

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021

Tomo II. Compilación.

- | Biotecnología, nanotecnología, bioingeniería y materiales
- | Historia de la Ingeniería (150ING)
- | Mujeres en ingeniería y cambio social
- | Ingeniería sostenible. Energía, eficiencia energética, gestión ambiental y cambio climático



Editores: Luis Fernández Luco | Cristina Vázquez | Alejandra Acuña Villalobos | Guillermo Lombera | Roberto Giordano Lerena

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería : 2021 : tomo II /
compilación de Luis Fernandez Luco ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires:
Luis Fernandez Luco, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga.

ISBN 978-987-88-7245-2

Obra Completa 978-987-88-7180-6

1. Ingeniería. I. Fernandez Luco, Luis, comp. II. Título.

CDD 620.00982

ISBN 978-987-88-7245-2



9 789878 872452



Pino y eucalipto: poder calorífico en función del contenido de humedad. Análisis inmediato y elemental

Martina, P. ^a; Aeberhard R ^a; Corace, J. ^a

a. GIDER – Dpto. de Termodinámica - Facultad de Ingeniería- UNNE
pablo@ing.unne.edu.ar ; raquelaeberhard@gmail.com

Resumen

La energía que se puede obtener de la biomasa depende de parámetros precisos, cuyos valores se pueden adquirir en forma experimental, tales como el poder calorífico y la humedad. Una correcta elección de las técnicas para determinar estas variables, hace fiables sus mediciones. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la determinación del poder calorífico superior, PCS, y el poder calorífico inferior, PCI, en función del contenido de humedad, para muestras de madera de pino y de eucalipto. La biomasa residual obtenida de estas especies es muy utilizada como combustible, en la región NEA, ya sea arrojando el aserrín directamente al quemador o compactándolo en forma de pellets. Los valores del PCS y el PCI fueron determinados en forma experimental, empleando una bomba de Mahler a volumen constante y en forma teórica a través de diferentes ecuaciones empíricas, utilizando para ello los datos adquiridos del Análisis Inmediato, AI, (materias volátiles, carbono fijo y cenizas) y del Análisis Elemental, AE, (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas).

Finalmente se exponen algunas controversias observadas durante el desarrollo del trabajo y que se prestaron a confusión, debido a que en la bibliografía consultada existían puntos que causaron incertidumbre como ser: definiciones difusas, unidades de medición poco claras, fórmulas diferentes para el cálculo del mismo parámetro, designación de nombres diferentes para la misma definición, etc.

La utilización de maderas de pino y eucalipto, como producto energético, constituye un recurso renovable y amigable con el medio ambiente que argumenta su estudio y desarrollo.

Abstract

The energy that can be obtained from biomass depends on precise parameters, whose values can be acquired experimentally, such as calorific power and moisture content. A correct choice of techniques to determine these variables, makes measurements reliable. In this work, are presented the results obtained from the determination of the high heat value, HHV, and the low heat value, LHV, depending on the moisture content, for pine and eucalyptus wood samples. The residual biomass obtained from these species is widely used as fuel, in the NEA region, either by throwing the sawdust directly into the burner or compacting it into pellets. HHV and LHV values were experimentally determined using a Mahler puma of constant volume, and theoretically through different empirical equations, using the data acquired from the Immediate Análisis IA (volatile matter, fixed carbon and ashes) and from Elemental Analysis, EA (carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur and ashes). Finally some controversies observed during the development of the work and that lent themselves to confusion are expounded, due to the fact that in the consulted bibliography there were points that caused uncertainty such as: : fuzzy definitions, unclear units of measure, different formulas for the calculation of the same parameter, designation of different names for the same definition, etc. The use of pine and eucalyptus woods, as an energy product, constitutes a renewable resource and environment friendly that argues its study and development.

Palabras clave: Madera de pino y eucalipto, Biomasa, Poder calorífico

INTRODUCCIÓN

La Biomasa, definida como la materia orgánica, que proviene de los árboles, plantas y desechos de animales, factible de ser transformada en energía, se utiliza actualmente en procesos de conversión con el fin de reemplazar a los combustibles fósiles.

Una forma de estimar 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 potencial energético mediante el cálculo del poder calorífico.

En la Provincia del Chaco la gran industria que utiliza como materia prima la madera, es generadora, no sólo de remanentes 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, sino también, utilizada como combustible, ya sea arrojando el aserrín directamente al quemador o compactándolo en forma de pellets.

Como se mencionó anteriormente, se puede establecer 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.

Con el objetivo de buscar la forma de aprovechar los residuos madereros de la región chaqueña, con posibilidad de 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), realizó un estudio comparativo del poder calorífico para diferentes especies de la región NEA.

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

DESARROLLO TEÓRICO

Poder Calorífico

Los combustibles que se utilizan 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 efectúe 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.

Desde el punto de vista de quemar un aserrín de madera, en un horno, el valor que interesa es el poder calorífico inferior PCI [1], ya que el calor de condensación del vapor de agua, contenido en los gases que resultan de la combustión, no es utilizable. El PCI se obtiene cuando el agua producto de la combustión se elimina con los gases de escape en forma de vapor. Como este valor es el calor de vaporización del agua [2], la relación entre ambos poderes caloríficos será:

$$PCI = PCS - Cva \quad (1)$$

Donde:

PCI: poder calorífico inferior;

PCS: poder calorífico superior

Cva: calor de vaporización del agua expresado como:

$$Cva = r(a + 9h) \quad (2)$$

Con:

r: entalpía de vaporización del agua = 595 kcal/kg

a: contenido de humedad del aserrín = 0% (si la muestra fue secada previamente).

h: contenido de hidrógeno de la madera: según bibliografía, aproximadamente 6%.

Para minimizar pérdidas, desvíos y posibles errores, es muy habitual que el ensayo se realice sobre una muestra secada a 105°C, por lo que el valor obtenido es en realidad el PCS para muestra seca (PCSms), pero pueden surgir dos requerimientos:

1º: El PCS para muestras con diferentes contenidos de humedad que se realiza con la siguiente ecuación [3]:

$$PCS_{mh} = PCS_{ms}(100 - a) \quad (3)$$

Donde:

PCS_{mh}: PCS para muestra húmeda,

PCS_{ms}: PCS para muestra seca,

a: contenido de humedad en base seca

2º: El PCI para muestras con diferentes contenidos de humedad. Esto es más frecuente que el caso anterior, ya que muchas industrias compran aserrín o pellets y lo queman en su caldera o quemador con el contenido de humedad con que llegan. La energía que entrega el combustible en este caso será el PCI con un cierto contenido de humedad (PCI de muestra húmeda):

$$PCI_{mh} = PCS_{mh} - C_{va} \quad (4)$$

Análisis próximo o inmediato

El análisis próximo o inmediato, AI, es un ensayo de laboratorio en el que se determinan los distintos componentes de un combustible a medida que se van quemando. Comprende la obtención de Materia Volátil (mv), Carbono Fijo (cf) y Cenizas (cen).

El AI puede realizarse de dos formas:

- Con muestra húmeda: donde se determina el contenido de humedad (ch) y los sólidos totales o sólidos secos (ss), de tal manera que: $ch + ss = 100\%$. A su vez los ss se analizan para conocer la mv, el cf y las cenizas, cen, tal que $ss \rightarrow mv + cf + cen = 100\%$.
- Con muestra seca: en este caso sólo se analizan los ss, es decir que previo al ensayo se debe secar la muestra, resultando: $ss \rightarrow mv + cf + cen = 100\%$.

Para realizar este ensayo se debe contar con un horno que alcance los 900 °C aproximadamente.

Este estudio permite 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.

En base a los valores alcanzados de mv, cf y cen, se puede calcular el PCS sin necesidad de recurrir a un ensayo experimental, ya que existen ecuaciones empíricas que permiten su obtención.

Análisis elemental

El análisis elemental, proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (C, H, O, N, S y CEN) presente en muestras orgánicas e inorgánicas, tanto sólidas como líquidas.

Como ocurre en el análisis próximo o inmediato, se puede obtener el poder calorífico superior a partir de ecuaciones, conociendo el contenido de C, H, O, N, S y CEN.

EQUIPO UTILIZADO

Bomba de Mahler de volumen constante

Los valores del PCSms de las muestras de pino y de eucalipto, se determinaron en forma experimental mediante una bomba calorimétrica de Mahler cuyas características son las siguientes:

Bomba calorimétrica de MAHLER de volumen constante, marca Julius Peters Berlin (JPB), modelo 1719, adiabática (camisa aislante de lana de vidrio). Obús maquinado, fabricado en acero inoxidable con capacidad de 282ml, con tapa roscada y cierre de 2 anillos poliméricos tipo O'ring. Llenada a presión con oxígeno puro mediante válvula reductora y manómetros de alta y baja presión.

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.

El valor de E calculado fue de $E = 2347 \text{ cal / } ^\circ\text{C}$.

Los valores determinados de PCSms utilizando la Bomba de MAHLER fueron:

Tabla 1: Valores de PCSms obtenidos con la Bomba Calorimétrica

Especie	PCSms (Kcal/kg)
Pino	4205
Eucalipto	4091

La siguiente figura muestra la Bomba calorimétrica de Mahler utilizada en los ensayos Figura 1:



Figura 1: Bomba de Mahler

Mufla de resistencia eléctrica

Para la realización del análisis próximo o inmediato se utilizó una mufla de resistencia eléctrica de temperatura controlada de las siguientes características:

- Capacidad: 1900 cm³
- Rango de temperatura: hasta 950°C
- Aislación: 10 cm de lana de vidrio y cemento aislante.
- Control de temperatura: electrónico, con sensor termocupla tipo J
- Precisión del sensor: +/- 3 °C
- Soporte de la resistencia: matriz de material refractario.
- Resistencia: alambre tipo Kahntal de 2mm de diámetro.

En la Figura 2 se observa la Mufla empleada:



Figura 2: Mufla

Horno de secado de resistencia eléctrica

Para las pruebas de secado se contó con un horno eléctrico de 40 litros de capacidad, con control automático de temperatura de hasta 105°C, el mismo se observa en la Figura 3:



Figura 3: Horno de resistencia eléctrica para ensayos de secado

DATOS Y RESULTADOS

PCS y PCI para distintos contenido de humedad

Se determinó el PCS y el PCI para diferentes contenidos de humedad. Se seleccionó un rango de humedad de 0% a 15%, ya que son los valores con los que normalmente llegan el aserrín y los pellets a la Industria o fábrica donde son utilizados.

Se debe tener en cuenta que, para todos los cálculos, se utilizó el contenido de humedad en base seca, que se expresa de la siguiente manera: contenido de humedad = $(pv - ps)/ps$, donde pv es el peso húmedo de la muestra y ps su peso seco.

En las Figuras 4 y 5, se representan el poder calorífico superior e inferior para las especies de pino y eucalipto, respectivamente, en función del contenido de humedad según (3) y (4):

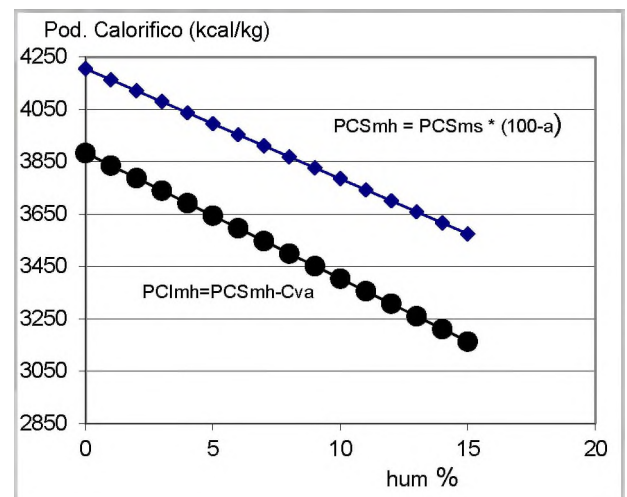


Figura 4: PCS y PCI en función del contenido de humedad para el aserrín de pino

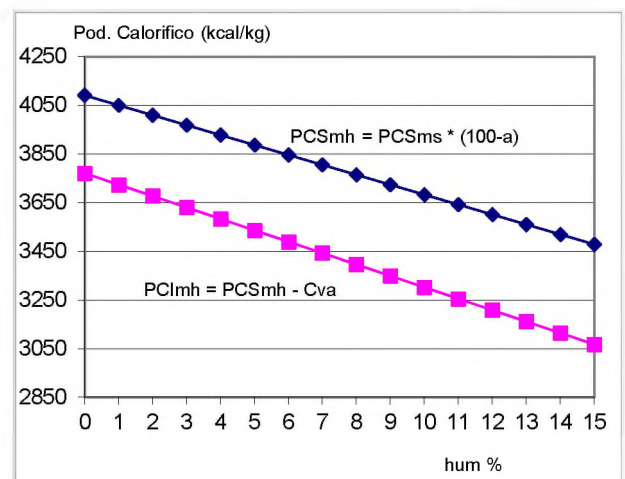


Figura 5: PCS y PCI en función del contenido de humedad para el aserrín de eucalipto

Como se observa en las Figuras 4 y 5, el PCS es mayor al PCI tanto para la madera de pino como de eucalipto.

Este resultado era de esperar ya que, como por definición, el PCS indica el calor que libera el combustible cuando toda el agua se condensa, se está considerando el aporte de calor que libera el vapor al condensar. Es decir, que cuanto más condensado se obtenga, mayor calor se obtendrá del combustible.

Análisis inmediato

En la siguiente tabla (Tabla 2) se exponen los resultados obtenidos experimentalmente del análisis próximo o inmediato:

Tabla 2: Análisis próximo o inmediato para las muestras de pino y eucalipto

AI	Pino	Eucalipto
Mv (%)	76,62	73,10
Cf (%)	22,17	25,80
Cen (%)	1,21	1,10
SS (%)	100	100

En la tabla 2, no se indica el contenido de humedad ya que las muestras fueron secada previamente.

Análisis elemental

Los datos del análisis elemental para las muestras de pino y eucalipto, fueron obtenidos de bibliografía [4]. Los mismos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3: Análisis inmediato para las muestras de pino y eucalipto

Análisis inmediato	Pino	Eucalipto
Carbono (%)	48,10	47,10
Hidrogeno (%)	6	6
Oxigeno (%)	44,69	45,80
Nitrógeno (%)	0	0
Azufre (%)	0	0
Cenizas (%)	1,21	1,10
Total (%)	100	100

Resultados del PCS según el análisis inmediato

Con los datos obtenido del análisis inmediato y mediante fórmulas empíricas, se calculó el poder calorífico superior para las muestras de pino y eucalipto.

Para ello se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$* PCS = 0,3563cf + 0,1755 \quad [4] \quad (5)$$

$$* PCS = 353,6cf + 155,9mv - 7.8cen \quad [5] \quad (6)$$

$$* PCS = 82cf + a.mv \quad [6] \quad (7)$$

En la Tabla 4, se visualizan los resultados para las dos especies:

Tabla 4: Resultados del PCS según el AI para las muestras de pino y eucalipto

Ecuación	PCS (kJ/kg)	
	Pino	Eucalipto
(5)	19774	20510
(6)	21345	22021
(7)	20431	20760

Resultados del PCS según el análisis elemental

Una vez conocidos los valores del análisis elemental, para las dos especies estudiadas, se pudo obtener el poder calorífico superior a través de ecuaciones que se muestran a continuación:

$$* PCS = 8100.C + 34000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500.S \quad [7] \quad (8)$$

$$* PCS = 0,3578C + 1,1356H + 0,0594N - 0,0845O - 0,974 \quad [8] \quad (9)$$

A continuación, en la Tabla 5, se exponen los resultados obtenidos:

Tabla 5: Resultados del PCS según el AE para las muestras de pino y eucalipto

Ecuación	PCS (kJ/kg)	
	Pino	Eucalipto
(8)	16897	16360
(9)	19273	18821

De los resultados obtenidos del PCS según el análisis elemental, se advierte que el poder calorífico de las muestras de pino son superiores a los poderes caloríficos del eucalipto.

Estudios han demostrado que existe una relación directa entre el poder calorífico y el contenido de carbono [9].

Las especies de coníferas, como es el caso del pino, presentan valores más altos de carbono respecto a las especies de frondosas o latifolias, como el eucalipto, por lo que el poder calorífico de las primeras será mayor.

CONCLUSIONES

Se ha obtenido el poder calorífico para las especies de pino y eucalipto, utilizando una bomba calorimétrica de Mahler.

Para confirmar el valor del poder calorífico logrado en forma experimental, se calculó el poder calorífico superior en forma teórica a partir del análisis elemental y del análisis próximo o inmediato.

Los valores calculados y los obtenidos calorimétricamente, están dentro de los rangos aceptados, según la bibliografía. Las diferencias entre ellos se debe, principalmente, al contenido de oxígeno que en algunas especies es muy variable. Para algunas maderas las discrepancias llegan a ser del 10 al 15% [1].

En la bibliografía consultada, han surgido ciertas confusiones en reiteradas oportunidades. Esto se debió a ambigüedades tales como: definiciones difusas, unidades de medición poco claras, fórmulas diferentes para el cálculo del mismo parámetro, designación de nombres diferentes para la misma definición e incertidumbre si las ecuaciones se presentaban con el contenido de humedad en base seca o en base húmeda o si el PCS y el PCI se definían para una muestra seca o húmeda.

Como una forma de despejar estas dudas, se exponen las siguientes aclaraciones y conclusiones:

- Cuando se realiza el ensayo del poder calorífico en el laboratorio, se utiliza un equipo llamado bomba calorimétrica de Mahler a volumen cte. Como el protocolo de este ensayo [3] exige que los gases finales de la combustión estén a la misma temperatura que los gases iniciales (oxígeno puro a 20/30 atm y $t = 25^{\circ}\text{C}$), el agua, producto de la combustión, quedará en estado líquido (microgotas, rocío) en el fondo y tapa del calorímetro, por lo que el valor hallado es el poder calorífico superior PCS.
- Normalmente los laboratorios secan la muestra a 105°C para eliminar los errores, inconsistencias y desvíos en la medición, por lo que el valor hallado es el PCS para muestra seca (PCSms).
- Debido a que, previo a la realización del ensayo, se debe secar totalmente la muestra (105°C), el agua que se produce en la combustión luego de la experiencia es la proveniente del hidrógeno que contenía inicialmente la muestra de combustible (para la gran mayoría de las maderas este valor es del 6%). El comburente (oxígeno puro), no contiene agua ni humedad.
- El PCS se encuentra en cierta bibliografía expresado como hv, hhv (high heat value), hs o contenido calorífico superior o bruto.
- Cuando el combustible se quema por ejemplo en una caldera a presión constante y elevada temperatura, el vapor de agua queda en estado gaseoso, obteniéndose un valor menor de energía llamado Poder Calorífico Inferior PCI, lhv (low heat value) o hi o poder calorífico neto. Para los fines industriales del quemado del combustible, el valor que interesa o que define la cantidad de combustible necesario es el PCI.
- Existen otras fórmulas para relacionar los poderes caloríficos de una muestra seca y de una muestra con cierto contenido de humedad a, siendo a la humedad referida al peso seco. Por ejemplo, una ecuación muy utilizada es:
$$PCI_{mh} = \frac{PCS_{ms} - C_{va}}{100 + a}$$
- Al realizar el Análisis Elemental y el Inmediato, los valores de cenizas interpretan lo mismo en ambos estudios. En el caso del carbono, correspondiente al Análisis Elemental, no representa el carbono fijo

del Análisis Inmediato, aunque sus nombres sean similares y se presten a confusión. El carbono C, en el AE, representa la totalidad del carbono presente en el combustible, mientras que el carbono fijo, cf, se lo denomina al residuo combustible que queda al eliminar la materia volátil y se obtiene a partir de la diferencia entre 100 y la suma de los porcentajes de humedad, materias volátiles y cenizas. Por ello el C es siempre mayor que el Cf.

El aserrín es uno de los desechos, originado 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, ya que puede producir incendios, así como también ser refugio para pequeñas alimañas, roedores, depósitos de basuras y enfermedades.

Los resultados alcanzados durante los ensayos con aserrín de maderas de pino y eucalipto, permiten deducir que la utilización de estas especies, como alternativa para la generación de energía, ayudarían no sólo a mejorar y proteger las condiciones del medio ambiente, sino también, aportarían una solución a la industria de la madera, ya que pueden ser aprovechadas para la producción de energía térmica empleada de distintas formas, como ser en generadores de vapor, en turbinas, en hornos, etc.

REFERENCIAS

- [1] Kollmann F, 1959 *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer Verlag, Berlin,. *Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones*. pp 260-281
- [2] García, C. (1987). *Termodinámica Técnica*. 4ª Edición. Editorial Alsina. Buenos Aires.
- [3] IRAM (1960). Norma 17016, *Método de Determinación del Poder Calorífico*, pp 7.
- [4] 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.
- [5] Parikh J., Channiwala S.A. and Ghosal G.K., (2005) *Fuel*, 84, 487
- [6] Hermite H. (1904), *Consideraciones Generales sobre los Combustibles Argentinos*. Buenos Aires, 1-33.
- [7] Kathiravale, S.; Yunus Muhd, M.N.; Sopian, K.; Samsuddin, A.H.; Rahman, R.A., (2003) "Modeling the heating value of Municipal Solid Waste", *Fuel*, 82, 1119-1125
- [8] 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.
- [9] Torres L. *Estudio de Caracterización de las biomasa forestales de interés Energético existentes en el Sur de Galicia y Norte de Portugal*.