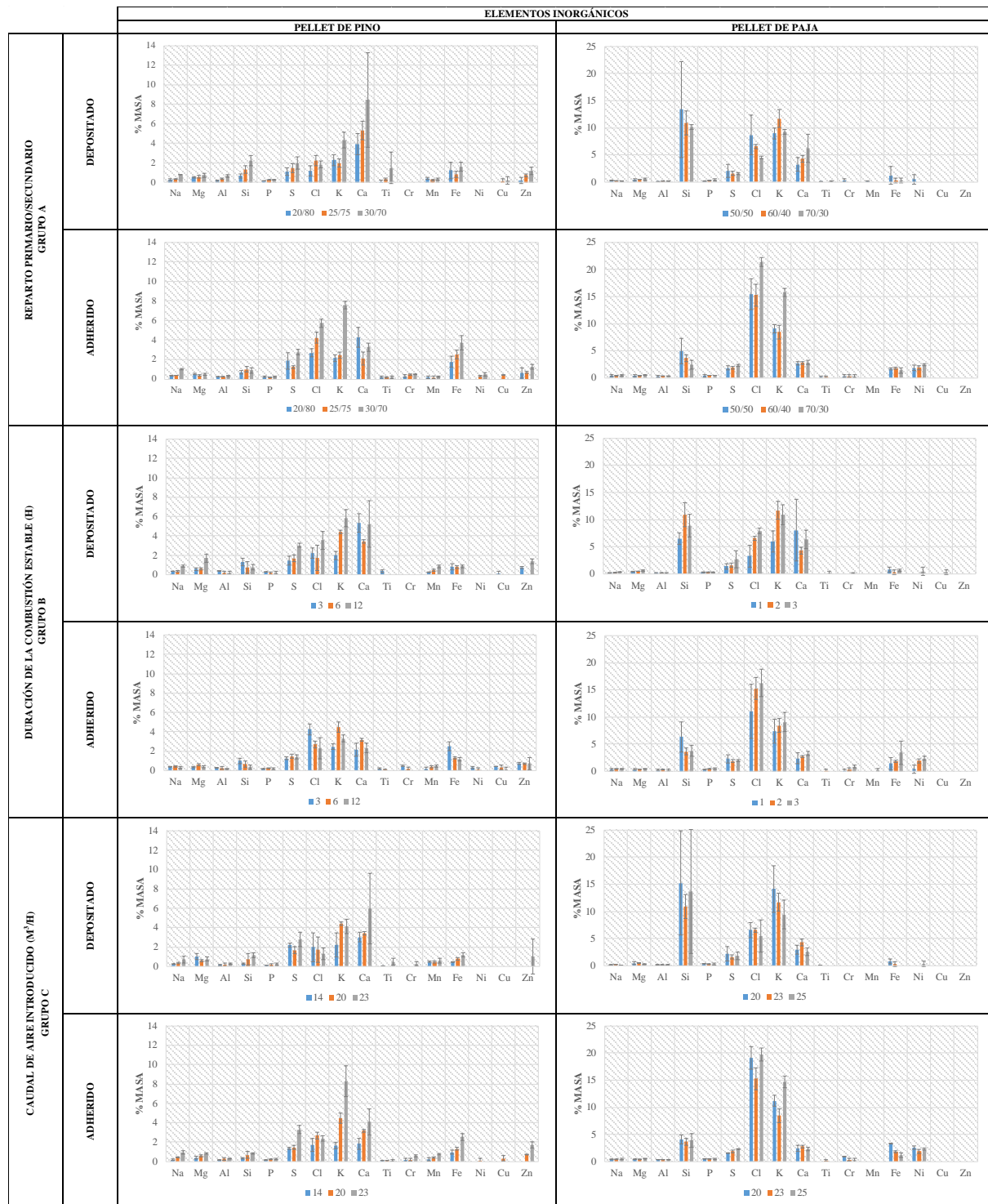


Figura 2: Elementos inorgánicos presentes en las muestras de ensuciamiento. Las barras de error indican la desviación estándar de los elementos en las muestras.

Por otra parte, hay una tendencia que se observa en ambos tipos de pellet, aunque mucho más claramente en la paja, y es que el Cl aparece en mucha más concentración en las muestras de “fouling adherido” que en las muestras de “fouling depositado”, lo cual significa que los compuestos de Cl son los primeros en condensar en el tubo formando parte de las primeras capas del ensuciamiento. En concreto, en las muestras de ensuciamiento de paja, los elementos mayoritarios en el “fouling

adherido” son el Cl y el K, formando seguramente KCl y los elementos mayoritarios en el “fouling depositado” son el Si y el K, formando seguramente silicatos alcalinos. Altas concentraciones de Si con K y Cl juegan un papel crucial en el ensuciamiento, provocando también problemas de aglomeración en el lecho porque la reacción del Si con el K genera silicatos alcalinos que funden a bajas temperaturas [3].

4. Conclusiones y consideraciones finales

Los índices teóricos de deposición deben ser utilizados con criterio. Su aplicabilidad es relativa, son una predicción previa del potencial de ensuciamiento de un combustible pero no determinan exactamente su comportamiento real.

El ensuciamiento o “fouling” viene determinado por la materia inorgánica del combustible utilizado, pero también influyen los parámetros de combustión empleados.

En las muestras de ensuciamiento de pino, la cantidad de materia orgánica disminuye al incrementar el caudal de aire, sobre todo el caudal de aire primario. En estas muestras, los principales elementos inorgánicos encontrados fueron el Ca, K, Cl y S.

En las muestras de ensuciamiento de paja se observó que el “fouling depositado” estaba formado principalmente por Si y K indicando la presencia de silicatos alcalinos y el “fouling adherido” estaba formado por Cl y K, indicando la presencia de la sal KCl en las primeras capas del ensuciamiento.

En resumen, el K junto con Si y Cl son los principales elementos causantes de “fouling”. Además, las altas cantidades de Si de la paja junto con el K provocaron los problemas de aglomeración en el lecho por la formación de silicatos alcalinos con bajas temperaturas de fusión.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto ENE2012-36405.

6. Referencias

- [1] JENKINS, B. M. BAXTER, L. L. MILES JR, T. R. MILES, T. R. *Combustion properties of biomass*. Revista Fuel Processing Technology, 1998, vol, 54, pp. 17-46.
- [2] BRYERS, R. W. *Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels*. Revista Progress in Energy and Combustion Science, 1996, vol, 22, pp. 29-120.
- [3] KHAN, A. A. DE JONG, W. JANSSENS, P. J. SPLIETHOFF, H. *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*. Revista Fuel Processing Technology, 2009, vol, 90, pp. 21-50.
- [4] SHAO, Y. WANG, J. PRETO, F. ZHU, J. XU, C. *Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation*. Revista Energies, 2012, vol, 5, pp. 5171-5189.
- [5] BAXTER, L. L. *Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach*. Revista Biomass and Bioenergy, 1993, vol, 4, pp. 85-102.
- [6] THEIS, M. SKRIFVAR, B. -J. ZEVENHOVEN, M. HUPA, M. TRAN, H. *Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 3. Influence of probe surface temperature*. Revista Fuel, 2006, vol, 85, pp. 2002-2011.
- [7] PRONOBIS, M. KALISZ, S. POLOK, M. *The impact of coal characteristics on the fouling of stoker-fired boiler convection surfaces*. Revista Fuel, 2013, vol, 112, pp. 473-482.
- [8] TORTOSA MASIÁ, A. A. BUHRE, B. J. P. GUPTA, R. P. WALL, T. F. *Characterising ash of biomass and waste*. Revista Fuel Processing Technology, 2007, vol, 88, pp. 1071-1081.

- [9] VIANA, H. VEGA-NIEVA, D. J. ORTIZ TORRES, L. LOUSADA, J. ARANHA, J. *Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain*. Revista Fuel, 2012, vol, 102, pp. 737-745.
- [10] FEBRERO, L. GRANADA, E. PÉREZ, C. PATIÑO, D. ARCE, E. *Characterisation and comparison of biomass ashes with different thermal histories using TG-DSC*. Revista Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, vol, 118, pp. 669-680.
- [11] GRANADA, E. PATIÑO, D. MÍGUEZ, J. L. MORÁN, J. *Analysis of deposition of fouled matter in a water-tube heat exchanger of a biomass combustor*. 34th International Symposium on Combustion, Warsaw, 2012.
- [12] VASSILEV, S. V. BAXTER, D. ANDERSEN, L. K. VASSILEVA, C. G. *An overview of the chemical composition of biomass*. Revista Fuel, 2010, vol, 89, pp. 913-933.
- [13] TEIXEIRA, P. LOPES, H. GULYURTLU, I. LAPA, N. ABELHA, P. *Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed*. Revista Biomass and Bioenergy, 2012, vol, 39, pp. 192-203.
- [14] DEMIRBAS, A. *Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues*. Revista Progress in Energy and Combustion Science, 2005, vol, 31, pp. 171-192.
- [15] THEIS, M. SKRIFVARS, B. J. ZEVENHOVEN, M. HUPA, M. TRAN, H. *Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 2: Deposit chemistry*. Revista Fuel, 2006, vol, 85, pp. 1992-2001.