



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA CHAQUEÑA COMO PRODUCTO ENERGÉTICO

Pablo Martina.¹ – María R. Aeberhard¹ – Juan José Corace¹ - Agripina Leiva Azuaga¹ -
Virginia Gallipoliti¹

¹G.I.D.E.R.- Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables -
Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Nordeste – Av. Las Heras 727 – 3500 – Resistencia - Chaco
Tel. 0362-4420076 – Email: pablo@ing.unne.edu.ar

RESUMEN

La inmensa industria maderera, en la región chaqueña, es generadora de residuos como ser el aserrín, viruta, costaneros (pequeños trozos laterales que sobran luego de aserrar los troncos) o ramas de diferentes tamaños que quedan juntos a los árboles talados.

Estos amontonamientos de madera reseca, tienen el peligro permanente de producir incendios, así como también de ser refugio para pequeñas alimañas, roedores, depósitos de basuras y enfermedades.

Motivados por la búsqueda de utilizar los residuos madereros y lograr a partir de ellos una fuente de energía barata, no contaminante, fácil de usar y que esté al alcance de todos, el grupo GIDER (Grupo de Investigación y desarrollo en Energías Renovables) desarrolla un proyecto con el fin de evaluar energéticamente estos desechos.

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos mediante una bomba calorimétrica de Mahler, utilizada para determinar el poder calorífico de muestras sólidas y líquidas.

Para el montaje y calibración del dispositivo se tuvo en cuenta la Norma IRAM 17.016 [1], ya que, previo a la utilización del equipamiento, se debió establecer la constante del aparato.

Se ha determinado en forma experimental el poder calorífico del aserrín de madera de Quebracho Colorado (*Schinopsis Balansae*) y se comparó dicho valor con el poder calorífico obtenido en forma teórica a partir del análisis elemental y del análisis próximo o inmediato. Si bien existen discrepancias entre los resultados alcanzados, dichos valores se encuentran dentro de los intervalos de poder calorífico de materiales biomásicos que se encuentran en la bibliografía.

La utilización del aserrín, como producto energético, constituye un recurso renovable y amigable con el medio ambiente que argumenta su estudio y desarrollo.

Palabras Claves: *Aserrín de Quebracho Colorado - Poder Calorífico - Bomba calorimétrica - Combustibles Alternativos.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

La Provincia del Chaco ha sido siempre una zona muy rica en recursos forestales. La gran mayoría de las maderas de la zona, se han utilizado desde el comienzo de la colonización chaqueña para su uso en muebles, tirantes, durmientes (ferrocarril), pisos, machimbres, aberturas (puertas, portones y ventanas), madera para la construcción, etc.

Toda esta inmensa industria, que utiliza como materia prima la madera, es generadora de residuos como ser el aserrín, viruta, costaneros (pequeños trozos laterales que sobran luego de aserrar los troncos) o ramas de diferentes tamaños que quedan juntos a los árboles talados.

Estos amontonamientos de madera reseca, tienen el peligro permanente de producir incendios, así como también de ser refugio para pequeñas alimañas, roedores, depósitos de basuras y enfermedades, ocasionando también un impacto negativo sobre el medio ambiente por la descomposición de los mismos a cielo abierto, generando gases de efecto invernadero, entre ellos metano.

Es por esta razón que el grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables) busca la forma de utilizar los residuos madereros de la región chaqueña, con la posibilidad de lograr a partir de ellos una fuente de energía barata, no contaminante, fácil de usar y que esté al alcance de todos.

Una forma de evaluar energéticamente un residuo es considerar, por una parte, su disponibilidad, que en el caso del aserrín es abundante en la zona chaqueña, y por otra conocer su poder calorífico.

Se puede estimar que la principal característica de un combustible es su poder calorífico, definido como la cantidad de calor que se obtiene mediante la combustión completa de la unidad de masa o volumen de un combustible, quedando los productos de la combustión a la temperatura a la que se encontraban inicialmente el combustible y el comburente, es decir que el poder calorífico es el calor de la reacción de combustión realizada a temperatura constante.

Al producirse la combustión se produce una transformación de energía química del combustible en energía térmica. Dicha energía térmica puede transferirse en forma de calor al medio si la combustión se realiza en un recinto no adiabático o bien puede incorporarse como energía interna térmica a los productos de la combustión si se realiza en un ambiente adiabático.

Los combustibles que se emplean en la práctica normalmente contienen hidrógeno combinado y muchas veces también humedad. El agua que produce el primero, más la que constituye la humedad pasan a formar parte de los productos de la combustión. Según las condiciones en



que se realice la combustión, puede ocurrir que toda el agua que integra los productos de la combustión quede gaseosa, es decir en forma de vapor, o que toda el agua quede líquida o parcialmente líquida y parcialmente vaporizada. En cada uno de los casos la cantidad de calor que se obtendrá será diferente, se tendrá así una infinidad de poderes caloríficos, conjunto que tendrá dos valores extremos. Se define entonces como poder calorífico superior al correspondiente al caso en que toda el agua producto de la combustión queda líquida y como poder calorífico inferior al del caso en que toda el agua producto de la combustión queda gaseosa.

Los combustibles pueden ser quemados a presión o a volumen constante. El poder calorífico a presión constante de gases se determina con el calorímetro de Junkers, dispositivo que fue diseñado y construido por el grupo GIDER, para determinar el poder calorífico del biogás [2]

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos utilizando una bomba calorimétrica de Mahler, aparato utilizado para determinar el poder calorífico de sólidos y líquidos a volumen constante.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Descripción del Equipamiento

La bomba calorimétrica de Mahler consiste básicamente en un recipiente o bomba donde se quema la muestra de combustible y una vasija calorimétrica que contiene una cantidad determinada de agua donde se sumerge la bomba, el termómetro y el agitador como se observa en las siguientes imágenes:



Foto 1: Vista exterior de la bomba calorimétrica



Foto 2: Vasija calorimétrica

La bomba se basa en un obús maquinado fabricado en acero inoxidable de 282ml de capacidad, con tapa roscada y cierre de 2 anillos tipo O'ring.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

La bomba está diseñada para soportar ser llenada a gran presión con oxígeno puro mediante válvula reductora y manómetros de alta y baja presión. Además se tuvo en cuenta que su superficie interna no se vea afectada por los productos a ensayar ni por el proceso de combustión.

Para la corriente de encendido se contó con un dispositivo de ignición a batería de 12 voltios, pulsado manualmente, como se observa a continuación.



Foto 3: Batería y pulsador



Foto 4: Bomba calorimétrica y equipo de medición

Las temperaturas fueron obtenidas con sensores tipo Pt100 (resolución 0,01°C), y registradas con un Data Logger transformando la señal de los mismos.

Para realizar un ensayo se introduce en la bomba un peso conocido de combustible, luego se la carga con oxígeno a presión, se sumerge en el baño de agua y se cierra el circuito eléctrico de ignición que inflama el combustible. El calor liberado en la combustión eleva la temperatura de la bomba y del agua.

Conociendo la elevación de temperatura y los pesos y calores específicos de las distintas partes del dispositivo puede obtenerse el poder calorífico del material estudiado.

2.2 Ensayos y Cálculos Realizados

2.2.1 Determinación experimental del poder calorífico del aserrín

Previo a la realización de los ensayos se determinó el equivalente en agua E (capacidad calorífica de la bomba), utilizando una sustancia patrón, cuyo poder calorífico es conocido.

La sustancia utilizada para el cálculo de E fue ácido benzoico C_6H_5-COOH , cuyo poder calorífico es 26.550 joules/gr.

El valor calculado del equivalente en agua fue de: $E = 1840,02 \text{ cal} / ^\circ\text{C}$.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Una vez obtenido el equivalente en agua del calorímetro se procedió a determinar el poder calorífico del aserrín. Para ello se armó una pastilla, con el material a estudiar, sujetándola entre los 2 electrodos de platino mediante un alambre de Nicrome (80%Niquel-20%Cromo) de 0.35mm de diámetro. (Foto 5).



Foto 5: Cápsula de aserrín



Foto 6: Colocación de la cápsula en la bomba

Una vez introducida la cápsula en la bomba, (Foto 6) se cerró la tapa en forma manual y se ajustó mediante una llave de apriete. Se cargó el obús con oxígeno puro a presión = 20kg/cm², venteando previamente el aire inicial para asegurarse que sólo quede oxígeno en el interior evitándose de esta manera la corrección por formación de ácido nítrico.

Para comprobar la hermeticidad del cierre del obús se lo sumergió en agua. Una vez preparada la bomba se la colocó en el recipiente calorimétrico rodeándolo con agua destilada hasta cubrirlo completamente. Se tapó el recipiente y se comenzó la agitación del agua (con agitador adosado a la tapa del envase) para lograr una buena uniformidad de las temperaturas.



Foto 7: Inmersión de la bomba en agua destilada



Foto 8: Cierre del recipiente calorimétrico



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para finalizar se efectuó la conexión eléctrica (batería, amperímetro, pulsador). Se accionó el pulsador y se produjo la explosión del combustible dentro del obús, lo cual se observó, inmediatamente, con el aumento de la temperatura del agua que rodea a la bomba. Transcurrido un tiempo la temperatura comienza a descender levemente.

Se registraron los valores de temperatura cada minuto. Al finalizar el ensayo se destapó el obús y se midió el alambre de Nicrome que quedó sin quemar, para realizar la corrección del calor aportado por el alambre. Los residuos depositados en el fondo del obús, resultado de la combustión, se considerarán en futuros trabajos.

Por último se controló si la combustión fue completa, si quedaron cenizas y si se observaba agua líquida (microgotas, rocío) dentro de la bomba.

Los pasos mencionados anteriormente se repitieron para cuatro ensayos a fin de lograr el promedio estadístico del poder calorífico experimental. Con todas las lecturas realizadas, se calculó el poder calorífico a través de la siguiente ecuación:

$$PCS = \frac{E \cdot \Delta T - C_3}{m_c} \quad (1)$$

Donde:

m_c = masa de combustible (aserrín) utilizado = 0.4537gr

Δt = variación de temperatura lograda en el ensayo = 1.10°C

C_3 = corrección por el alambre de Nicrome utilizado = 36.8cal

E = equivalente en agua del calorímetro = 1840,02 cal / °C

$$\Rightarrow PCS = \frac{E \cdot \Delta T - C_3}{m_c} = 4380,03 \text{ Kcal / Kg}$$

En la ecuación 1 sólo se tuvo en cuenta el salto final de temperatura. Los valores intermedios obtenidos con el elemento transductor para medir la señal de salida del Pt100 son objeto de trabajos posteriores.

Al observarse que tanto la masa como el poder calorífico de la cápsula de gel bicolor eran muy pequeños, se despreciaron los resultados obtenidos al calcular el poder calorífico del aserrín.

Dado que el valor obtenido en forma experimental mediante el calorímetro de Mahler es el poder calorífico superior en base húmeda (PCS_{bh}), se calculó el poder calorífico superior en base seca (PCS_{bs}) como:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

$$PCS_{bs} = \frac{PCS_{bh}}{1 - \frac{H}{100}} = \frac{4380,03}{1 - \frac{11,82}{100}} = 4967,14 \text{ Kcal / kg} \quad (2)$$

Otra forma de estimar el poder calorífico de un combustible es utilizando fórmulas que lo expresan en función de las características físico-químicas del mismo.

Para poder corroborar los valores del poder calorífico se compararon los resultados obtenidos en forma experimental con los obtenidos a través de las ecuaciones de Dulong [3], Francis y Lloyd [4], Milne [5] y Christensen [6] en las que se calculó el poder calorífico en función del análisis elemental y el análisis inmediato. A continuación se expresan las ecuaciones utilizadas:

$$\text{Ecuación de Dulong: } PCS = 8100.C + 34000(H - \frac{O}{8}) + 2500.S \quad (3)$$

$$\text{Ecuación de Francis y Lloyd } PCS = 0,3578.C + 1,1356.H + 0,0594N - 0,0845.O - 0,974 \quad (4)$$

$$\text{Ecuación de Milne: } PCS = 341.C + 1322.H - 120.O - 120.ON + 68,6.S - 15,3.CEN \quad (5)$$

$$\text{Ecuación de Christensen: } PCS = 348.C + 939.H + 105.S + 63.N - 108.O - 24,5.CH \quad (6)$$

Donde: C, H, O, N, S, CEN, CH son los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y contenido de humedad, respectivamente.

En la tabla 1 se exponen los valores característicos del análisis elemental del aserrín de Quebracho colorado (Schinopsis Balansae):

Análisis Elemental (% p/p en base seca)			
C	H	O	N
52,7	5,8	40,2	0,2

Tabla 1: Análisis elemental. Ogara 1987. [7]

Con los datos de la tabla 1 y las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) se obtuvieron los siguientes resultados:

$$PCS_{Dulong} \Rightarrow 4535 \text{ kcal / kg}$$

$$PCS_{FrancisyLloyd} \Rightarrow 5037 \text{ kcal / kg}$$

$$PCS_{Milne} \Rightarrow 4958,3 \text{ kcal / kg}$$

$$PCS_{Christensen} \Rightarrow 4581,6 \text{ kcal / kg}$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

2.2.2 Análisis próximo o Inmediato del Aserrín de Quebracho colorado

El análisis próximo o inmediato, comprende la obtención del contenido de Humedad, Cenizas, Materia Volátil y Carbono Fijo, y depende de una serie de ensayos, tanto directos como indirectos, que permiten obtener sus valores.

Para obtener el contenido de humedad (**CH**) se depositó la muestra de aserrín en una estufa a 105 °C hasta que su peso permaneció constante, es decir, libre de agua y se calculó mediante fórmula el valor buscado.

Para obtener las materias volátiles (**MV**), compuestas por la combinación de hidrógeno, carbono, y otros gases, se colocó la muestra seca en la mufla eléctrica a 550 °C hasta que no hubo diferencia de peso entre dos pesadas consecutivas. Finalmente se obtuvo las materias volátiles conociendo los pesos seco y secado a 550°C.

Para obtener las cenizas (**CEN**), residuo incombustible, se continuó la quema a una temperatura de 850 °C hasta que su peso permaneció invariable y, con estos datos, se calculó el dato esperado.

Finalmente el porcentaje de carbono fijo (**CF**) se determinó restando a 100 la suma de los porcentajes de materias volátiles y cenizas,

$$\Rightarrow CF = 100\% - (MV + CEN) \quad (2)$$

Los resultados del análisis próximo o inmediato se exponen en la tabla 1:

ANÁLISIS INMEDIATO	Base seca	Base húmeda
Humedad Total (%)	-----	11,82
Materias Volátiles (%)	62,7	55,3
Carbono Fijo (%)	34,5	30,41
Cenizas (%)	2,8	2,47

Tabla 2: Análisis próximo o inmediatos

Este estudio permitió deducir el porcentaje de biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química, como la materia volátil y el carbono fijo, y la fracción inactiva en el caso de las cenizas.

3. CONCLUSIÓN

Se ha obtenido el poder calorífico del aserrín de madera de Quebracho Colorado (*Schinopsis Balansae*) utilizando una bomba calorimétrica de Mahler.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para confirmar el valor del poder calorífico logrado en forma experimental, se lo comparó con el poder calorífico calculado en forma teórica a partir de ecuaciones empíricas expresadas en función del análisis elemental y del análisis próximo o inmediato.

Las diferencias entre los valores calculados y el obtenido calorimétricamente están dentro de los rangos aceptados, según la bibliografía. Estas diferencias se deben principalmente al contenido de oxígeno que es además, en algunas especies, muy variable. Para algunas maderas las discrepancias llegan a ser del 10 al 15% [8]. Los datos alcanzados se consideran satisfactorios, teniendo en cuenta que son los primeros resultados logrados con la bomba calorimétrica de Mahler.

Se observó que el poder calorífico superior en base húmeda (PCS_{bh}), es menor que el poder calorífico superior en base seca (PCS_{bs}). Este comportamiento era de esperar, ya que parte del calor se pierde al evaporar el agua, por lo que cuanto más seca está la muestra, más energía se puede obtener de ella.

El aserrín es uno de los desechos originados en la industria maderera de mayor impacto ambiental. Generalmente este residuo no es utilizado en forma apropiada y su acumulación ocupa un espacio físico importante dentro de los lugares de trabajo, tornándose inclusive peligroso.

Los resultados alcanzados durante los ensayos con aserrín de madera de Quebracho Colorado (*Schinopsis Balansae*), permiten inferir que la utilización de este producto, como alternativa para la producción de energía, mejoraría no sólo las condiciones ambientales y de seguridad sino también aportaría una solución a la industria de la madera.

4. REFERENCIAS

- [1] Norma IRAM 17016, Método de Determinación del Poder Calorífico.
- [2] Martina P., Aeberhard R. Corace J., García Solá. E., (2011). Diseño y Construcción de un Calorímetro de Junkers para Determinación del Poder Calorífico del Biogás. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 15, ISSN 0329-5184
- [3] Kollmann F, 1959 Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Springer Verlag, Berlin,. Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. pp 260-281
- [4] Díaz R., 2008. Caracterización energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador. Curso Internacional "Producción y Aprovechamiento Energético de Biomasa". Septiembre de 2008. Riobamba – Ecuador.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- [5] Rabou L., Van der Drift A., Van Doorn J., 2002. Analysis of biomass data in ECN database Phyllis, ECNRX- 02-014. June, Amsterdam, the Netherlands.
- [6] Rasmussen A., 2004. Final report Waste Incineration. Thesis to obtain the Master of Science. Department of Chemical Engineering of University of Denmark, 2004.
- [7] Ogara, M.R., Berset, A., Gronhut, E. 1987. La biomasa forestal como fuente de energía. Sistemas y posibilidades. 11 Jornadas Mes Forestal de Entre Ríos. Concordia. 4.1 - 4.34.
- [8] Kollmann F, 1959 Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Springer Verlag, Berlin,. Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. pp 260-281
- [9] Christensen, T. H., 1998 ed., Affaldsteknologi (in Danish), 2nd edition, Ingeniøren bøger, , ISBN 87-571-2148-6.
- [10] Ernitz A. 1961. Manual de Maderas. Editorial Alsina. Buenos Aires. ISBN: 9789505530038. p.58.
- [11] Márquez F. Cordero T., Rodríguez J., Rodríguez J. 2001 Estudio Del Potencial Energético De Biomasa *Pinus Caribaea* Morelet Var. *Caribaea* (Pc) Y *Pinus Tropicalis* Morelet (Pt); *Eucaliptus Saligna* Smith (Es), *Eucalyptus Citriodora* Hook (Ec) Y *Eucalytus Pellita* F. Muell (Ep); De La Provincia De Pinar Del Río. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 7(1):pp: 83-89.
- Relova I., Hernández E., García J., Cándano F., Coro R., Fernández L. 2000. Potencial de aserrín de la industria del aserrado de *Pinus Caribaea* var. *Caribaea* con fines energéticos Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET Pinar del Río. Vol. 2, No.1 enero-marzo, 2000. ISSN 1562-3297