



ARTÍCULO

Caracterización y uso de biocombustibles elaborados con fines domésticos a partir de residuos forestales de *Pinus ponderosa* en Bariloche, Argentina.

Leonardo Andreassi¹, Guillermo Douat^{2*}, Fernando Salvare³ & Agustín Capitanich⁴

¹ Ing. Mecánico. CIEFAP. Bariloche, Argentina.

² Ing. Ambiental. CIEFAP. Asistente técnico. Bariloche, Argentina. gdouat@ciefap.org.ar

³ Ing. Agrónomo. Bariloche, Argentina. CIEFAP & Dir. De Bosques de Río Negro. fsalvare@ciefap.org.ar

⁴ Ing. Mecánico. Bariloche, Argentina. CIEFAP

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.571>

Recibido: 26.08.2022; Aceptado 18.11.2022

RESUMEN

El incremento poblacional en Bariloche, Patagonia Argentina, ha provocado el desarrollo de barrios que aún no cuentan con todos los servicios básicos. El servicio más crítico, como consecuencia del clima extremo de la zona, es la distribución de gas natural por red, que es el recurso preferido para la calefacción doméstica. Por otra parte, existen grandes extensiones de recursos madereros que carecen de manejos silviculturales, que han desarrollado enfermedades fitosanitarias, y constituyen potenciales focos de incendios. En este contexto resulta de interés analizar la elaboración de biocombustibles a partir de los residuos forestales, y que resulten apropiados para ser utilizados en equipos de calefacción domésticos, con sistemas de combustión más eficientes y limpios que los tradicionales.

Para tal efecto se estudian los residuos de *Pinus ponderosa*, especie con alta presencia en la región (~1450 ha). Los residuos fueron categorizados en fuste, rama y follaje y sometidos a dos procesos de transformación para obtener biocombustibles sólidos (chipeo y pelletización). Tanto pellets, como chips fueron caracterizados bajo normas ISO 17225 en laboratorios de CIEFAP (Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico), y ensayados en equipos acordes a su morfología con el fin de estudiar la eficiencia de la combustión y las emisiones que estos vuelcan a la atmósfera.

Palabras claves: Bioenergía, biocombustible sólido, combustión, residuos forestales, emisiones.

SUMMARY

The population growth in Bariloche, Patagonia, Argentina, has led to the development of neighborhoods that still do not have all the basic services. The most critical, because of the extreme climate of the area, is the distribution of natural gas through the network, which is the preferred resource for domestic heating. On the other hand, there are large areas of timber resources that lack silvicultural management, have developed phytosanitary diseases, and are potential sources of fires. In this context, it is of interest to analyze the elaboration of biofuels from forest residues, which are appropriate for use in domestic heating equipment, with more efficient and cleaner combustion systems than the traditional ones.

For this purpose, the residues of *Pinus ponderosa*, a species with a high presence in the region (~1450 ha), were studied. The residues were categorized into stem, branch and foliage and were subjected to two transformation processes to obtain solid biofuels (chipping and pelletization). Both pellets and chips were characterized under ISO 17225 standards in CIEFAP (Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico) laboratories, and tested in equipment according to their morphology in order to study combustion efficiency and emissions into the atmosphere.

Keywords: Bioenergy, solid biofuel, combustion, forest residues, emissions.

INTRODUCCIÓN

El costo y las consecuencias ambientales del uso de combustibles fósiles incentivan la adopción de energías renovables. Entre estas últimas, la energía generada a partir de biomasa puede ser producida y consumida en un ámbito de carbono neutralidad (Uasuf & Hilbert, 2012.). A esto, se le suma la particularidad de que el 80% de la demanda energética en la Patagonia argentina corresponde a energía térmica (González, 2016) volviendo muy vulnerable esta situación.

En la provincia de Río Negro existen aproximadamente 6.000 hectáreas de coníferas implantadas, de las cuales 1.450 se encuentran en la cuenca de Arroyo del Medio, cercanas a San Carlos de Bariloche. La principal especie dentro de dichos cultivos es el *Pinus ponderosa*, alcanzando un 75% del total. Estas plantaciones se caracterizan por una elevada densidad de plantación (2.400 a 3.000 plantas por hectárea) lo que, sumado a la falta de un manejo forestal adecuado, ha generado la proliferación de enfermedades fitosanitarias (Diez *et. al.*, 2017). La revalorización en formato pellet y astillas de los residuos generados en el manejo forestal y en los aserraderos podría favorecer el desarrollo de las actividades de saneamiento y mejora de las forestaciones como también la producción y utilización de un combustible renovable de origen local para calefacción. A partir de la intervención realizada por Diez *et. al.* (2017) en 2 sitios con distintas estructuras forestales dentro de la cuenca de Arroyo del Medio, se estimó que es posible obtener 50 m³/ha de chips a partir de residuos secos de poda y raleo (ramas secas), sin contar chips producidos a partir de leña (50-180 m³/ha) y chips de residuos “verdes” de poda y raleo (140 m³/ha).

Los biocombustibles son generalmente más difíciles de quemar que los combustibles fósiles debido a la incompleta e intermitente combustión que ocurre en las estufas y pequeñas calderas. Como consecuencia, los gases de escape contienen una cantidad significativa de sustancias dañinas como el material particulado (MP) y los compuestos orgánicos parcialmente oxidados (Foppa Pedretti *et. al.*, 2010).

La transformación de la biomasa al formato pellets y astillas permite utilizar el recurso en forma automatizada en equipos de combustión domésticos; aumentando la eficiencia de su transformación en energía térmica útil, y reduciendo las emisiones respecto al uso tradicional de la biomasa. Para lograr este objetivo, además de la tecnología de combustión, se requiere de un combustible que cumpla parámetros de calidad, como baja humedad, y contenido de ceniza, delimitados en la normativa ISO 17225-2¹ e ISO 17225-4².

En el presente documento se estudia la materia prima para la fabricación de pellets y astillas a partir de distintos tipos de residuos de *Pinus ponderosa* (Cuadro 1, Figura 1), evaluando las emisiones y la eficiencia de su combustión en una estufa estándar de 9 kW nominal para los pellets y una caldera de 50 kW nominal para las astillas. Su objetivo es analizar las características físico-químicas de los biocombustibles elaborados a partir de los residuos de plantaciones forestales cercanas a Bariloche, y estudiar el comportamiento de su combustión en equipos específicos para su uso, esperando que estos antecedentes sirvan como base para el desarrollo futuro de combustibles a partir de residuos biomásicos disponibles en la región, y de esta manera ofrecer una alternativa de gran potencialidad a la escasa oferta de recursos energéticos.

¹ International Organization for Standardization. Norma IRAM-ISO 17225-2. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2 - Clases de “pellets” de madera.

² International Organization for Standardization. Norma IRAM-ISO 17225-4. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4 - Clases de “chips” de madera.

Cuadro 1. Descripción de la fuente utilizada para la producción de biocombustibles de ensayo

Fuente	Descripción	Denominación Combustible
1	Madera proveniente de fuste con nula o mínima presencia de corteza. Origen: provincia de Chubut	Pellet de fuste
2	Chipeo proveniente de fuste sin descortezar. Origen: provincia de Río Negro	Astilla de fuste
3	Ramas sin follaje con un diámetro entre 25mm y 100mm. Origen: provincia de Río Negro	Pellet de rama Astillas de rama
4	Ramas finas con gran contenido de acículas. Origen: provincia de Río Negro	Pellet de acícula Astillas de acícula



Figura 1. Fuentes para elaboración de biocombustibles: ramas sin follaje con diámetro entre 25 y 100 mm (fuente 3, izquierda). Ramas finas con gran contenido de acículas (Fuente 4, derecha)

MATERIAL Y MÉTODO

En la figura 2 se muestra un diagrama de las tareas que se desarrollaron durante la elaboración de este trabajo.

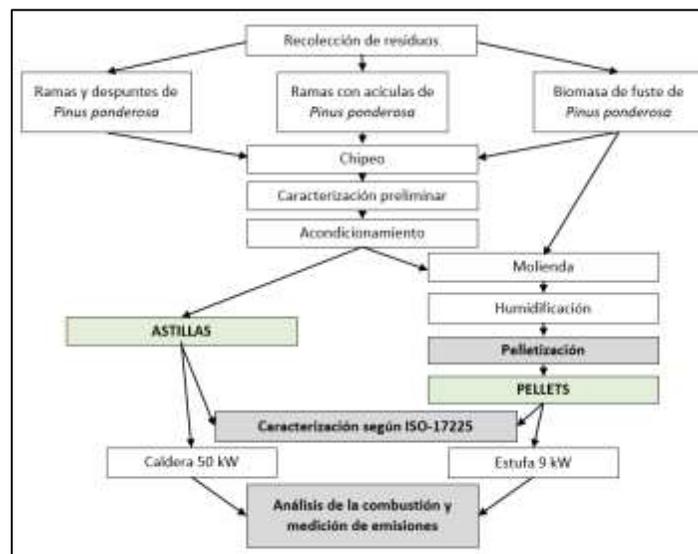


Figura 2. Diagrama de las tareas desarrolladas durante el estudio.

La caracterización energética del pino ponderosa se realizó por medio de su separación morfológica en 3 fracciones: fuste, ramas y acículas. Si bien las mismas pueden aparecer agrupadas en el desarrollo de las actividades silviculturales, el análisis como fracción “pura” permite caracterizar los resultados con mayor precisión, los que por lo general suelen ser muy heterogéneo. Mediante este análisis segregado es posible estimar los resultados de una muestra general (mezcla de todos los componentes) a partir del estudio de las partes constituyentes. Esta información es fundamental para estimar el comportamiento de las mezclas, o definir qué selección realizar para obtener un biocombustible de mayor calidad.

Producción de Astillas

La fabricación de astillas a partir de las fuentes indicadas en el Cuadro 1 requirió de un proceso de secado, y chipeo con un equipo Bearcat DH 911, adicionalmente para las fuentes 2 y 3 se requirió tamizar para obtener una granulometría P31s¹. Por su parte, la fuente 4 no arrojó un tamaño de partícula definido con geometría tri o bidimensional, ya que durante el chipeo las acículas salen agrupadas o unidas formando un “ramillete” que no posee las características morfológicas de un chip bioenergético apto para ser quemado en sistemas de alimentación automático mediante tornillo sinfín. Sin embargo, estos pudieron ser dosificados en forma manual en el sistema de alimentación de la caldera (usos a tolva llena requerirán un chipeo estricto, en el cual un oreo previo puede mejorar el proceso).

Producción de Pellets

La fabricación del pellet requirió, en orden cronológico, los siguientes procesos: (i) chipeo de la materia prima; (ii) secado con aire caliente; (iii) molienda; (iv) humectación; (v) densificado (pelletizado); (vi) enfriado y tamizado de finos. Las operaciones fueron realizadas en la planta de pelletizado experimental del CIEFAP en la localidad de San Carlos de Bariloche.

La molienda se realizó en un molino de martillos con aspiración forzada y una malla con perforaciones de 4 mm. Para el proceso de pelletizado se utilizó un equipo de matriz plana con accionamiento de velocidad variable de 4 kW de potencia. La temperatura de ingreso del material a la pelletizadora fue en promedio de 11°C. En la figura 2 se muestra la temperatura superficial de los pellets, siendo del orden de los 100-105°C en la salida de la matriz. La velocidad de rotación de la pelletizadora se mantuvo en un rango entre 147 y 208 rpm, y la luz inicial entre rodillo y matriz de 0,20 a 0,25 mm. Para la fuente 1 y 3 se utilizó una matriz con orificios de diámetro 6 mm y una longitud efectiva de 36 mm. Mientras que para la fuente 4 se debió aumentar la luz a una longitud efectiva de 42 mm para alcanzar una buena compactación (Cuadro 2). En todos los casos el ángulo de ingreso al canal fue de 60° y 1mm de profundidad. En ninguno de los casos se utilizaron aditivos en el pelletizado.

Cuadro 2. Parámetros del proceso de pelletizado.

Material	Longitud de los orificios de la matriz (mm)	Velocidad del rodillo (rpm)	Temperatura Matriz (°C)	Caudal másico de producción (Kg/h)
Fuste	36	147	92-97	17,8
Rama	36	152	87	18,7
Acícula	41,7	208	85-90	16,2

¹ P31S. Distribución del tamaño de partículas donde la fracción principal (≥60% m/m) se encuentra entre 3.15 mm y 31.50 mm, la fracción de finos (≤3.15 mm) es ≤10% (m/m), y la longitud máxima de las partículas es ≤150 mm (ISO 17225-4).

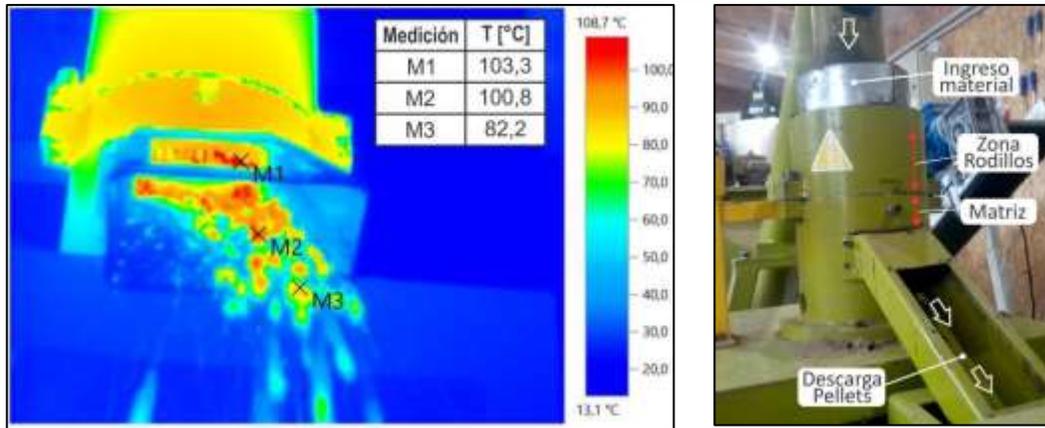


Figura 3. Termografía pelletizadora mostrando la temperatura de la superficie del pellet (Izq). Descripción de zonas pelletizadora (Der).

Caracterización de Biocombustibles

Los pellets y astillas (*chips*) producidos fueron evaluados con los parámetros contemplados en la normativa de biocombustibles sólidos para uso domésticos IRAM ISO 17225-2 y 17225-4 (Cuadros 3 y 4). Dichas normas establecen clases de calidad dependientes de las características de cada biocombustible, y que son fundamentales para identificar si estos son aptos para usarlos en una diversa gama de equipos (a menor calidad de combustible se necesitan mejores tecnologías de combustión y alimentación). Para los fines de este documento las clases informadas fueron elegidas teniendo en cuenta solo los parámetros evaluados. Para su comercialización las normativas exigen un análisis de elementos más extenso. La preparación de las muestras estudiadas fue realizada según los lineamientos de la normativa ISO 14780¹ y los resultados expresados para cada parámetro corresponden a valores promedios de las determinaciones realizadas.

Los parámetros contemplados para la categorización fueron:

- Origen y fuente
- Contenido de Humedad: Contenido de agua en porcentaje respecto del peso total (a.r.²).
- Contenido de cenizas: Cantidad de material inorgánico en la biomasa en base seca (d.b.³).
- Diámetro y Largo del pellet: Parámetros dimensionales del pellet.
- Durabilidad mecánica: Indica la resistencia mecánica de los pellets cuando son sometidos a un esfuerzo mecánico (golpeteo).
- Aditivos: Material que se introduce intencionalmente en conjunto con la materia prima para aglutinar.
- Densidad aparente: Masa/volumen (kg/m³)
- Poder calorífico superior: Energía contenida en una unidad de masa.
- Poder calorífico inferior: poder calorífico superior corregido por la humedad del combustible.
- Contenido de Finos (ISO 18846): Porcentaje de material de tamaño menor a 3,15 mm que posee una muestra dada de pellets.
- Nitrógeno (ISO 16948).
- Azufre y Cloro (ISO 16994).

¹ Comité Europeo de Normalización. *UNE-EN ISO 14780 – Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras*

² a.r. (As received): Siglas en inglés de "Como se recibe".

³ d.b. (Dry basis): Siglas en inglés de "Base seca".

Cuadro 3. Especificación de “pellets” de madera clasificados para aplicaciones residenciales y comerciales.

	Clase de propiedad/método de análisis	Unidades	Categorías		
			A1	A2	B
Normativo	Origen y fuente, IRAM-ISO 17225-1	--	1,1,3 madera de tronco	1,1,1 árboles enteros sin raíces	1,1 madera de bosque, plantación y otras maderas vírgenes
			1,2,1 residuos de madera no tratada químicamente	1,1,3 madera de tronco	1,2 subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera
				1,1,4 residuos de cosecha forestal	1,3,1 madera usada no tratada químicamente
				1,2,1 residuos de madera no tratada químicamente	
	Diámetro, D ^a y longitud, L ^b , ISO 17829, de acuerdo con Figura 1.	mm	D0,6, 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D0,6, 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D0,6, 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00
			D08, 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D08, 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D08, 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00
	Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	%(m/m) ¹ según se recibe en base húmeda	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ceniza, A, ISO 18122	%(m/m), en base seca	A0,7 ≤ 0,7	A1,2 ≤ 1,2	A2,0 ≤ 2,0
	Durabilidad mecánica, DU, ISO 17831-1	%(m/m) según se recibe	DU97,5 ≥ 97,5	DU97,5 ≥ 97,5	DU96,5 ≥ 96,5
	Finos, F, ISO 18846	%(m/m) según se recibe	F1,0 ≤ 1,0	F1,0 ≤ 1,0	F1,0 ≤ 1,0
	Aditivos ^c	%(m/m) según se recibe	≤ 2 Declarar tipo y cantidad	≤ 2 Declarar tipo y cantidad	≤ 2 Declarar tipo y cantidad
	Poder calorífico inferior, Q, ISO 18125	MJ ² /kg o kWh ³ /kg según se recibe	Q16,5 ≥ 16,5 o Q4,6 ≥ 4,6	Q16,5 ≥ 16,5 o Q4,6 ≥ 4,6	Q16,5 ≥ 16,5 o Q4,6 ≥ 4,6
	Densidad aparente, BD, ISO 17828	kg/m ³ según se recibe	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Nitrógeno, N, ISO 16948	%(m/m), en base seca	N0,3 ≤ 0,3	N0,5 ≤ 0,5	N1,0 ≤ 1,0
Azufre, S, ISO 16994	%(m/m), en base seca	S0,04 ≤ 0,04	S0,05 ≤ 0,05	S0,05 ≤ 0,05	
Cloro, Cl, ISO 16994	%(m/m), en base seca	Cl0,02 ≤ 0,02	Cl0,02 ≤ 0,02	Cl0,03 ≤ 0,03	

^a Declarar el tamaño seleccionado D06 o D08 de los “pellets”.

^b La longitud máxima debe ser ≤ 45 mm.

^c Tipo de aditivos para ayudar a la producción, entrega o combustión.

(Fuente: Extraído de IRAM-ISO 17225-2)

¹ %(m/m): Porcentaje masa/masa. Masa del parámetro medido dividido (ej: agua) por la masa total del componente medido (ej: pellet).

² MJ: mega Joules

³ kWh: kilo Watts hora

Cuadro 4. Especificación de *chips* de madera clasificados.

Clase de propiedad/ método de análisis	Unidades	Categorías			
		A1	A2	B1	B2
Origen y fuente, IRAM-ISO 17225-1	--	1,1,1 árboles enteros sin raíces	1,1,1 árboles enteros sin raíces	1,1 madera de bosque, plantación y otras maderas vírgenes	1,1 madera de bosque, plantación y otras maderas vírgenes
		1,1,3 madera de tronco	1,1,3 madera de tronco	1,2,1 residuos de madera no tratada químicamente	1,2 subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera
		1,1,4 residuos de cosecha forestal	1,1,4 residuos de cosecha forestal		
		1,2,1 residuos de madera no tratada químicamente	1,2,1 residuos de madera no tratada químicamente	1,3,1 madera usada no tratada químicamente	
Normativo	Tamaño de partícula, P, ISO 17827-1	mm			
	Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	Seleccionar del Cuadro 4			
	Ceniza, A, ISO 18122	% (m/m), en base seca	M10 ≤ 10 M25 ≤ 25	M35 ≤ 35	Declarar el valor máximo
	Densidad aparente, BD, ISO 17828	kg/m ³ suelto según se recibe	A1,0 ≤ 1,0	A1,5 ≤ 1,5	A3,0 ≤ 3,0
	Nitrógeno, N, ISO 16948	% (m/m), en base seca	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250 BD300 ≥ 300	Declarar el valor mínimo
	Azufre, S, ISO 16994	% (m/m), en base seca	No aplicable	No aplicable	N1,0 ≤ 1,0
Cloro, Cl, ISO 16994	% (m/m), en base seca	No aplicable	No aplicable	S0,1 ≤ 0,1	
Informativo	Poder calorífico inferior, Q, ISO 18125	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	No aplicable	No aplicable	Cl0,05 ≤ 0,05
			Declarar el valor mínimo	Declarar el valor mínimo	

(Fuente: IRAM-ISO 17225-4)

Cuadro 5. Tamaño de partícula de los *chips* de madera clasificados

Dimensiones (mm), ISO 17827-1				
Fracción principal [mínimo 60% (m/m)] (mm)	Fracción de finos % (m/m) (≤ 3,15 mm)	Fracción gruesa % (m/m)	Longitud máxima de las partículas (mm)	Área máxima de la sección transversal de la fracción gruesa (cm ²)
P16S 3,15 mm < P ≤ 16 mm	≤ 15%	≤ 6% (> 31,5 mm)	≤ 45 mm	≤ 2 cm ²
P31S 3,15 mm < P ≤ 31,5 mm	≤ 10%	≤ 6% (> 45,0 mm)	≤ 150 mm	≤ 4 cm ²
P45S 3,15 mm < P ≤ 45 mm	≤ 10%	≤ 10% (> 63,0 mm)	≤ 200 mm	≤ 6 cm ²

El tamaño de partícula de los chips se determinó a partir de una muestra segregada por tamaños mediante el uso de un conjunto de tamices. Con la masa recolectada en cada tamiz, y el uso del Cuadro 5 se determinó el tamaño de partícula, parámetro que es fundamental para lograr el óptimo funcionamiento de los sistemas de alimentación en equipos alimentados con chips.

El contenido elemental (C, S y N) y el poder calorífico superior fueron analizados en laboratorios externos al CIEFAP. Para ello, se enviaron dos muestras molidas (< 1mm) de cada una de las fracciones de biomasa. El valor de los contenidos elementales se obtuvo con el resultado promedio de las muestras. El poder calorífico inferior se calculó según el anexo D de la norma ISO 17225-1.

Descripción del Ensayo y Equipamiento de Combustión.

Las pruebas de combustión se efectuaron en una estufa doméstica para pellets de origen chino (Mocca Serrana) con una potencia nominal de 9 kW, y en una caldera de 50 kW de origen austriaco (Hargassner Eco HK-50).

- Combustión de astillas

La caldera de astillas pertenece a la Clase 5 según la normativa UNE-EN 303-5. Posee un sistema de alimentación por tornillo, sobre 2 parrillas móviles dentro de una cámara de combustión de material refractario. Estas parrillas permiten evacuar las cenizas de la combustión, lo que permite utilizar materiales donde este parámetro es elevado. El equipo posee regulación de aire primario y secundario, mediante control de O₂ por sonda lambda. Durante los ensayos la caldera estuvo configurada para trabajar a su potencia máxima. La alimentación del combustible dentro del silo se realizó en forma manual para registrar el consumo de combustible. Si bien se procuró abastecer al máximo al sistema de alimentación durante la duración de los ensayos, los mismos no fueron realizados a “silo lleno”. Esto último se aclara porque la alimentación de acículas a silo lleno no ha sido verificada en este estudio.

- Combustión de pellets

La información técnica de la estufa declara un límite de 500 ppm respecto a las emisiones de monóxido de carbono. El equipo, como la mayoría de las estufas estándar, no posee un sistema de evacuación de cenizas, sino un crisol quemador con perforaciones para el ingreso de aire donde los pellets arriban desde la tolva para ser quemados. Los gases de combustión son succionados por un ventilador colocado en la descarga de la estufa, generando una depresión en la cámara de combustión. El equipo cuenta con 4 niveles para regular su potencia. Durante la realización de ensayos de prueba utilizando pellets comerciales de alta calidad (A1) las 3 potencias más altas arrojaban valores elevados de monóxido y material particulado. Por ello, se escogió la potencia 4 (más baja) para los ensayos a realizar en este trabajo, ya que bajo esta configuración la combustión brindaba valores más acotados, que permiten realizar muestreos más largos para la comparación entre los 3 tipos de pellets a evaluar. Esta potencia es aproximadamente de 5 kW y se corresponde con el ensayo comúnmente denominado “a carga parcial”.

- Ensayos de combustión y emisiones

Los ensayos consistieron en la medición, para cada combustible, de los siguientes parámetros de operación:

- Concentración de monóxido de carbono (CO) en los gases de escape
- Material particulado total (MP) en los gases de escape
- Temperatura en los gases de escape
- Concentración de oxígeno en los gases de escape
- Temperatura ambiente
- Consumo de combustible
- Diferencia de presión en tubo Pitot (presión dinámica)
- Volumen de gases extraídos de la chimenea con la boquilla de muestreo
- Residuos en el crisol de la estufa. (solo para pellet)

Para la medición de concentración de oxígeno y monóxido de carbono, temperatura de gases y ambiente se utilizó un analizador de gases Testo 310 (mediciones spot). El cálculo de rendimiento térmico se realiza a partir de la normativa UNE-EN 14785 mediante las Expresiones 1 y 2 siguientes:

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - O_2} \quad (1)$$

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (2)$$

Donde:

λ : Exceso de aire

O_2 : Concentración de oxígeno en los gases de escape

η : Eficiencia térmica de la estufa

q_a : Pérdidas de calor sensible en los humos

q_b : Pérdidas de calor latente en los humos

q_r : Pérdidas térmicas debido a los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parilla

Las expresiones correspondientes a q_a , q_b , y q_r se encuentran detalladas en la normativa EN 14785. Estas pérdidas q_r están mayormente asociadas con el contenido de carbono no combustionado que se encuentra en los residuos de combustión. Con el objetivo de obtener una primera aproximación del rendimiento estas pérdidas se desprecian.

Debido a que las estufas a pellet en general no cuentan con la capacidad de eliminar cenizas del crisol de combustión, la evaluación de cenizas remanente en el crisol luego de la combustión se realizó mediante el pesaje en balanza electrónica de precisión (3000 g \pm 0,1 g), antes y después del ensayo de combustión. Esta medición está relacionada con el contenido de ceniza propio del material (ensayo de laboratorio según ISO 18122), sin embargo, durante la combustión un porcentaje de las cenizas vuelan fuera del crisol junto con la corriente de gases, por lo que el valor no será idéntico al ensayo de laboratorio. La cantidad de material residual en el crisol junto con su tendencia a aglomerarse influirá directamente en la combustión modificando los ingresos de aire y derivando en errores de encendido por no permitir el contacto del pellet nuevo con el aire caliente proveniente de la resistencia de encendido. Para establecer una comparación entre ensayos se definió el porcentaje de cenizas depositada (%CD) como la cantidad de ceniza depositada por kg de combustible, a partir de la Expresión 3.

$$\%CD = \frac{\text{masa depositada en crisol luego de la combustion}[g]}{\text{masa de combustible quemado}[g]} \quad (3)$$

Para la evaluación de Material Particulado, en estufa y caldera, se utilizó un medidor isocinético en el cual se captura el material en un filtro HEPA de 99,9% de eficiencia en retención de partículas de 0,3 μm . La metodología empleada se basó en la descrita en los métodos 5 y 17 de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA)¹, con adaptaciones para adecuarlo a las mediciones en chimeneas de diámetros reducidos. Estas mediciones requieren que el filtro se encuentre calefaccionado para evitar condensaciones. Para ello, el método 5 cuenta con una caja caliente donde el portafiltro es colocado y mantenido a una temperatura de 120°C, mientras que el método 17 utiliza el propio calor de la chimenea colocando el portafiltro en su interior. En este trabajo se utilizó una sonda de muestreo bajo los lineamientos del método 17, pero no fue posible colocarla dentro de la chimenea, ya que su tamaño superaba el diámetro de las mismas (2"-3"). Como alternativa, se decidió colocarlo por fuera y a temperatura ambiente, asumiendo el riesgo de que el filtro se mojé y tener que descartar dicha medición². Además, se utilizó solo un punto de muestreo en centro del flujo de gases de acuerdo con la normativa alemana VDI 2066 (Lenz, et al., 2018). Por último, se realizó una reducción de la sección en el conducto de escape para lograr un aumento de velocidad del flujo de gases. Esto permitió aumentar las mediciones de presión dinámica, y de esta manera disminuir el error asociado al registro de las bajas velocidades de gases de los equipos de combustión domésticos para biomasa (valores de 2,5 m/s aumentaron a 6 m/s).

¹ Environmental Protection Agency of United States. Method 5 and 17 - Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources.

² Una vez concluida la corrida de medición se verificaba si el filtro se había mojado. De ser así, se descartaba el dato obtenido.

La velocidad con la cual se acumula el material particulado (MP) en el filtro de medición impacta directamente en la caída de presión a través del mismo. Por ello, fue necesario modificar la presión de succión aguas abajo del filtro continuamente, para mantener una velocidad constante e isocinética con el flujo de gases. Los ensayos más cortos, fueron finalizados cuando por la pérdida de carga en el filtro, ya no se podía garantizar el isocinetismo. Esta característica es de vital importancia, ya que los contaminantes sólidos, como el MP, poseen movimiento, y si los mismos no son extraídos a la misma velocidad con la que circulan por el ducto se desviaría el valor obtenido del real.

Según UNE EN 303-5 El isocinetismo (expresión 4) debe encontrarse entre el 70 y 150% para considerar válido el ensayo.

$$Isocinetismo = \frac{100 \cdot V_e}{V_g} \quad (4)$$

Donde;

V_e : Velocidad de extracción.

V_g : Velocidad del gas.

En todos los ensayos el isocinetismo se mantuvo entre 90 y 105%. Se contabilizó el tiempo de combustión, desde que el equipo entro en régimen hasta la finalización de las mediciones.

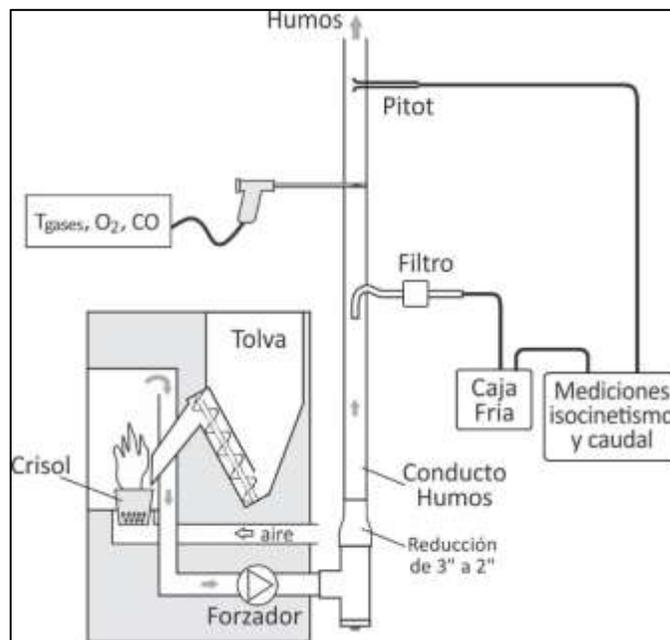


Figura 4. Set de medición estufa a pellets

La Figura 4 muestra el esquema del set de medición para la estufa. El set de medición para la caldera es equivalente, pero la reducción en el diámetro del conducto de escape fue de 6" a 4". Como se comentó anteriormente, las reducciones se realizaron con el fin de aumentar la velocidad de los gases y por ende la presión dinámica asociada. De esta manera se disminuye el error asociado a las bajas lecturas que se obtienen en la medición de equipos que combustionan biomasa.

RESULTADOS

Caracterización de Pellets y Astillas

- Pellets

Las características de los pellets utilizados en el estudio se resumen en el Cuadro 6 y Figura 5.

Cuadro 6. Caracterización de los pellets fabricados para el estudio.

Parámetro	Método/Norma de referencia	Pellet de fuste	Pellet de ramas	Pellet de acícula	Unidades
Humedad (ar)	ISO 18134-2: 2018	8,4	9,2	9,7	% (m/m)
Cenizas (db)	ISO 18122: 2015	0,3	1,5	2,4	% (m/m)
Diámetro	ISO 17829: 2015	6,0	6,1	6,1	mm
Largo (promedio)	ISO 17829: 2015	9,9	12,9	14,2	mm
Largo (desv. estándar)	ISO 17829: 2015	4,4	4,1	4,0	mm
Durabilidad mecánica	ISO 17831-1: 2015	93,1	98,4	97,4	% (m/m)
Aditivos	ISO 17225-1	0	0	0	% (m/m)
Densidad aparente (ar)	ISO 17828: 2015	670	680	620	kg/m ³
Poder calorífico superior	ISO 18125	19,13	19,58	19,98	MJ/kg
Poder calorífico inferior	Cálculo según ISO 17225-1	16,21	16,47	16,74	MJ/kg
Nitrógeno (db)	IRAM-SAGyP 29572-1	0,026	0,106	0,694	% (m/m)
Azufre (db)	ISO 16994	0,04	0,04	0,08	% (m/m)
Cloro (db)	ISO 16994	0,008	0,015	0,02	% (m/m)
Clase	ISO 17225-2 ^a	A1^b	B	-	

^aLa clase fue seleccionada en forma inicial teniendo en cuenta los parámetros relevados. La clasificación final requiere un análisis más detallado de la composición química.

^bLos parámetros de la biomasa son coherentes con calidad A1, sin embargo, la durabilidad mecánica debe ser mayor (>97,5%) para alcanzar esta categoría.

ar: según se recibe – db: base seca



Figura 5. Pellets de fuste (izq.), de ramas (centro) y de acículas (der.) utilizados en los ensayos.

El color característico de cada uno de los pellets (Figura 5) es producto de las materias primas utilizadas. En el primero, de izquierda a derecha, solo se utilizó biomasa de fuste sin corteza, por ello el color marrón claro. Para el segundo, la proporción de corteza era muy similar a la de madera y esto provocó que el color se vuelva un tono más oscuro que el primero. La última biomasa por su parte, al contener

una gran cantidad de follaje (además de algunas ramas), hizo que el color de los pellets fuese verde oscuro.

Los análisis de laboratorio realizados sobre los pellets de las 3 fuentes fueron comparados con los límites que establece para cada propiedad la norma ISO 17225-2. El pellet cuyo material proviene del fuste del pino ponderosa sin corteza podría ser clasificado con la calidad A1 (ver cuadro 3) respecto a las propiedades de la materia prima, pero el análisis realizado sobre el producto pelletizado dio una durabilidad mecánica menor al mínimo que requiere dicha calidad (>97,5%). Este parámetro depende en gran parte del proceso productivo. La durabilidad mecánica del pellet es una medida de su compactación, así, a mayor valor, menor será su ruptura y formación de polvillo. En este estudio los pellets no sufrieron transportes, los finos fueron eliminados y su densidad aparente está dentro de la normativa, por lo cual este parámetro no influyó en los análisis de combustión.

El pellet proveniente de ramas no contiene follaje, pero posee corteza. A partir de los análisis realizados se lo clasifica como categoría B. El contenido de cenizas es de 1,5% el cual es un valor bajo dentro de la categoría B. Normativas internacionales previas (2011) fijaban el límite de la categoría A2 en 1,5%.

El pellet fabricado a partir de material proveniente de ramas finas con gran contenido de acículas, posee un contenido de cenizas de 2,4% y de azufre de 0,08%, ambos valores superan el límite de la categoría B, por lo que no califican como combustibles recomendados para uso doméstico, aunque sí podrían ser compatibles con las normas que regulan combustibles para uso industrial.

Coincidiendo con el comportamiento observado para el pino ponderosa en la región de Aysén, Chile (Solórzano, 2017), el poder calorífico tanto superior como inferior de la fuente 4, fue mayor al de la 3 y éste mayor al de la fuente 1.

- Astillas

Las características de las astillas utilizadas en esta investigación se resumen en el Cuadro 7 y Figura 6

Cuadro 7. Caracterización de astillas producidas para el estudio

Parámetro	Método/Norma de referencia	Astilla fuste	Astilla ramas	Astilla acícula	Unidades
Humedad (ar)	ISO 18134-2 : 2018	10	18	15	%(m/m)
Cenizas (db)	ISO 18122 : 2015	0,6	1,5	2,4	%(m/m)
Granulometría	ISO 17827 + ISO 17225-4	P16S	P16S	-	mm
Densidad aparente (ar)	ISO 17828 : 2015	150	220	140	kg/m ³
Poder calorífico superior	ISO 18125	19,13	19,58	19,98	MJ/kg
Poder calorífico inferior	Cálculo según 17225-1	15,91	14,82	15,78	MJ/kg
Clase	IRAM 17225-4	A1	A2	B1 ^(a)	

(a) Los parámetros de la biomasa son coherentes con calidad B1, sin embargo, la granulometría debe ser trabajada para este material.

Las astillas de fuste mostraron parámetros acordes a la categoría A1 y las procedentes de ramas a la categoría A2 (ver cuadro 4), ambas para uso doméstico. La granulometría es acorde a lo requerido por la mayor parte de los equipos de combustión. La caldera utilizada en este estudio acepta tanto tamaño P16s como P31s (este último de mayores dimensiones).



Figura 6. Astillas de ramas de pino ponderosa sin follaje utilizadas en los ensayos.

El material chipeado de ramas finas con acículas, difícilmente puede categorizarse como combustible para uso doméstico en el estado, forma y tamaño obtenido. El resto de los parámetros son coherentes con un combustible de clase B. Para los fines del estudio, este combustible se ensayó mediante alimentación manual en la tolva de ingreso, sin embargo, para uso continuo se debe trabajar sobre su geometría.

Ensayos de Combustión

Los ensayos de combustión fueron realizados por duplicado, triplicado y hasta cuadruplicado según la cantidad de biocombustible disponible. Los resultados que se muestran en el Cuadro 8 contienen el valor promedio de las diferentes repeticiones. En los gráficos se acompaña el valor medio con un rango correspondiente a los valores extremos registrados.

Cuadro 8. Valores promedios de mediciones (n) en operación y resultados experimentales de combustión.

Parámetro	Unidad	Pellet fuste	Pellet Rama	Pellet Acícula	Astilla fuste	Astilla Rama	Astilla Acícula
Consumo	kg/h	1,23	1,21	1,05	14,3	13,2	10,9
Humedad	% (m/m)	8,4	9,2	9,7	10	18	15
λ		3,1	2,9	3,2	1,4	1,6	1,8
T° de humos	°C	197,9	203,0	197,1	141,6	130,7	132,1
T° ambiente	°C	20,2	16,3	20,6	22,0	17,5	27,6
O ₂	% dry gas ^a	14,2	13,6	14,5	5,4	7,5	9,3
CO	ppm dry gas ^b	88,9	43,9	122,7	8,6	50,5	169,7
Tiempo combustión	minutos	57	58	47	88	57	49
Repeticiones ^c	n	4	4	4	3	2	3
Eficiencia	%	77,9	78,4	77,7	92,6	92,2	91,9
Potencia útil	kW	4,3	4,3	3,8	53	50	38
CO @ 13% O ₂ ^d	ppm	104,1	47,8	150,3	4,4	29,8	127,2
MP @ 10% O ₂ ^e	mg/Nm ³	42,4	65,8	210,5	-	28	54

^a Porcentaje volumétrico de O₂ del gas de combustión seco (libre de humedad)

^b ppm: partes por millón de CO en el gas de combustión seco

^c Cantidad de muestreos realizados por cada biocombustible

^d ppm de CO corregidas al 13% de O₂

^e mg de material particulado por m³ normalizado (273 K y 1 atm) al 10% de O₂

El consumo de pellet de la estufa fue similar para todos los casos. Como su alimentación es volumétrica (tornillo) la reducción en la masa quemada del pellet de acícula está asociada a su menor densidad aparente. La caldera de astillas, además de tornillo sinfín cuenta con un sensor de lecho brasa que

notifica el nivel instantáneo de combustible dentro de la cámara. Durante los ensayos se observó que debido a la geometría del material chipeado de acículas, no se logra mantener la masa requerida por la caldera, aun usando al 100% la velocidad del sistema de alimentación. Por lo mismo, la masa consumida de este combustible fue menor, y esto impacta en la potencia erogada. Esta dificultad podría superarse mediante la pelletización del material, por cuanto la caldera acepta otros formatos de biocombustibles distintos a los chips (pellets, carozo de aceituna, etc.). Por su parte, las astillas provenientes de fuste y ramas lograron la alimentación solicitada por el régimen de combustión a potencia máxima.

El rendimiento de combustión para los tres tipos de pellet se mantuvo en valores muy similares, rondando el 78%. Lo mismo ocurrió con la eficiencia en la caldera obteniéndose para los tres tipos de astillas valores del 92%.

La potencia térmica se calcula directamente como producto del consumo de combustible, el poder calorífico inferior y el rendimiento de combustión. Tanto en los pellets y astillas, los materiales provenientes de fuste y ramas brindaron potencias similares. Con respecto al pellet de acícula la menor potencia está directamente asociada al menor consumo másico, este parámetro podría ser modificado si el proceso de transformación brindara un combustible más denso. Lo mismo ocurriría mejorando el proceso de chipeo de las acículas para reducir su tamaño y permitir un mayor caudal de alimentación en el tornillo de la caldera, o bien usando pellets de este material.

La concentración de oxígeno en los gases permitió calcular el exceso de aire (λ). Para los ensayos en estufa se obtuvo valores λ entre 2,9 y 3,2, los que resultan altos en comparación con los valores de referencia óptimos (λ en rango 1,4 - 1,6) (Hansen & Rosentoft, 2009). Durante los ensayos se observó un aporte de aire sobre la llama proveniente del conducto de caída de pellets. Al respecto, se decidió no sellar la tolva ni reducir el ingreso de aire de combustión inferior de la estufa para ensayar los pellets en condiciones normales.

Para los ensayos de combustión en la caldera de astillas, se registraron valores de exceso de aire entre 1,4 y 1,8. Estos valores se obtienen gracias a la capacidad de la caldera de medir concentración de oxígeno en gases, y regular el aire de ingreso primario y secundario.

El contenido de Monóxido de carbono (CO) en el gas de combustión es un indicador de combustión incompleta y de que hay otros componentes no deseados y peligrosos en el gas de combustión, como por ejemplo hidrocarburos no quemados y posiblemente dioxinas (Hansen & Rosentoft, 2009).

Los resultados son corregidos a 13% de O₂, Esto permite comparar los valores entre sí, como también con los límites establecidos por distintas normativas (Figura 7).

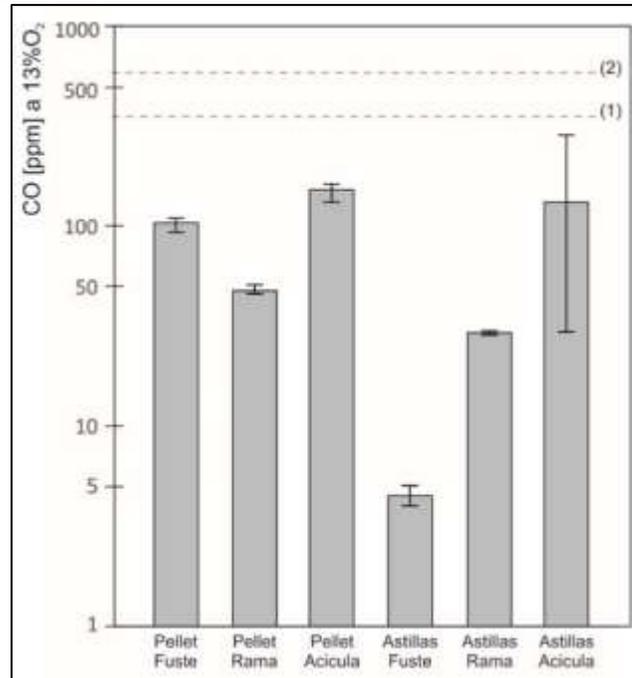


Figura 7. Concentración de monóxido de carbono (CO) en gases de combustión para los distintos ensayos. (1) Concentración máxima de CO según norma EN 303-5 Caldera astillas automáticas – Clase 5. (2) Concentración máxima de CO según norma EN 14785 Estufas a pellet (potencia reducida).

Los resultados de medición del material particulado (MP) deben ser corregidos a condiciones normales de presión y temperatura y 10% de oxígeno para poder compararse con los valores de referencia. En la Figura 8 se muestran las emisiones de MP para cada tipo de pellet y astillas, observándose una mayor emisión de material particulado a mayor contenido de ceniza en el combustible (ver Cuadro 7 y 8, y Figura 9).

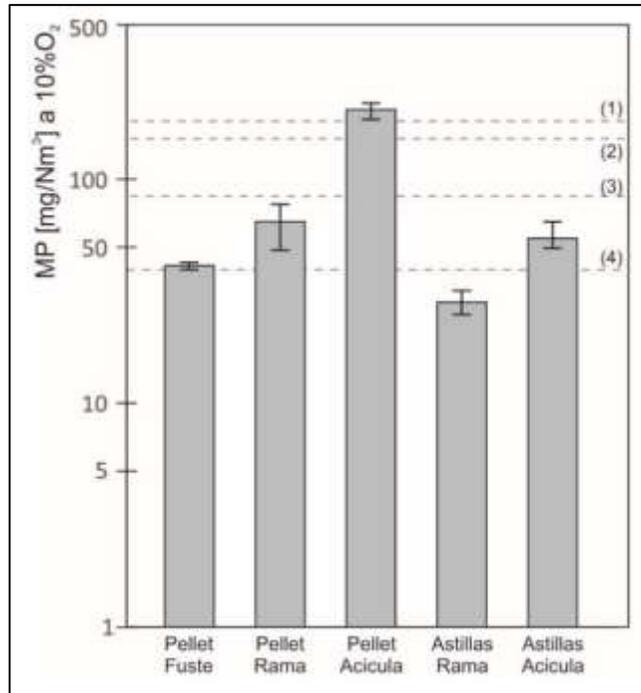


Figura 8. Material particulado total en gases de combustión para los distintos ensayos. (1) Límite MP – Estufas a pellet – Dec. N°39 Ambiente Chile (calculado para las condiciones de la estufa a pellet de 5 kW). (2) Límite MP – EN 303-5 Caldera astillas automática – Clase 3. (3) Límite MP ENRE Argentina – Combustible: Carbón (centrales termoeléctricas). (4) Límite MP – EN 303-5 Caldera astillas automáticas – Clase 5

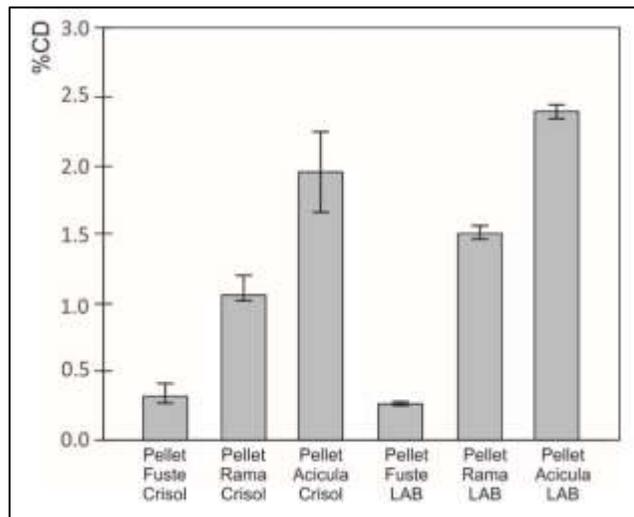


Figura 9. Contenido de material remanente en crisol luego de la combustión y contenido de cenizas propio de la biomasa. (Crisol: Contenido de cenizas obtenido en las pruebas de combustión. LAB: Contenido de cenizas obtenido bajo metodología ISO en laboratorio).

En el gráfico anterior se observa el porcentaje de material remanente luego de la combustión, respecto de la masa quemada. Las columnas de la izquierda indican el porcentaje de material remanente en el crisol, en tanto las de la derecha muestran los resultados de cenizas obtenidas en ensayos de laboratorio según ISO 18122, Si bien los ensayos no tuvieron duraciones exactamente iguales, el tiempo de cada periodo de combustión fue cercano a 1 hora.

CONCLUSIONES

Pellets

Los pellets de fuste sin corteza cumplen con los parámetros cotejados de la normativa IRAM ISO 17225-2 para los biocombustibles de mayor calidad. El pellet de rama, debido a su contenido de cenizas, alcanza la categoría B, la cual no es aceptada por todas las estufas domésticas, por cuanto estos equipos tienen una baja capacidad para manejar o evacuar los residuos depositados en el quemador. Un *blend* o mezcla entre los materiales del pellet de fuste y rama, o la aplicación de procesos de mejora (ej. tamizado y extracción de finos en el proceso de molienda previo al pelletizado) podrían brindar un material de mayor calidad. El material base del pellet de acícula no corroboró ninguna clasificación para uso doméstico, sin embargo, podría evaluarse su uso en el ámbito industrial.

El pelletizado permitió homogenizar las densidades y humedad de las tres fuentes, permitiendo que en todos los casos se obtengan rendimientos similares de combustión y potencia útil.

Para todos los pellets estudiados, las emisiones de monóxido de carbono se mantuvieron por debajo de las normativas de referencia más usuales para estufas trabajando a carga parcial (UNE-EN 14785).

Los pellets de fuste y rama mantuvieron valores de material particulado total inferiores al límite de la normativa chilena para estufas, mientras que el pellet de acícula superó ese valor. Es importante considerar que los valores absolutos dependen fuertemente del diseño del equipo de combustión.

Respecto al material residual en el crisol luego de la combustión, se observó que se mantiene una coherencia con los resultados de cenizas obtenidos en laboratorio. Una mayor cantidad de residuos y ceniza en el crisol modificará la combustión y puede impedir que la estufa encienda automáticamente si la cantidad de residuos es alta, lo cual implicará la necesidad de limpiezas más regulares.

Si bien el rendimiento es similar, lo que implica un buen aprovechamiento de la energía para los 3 materiales, el contenido de material particulado es un indicador de los ensuciamientos en el interior del equipo y de las emisiones ambientales. Estos ensuciamientos, como el depósito de cenizas en el cenicero, pueden reducir los rendimientos de combustión cuando el material se utilice en forma continua (en este estudio los tiempos de combustión fueron cercanos a 1 hora). Pensando en una utilización de estos materiales en equipos de combustión más complejos, la eficiencia de combustión estacionaria dependerá fuertemente de los mecanismos de limpieza que se utilicen, la potencialidad de mejorar las condiciones de la combustión y/o reducir el contenido de cenizas de los combustibles.

Astillas

Las astillas provenientes del chipeo de fustes con corteza son coherentes con la categoría más alta (A1) de la normativa IRAM ISO17225-4 para usos domésticos. Seguidos por los chips provenientes de ramas acordes a la calidad A2, El material chipeado a partir de las acículas no posee una granulometría acorde a la definición de "chip energético" sin embargo las propiedades de la biomasa estarían dentro de la categoría B.

Debido al control de combustión que posee la caldera utilizada para los ensayos, todos los combustibles erogaron emisiones de monóxido de carbono menores al límite más exigente de la normativa UNE-EN 303-5 (Clase 5). Respecto al material particulado generado en la combustión de astillas provenientes de

ramas, fue menor al límite para calderas clase 5, mientras que el de acículas fue mayor a este último, pero menor al de emisiones para calderas Clase 3 de menores prestaciones. En este último caso, la alimentación de combustible no fue suficiente para el régimen de máxima potencia; configuraciones de potencia reducida podrían reducir las emisiones de material particulado en el uso de este biocombustible. Debido a lo mencionado, si bien el rendimiento de combustión fue similar, la potencia erogada para la combustión de acículas fue menor a la requerida por el valor objetivo.

Respecto a las tecnologías, el pelletizado permite homogenizar la calidad de las distintas fuentes, brindando la posibilidad de uso en aplicaciones domésticas con un alto rendimiento energético en equipos de combustión sencillos. Las astillas se presentan como un biocombustible de producción simple, pero requieren de equipos de mayor complejidad. El control de combustión que poseen las calderas automáticas con regulación de oxígeno como la utilizada, permitió obtener excelentes valores de emisiones para materiales de menor calidad.

AGRADECIMIENTOS

Este informe fue realizado en el marco de un trabajo final de carrera de ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Río Negro. Por ello, consideramos importante hacerles llegar nuestra gratitud por brindar el marco de trabajo.

Además, agradecer al personal de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), especialmente a Marcelo Caputo y a Hector Bajano, quienes han participado del trabajo y nos brindaron las herramientas necesarias para poder llevarlo adelante.

A la Dirección de Bosques de la provincia de Río Negro por compartir el espacio donde hemos desarrollado el trabajo, y al CIEFAP por darnos la estructura necesaria para llevarlo a buen puerto.

A Georgina, Gastón, Claudia y Marcelo por sus aportes en la corrección del mismo.

REFERENCIAS

- Diez, J., Claps, L. Andreassi, L. & Salvaré, F. (2017).** Aprovechando residuos forestales: Una alternativa de manejo integral de plantaciones de pino ponderosa en la cuenca de Arroyo del Medio. Revista Presencia INTA, N° 68. Pp: 9-14.
- Foppa-Pedretti, E., Toscano G., Duca D., Pizzi A. & Riva G. (2010).** Effects of the Quality of the Biomass on Combustion Emissions of Stoves and Small Boilers. International Conference Ragusa SHWA2010. 16-18 September, 2010. Ragusa Ibla Campus. Italia.
- González, A. (2016).** Eficiencia térmica en edificios: olvidando lo más importante. Patagonia Forestal, XXI(1): 9-11.
- Hansen, M.T. & Rosentoft, J.A. (2009).** English handbook for wood pellet combustion. PELLETSATLAS Project, EU.
- Lenz V., Thran D., & Pfeiffer, D. (2018).** Methods for Measuring Emissions of Particulate Matter from Solid Biomass Combustion. Series of funding programme "Biomass energy use".
- Solórzano, S. (Ed). 2017.** Herramienta para Negocios Sustentables en Biomasa Forestal. Informe Técnico N° 214. Instituto Forestal - Chile. 79 p.
- Uasuf, A. & Hilbert, J. (2012).** El uso de biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informes técnicos bioenergía Año 1 N°2, Ediciones INTA.