

NUEVA FÓRMULA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD

FRANCISCO MARCOS, SANTIAGO VILLEGAS.

DPT. ING. FORESTAL. UNIV. POLITÉCNICA OF MADRID.

RESUMEN

El objetivo de la presente comunicación es facilitar una fórmula que relacione el poder calorífico inferior (PCI) de la madera a una humedad h (bien sea medida en base seca o en base húmeda) con el poder calorífico superior anhidro (PCS₀), que es el que facilitan los centros de investigación.

P.C.: Poder calorífico, Humedad, Madera, Fórmula.

SUMMARY

This paper studies the basic concepts of moisture and heat value. From these, the concepts of wood's H.H.V. (high heat value) and L.H.V. (low heat value) are shown. Then some formulae widely used up to the moment, are analyzed. Lastly, a calculus diagram is shown, together with a formula to get the L.H.V. of a moist wood fuel from the H.H.V. of the oven-dry wood fuel (this last datum may be obtained in many research labs).

K.W.: Heat value, Moisture, Wood, Formulae.

CONCEPTOS DE HUMEDAD.

Hay dos conceptos de humedad que deben tenerse presentes al referirnos a esta variable:

1) Humedad en base húmeda.

donde: P_h = Peso húmedo de la muestra.

P_s = Peso seco de la muestra. Es el peso después de un secado a 100+-4°C, cuando la muestra no disminuye ya su peso (ha perdido toda el agua).

Siempre se cumple $P_h \geq P_h - P_s$ por lo que $H_h \leq 1$.

2) Humedad en base seca.

Como $P_s \leq P_h$ entonces $H_s \geq H_h$.

H_s puede ser >1. La relación entre ambas es la siguiente:

Las diferencias entre el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) son debidas al contenido en agua de la madera. Conceptualmente, el PCS es la energía desprendida en la combustión de 1 Kg de combustible cuando el agua evaporada se recoge condensada. En el PCI el agua de la combustión se escapa, en forma de vapor, al medio ambiente.

$PCS = PCI + \text{Calor desprendido en la condensación del agua.}$

Hemos de tener presente que el agua en la madera puede encontrarse:

1) *Agua libre* en el lumen interior de la célula. Aparece con humedades superiores al punto de saturación de la pared celular (H_{sf}).

2) *Agua de impregnación* o de imbibición. A su vez se presenta de tres formas diferentes:

2a) Con humedades entre el H_{sf} y una humedad cercana al 16% agua en forma de condensación en los tubos capilares.

2b) Con humedades entre el 8-12% y el 16% aparece una agua de adsorción, en uniones de puentes de hidrógeno. La energía necesaria para extraer esta agua es muy alta.

2c) Con humedades por debajo del 8-12% aparece el agua de sorción molecular, en los espacios entre la interfibrilla elemental. Es un agua unida por puentes de hidrógeno y de la que es muy costosa energéticamente su extracción.

3) Agua de constitución. Es la que entra a formar parte de los compuestos químicos que constituyen la madera. Su eliminación o disminución origina la destrucción de la madera.

Este agua forma parte de la madera aunque su humedad sea del 0%.

FORMULAS RECOGIDAS EN LA BIBLIOGRAFIA.

Aparte de la conocida fórmula de Dulong que facilita el poder calorífico de cualquier combustible en función de los tantos por uno de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre:

$$PCIO = 8100 c + 34000 (h - o/8) + 2500 s \text{ (en Kcal/Kg).}$$

una de las primeras fórmulas recogidas en la bibliografía es la fórmula citada por Kollman (1959):

donde h es el tanto por uno de hidrógeno en la madera seca y los poderes caloríficos son medidos en Kcal/Kg.

En la fórmula anterior no se considera si la humedad de la madera está por debajo o por encima del punto de saturación de la fibra; pero sí se considera el hecho de que la madera tiene hidrógeno y éste hidrógeno al quemarse desprende agua que, en el caso del PCS0 se recoge condensada, mientras que en el caso del PCI se supone se pierde al medio ambiente.

La fórmula de Nierat, citada por Doat y Valette (1981): $PCSH = PCS0 - 600 \cdot H_h$.

La fórmula de Elvira y Hernando (1989) nos parece muy acertada, pero requiere el conocimiento de ciertos valores a veces no disponibles :

donde PCmp es el poder calorífico de la materia prima, en este caso madera.

g= agua de constitución.

e_1 = extractos sólidos no evaporables.

m= elementos minerales no combustibles.

PCR = Poder calorífico de los productos secos, no evaporados, distintos de la celulosa y lignina; procedentes de sustancias que impregnan la madera.

PCV = Poder calorífico de los extractos volátiles.

e_2 = extractos volátiles.

Teniendo en cuenta la situación del agua en la madera podemos presentar la tabla 1, donde:

H_{sf} = Humedad del punto de saturación de la fibra. Depende de la madera y podemos considerar un valor medio del 0,3 (en base seca).

H_{cap} = Humedad por encima de la cual el agua está retenida por capilaridad. Depende de la especie de madera. Un valor medio es del 0,16 (en base seca).

H_{ads} = Humedad por encima de la cual el agua está retenida por adsorción molecular. Depende de la especie de madera. Es un valor variable entre el 0,08 y el 0,12 (en base seca).

Calculando los valores de Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7 y Q8 se obtienen las fórmulas siguientes:

$$PCSH = (1 - H_h) \cdot PCS0 - H_h \cdot C_e \cdot dT - QC \quad (I)$$

donde PCS_H = Poder calorífico superior a la humedad H (base húmeda).

H = Humedad de la muestra, en base húmeda, en tanto por uno.

C_e = Calor específico del agua. 1 Cal/g.°C.

T = Temperatura de la muestra a ensayar.

H = Humedad del punto de saturación de la pared celular (punto de saturación de la fibra).
Depende de la especie. En tanto por uno.

$$QA = H_h \cdot C_e \cdot dT$$

en (I) QC depende de la humedad:

- Si H_h es mayor que H_{sf} : $QC = (H_{sf} - H_{cap}) \cdot C_{cap} + (H_{cap} - H_{ads}) \cdot C_{ph1} + H_{ads} \cdot C_{ph2}$

- Si H_h es menor que H_{sf} y mayor que H_{cap} : $QC = (H_h - H_{cap}) \cdot C_{cap} + (H_{cap} - H_{ads}) \cdot C_{ph1} + H_{ads} \cdot C_{ph2}$

- Si H_h es menor que H_{cap} y mayor que H_{ads} : $QC = (H_h - H_{ads}) \cdot C_{ph1} + H_{ads} \cdot C_p$

- Si H_h es menor que H_{ads} : $QC = H_h \cdot C_{ph2}$.

donde:

C_{cap} = Calor necesario para extraer un gramo de agua de la madera, cuando el agua está unida por capilaridad. En Cal/g.

C_{ph1} = Calor necesario para extraer un gramo de agua de la madera, cuando el agua está unida por puentes de hidrógeno mediante adsorción. En Cal/g.

C_{ph2} = Calor necesario para extraer un gramo de agua de la madera, cuando el agua está unida por puentes de hidrógeno mediante sorción. En Cal/g.

$$\text{Obteniendo } PCS_0 = (PCS_H + QA + QC) / (1 - H_h) \quad (1)$$

A partir de esta fórmula y de la fórmula:

$$PCI_0 = PCS_0 - A_c \cdot C_l \quad (2)$$

siendo A_c = Agua de constitución, en tanto por uno. C_l = Calor latente de vaporización, Cal/g.

y haciendo consideraciones similares a las anteriores obtendremos:

$$PCI_H = PCS_H - (1 - H_h) \cdot A_c \cdot C_l - 600 ((H_h - h) (1 - H_h)) \quad (3)$$

donde el término $600 ((H_h - h) (1 - H_h))$ es el calor empleado en vaporizar agua si el combustible tiene una humedad H_h y h es el tanto por 1 en hidrógeno respecto al peso seco.

De (I) y (3) finalmente obtenemos:

$$PCI_H = (1 - H_h) \cdot PCS_0 - QA - QC - (1 - H_h) \cdot A_c \cdot C_l - 600 ((H_h - h) (1 - H_h)) \quad (4)$$

Si en la fórmula (4) despreciamos los valores de QA se comete un error máximo que depende de la humedad y cuyo valor es $1,625 \cdot H$, siendo $H < 0,3$. Por tanto el máximo error al desestimar QA es de $0,04875\%$. Con QC el error máximo depende de la especie y humedad, de muy variable y difícil estimación pero siempre inferior al $0,8\%$. Y teniendo en cuenta que puede despreciarse el valor del producto $h \cdot H$. Queda, en primera aproximación, la fórmula:

$$PCI_H = (1 - H_h) \cdot PCS_0 - (1 - H_h) \cdot A_c \cdot C_l - 600 (H_h - h) \quad (5)$$

El valor de $(1-H_h).A_c.C_l$ es, como máximo, 1,09% del valor total por lo que puede ser también despreciado, para usos industriales. Si estimamos $h=0,06$ quedando (5) de la forma:

$$PCI_H = (1-H_h). PCSO - (1-H_h).A_c.C_l - 600 (H_h - 0,054) \quad (6)$$

o lo que es lo mismo, referido a humedad en base seca:

$$PCI_H = (PCSO - 600 (0,946 H_s - 0,054)) / (1 + H_s) \quad (6')$$

Los estudios de regresión empleados, con los resultados de 3 pinos españoles, demuestran que la fórmula (4) es la que más se adecua a la realidad. Pero, a efectos industriales es más fácil de utilizar la fórmula (6); cuyo error con respecto a la (4) es menor cuanto menor sea la humedad; el error máximo cometido es del 1,93875%.

CONCLUSIONES.

- 1) La variable que más influye en el poder calorífico de la madera es la humedad.
- 2) Se recomienda, para uso de la investigación, construir tablas de valores del poder calorífico superior anhidro de las distintas maderas. Para ello, se hacen estudios en laboratorio y a partir del poder calorífico superior a la humedad H y la fórmula 1 se obtiene el poder calorífico superior anhidro.
- 3) Se recomienda, para usos industriales el encargo del ensayo en bomba calorimétrica de la muestra que desea utilizarse. Si esto no es posible se recomienda utilizar los valores del poder calorífico superior anhidro y utilizar la fórmula (6) para la obtención del poder calorífico inferior húmedo.

BIBLIOGRAFÍA

- CARRETERO CARRERO R. et all (1992), La madera como combustible renovable, IV Jornadas Forestales de Cuenca, Cuenca.
- DOAT J. y VALETTE J.CH. (1981), Le pouvoir calorifique superieur d'espèces forestieres mediterraneenes. Ann. Sci. Forest. 38-4.
- ELVIRA L. y HERNANDO C. (1989), Inflamabilidad y energía del sotobosque, INIA, Madrid.
- KOLLMAN, F. (1959), Tecnología de la madera y sus aplicaciones, IFIE, Madrid.
- MARCOS F. Y HERNANDO A. (1986), Consideraciones en torno al poder calorífico de las especies forestales españolas. VI Conf. Plan. Ah. y Alt. Energéticas. Zaragoza.
- VILLEGAS, S Y MARCOS F.(1987), Propiedades físicas que condicionan el aprovechamiento energético de la madera, XIX Conf. Int. Maq. Agric. Zaragoza. pp. 241-250.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es fruto de un proyecto de investigación subvencionado por la Universidad Politécnica de Madrid, es mi deseo mostrar aquí mi agradecimiento a esta Universidad. También deseo expresar mi agradecimiento a los profesores Carretero, Elvira y García Andrés que dirigieron los primeros trabajos de cálculo de poderes caloríficos. Igualmente al profesor

Godino que colaborará en el trabajo de investigación. Especialmente agradecido a Carlos Gimeno, que ya nos dejó y que comenzó estos trabajos.

Materia	Humedad	Masa	Calor desprendido	Calor absorbido
Agua	$> H_{sf}$	$H_h - H_{sf}$	Q1	Q2
Agua	$< H_{sf}, > H_{cap}$	$H_{sf} - H_{cap}$	Q3	Q4
Agua	$< H_{cap}, > H_{ads}$	$H_{cap} - H_{ads}$	Q5	Q6
Agua	$< H_{ads}$	H_{ads}	Q7	Q8
Madera		$1 - H_h$	Q9	Q10
TOTAL		1	$Q1 + Q3 + Q5 + Q7 + Q9$	$Q2 + Q4 + Q6 + Q8 + Q10$

Tabla 1: Humedad y calor en la madera.