

CÁLCULO DE LA EXERGÍA DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

Maria I. Fernández P. -mariai@fem.unicamp.br.

Universidade Estadual de Campinas, Fac. de Engenharia Mecânica, Departamento de Energía.
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Campinas - SP – Caixa Postal: 6122 - CEP 13083-970

Silvia A. Nebra P. -sanebra@fem.unicamp.br.

Universidade Estadual de Campinas, Fac. de Engenharia Mecânica, Departamento de Energía.
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Campinas - SP – Caixa Postal: 6122 - CEP 13083-970

Arnaldo Martínez R. -arnaldo@fim.ceefe.uo.edu.cu

Universidad de Oriente. (SEDE MELLA) Fac. de Ingeniería Mecánica. Centro de Estudios de Refrigeración "Luis Fernando Brossard Pérez".

Avenida Las Américas s/n esquina L. Santiago de Cuba 90900. Cuba.

Resumen. *En el trabajo se presenta el cálculo de la exergía de la caña de azúcar considerándola como la suma de la exergía de la fibra seca sin sacarosa; y la exergía del jugo formado por todo el contenido de sacarosa y agua de la caña. Para el cálculo de la exergía tanto de la fibra como del jugo, se parte de un estudio bibliográfico donde se obtienen los diferentes rangos de variación de la composición química de la caña de azúcar y por consiguiente de la composición de la fibra en caña, obtenida para el bagazo y las diferentes expresiones del poder calorífico de la fibra. Los resultados obtenidos muestran que la exergía de la fibra tal como fué considerada, totalmente seca y sin jugo, depende en lo fundamental de su composición química, siendo el coeficiente β aproximadamente de 1,14 y la exergía media de la fibra de 2329 kJ/kg caña. Considerando el ambiente de referencia propuesto por Szargut, en la determinación de la exergía del jugo se obtiene que la componente de mezcla del jugo no influye prácticamente en el resultado de la exergía total siendo el valor de la exergía química el que define su valor medio de 2814,25 kJ/kg de jugo y 2380 kJ/kg de caña. El valor medio de la exergía de la caña obtenida para una composición de :8-18 % de fibra, 75-82 % de agua y 14,5 a 22 % de sacarosa es de 4709 kJ/kg caña.*

Palabras Claves: *Exergía de la caña de azúcar, exergía, caña de azúcar*

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar está conceptuada como : Una planta de características excepcionales capaz de sintetizar carbohidratos solubles y material fibroso a un ritmo muy superior al de otros cultivos comerciales, (Suarez et al, 1992), propiedad que la convierte en uno de los recursos renovables mas importantes, por el corto periodo de renovación y .por sus potencialidades en la producción de cientos de derivados, de los que el azúcar continua siendo de modo general el producto principal.

En la tecnología de la producción azucarera, (Fauconier,1980) , la diferencia en Caña Agrícola y Caña Industrial. Caña agrícola es denominada desde que nace hasta que se procesa para ser llevada al ingenio; y es designada como industrial desde que llega a la desmenuzadora, donde comienza a transformarse en jugo y bagazo. Esta última está formada no solo por los tallos de las plantas sino también por todas las materias extrañas que los acompañan, como paja, cogollo, tierra etc.

Son escasos los trabajos de aplicación de los métodos exergéticos a la industria azucarera donde predominan aún los balances energéticos (análisis basados solamente en la primera ley de la termodinámica) como consecuencia de la complejidad propia del proceso y la falta de datos disponibles acerca de los valores de las exergías de los flujos que participan, siendo uno de estos flujos la caña de azúcar.

El cálculo de la exergía de la caña industrial, objeto de este trabajo, estará influenciada por sus características fisico-químicas, morfológicas y por su composición elemental. La determinación de la exergía de la caña agrícola además estará influenciada por variables mucho más complejas como las características del suelo, de las semillas, de los tipos y cantidades de fertilizantes, de la época del año, de la forma de corte, transportación, acopio, preparación previa etc

Se destacan en esta esfera los trabajos de (Baloh,1980), (Calvo,1991), quienes asignan a la caña de azúcar valor de exergía nula cero, entiéndase por exergía nula, la exergía química. Aunque conceptualmente aceptan la existencia de un potencial químico, al aplicar el método no lo consideran, a juicio de los autores por considerar la caña de azúcar en el ambiente de referencia .

La caña de azúcar se encuentra en equilibrio térmico y mecánico con el medio ambiente mas no en equilibrio químico con él, es este desequilibrio lo que constituye su exergía química y sus potencialidades para obtener sus derivados.

2. DESARROLLO.

La caña industrial constituida en lo fundamental por los tallos de las plantas es un sistema bifásico sólido líquido , la fase sólida es un complejo celuloso-lignocelulosa y pentosan, conocido generalmente como fibra, que forma canales en los entrenudos en los que se aloja el jugo, una solución acuosa conteniendo una gran variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas de las que cerca del 90 % es sacarosa, (Spencer and Meade, 1976).

La composición elemental de la caña de azúcar varía de un autor a otro en dependencia de la complejidad y número de variables que influyen en su cultivo. La Tabla 1 recoge un resumen de la composición elemental de la caña obtenida en la bibliografía consultada según diversos autores y que sirve como base a los cálculos realizados en este trabajo.

Tabla 1.- Composición Elemental de la Caña de Azúcar

Autor	Fibra	Agua	Sacarosa	Glucosa	Fructuosa
Leme Jr. 1965	8 - 18	65 -75	11 - 18	0,1 - 1	0 - 0,6
Jackson 1990	8 - 4	75 -82	14,5 - 22	0,3 - 1,1	0 - 0,7
Spencer , 1967	11 -16	73 -76	7,8 - 14	0,2 - 6,4	0,2 - 6,4
Howard P, 1982	12,5	72	15,5	-	-
Noa, 1991	12,21	71	14,1	1,33	-

En la Tabla 1 solo aparecen reflejados los valores de los elementos que aportan a la exergía química de la caña. Puede ser observado que el rango mas amplio de variación de la fibra lo presenta (Leme Jr,1965) con un rango de variación de 8 a 18 % de fibra en caña, el rango mas amplio de variación del contenido de agua y sacarosa lo reporta (Jackson,1990) en un rango de 75 a 82 % de agua en caña y de 14,5 a 22 % de sacarosa, en caña.

La exergía de la caña, tomando como base sus características fisico-químicas y morfológicas, fue aceptada como la suma de la exergía de la fibra totalmente seca y de una disolución binaria agua- sacarosa (el jugo), "Eq. (1)"

$$b_{chca} = b_{chfibra} + b_{chjugo} \quad (1)$$

2.1 Cálculo de la exergía de la fibra.

Considerando que las transformaciones que sufre la fibra durante el proceso de molienda son transformaciones físicas y no químicas que la convierten de fibra en bagazo fue considerada como un combustible seco empleando la "Eq. (2)" propuesta por Szargut 1988, para combustibles técnicos sólidos. En el caso que nos ocupa por ser la que mas se asemeja a la estructura química del bagazo fué usada la ecuación propuesta por Szargut para la madera.

$$\beta = \frac{b_{ch}}{C_F} = \frac{1,042 + 0,2160(ZH / ZC) - 0,2499(ZO / ZC)[1 + 0,78849(ZH / ZC)] + 0,0450(ZN / ZC)}{1 - 0,3035(ZO / ZC)} \quad (2)$$

Para la determinación del coeficiente β se realizó una recopilación de datos bibliográficos brindados por diferentes autores y que aparecen en la Tabla 2, referenciados por (Baloh,1995); y (Hugot, 1986).

Tabla 2.- Composición Elemental de la Fibra Según Diversos Autores

Autor	C	H	O	N	ZO/ZC	ZH/ZC	β
Deer, 1921	46,5	6,5	46	-	0,9892	0,1398	1,139
Tromp,1938	44,0	6,0	48	-	1,091	0,1364	1,149
Kelly, 1966	48,2	6,0	43,1	-	0,8942	0,1245	1,129
Davies, 1947	47,9	6,7	45,4	-	0,9478	0,1399	1,135
Gregory, 1944	48,1	6,1	43,3	-	0,9002	0,1268	1,130
Paturan, 1944	46,5	5,9	44,7	-	0,9613	0,1269	1,136
Werner, 1966	49,1	5,8	41,5	0,2	0,8452	0,1181	1,124
Dixon, 1988	46,2	5,7	42,1	0,3	0,9113	0,1234	1,131
Beatón, 1991	46,8	6,0	43,3	-	0,9252	0,1282	1,132
Horst, 1983	46,78	5,99	43,33	-	0,9252	0,1282	1,132
Hugot, 1986	47	6,5	44	-	0,9362	0,1383	1,134
Valores Medios	47,5	6,1	44,4	-	0,9347	0,1284	1,133

La exergía química de la fibra es función directa del valor calórico según la "Eq.(3)".

$$b_{ch} = \beta(C_1 + LZ_w) + b_{chw} Z_w = \beta(C_F - 9LZH_2) + b_{chw} Z_w \quad (3)$$

Al considerar la fibra totalmente seca, la Eq.3 se transforma en la "Eq.(4)"

$$b_{ch} = \beta C_1 \quad (4)$$

En la Tabla 3 se presentan los valores de valor calórico bajo calculados según las diferentes ecuaciones propuestas en la bibliografía por diversos autores, considerando que la fibra está totalmente seca y no contiene sacarosa, para las diferentes composiciones elementales reflejadas en la Tabla 2.

El valor más próximo al valor medio obtenido es el reportado por (Hugot, 1986) para las Islas Mauricio.

Ajustando todos los valores calóricos obtenidos por los diferentes autores a una distribución normal se puede afirmar que, para una tolerancia de $\pm 5\%$ se obtuvo un 99% de confianza que la media esté entre los valores determinados.

Tabla 3.- Poder Calórico Inferior de la Fibra Totalmente Seca y Sin Sacarosa

Autor	Valor Calórico bajo (KJ/Kg fibra)	Valor Calórico para 8-18 % fibra en caña (kJ/kg caña)
Mendeleiev	17435	13948,0 - 3138,3
Caio Glauco, 1994	14400	1152,0 - 2592,0
Silva et al, 1998	18687	1495,0 - 3363,7
Hugot, 1986	17371	1389,7 - 3126,8
Sudáfrica, 1986	18309	1464,7 - 3295,6
Pritzelwitz Hugot	177790	1423,2 - 3202,2
Hessey	18104	1448,3 - 3258,7

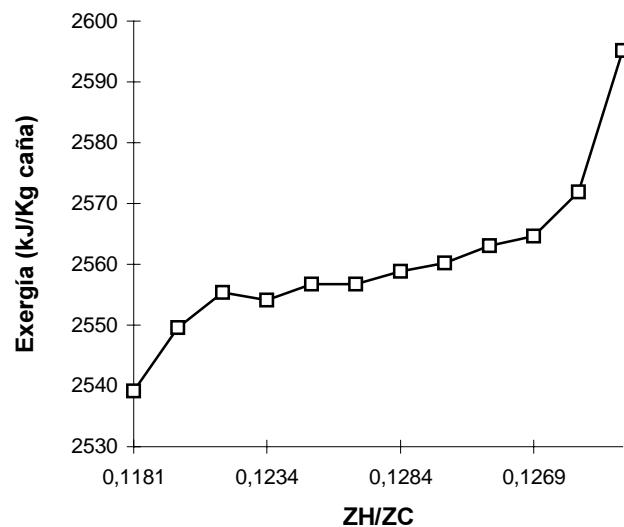


Fig 2.- Exergía de la fibra en función de la relación Hidrógeno/Carbono

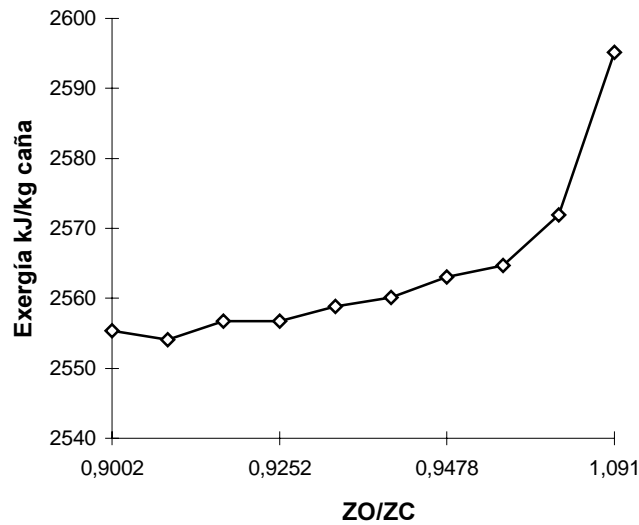


Fig 1.-Exergía de la fibra en función de la relación Oxígeno /Carbono

A partir del valor medio de valor calórico reportado (Hugot,1986) para las Islas Mauricio; y para las relaciones oxígeno/ carbono y hidrógeno/carbono se determinaron los valores de exergía media de la fibra en función de esos coeficientes que son presentados en las Figuras 1 y 2. en función de la relación oxígeno carbono e hidrógeno carbono.

2.2 Cálculo de la exergía del jugo de la caña de azúcar.

El jugo, o caldo, es en general una disolución múltiple de sustancias orgánicas e inorgánicas, donde cerca del 90 % de las sustancias orgánicas es sacarosa y una mínima fracción (2-4 %) es glucosa y fructuosa, por lo que para los efectos del cálculo se considera una disolución binaria agua- sacarosa, (ver Tabla 1)

(Guallar,1987) divide la exergía química de una mezcla genérica en dos componentes, una componente reactiva y una componente de mezcla, ver "Eq. (5)"

$$b_m = b_r + b_{mezcla} \quad (5)$$

siendo:

b_m .- La exergía de la mezcla binaria agua – sacarosa.

b_r .- La denominada exergía reactiva, que corresponde a las exergías de referencia.

b_{mezcla} .- La exergía que corresponde al proceso de mezcla de los componentes.

$$b_r = \sum_{i=1}^n x_i \tilde{\epsilon}_i^0 \quad (6)$$

donde:

x_i .- Fracción molar del componente i en la disolución.

$\tilde{\epsilon}_i^0$.- Exergía de referencia del componente i en la disolución.

$$b_{mezcla} = -RT_0 \sum_{i=1}^n \ln a_i \quad (7)$$

siendo.

R .- Constante Universal de los gases.

T_0 .- Temperatura del ambiente de referencia, 25 °C.

a_i .- Actividad del componente i en la disolución.

Sustituyendo la "Eq.(6)" y "Eq.(7)" en la "Eq.(5)" se obtiene la "Eq.(8)"

$$b_m = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \tilde{\epsilon}_i^0 - RT_0 \sum_{i=1}^n \ln a_i \quad (8)$$

Los valores de $\tilde{\epsilon}_i^0$ (exergías de referencia de la sacarosa y el agua) fueron tomados de (Kotas, 1995).

$$\tilde{\epsilon}_i^0 = 3120 \text{ kJ/kmol de agua}$$

$$\tilde{\epsilon}_i^0 = 6033090 \text{ kJ/kmol de sac}$$

Siendo que la actividad del componente en la disolución reportada por a_i (Velezmoro et al, 1999)

De acuerdo con los datos de la Tabla 1 se determinan las fracciones molares como:

$$x_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{ag} / \dot{m}_j}{\dot{m}_{ag} / \dot{m}_j + \dot{m}_{sac} / \dot{m}_j} \quad (9)$$

$$x_{sac} = \frac{\dot{m}_{sac} / \dot{m}_j}{\dot{m}_{ag} / \dot{m}_j + \dot{m}_{sac} / \dot{m}_j}$$

(10)

siendo :

m_{sac} , m_j .- masa de sacarosa y jugo respectivamente.

A partir de la Tabla 1 se construye la Tabla 4 en la que especifica la composición del jugo de la caña según los diferentes autores consultados en la literatura.

Tabla 4.- Composición del Jugo en la Caña de Azúcar

Autor	Agua % en caña	Azúcares % en caña	Jugo % en caña	Sacarosa % en jugo	Agua % en jugo
Leme Jr, 1965	65-75	11.1-19,6	76,1-94,06	14,58	85,42
Jackson ,1990	75-82	14,8-23,8	89,8-104	16,48	83,52
Spencer, et al 1967	73-76	8,2-26,8	80,8-102,8	10,15	89,85
Howard Payne,1982	72	15,5	87,5	17,71	82,29
Noa et al, 1991	71	15,43	86,43	17,85	82,15

En la Tabla 5 se presentan los valores calculados de las fracciones molares para el agua y la sacarosa segun cada uno de los autores

Tabla 5.- Exergía del Jugo en la Caña de Azúcar.

Autor	x_{sac}	x_{agua}	b_r (kJ/kgjugo)	b_{mezcla} (kJ/kgjugo)	b_m (kJ/kgjugo)	b_m (kJ/kgcaña)
Leme Jr, 1965	0,010	0,990	2983,30	-7,52	2990,82	2276,01
Jackson, 1990	0,010	0,990	2983,30	-7,52	2990,82	2685,78
Spencer , 1967	0,006	0,994	1564,90	-4,871	1569,77	1268,37
Howard ,1982	0,011	0,982	3266,98	-7,07	3259,91	2852,42
Noa et al, 1991	0,011	0,989	3267,00	-7,07	3259,91	2817,54

3. CONCLUSIONES

La Tabla 2 muestra que para los valores medios de composición de la fibra en caña, los valores de la relación exergía /poder calorífico son prácticamente constantes e igual a 1,14, que corresponde a los valores obtenidos por Szargut para combustibles sólidos. Este valor es influenciado, no por el porcentaje de fibra en caña, el que afectará solamente el valor total de la exergía (y no el valor específico) y si por la relación O/C e H/C, siendo prácticamente despreciable la influencia del contenido de nitrógeno motivo por el cual la mayoría de los autores no lo consideran.

Los valores medios de la exergía de la fibra oscilaron entre 2540 y 2600 kJ/Kg de caña para los valores medios de composición química y valor calórico reportados en la literatura, (ver Tabla 3 y Fig 1 y Fig 2), siendo el valor medio de la exergía de la fibra de 2329 kJ/kg caña.

Es evidente en la Tabla 5 que los valores de la exergía del jugo de la caña de azúcar están influenciados fundamentalmente por la componente reactiva de la exergía de mezcla calculada para el ambiente de referencia propuesto por Zsargut, (1998), siendo el jugo una disolución diluída de fracciones molares del agua y la sacarosa, prácticamente constante para los valores de azúcares y porcentos de agua reportados en la literatura especializada.

La componente de mezcla de la exergía del jugo, Tabla No.5, es prácticamente despreciable comparada con la exergía reactiva pues sólo representa el 0.25% de la misma, cuyo valor medio es de 2605,06 kJ/kg de caña; y 0,29 % del valor de exergía media total del jugo obtenido, que es de 2814,25 kJ/kg de jugo y 2380 kJ/kg de caña.

El valor total medio de la exergía de la caña calculado será la suma de la exergía de la fibra y de la exergía del jugo igual a 4709 kJ/kg caña.

4. **AGRADECIMIENTOS:**

Los autores agradecen al Ingeniero Eduardo José Cidade Cavalcanti la colaboración en el tratamiento estadístico de los datos y su presentación.

Agradecen también a CAPES y CNPq por el apoyo financiero.

5. **BIBLIOGRAFÍA**

Baloh, T. 1980, Methodology of energy investigations in the cane sugar industry. Workshop on relational energy utilization in cane sugar industry. Habana Cuba

Baloh, T, & Wittward E, 1995, Manual de Energía de Fábricas de Azúcar.

Beaton P, Silvia E, 1991, Pruebas de Balance Térmico en Calderas para Bagazo. ENPES. Santiago de Cuba.

Calvo G. Alberto. 1991, Aplicaciones del Método Exergético de Análisis a la Industria Azucarera". Tesis de doctorado. Cuba.

Fauconnier, B. D. 1980 "La Caña de Azúcar". Editorial Científico Técnica. La Habana..

Guallar P.J. 1987, Análisis Exergético e Integración Térmica de Procesos en la Industria Azucarera". Tesis doctoral . Zaragoza España..

Horta N. L.A , Nebra S. A., Oliveira J. S. 1994, Análise Exergetica de Processos. ENCIT 94. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil,

Howard P. J. 1982, Unit Operations in Cane Sugar Products. Elsevier Scientific Company. Sugar series 4. New York.

Hugot E. 1986, Handbook of Cane Sugar Engineering. Sugar Series 7. Elsevier Science. Publishing.

Jackson E.B. 1990, Sugar Confectionary Manufacture Technical service Manager. Confectionary Industries. Cerestar U.K. Edit. Blackie and Son LTD.

Jenkins B.M. 1990. "Fuel Properties of Biomass Materials". International Symposium on application and management of Energy in agriculture. The role of biomass fuels IIT. Delhi. India 21-23 Mayo .

Kotas T.J. 1995, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis" Kreger Publishing Company. Malabar, Florida,.

Leme Junior J. 1965, Açucar de Cana. Imprenta Universitaria. Universidad Rural Estado de Minas Gerais. Viçosa.

Noa, 1991, La diversificación de la Industria de la Caña de Azúcar. GEPLACEA. Mexico.

Rivacoba R.S., Garcia A. L., Fernández N. Gonzalez L, Cabello A. 1992, La Caña de azúcar como base de un desarrollo agro-industrial sostenible. Conferencia Mundial sobre el Desarrollo y Medio Ambiente. Rio de Janeiro, São Paulo. Brasil.

Rodríguez A.A, Leal R.L, Betancourt LP, Lan YC, Bravo TM, 1992, Manual de las propiedades físico-químicas de los combustibles sólidos disponibles en Cuba. AID de Combustión. Empresa de Fertilizantes Nitrogenados de Cienfuegos..

Silva M. A., Nebra S. A. Machado Silva M.J., Sanchez C.G. 1998, The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee and bioenergy coffee industry. Biomass and Bioenergy. Vol.14 N0 5/6 pp 457-467. Great Britain,.

Szargut J., Morris D.R. Steward F.R., 1988, Exergy Análisis of Thermal, Chemical and metallurgical Process. Hemisphere Publishing Corporation. USA,

Valero C.A, Lozano S.M A., 1994, Curso de Termoeconomía. Centro Politécnico Superior de Ingeniería. Universidad de Zaragoza. UNICAMP..

Spencer and Meade 1967,.Manual del Azúcar de Caña. Editorial Montaner y Simón S.A Barcelona. España,

SUGARCANE EXERGY CALCULATION

Abstract: *This paper presents a sugarcane exergy calculation, carried out considering the material as constituted by dry fibre and juice, being the last one that includes all the sucrose and water present in sugarcane. The variation intervals of sugarcane chemical composition; and consequently the chemical composition of fibre and juice were obtained from a bibliographic research. The final results show that, the fibre exergy, as was considered, totally dry and without sucrose, is a function of its chemical composition only. The quotient between the exergy and the low calorific value has a middle value of 1,14 and the middle value of its exergy was 2329 kJ/kg of cane. Based on the environmental reference proposed by Szargut for the sugarcane juice exergy determination, it was obtained that the mixture component of juice exergy has no practical influence in the total exergy juice value, being the value of the reactive exergy component the determining of a middle value of sugarcane juice exergy of 2814,25 kJ/kg of juice and 2380 kJ/kg of cane. The sugarcane exergy value obtained for 8-18 % of fiber , 75-82 % of water and 14,5 - 22 % of sucrose was 4709 kJ/kg of cane.*

Keywords: Sugarcane exergy, Exergy, Sugar cane. Sugar-cane