

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

A BIOMASSA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Código: CON-2016-1047

Rafael Fernando Zotto, rafael.zotto@gmail.com¹

Edson Bazzo, e.bazzo@ufsc.br¹

¹Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (LabCET)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 88.040-900, Brasil

Resumo: O poder calorífico representa a quantidade de energia liberada durante a combustão completa e para todos os combustíveis sólidos e a maioria dos combustíveis líquidos é experimentalmente medido com um dispositivo denominado bomba calorimétrica. Na literatura técnica encontra-se numerosas formulações empíricas e estatísticas para estimar o poder calorífico dos combustíveis a partir de sua composição elementar. Este trabalho apresenta uma seleção dessas formulações para o cálculo do poder calorífico superior e inferior. Todas essas formulações foram utilizadas para calcular o poder calorífico com base em dados de medições da composição elementar fornecidos na literatura para algumas biomassas. Os resultados calculados foram avaliados em relação aos seus valores medidos apresentados nas mesmas referências bibliográficas. São apresentados o mínimo, o máximo e a média dos desvios absolutos encontrados para cada equação de predição do poder calorífico. As equações com melhores resultados para o poder calorífico superior e inferior apresentaram desvios médios inferiores a 3% e 5%, respectivamente.

Palavras-chave: biomassa, lenha, cavacos de madeira, bagaço de cana, poder calorífico

1. INTRODUÇÃO

Apenas a pouco mais de 100 anos a biomassa figurava como a principal fonte de energia no mundo. Embora tenha perdido espaço inicialmente para o carvão e, posteriormente, para o petróleo e o gás natural, sempre teve uma representação significativa na matriz energética mundial. No entanto, é difícil a contabilização de grande parte da biomassa utilizada para fins energéticos devido à precariedade e falta de informações oficiais (ANEEL, 2005). Apesar disso, estima-se que, atualmente a biomassa represente 10% da oferta de energia primária total no mundo (IEA, 2015). No Brasil, a biomassa responde atualmente por cerca de 24% da oferta interna de energia. Devido ao pujante crescimento na demanda por energia, a oferta de biomassa mais do que dobrou desde 1970 (EPE, 2015). Entretanto, o Brasil possui enorme diversidade e disponibilidade de biomassa que pode ser ainda melhor explorada, em função de sua área territorial continental, do solo e condições climáticas adequadas.

A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, respondendo atualmente por quase 10% do total de geração instalada no país (ANEEL, 2016). O bagaço de cana e a madeira (incluindo seus resíduos e derivados) são as biomassas mais representativas como fonte de energia para geração de eletricidade. Neste contexto, é importante conhecer as características desse tipo de combustível, a fim de se determinar sua potencialidade e, portanto, poder avaliar se este está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade. Algumas características são comuns a todos os combustíveis, como o poder calorífico e a composição química, enquanto outras são específicas. Dentre elas, pode-se destacar para a biomassa o teor de umidade, densidade e a granulometria. A densidade do combustível tem influência no método de transporte e nos custos associados, na necessidade de espaço para armazenagem e nas exigências para manuseio e alimentação do combustível. A granulometria da biomassa é variável importante nas aplicações de queima em suspensão. O teor de umidade é uma propriedade que varia de modo bastante amplo na biomassa, o que influencia significativamente os processos de combustão, dificultando seu controle.

Neste trabalho são apresentadas formulações empíricas e estatísticas desenvolvidas por diversos pesquisadores para estimar o poder calorífico dos combustíveis a partir de sua composição elementar. Com base na composição elementar dos combustíveis, os resultados obtidos foram comparados com valores medidos em laboratório, fornecidos pelas referências indicadas para algumas biomassas, apresentando-se ao final a média dos desvios absolutos encontrados para cada equação de predição do poder calorífico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com descrição apresentada por Spliethoff (2010), o termo biomassa representa todo material de origem orgânica, incluindo organismos vegetais e animais, seus respectivos resíduos e, no sentido mais amplo, todos seus produtos e subprodutos ou resíduos destes, como papel ou celulose, resíduos orgânicos da indústria alimentícia e lixo orgânicos domésticos, comerciais e industriais. Entretanto, o conceito de biomassa é tratado de forma diferente de um país para outro, existindo países que distinguem a biomassa e os combustíveis derivados de resíduos.

2.1. Processo de Combustão da Biomassa

A queima direta ou combustão é, em geral, basicamente a tecnologia de conversão energética mais antiga e comercialmente difundida aplicada para biomassa. Através da composição imediata é possível verificar que a biomassa é um combustível rico em voláteis, que constituem quase três quartos do seu peso. De acordo com Hellwig (1985, *apud* Nogueira e Lora, 2002), o processo de combustão da biomassa ocorre em seis etapas consecutivas bem definidas: secagem; emissão dos voláteis; ignição dos voláteis; queima dos voláteis em chama; extinção da chama dos voláteis; combustão do resíduo de coque. A Figura 1 mostra a fração em massa consumida durante a combustão e a temperatura correspondente a cada uma destas etapas para o caso da queima de madeira.

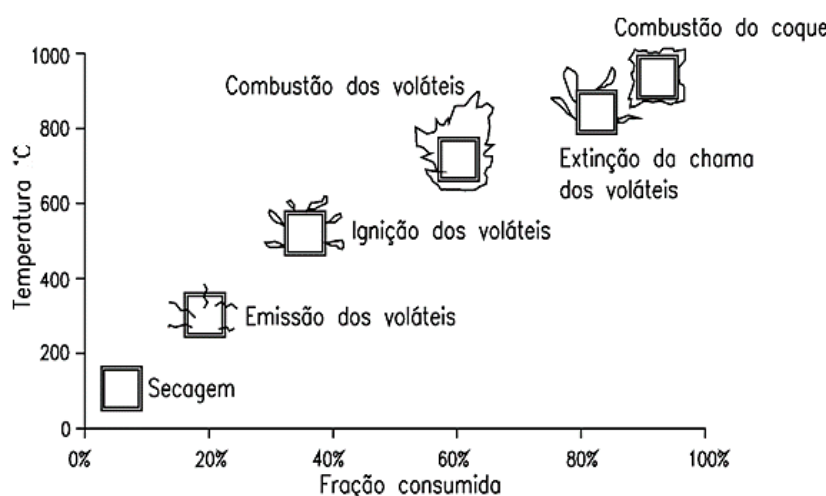


Figura 1. Etapas de combustão da madeira (Nogueira e Lora, 2002).

Deve-se considerar, evidentemente, que o processo de combustão da biomassa ocorre primeiramente em uma etapa homogênea (queima dos voláteis) e posteriormente em uma etapa heterogênea (combustão do resíduo de coque). A umidade presente na biomassa é um fator importante na combustão. Na primeira etapa, a água presente no combustível começa a evaporar. A secagem da partícula é necessária antes da fase de emissão e ignição dos voláteis. Desta forma, elevados teores de umidade atrasam a ignição e reduzem a temperatura de combustão, afetando a qualidade do processo (Hellwig, 1985 *apud* Werther *et al.*, 2000).

Quando a combustão da biomassa ocorre em leito fixo sobre uma grelha, os voláteis são liberados e queimados sobre a cama. Sendo assim, é conveniente dividir o fluxo de ar de combustão em duas partes: o ar primário que é utilizado para a combustão do coque e o ar secundário utilizado para a combustão dos voláteis. O ar secundário é também importante para garantir a combustão completa das partículas de coque arrastadas com os gases do leito.

2.2. Composição da Biomassa

O conhecimento da composição elementar é a base para análise dos processos de combustão, tais como o cálculo das quantidades de ar e gases. Determinada a partir de amostras da biomassa, representa a fração mássica de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W), cinzas (Z), entre outros elementos que constituem o combustível. Também é comum a determinação do conteúdo das amostras em termos de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas, o que é denominado de composição imediata. A biomassa possui elevado percentual de voláteis em sua constituição, os quais tem papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão. Os dados de composição elementar e imediata são expressos, geralmente, em base seca ou base úmida. Esta última também é conhecida como base de trabalho. A base seca é frequentemente utilizada na literatura técnica para tornar os dados de aplicação geral, independente da umidade. Algumas vezes os valores também são encontrados em base seca e livre de cinzas. É importante observar a correta conversão entre as essas bases para não incorrer em erros nos cálculos de combustão.

Na Tabela 1 são apresentados a composição elementar em base úmida e o poder calorífico medido para algumas biomassas, com base nos dados fornecidos nas referências indicadas. Em geral, observa-se que a biomassa possui elevados

teores de oxigênio, que juntamente com o carbono constituem a maior parte do combustível, em base seca. Em contraste com grande parte dos combustíveis convencionais, o bagaço de cana de açúcar e a madeira possuem quantidades de enxofre negligenciáveis, cuja presença é indesejável por trazer consequências prejudiciais ao meio ambiente e aos equipamentos, devido a formação de ácido sulfúrico. O teor de cinzas é relativamente baixo para a maioria dos tipos de biomassa, quando comparado com o carvão mineral, por exemplo, com algumas exceções como a palha e a casca de arroz.

Tabela 1. Composição elementar (base úmida) e poder calorífico de algumas biomassas.

Combustível	PCI [MJ/kg]	PCS	C	H	O	N	S	Z	W
						% [kg/kg]			
Álamo ^c	-	20,70	51,60	6,30	41,50	-	-	0,60	-
Álamo híbrido ^b	-	19,02	50,18	6,06	40,43	0,60	0,02	2,70	-
Amido ^a	12,81	-	36,84	5,68	40,73	-	-	-	16,76
Bagaço de cana-de-açúcar ^b	-	18,99	48,64	5,87	42,82	0,16	0,04	2,44	-
Bagaço de cana-de-açúcar ^c	-	17,33	44,80	5,40	39,60	0,40	0,01	9,80	-
Caroço de azeitona ^b	-	21,59	52,80	6,69	38,25	0,45	0,05	1,72	-
Carvalho silvestre ^d	-	19,96	50,64	6,02	41,74	0,25	-	1,35	-
Casca de amêndoa (externa) ^b	-	18,89	47,53	5,97	39,16	1,13	0,06	6,13	-
Casca de amêndoa (interna) ^b	-	19,49	49,30	5,97	40,63	0,76	0,04	3,29	-
Casca de arroz ^b	-	15,84	38,83	4,75	35,47	0,52	0,05	20,26	-
Casca de arroz ^c	-	15,30	38,50	5,70	39,80	0,50	-	15,50	-
Casca de árvore (Suécia) ^f	9,00	-	25,02	2,95	20,15	0,15	-	1,70	50,00
Casca de oliva ^a	16,05	-	44,69	7,10	32,33	1,16	0,10	5,00	9,48
Casca de oliva (Espanha) ^f	15,58	-	40,97	4,88	30,76	3,89	0,15	7,16	12,20
Casca de pistache ^b	-	18,22	50,20	6,32	41,15	0,69	0,22	1,41	-
<i>Castanea sativa</i> ^e	-	18,70	47,10	4,90	47,70	0,20	0,02	0,10	-
Cavaco de madeira (Austria) ^f	10,21	-	29,82	3,70	26,94	0,30	-	0,53	38,70
Cavaco de madeira (Finlândia) ^f	10,45	-	26,95	3,30	23,65	-	-	1,10	45,00
<i>Cedrus atlantica</i> ^e	-	20,30	50,30	5,60	43,60	0,20	-	0,40	-
Celulose ^a	14,98	-	42,35	6,70	45,73	0,02	-	0,09	5,11
Cicuta ocidental ^d	-	20,05	50,40	5,80	41,40	0,10	0,10	2,20	-
<i>Eucalyptus globulus</i> ^e	-	17,60	46,20	5,80	47,20	0,20	0,02	0,50	-
<i>Eucalyptus grandis</i> ^c	-	19,35	48,30	5,90	45,13	0,15	0,01	0,40	-
Girassol ^a	14,24	-	42,86	6,13	30,38	5,47	0,27	6,23	8,59
Madeira (Suécia) ^f	16,51	-	44,24	5,65	39,84	-	-	0,27	10,00
Madeira de demolição ^b	-	18,41	46,30	5,39	34,45	0,57	0,12	13,12	-
Madeira de salgueiro ^b	-	19,59	49,90	5,90	41,80	0,61	0,07	1,71	-
Madeira vermelha ^d	-	21,03	53,50	5,90	40,30	0,10	-	0,20	-
Palha de arroz ^b	-	15,09	38,24	5,20	36,26	0,87	0,18	18,67	-
Palha de arroz ^c	-	15,80	39,20	5,10	35,80	0,60	0,10	19,20	-
Palha de trigo ^b	-	17,94	44,92	5,46	41,77	0,44	0,16	7,02	-
Palha de trigo ^c	-	17,51	43,20	5,00	39,40	0,60	0,10	11,40	-
Palha de trigo (Dinamarca) ^f	15,21	-	41,32	5,37	36,84	0,39	-	4,09	12,00
Palha de trigo (Reino Unido) ^f	14,58	-	38,60	5,10	33,70	0,60	0,10	5,50	16,00
Papel ^a	11,94	-	24,80	3,18	39,50	-	0,04	25,93	6,50
Papel misto ^b	-	20,78	47,99	6,63	36,84	0,14	0,07	8,33	-
Papelão ^a	13,69	-	35,90	4,36	43,17	0,24	0,32	10,30	5,40
Pinheiro ^a	17,22	-	47,29	5,54	38,47	0,10	0,10	0,12	8,38
<i>Pinus pinaster</i> ^e	-	20,10	48,40	6,00	45,30	0,10	-	0,20	-
Resíduo de madeira ^a	15,85	-	43,84	7,87	34,31	1,03	0,01	3,64	8,40
Resíduo de uva (Espanha) ^f	16,37	-	41,52	5,56	33,97	2,08	0,12	5,30	11,45
Serragem de pinheiro ^b	-	20,42	51,23	5,98	42,10	0,06	0,03	0,41	-
Talos de alfafa ^b	-	18,67	47,17	5,99	38,19	2,68	0,20	5,27	-

Fonte: ^a Heikkinen *et al.* (2004); ^b Jenkins *et al.* (1998); ^c Overend e Wright (2007); ^d Singer (1991); ^e Telmo *et al.* (2010); ^f Yin *et al.* (2008).

O conteúdo de cinzas de biomassas de origem florestal e agrícola pode variar de um local para outro em função de características do solo e do clima. Além disso, no processo de extração e manuseio uma quantidade significativa de material estranho (terra, areia, entre outros) pode ser agregada a composição do combustível, como ocorre com o corte mecanizado da cana de açúcar ou com os resíduos vindos dos pátios das madeireiras.

3. METODOLOGIA

O poder calorífico representa a quantidade de energia liberada durante a combustão completa, podendo ser expressa por unidade de massa ou de volume. Para todos os combustíveis sólidos e a maioria dos combustíveis líquidos, a bomba calorimétrica é o dispositivo de medição padrão da indústria. Os produtos da combustão dentro do calorímetro são resfriados até a temperatura inicial, e o calor absorvido pelo fluido de arrefecimento é medido para determinar o calor de combustão superior, ou bruto, normalmente chamado de poder calorífico superior (PCS).

Nesses equipamentos, os combustíveis são queimados num volume constante de oxigênio. Para a maioria dos combustíveis, a diferença entre os poderes caloríficos a volume constante e pressão constante é pequena e é geralmente negligenciada. No entanto, o poder calorífico a pressão constante é o valor tecnicamente correto, porque essa é essencialmente a condição encontrada nas fornalhas. Sendo assim, para combustíveis sólidos e líquidos, uma correção devido a mudança de volume é necessária para converter o PCS medido em uma bomba calorimétrica a volume constante (PCS_v) para pressão constante (PCS_p).

De acordo com Kitto e Stultz (2005) e ASME (2009), essa correção pode ser calculada pela equação

$$PCS_p = PCS_v + 615H. \quad (1)$$

Enquanto o poder calorífico superior pode ser determinado com precisão por procedimentos estabelecidos por normas, a determinação direta do poder calorífico inferior (PCI) é difícil. Não existe padrão internacional para o cálculo do PCI a partir de um PCS medido. As constantes usadas para entalpias de combustão, e a temperatura utilizada para calcular o calor latente de vaporização, variam entre as referências. É importante utilizar a mesma temperatura para a entalpia de vaporização e os cálculos de eficiência da caldeira, a fim de evitar erros no cálculo do consumo de combustível.

Na literatura técnica encontra-se numerosas formulações empíricas e estatísticas desenvolvidas por diversos pesquisadores para estimar o poder calorífico dos combustíveis a partir de sua composição elementar ou imediata, em grande parte voltadas para combustíveis fósseis, mas que tem sido sistematicamente consideradas nos cálculos com biomassa. Uma seleção dessas formulações é apresentada a seguir, devidamente ajustadas para entrada dos dados em frações mássicas em base úmida e para o resultado do poder calorífico em kJ/kg.

Uma das correlações mais difundida e frequentemente utilizada para combustíveis sólidos é a fórmula de Dulong. Segundo Kitto e Stultz (2005), os resultados dessa equação são bastante precisos para carvões betuminosos, e é expressa por

$$PCS = 33829C + 144277(H - O/8) + 9420S \quad (2)$$

onde PCS é o poder calorífico superior em kJ/kg e C, H, O e S são as frações mássicas de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, respectivamente, por quilograma de combustível [kg/kg] em base úmida.

Para a temperatura de referência de 25°C (ASME, 2009), o calor latente de vaporização corresponde a 2442 kJ/kg. Então, em função da quantidade de água presente nos gases de combustão por quilograma de combustível, o poder calorífico inferior (PCI) em kJ/kg é obtido por

$$PCI = PCS - 2442(8,94H + W), \quad (3)$$

onde W corresponde à fração mássica de umidade presente no combustível, expressa em kg/kg.

De acordo com Annaratone (2008), é possível calcular o PCI de combustíveis sólidos utilizando a equação

$$PCI = 19200 - 21700W \quad (4)$$

e obter o PCS através da Eq. (2).

Para Bazzo (1995), o poder calorífico superior de combustíveis sólidos e líquidos pode ser calculado com relativa aproximação por

$$PCS = 33900C + 141800(H - O/8) + 9200S \quad (5)$$

e o poder calorífico inferior é obtido através da expressão

$$PCI = PCS - 2440(9H + W). \quad (6)$$

Segundo Pera (1972), o poder calorífico superior de combustíveis sólidos é determinado da seguinte forma

$$PCS = 33913C + 142184(H - O/8) + 9270S, \quad (7)$$

sendo que o termo $(H - O/8)$ desconta o equivalente de hidrogênio que já se encontra combinado com o oxigênio do próprio combustível. O poder calorífico inferior é obtido através da expressão

$$PCI = PCS - 2512(9H + W). \quad (8)$$

Num extenso levantamento realizado por Jenkins foram obtidos dados referentes às análises elementar, imediata e poder calorífico de 62 tipos de biomassa, de acordo com Cortez *et al.* (2008). Com esses dados, Jenkins realizou uma análise estatística e determinou a seguinte relação empírica para estimar o poder calorífico superior

$$PCS = 2338,1(1 - W) + 35100C \quad (9)$$

e a seguinte equação para calcular o poder calorífico inferior

$$PCI = PCS - 2310(9H + W). \quad (10)$$

Cortez *et al.* (2008) também apresentam a fórmula de Mendeliev para o cálculo do poder calorífico inferior, dada por

$$PCI = 33900C + 103000H - 10900(O - S) - 2400W. \quad (11)$$

De acordo com Gaur e Reed (1995 *apud* Van Loo e Koppejan, 2008), o PCS da biomassa pode ser calculado razoavelmente bem utilizando a seguinte fórmula empírica

$$PCS = 34910C + 117830H + 10050S - 1510N - 10340O - 2110Z, \quad (12)$$

onde N e Z são as frações mássicas de nitrogênio e cinzas, respectivamente, por quilograma de combustível [kg/kg] em base úmida. Van Loo e Koppejan (2008) propõe o cálculo do PCI a partir do PCS acima aplicando a equação

$$PCI = PCS - 2444(8,936H + W). \quad (13)$$

Segundo Santos (2004), o poder calorífico superior e inferior da madeira e outras biomassas podem ser estimados, respectivamente, pelas seguintes fórmulas

$$PCS = 34245C + 110198H - 11985(O + N) - 1531Z + 68,5(1 - W), \quad (14)$$

$$PCI = PCS - 2258(9H + W). \quad (15)$$

Niessen (2002) apresenta as equações de Chang, Boie, Dulong modificada e Vondracek, desenvolvidas para estimar o poder calorífico de resíduos industriais e municipais, e respectivamente representadas por

$$PCS = 35844(1 - W - Z) + 75245H - 26749S - 46545O - 28026N, \quad (16)$$

$$PCS = 34843C + 115338H + 6280S - 10802O, \quad (17)$$

$$PCS = 32787C + 150440(H - O/8) + 9261S + 49700 + 2420N, \quad (18)$$

$$PCS = \left(37334 - \frac{2604C}{(1-W-Z)} \right) C + 113044(H - O/10) + 10467S. \quad (19)$$

Buckley e Domalski (1988) consideram em sua análise quatro equações de cálculo do PCS para combustíveis derivados de resíduos (*refuse-derived fuels* – RDF), além da tradicional fórmula de Dulong. São as equações de Tillman, que utiliza apenas o teor de carbono para estimar o PCS da madeira, de Lloyd e Davenport, de Boie e do *Institute of Gas Technology*, as quais são expressas, respectivamente, por

$$PCS = 43700C - 1670(1 - W), \quad (20)$$

$$PCS = 35780C + 113570H + 5900N + 11190S - 8450O, \quad (21)$$

$$PCS = 35150C + 116170H + 6276N + 10460S - 11090O, \quad (22)$$

$$PCS = 34170C + 132210H + 12320S - 11980(O + N) - 1530Z. \quad (23)$$

4. RESULTADOS

Todas as equações acima foram aplicadas no cálculo do poder calorífico superior e inferior para as diversas biomassas apresentadas na Tabela 1. Os resultados calculados (PC_{calc}) foram avaliados em relação aos respectivos valores medidos (PC_{med}), de acordo com a expressão

$$Desv = \frac{|PC_{calc} - PC_{med}|}{PC_{med}} 100. \quad (24)$$

Na Tabela 2 são apresentados o mínimo, o máximo e a média dos desvios absolutos encontrados para cada equação de predição do poder calorífico.

Tabela 2. Comparativo entre as equações de estimativa do poder calorífico para a biomassa.

Variável	Equação	Desvios absolutos [%]		
		Mínimo	Máximo	Média
PCI	Jenkins (10)	0,3	15,6	4,7
	Gaur e Reed (13)	0,1	38,0	9,7
	Mendeliev (11)	0,2	39,5	10,0
	Santos (15)	0,3	49,1	12,3
	Annaratone (4)	0,9	49,0	13,3
	Bazzo (6)	5,5	57,6	16,5
	Dulong (3)	5,5	58,1	16,7
	Pera (8)	5,8	57,9	16,7
PCS	Jenkins (9)	0,0	9,5	2,6
	Tillman (20)	0,1	11,2	2,6
	Boie (17)	0,3	11,7	3,1
	Institute of Gas Technology (23)	0,3	12,5	3,2
	Boie (22)	0,1	12,5	3,3
	Vondracek (19)	0,1	13,0	3,3
	Gaur e Reed (12)	0,2	13,8	3,5
	Dulong modificada (18)	0,1	13,3	3,6
	Chang (16)	0,6	13,5	3,6
	Lloyd e Davenport (21)	1,0	19,2	7,1
	Santos (14)	0,5	15,5	7,2
	Pera (7)	2,7	22,7	9,8
	Bazzo (5)	2,7	22,7	9,8
	Dulong (2)	2,6	23,0	9,9
	Annaratone (3)	0,4	34,8	11,6

A Equação (10) proposta por Jenkins oferece os melhores resultados no cálculo do PCI, com um desvio médio inferior a 5%. Na estimativa do poder calorífico superior da biomassa destacaram-se as equações (9) e (20), propostas por Jenkins e Tillman, respectivamente, com um desvio médio menor que 3%. Entretanto, outras sete equações também apresentaram boa estimativa para o PCS, não superando 4% na média dos desvios.

A biomassa é formada por compostos químicos orgânicos complexos, e complexas transformações termodinâmicas ocorrem quando é queimada na fornalha. Por isso, de acordo com Singer (1991), não é possível utilizar as fórmulas do tipo de Dulong para prever o poder calorífico tanto da madeira como do bagaço. Nessas fórmulas, a fração de hidrogênio disponível para queima, segundo o termo $(H - O/8)$, é relativamente baixa, devido à elevada fração de oxigênio presente na biomassa, resultando num valor de poder calorífico invariavelmente menor. A consideração de Dulong também é questionada por Buckley e Domalski (1988), Telmo *et al.* (2010) e Jenkins *et al.* (1998).

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas equações propostas por diversos pesquisadores para estimar o poder calorífico dos combustíveis a partir de sua composição elementar. Os resultados obtidos foram comparados com valores medidos em laboratório, demonstrando menores desvios para a equação proposta por Jenkins, tanto no cálculo do PCS, quanto do PCI, na ordem de 3 e 5%, respectivamente. Outras correlações também apresentaram bons resultados, a maioria com desvios abaixo de 4%. Por outro lado, outras equações apresentam desvios relativamente grandes, acima de 10%, em parte devido à elevada fração de oxigênio presente na biomassa. São equações originariamente propostas para combustíveis fósseis, que não devem ser utilizadas para calcular o poder calorífico de biomassas como o cavaco de madeira e o bagaço de cana.

6. REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005, “Atlas de Energia Elétrica do Brasil”, 2. ed., ANEEL, Brasília, Brasil, pp. 243.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016, “BIG – Banco de Informações de Geração: Fontes de Energia”, ANEEL, Brasília, Brasil.
- Annaratone, D., 2008, “Steam Generators: Description and Design”, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha.
- ASME – American Society of Mechanical Engineers, 2009, “PTC 4-2008: Fired Steam Generators: Performance Test Codes”, ASME, New York, EUA.
- Bazzo, E., 1995, “Geração de Vapor”, 2. ed., Ed. UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Buckley, T.J., Domalski, E.S., 1988, “Evaluation of Data on Higher Heating Values and Elemental Analysis for Refuse-derived Fuels”, Proceedings of the 13th National Waste Processing Conference, Philadelphia, EUA, pp. 77-84.
- Cortez, L.A.B., Lora, E.E.S., Gómez, E.O., 2008. “Biomassa para Energia”, Ed. UNICAMP, Campinas, Brasil.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2016, “Balanço Energético Nacional 2015: Ano Base 2014”, EPE, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 292.
- Heikkinen, J.M., Hordijk, J.C., de Jong, W., Spliethoff, H., 2004, “Thermogravimetry as a Tool to Classify Waste Components to be Used for Energy Generation”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 71, pp. 883-900.
- IEA – International Energy Agency, 2015, “Key World Energy Statistics”, Chirat, Paris, França, pp. 81.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R., Miles, T.R., 1998, “Combustion Properties of Biomass”, Fuel Processing Technology, Vol. 54, pp. 17-46.
- Kitto, J.B., Stultz, S.C., 2005, “Steam: Its Generation and Use”, 41th ed, The Babcock and Wilcox Company, Ohio, EUA.
- Niessen, W.R., 2002, “Combustion and Incineration Processes”, 3rd ed., Ed. Marcel Dekker, New York, EUA.
- Nogueira, L.A.H., Lora, E.E.S., 2002, “Wood Energy: Principles and Applications”, Núcleo de Excelência em Geração Termoeletrica Distribuída – NEST, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEL, Itajubá, Brasil, pp. 168.
- Overend, R.P., Wright, L.L., 2007, “Biomass Energy”, In: Goswami, D.Y., Kreith, F., “Energy Conversion”, Ed. CRC Press, New York, EUA, pp. 50-68.
- Pera, H., 1972, “Geradores de Vapor de Água: Caldeiras”, Ed. EPUSP, São Paulo, Brasil.
- Santos, M.L. de S., 2004, “Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operation”, Ed. Marcel Dekker, New York, EUA.
- Singer, J.G., 1991, “Combustion Fossil Power: a Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation”, Ed. Combustion Engineering, Connecticut, EUA.
- Spliethoff, H., 2010, “Power Generation from Solid Fuels”, Ed. Springer, Berlin, Alemanha.
- Telmo, C., Lousada, J., Moreira, N., 2010, “Proximate Analysis, Backwards Stepwise Regression Between Gross Calorific Value, Ultimate and Chemical Analysis of Wood”, Bioresource Technology, Vol. 101, pp. 3808-3815.
- Van Loo, S., Koppejan, J., 2008, “The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing”, Ed. Earthscan, Chippingham, Inglaterra.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., Siagi, Z., 2000, “Combustion of Agricultural Residues”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, pp. 1-27.
- Yin, C., Rosendahl, L.A., Kær, S.K., 2008, “Grate-firing of Biomass for Heat and Power Production”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, pp. 725-754.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THE BIOMASS AS ENERGETIC ALTERNATIVE FOR INDUSTRIAL PROCESSES AND ELECTRICITY GENERATION

Rafael Fernando Zotto, rafael.zotto@gmail.com¹
Edson Bazzo, e.bazzo@ufsc.br¹

¹Laboratory of Combustion and Thermal Systems Engineering (LabCET)
 Federal University of Santa Catarina (UFSC), 88.040-900, Brazil

Abstract. *The calorific value is energy amount released during the complete combustion and for all solid fuels and most of the liquid fuel is experimentally measured with a device called a bomb calorimeter. In the technical literature are found numerous empirical and statistical formulations to estimate calorific value of fuels from its elementary analyses. This paper presents a selection of these formulations to calculate higher and lower heating value. All these formulations were used to calculate the calorific value based on measured data from elemental composition provided in literature for some biomass. The calculated results were evaluated with respect to their measured values presented in the same bibliographic references. Are displayed the minimum, maximum and average absolute deviations found for each prediction formula of heating value. The formulations with better results for higher and lower heating value showed average deviation lower than 3% and 5%, respectively.*

Keywords: *biomass, wood, wood chips, sugarcane bagasse, calorific value*