

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO

Elissando Rocha da Silva¹, Sebastião N. V. Junior¹, Juliana T. C. L. Tonelli¹, Gilberto Martins¹
¹Universidade Federal do ABC – Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Rua Santa Adélia, 166 – Bairro Bangu – Santo André – São Paulo – SP – Brasil – CEP 09210-170
E-mail: elissando.silva@ufabc.edu.br

Recibido 12/08/14, aceptado 24/09/14

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de conversão energética dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Santo André, em São Paulo, Brasil, através do processo de incineração utilizando coeficientes técnicos disponíveis na literatura. Para isso foi necessário estimar o poder calorífico inferior dos resíduos. Para estimar o poder calorífico inferior foram utilizados vários modelos matemáticos empíricos com base nos dados da composição dos resíduos sólidos urbanos. O valor do poder calorífico inferior estimado foi de $(10,60 \pm 1,65)$ MJ/kg. A potência elétrica estimada para o ano de 2015 foi de $18,24 \pm 2,84$ e $19,46 \pm 3,03$ para o ano de 2020. Concluímos que é possível recuperar aproximadamente 28 % da energia contida nos resíduos sólidos urbanos. Os materiais plásticos, papel e papelão juntos contribuem com 60 % do valor do poder calorífico inferior. Estes materiais determinam a viabilidade do processo de incineração dos resíduos sólidos urbanos.

Palavras chave: Resíduos sólidos urbanos, Poder calorífico inferior, Eletricidade, Estimativa.

INTRODUÇÃO

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) estão presentes em qualquer sociedade, como resultado das atividades humanas; possuem composição heterogênea e, sua taxa de produção e composição física variam geograficamente, pois dependem do nível socioeconômico e cultural da população e das condições climáticas da região, além de sofrerem também influências sazonais, em relação às estações do ano. Os RSU constituem-se num dos grandes problemas da atualidade, seja pela iminência de impactos socioeconômicos e ambientais decorrentes da condição de descarte, seja pela dificuldade que inúmeros municípios possuem de alocar espaços e/ou condições adequadas para sua destinação final.

Um sistema integrado de gestão de resíduos sólidos urbanos tem como principais objetivos a recuperação de materiais e energia, além da disposição adequada dos rejeitos finais. De acordo com Koufodimos e Samaras (2002) as alternativas para a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos dependem da composição dos resíduos. A fração orgânica constitui o principal fator determinante da viabilidade da compostagem e digestão anaeróbia, enquanto que as frações de papel e plásticos determinam a viabilidade da incineração devido aos elevados valores do poder calorífico destes materiais.

A recuperação de energia a partir de resíduos sólidos urbanos é possível por meio de vários processos, tais como a combustão, pirólise, gaseificação e digestão anaeróbia da fração orgânica degradável (Fruegaard *et al.*, 2009). A incineração é um dos métodos mais eficazes utilizados para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, uma vez que reduz o volume dos resíduos significativamente e permite a recuperação de energia (Shu *et al.*, 2006). Este método transforma os resíduos basicamente em três produtos: cinzas, gases da combustão e calor. As cinzas são em sua maioria formadas por constituintes inorgânicos que estavam presentes nos resíduos. Elas podem se aglomerar em nódulos sólidos ou serem carregadas diretamente pelos gases da combustão. Os gases da combustão necessitam de um tratamento adequado para reduzir a concentração de alguns poluentes gasosos presentes e reduzir a quantidade de material particulado antes de serem emitidos para atmosfera (Santos, 2011). O calor produzido no processo de incineração de RSU pode ser aproveitado para usos energéticos, tais como geração de eletricidade, aquecimento e refrigeração (Caraschi e Leão, 2008; Santos, 2011).

Quando a incineração tem como objetivo a recuperação de energia é importante conhecer a composição dos resíduos, que está diretamente relacionada com o potencial energético. Conhecer o poder calorífico inferior (PCI) dos resíduos sólidos urbanos é importante para projetar e operar plantas de incineração (Liu *et al.*, 1996; Abu-Qudais e Abu-Qudais, 2000; Thipkhanthod *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2007; Ogwueleka e Ogwueleka, 2010). Normalmente, o valor do PCI é determinado a partir de relações matemáticas, conhecendo-se o Poder Calorífico Superior (PCS), o teor de umidade e a fração mássica de Hidrogênio na amostra. O PCS é determinado experimentalmente com auxílio de um calorímetro. No entanto, este método apresenta custo elevado e requer maior tempo para determinação do poder calorífico. Assim, faz-se necessário o uso de modelos matemático para a estimativa do PCI (Shu *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2007; Akkaya e Demir, 2009).

Existem vários modelos empíricos disponíveis para a determinação do poder calorífico inferior de resíduos sólidos urbanos (Liu *et al.*, 1996; Abu-Qudais e Abu-Qudais, 2000; Thipkhanthod *et al.* 2005; Chang *et al.*, 2007; Ogwueleka e Ogwueleka, 2010). Em relação aos modelos matemáticos empíricos, existem três tipos de modelos que são utilizados para estimar o poder calorífico inferior do RSU: aqueles baseados na composição física, os baseados na análise centesimal e os baseados na análise química elementar. A análise da composição física (gravimétrica) baseia-se nas frações mássicas de plásticos, papel, umidade, orgânicos diversos, têxteis, couro e borracha e outros materiais combustíveis presentes no RSU. A análise química

elementar envolve tipicamente determinação da fração mássica dos elementos: carbono(C), hidrogênio(H), oxigênio (O), nitrogênio(N) e enxofre(S), enquanto que a análise centesimal baseia-se no teor de umidade, matéria combustível (matéria volátil e carbono fixo), e cinzas (Liu *et al.*, 1996; Abu-Qudais e Abu-Qdais, 2000; Thipkhunthod *et al.*, 2005; Shu *et al.*, 2006).

Vários modelos matemáticos empíricos foram desenvolvidos para estimar o *poder calorífico inferior* de RSU, por vários autores (Liu *et al.*, 1996; Koufodimos e Samaras, 2002; Kathiravale *et al.*, 2003; Meraz *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 2003; Shu *et al.*, 2006; Change *et al.*, 2007; Akkaya e Demir, 2010; Ogwueleka e Ogwueleka, 2010). Além dos modelos baseados na composição física, análise centesimal e análise química elementar, outros modelos foram desenvolvidos a partir de redes neurais. Estes modelos também são alternativas para cálculos do PCI de resíduos sólidos urbanos (Dong *et al.*, 2003; Shu *et al.*, 2006; Akkaya e Demir, 2010; Ogwueleka e Ogwueleka, 2010). Embora capazes de estimar o PCI com precisão, estes modelos são inviáveis para a prática de gestão de resíduos sólidos urbanos, pois requerem conhecimento prévio de rede neural e aplicação do modelo computacional de simulação.

Chang e Huang (2001) investigaram o fluxo de energia de um incinerador de RSU, no norte de Taiwan, o valor do PCI medido por eles foi de 7,60 MJ/kg. Liu *et al.* (1996) manipularam uma análise de regressão múltipla estatística baseada em 40 amostras de RSU de Taiwan, eles obtiveram uma equação de cálculo de PCI, e o valor estimado por eles foi de 9,97 MJ/kg. Cooper *et al.* (1999) analisaram 20 tipos de resíduos perigosos e 20 não perigosos, e desenvolveram uma equação para estimativa de PCI que pode ser usada tanto para estimar poder calorífico de resíduos perigosos como também para resíduos não perigosos. Kathirvale *et al.* (2004) estudaram 20 amostras de resíduos de Kuala Lumpur na Malásia, em suas estimativa, verificaram-se que o poder calorífico inferior varou de 6,45 a 11,05 MJ/kg. Lin (1996) usou modelos de séries temporais para estimar o valor do PCI de resíduos sólidos urbanos na cidade de Taipei. Ele estimou o PCI de um projeto de instalação de uma planta de incineração em Taipei, o valor do PCI estimado foi de 5,45 MJ/kg, mas durante o funcionamento da planta de incineração foi medido 7,12 MJ/kg. Shu *et al.* (2006) analisaram 220 amostras de resíduos e estimaram o valor do PCI em 7,40 MJ/kg.

A eficiência energética de uma planta de incineração de RSU pode ser descrita em termos do *poder calorífico inferior* ou do *poder calorífico superior*. Por exemplo, na Europa geralmente a eficiência é definida em função do PCI, enquanto que nos Estados Unidos é definida em função do PCS. De acordo com Ragožnič *et al.* (2008) a eficiência de produção de eletricidade bruta em plantas de incineração de RSU varia de 18 a 26 % (com base no PCI). Fruergaard *et al.* (2009) realizaram uma análise em 231 incineradores na Europa e, estimaram a eficiência média de produção de eletricidade, com base no PCI, o valor da eficiência obtido por eles foi de 20,7 %. Vários fatores afetam a eficiência de plantas de incineração, tais como, o tamanho da planta, tipo de resíduos incinerado, cogeração de eletricidade, dentre outros. De acordo com Reimann, (2006) e Fruergaard *et al.* (2009) a demanda de energia de uma planta de incineração é de aproximadamente 10 % da energia contida nos resíduos sólidos urbanos.

O objetivo deste trabalho é estimar o potencial de conversão energética dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Santo André, em São Paulo, Brasil, através do processo de incineração utilizando coeficientes técnicos disponíveis na literatura. Para isso será necessário estimar o PCI dos RSU. Esta estimativa do PCI será realizada utilizando vários modelos matemáticos empíricos com base nos dados da composição do RSU da referida região.

Este trabalho foi motivado principalmente pela necessidade de redução do volume de resíduos para ser encaminhados para o aterro municipal de Santo André. Este município possui uma área de 175,781 km² e população de 704.942 habitantes. A produção diária de RSU é de 510,40 toneladas por dia, correspondendo a uma taxa de produção de 0,73 quilogramas por dia por habitante. Atualmente, os resíduos são depositados no aterro municipal de Santo André, único aterro sanitário existente no município. Este aterro tem capacidade de recebimento de RSU até o ano de 2020, considerando o envio de todo o RSU coletado “*in natura*”. Visando ampliar a vida útil do aterro, o governo municipal, através do Semasa (autarquia municipal de saneamento ambiental) estuda a implantação de novas tecnologias de tratamento e destinação final para os resíduos sólidos urbanos, dentre elas a incineração.

METODOLOGIA

Cálculo do Poder Calorífico Inferior

Para obter o potencial de conversão energética dos RSU através do processo de incineração é necessário estimar o *poder calorífico inferior* dos resíduos. Os modelos utilizados para estimar o PCI são apresentados nas equações 1 - 7. As equações 1 e 2 são modelos baseados na análise centesimal, as equações 3 e 4 representam modelos baseados na análise da composição física e as equações 5, 6 e 7 representam modelos que se utilizam da análise elementar.

Nos modelos de análise centesimal, V, representa a fração mássica dos componentes combustíveis (%) e, W o teor de umidade em base úmida (%) dos resíduos sólidos urbanos. A fração mássica combustível dos RSU foi determinada pela diferença entre a fração mássica seca e a fração de cinzas. A umidade média foi obtida a partir da umidade de cada componente dos resíduos sólidos urbanos.

$$PCI = 45V - 6W \quad (1)$$

$$PCI = 44,75V - 5,85W + 21,2 \quad (2)$$

A equação 3 permite o cálculo do poder calorífico inferior baseado nas frações mássica de plástico, resíduos de alimentos, papel, papelão e teor de umidade.

$$PCI = [88,2 P_{pl} + 40,5(P_{fo} + P_{pa})] \left(\frac{100-W}{W}\right) - 6W \quad (3)$$

Nas equações 3 e 4, P_{pl} representa a fração mássica dos plásticos (%), P_{fo} é a fração mássica dos resíduos de alimentos (%) e, P_{pa} é a fração mássica de papel e papelão (%).

$$PCI = 23(P_{fo} + 3,6P_{pa}) + 160P_{pl} \quad (4)$$

As equações 5 a 7 permite estimar o poder calorífico inferior a partir das frações mássicas dos diversos elementos químicos que compõem os RSU. De acordo com Cooper *et al.* (1999) estes modelos apresentam maior precisão em comparados com os modelos baseados nas composição física e análise centesimal.

$$PCI = 81C + 342,5 \left(H - \frac{O}{8}\right) + 22,5 S - 6(W + 9H) \quad (5)$$

$$PCI = 81 \left(C - \frac{3}{8} x O\right) + 57 \times \frac{3}{8} O + 345 \left(H - \frac{O}{16}\right) + 25 S - 6(W + 9H) \quad (6)$$

$$PCI = 81 \left(C - \frac{3}{4} O\right) + 342,5 H + 22,5 S + 57 \times \frac{3}{4} O - 6(W + 9H) \quad (8)$$

As equações 1, 2 e 3 foram proposta pela Fundação Nacional Japonesa de Resíduos Sólidos Urbanos (1991) (JNMSWF); a equação 4 foi proposta por Khan e Abu-Ghararah, (1991); e as equações 5, 6 e 7 foram proposta por Wilson (1977). Na tabela 1 são apresentadas as referencias dos modelos utilizados na estimativa do PCI.

MODELO	EQUAÇÃO	REFERENCIA
Análise centesimal	Equação 1	JNMSWF (1991) apud Lin et al. 2013
	Equação 2	JNMSWF (1991) apud Lin et al. 2013
Composição física	Equação 3	JNMSWF (1991) apud Chang et al. 2007
	Equação 4	Khan e Abu-Ghararah, 1991
Análise elementar	Equação 5	Wilson (1977) apud Chang et al. 2007
	Equação 6	Wilson (1977) apud Ogwueleka e Ogwueleka, 2010
	Equação 7	Wilson (1977) apud Chang et al. 2007

Tabela 1: Referencia dos modelos utilizados para estimar o PCI de resíduos sólidos urbanos

Características dos RSU de Santo André

A gravimetria dos resíduos sólidos urbanos foi realizada no ano de 2013 como parte de um projeto do Semasa para melhorias da gestão dos RSU no município. O município de Santo André foi dividido em 16 setores, de resíduos que determinam os roteiros de incursões por parte dos veículos coletores dos resíduos. Cada setor possui pelo menos dois bairros e, para efeito operacional cada setor foi dividido em subsetores, totalizando 58 subsetores. Com propósito de obter amostras significativas, foram analisadas amostras de resíduos oriundos de todos subsetores, perfazendo, pelo menos, dois veículos coletores de resíduos por subsetor no mesmo dia. As amostras foram coletadas em diversas áreas da cidade, incluindo áreas residenciais, comerciais e praças, totalizando 58 amostras.

A tabela 2 apresenta as frações mássica dos diversos componentes que compõem os resíduos sólidos urbanos de Santo André (Semasa, 2013). Os valores de umidade e massa seca foram adaptados dos dados obtidos por Tchobanoglous *et al.* (1993), Meraz *et al.* (2003) e Poletto e Silva (2009). Todos os valores de umidade foram obtidos em base úmida.

COMPONENTES	UMIDADE (%)	MASSA ÚMIDA (%)		MASSA SECA (%)	
			NORMALIZADA		NORMALIZADA
Resíduos alimentos	70,0	51,0	60,1	15,3	18,0
Madeira	20,0	0,90	1,1	0,70	0,8
Papel / Papelão	6,00	10,0	11,8	9,40	11,1
Borracha	2,00	0,90	1,1	0,87	1,0
Plásticos	2,00	16,0	18,9	15,7	18,5
Têxteis	10,0	6,00	7,1	5,40	6,4
Metal	2,00	1,70	–	–	–
Vidro	2,00	1,10	–	–	–
Diversos	5,00	12,4	–	11,8	–
Total	–	100	100	61,9	55,9

Tabela 2: Características das componentes dos RSU em santo André

Na Tabela 3 é apresentada a composição elementar típica (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas), frações mássicas, em base seca, dos resíduos sólidos urbanos (Meraz *et al.*, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 1999); Poletto e Silva, 200). A Tabela 4 apresenta a composição elementar típica das diversas frações dos RSU, em base úmida. Os dados da Tabela 4 foram obtidos a partir dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3. Estes parâmetros foram utilizados para calcular o poder calorífico inferior dos RSU através das equações apresentadas anteriormente.

COMPONENTES	COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DOS RSU (%), BASE SECA					
	CARBONO	HIDROGÊNIO	OXIGÊNIO	NITROGÊNIO	ENXOFRE	CINZAS
Resíduos alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Papel/papelão	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Borracha	78,0	10,0	–	2,0	–	10,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	–	–	10,0
Têxteis	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Metais	4,5	0,6	4,3	0,1	–	90,5
Vidros	0,5	0,1	0,4	0,1	–	98,9

Tabela 3: Composição química típica de RSU em base seca

COMPONENTES	COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DE RSU (%), BASE ÚMIDA					
	CARBONO	HIDROGÊNIO	OXIGÊNIO	NITROGÊNIO	ENXOFRE	CINZAS
Resíduos alimentos	14,4	1,9	11,3	0,8	0,1	1,5
Madeira	38,5	4,7	33,2	0,2	0,1	1,2
Papel/papelão	40,9	5,6	41,4	0,3	0,2	5,6
Borracha	75,4	9,7	–	1,9	–	9,7
Plásticos	58,9	7,1	22,4	9,8	–	9,8
Têxteis	49,5	5,9	28,1	4,1	0,1	2,3
Metais	4,4	0,6	4,2	0,1	–	88,4
Vidros	0,5	0,1	0,4	0,1	–	96,2

Tabela 4: Composição química típica de RSU em base úmida

Geração de Energia Elétrica

A geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos é tipicamente gerada por processo térmico, ou utilização do biogás produzido a partir da digestão anaeróbia dos RSU em biodigestores e aterros sanitários. No processo de incineração a energia contida nos resíduos é liberada, juntamente com a energia liberada na queima dos combustíveis auxiliares e da energia presente no ar pré-aquecido injetado no forno. O potencial de conversão de resíduos em energia pode ser obtido através da equação 9.

$$E_R = f_c PCI \quad (9)$$

Na equação 9, f_c é um fator que representa as perdas de energia nas cinzas e por radiação (Reimann, 2006; Pavlas, e Touš, 2009; Gohlke, 2009; Grosso *et al.*, 2010; Pavlas *et al.*, 2011; Ryu e Shin, 2012; Sora, 2013; Kokalj e Samec, 2013), E_R é o potencial de conversão energética dos RSU [MJ/kg]. Por potencial de produção de conversão energética entende-se a quantidade de energia que pode ser obtida por unidade de massa de RSU incinerada.

Então a potência elétrica, P[MW], pode ser obtida através da combustão dos resíduos sólidos urbanos é dada por

$$P = \eta_t \eta_g f_u E_R M(t) \quad (10)$$

onde, $M(t)$ é taxa de incineração de RSU [kg/s], f_u é fator de utilização do gerador, η_t é a eficiência da máquina térmica e η_g é a eficiência do gerador elétrico. A Tabela 5 apresenta os dados de eficiência e o fator de utilização do gerador utilizado para estimar a geração de eletricidade. A Tabela 6 apresenta uma estimativa da taxa de geração de RSU no município de Santo André até o ano de 2020

Parâmetros	Valores
Eficiência da máquina térmica, η_t	0,33
Eficiência do gerador elétrico, η_g	0,98
Fator de utilização, f_u	0,90
Fator de perdas de energias nas cinzas e por radiação, f_c	0,97

Tabela 5: Parâmetros de eficiência utilizados para estimativa da potência de geração de energia.

ANO	RSU (T/ANO)	ANO	RSU (T/ANO)
2015	192.252	2018	199.848
2016	194.751	2019	202.446
2017	197.283	2020	205.078

Tabela 6: Estimativa da taxa de geração de RSU em Santo André entre 2015 e 2020

RESULTADOS

Neste trabalho, as frações mássicas de vidro e metal, não foram consideradas no cálculo do *pode calorífico inferior*, uma vez que são inertes e não influenciam a estimativa do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. Também não foi considerado no cálculo do PCI a fração mássica dos componentes diversos.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados que se obtêm com os modelos apresentados (equações 1 a 7) para a incineração de um quilograma de RSU gerado no município de Santo André. As equações 3 e 7 fornecem os maiores valores para o PCI, respectivamente, e a equação 2 fornece o menor valor.

MODELO	PCI (MJ/kg)	Modelo	PCI (MJ/kg)
Equação 1	8,72	Equação 5	10,05
Equação 2	8,67	Equação 6	11,03
Equação 3	13,20	Equação 7	11,95
Equação 4	10,61		

Tabela 7: Estimativa do poder calorífico inferior dos RSU de Santo André/SP, Brasil

Nota-se que há bastante variação entre os resultados obtidos pelos vários modelos. Neste trabalho, para o cálculo da potência elétrica, será utilizado o valor médio do poder calorífico inferior obtido através do cálculo com as equações 1 a 7. O valor médio obtido para o PCI dos resíduos sólidos urbanos de Santo foi de 10,60 MJ/kg. O valor final do PCI pode ser representado em função da média obtida e do desvio padrão. Considerando, o desvio padrão de 1,65, pode-se representar o valor do poder calorífico inferior como $PCI = (10,60 \pm 1,65) \text{ MJ/kg}$.

Os componentes dos resíduos sólidos urbanos (resíduos orgânicos, plásticos, borracha, madeiras, resíduos têxteis, papel e diversos) possuem características diferentes, portanto, possui PCI diferentes, expresso por [MJ/kg] ou [kcal/kg] ou [Btu/lb]. Assim, o poder calorífico inferior dos RSU pode ser obtido pela soma dos PCI das diversas substâncias orgânicas que compõem os resíduos sólidos urbanos. A Tabela 8 apresenta os valores do PCI obtido através das equações 5, 6 e 7, para os diversos componentes dos RSU. Na Tabela 9 é apresentada a contribuição individual de cada componente no valor do PCI. As estimativas, apresentadas na Tabela 8, foram obtidas a partir dos dados apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4. Os resultados da Tabela 9 foram obtidos através da multiplicação dos dados apresentados na Tabela 8 pelos valores percentuais de massa úmida normalizada, apresentado na Tabela 2.

COMPONENTES DOS RSU	PCI (MJ/kg)		
	Equação 5	Equação 6	Equação 7
Resíduos de Alimento	3,40	4,00	4,58
Papel e papelão	13,08	15,27	17,38
Plásticos	24,48	25,71	26,81
Madeira	12,29	14,04	15,74
Têxteis	18,64	20,14	21,55
Borracha	37,24	37,34	37,24

Tabela 8: PCI dos componentes dos RSU estimados pelas equações 6, 7 e 8

COMPONENTES DOS RSU	PCI (MJ/kg)		
	Equação 5	Equação 6	Equação 7
Resíduos de Alimentos	2,05	2,40	2,75
Papel e papelão	1,54	1,80	2,05
Plásticos	4,62	4,85	5,06
Madeira	0,13	0,15	0,17
Têxteis	1,32	1,43	1,52
Borracha	0,39	0,40	0,40
Total	10,05	11,03	11,95

Tabela 9: Contribuição dos componentes de RSU no valor do PCI total

Com base nas estimativas do poder calorífico inferior, constatou-se que o PCI do componente plástico representa 44 % do valor total do poder calorífico inferior dos RSU; os resíduos de alimentos contribui com cerca de 22 %, papel e papelão juntos contribuem com cerca de 16 %, materiais têxteis contribui com 13 %, madeira e borracha contribuem com 1% e 4 %, respectivamente. Os materiais plásticos, papel e papelão juntos contribuem com 6,36 MJ/kg, isto é, 60 % do valor do poder calorífico inferior dos resíduos sólidos urbanos. Estes matérias determinam a viabilidade do processo de conversão energética dos RSU através de incineração, pois, conforme relatado por Talyan et al. (2008) a conversão energética dos resíduos sólidos urbanos é viável para RSU que apresente PCI superior a 5,10 MJ/kg. a Figura 1 mostra percentagem dos componentes dos resíduos sólidos urbanos no valor total do PCI.

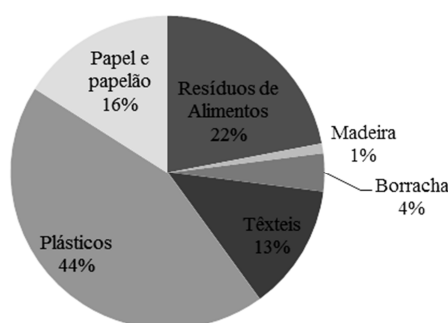


Figura 1: Percentagem dos componentes dos resíduos sólidos urbanos no valor total do PCI

A Tabela 10 apresenta os valores do poder calorífico inferior dos resíduos sólidos urbanos medidos e estimados por vários metodologias e autores.

REFERÊNCIA	PCI (MJ/kg)	REFERÊNCIA	PCI (MJ/kg)
Barniske, (1989)	6,30 – 10,50	Kathirvale et al. (2004)	6,45 – 11,05
Liu et al. (1996)	9,97	Shu et al. (2006)	7,40
Chang et al. (1997)	5,17 – 12,35	Poletto e Silva, (2009)	9,60
Lin, (1998)	7,12	Manrique et al. (2010)	10,89
Abu-Qudais e Abu-Qdais, (2000)	11,50	Ryu e Shin, (2012)	11,90
Chang e Huang, (2001)	7,60	Lin et al. (2013)	7,73
Koufodimos e Samaras, (2002)	8,43	Calculado neste trabalho	10,60 ± 1,65

Tabela 10: Valores de PCI medidos e estimados por vários autores

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 foi estimada a potência elétrica que se pode obter a partir da incineração dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Santo André, conforme, apresentado na Tabela 11. O valor do poder calorífico inferior utilizado no calculo da potencia foi, PCI = (10,60 ± 1,65) MJ/kg. A partir de 2015 é possível obter uma potência elétrica de 18,24 MW e chegar a 19,46 MW em 2020. Os resultados mostram que é possível recuperar cerca de 28 % da energia contida nos resíduos sólidos urbanos.

Ano	P (MW)
2015	18,24 ± 2,84
2016	18,48 ± 2,88
2017	18,72 ± 2,91
2018	18,97 ± 2,95
2019	19,21 ± 2,99
2020	19,46 ± 3,03

Tabela 11: Estimativa da potencia elétrica e geração de eletricidade a partir da incineração dos RSU

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram avaliados vários modelos de estimativa do PCI dos resíduos sólidos urbanos. Foram sugeridos 7 equações para estimativa do poder calorífico inferior dos RSU. Um conjunto de coeficientes foi sugerido para estimar o potencial de conversão energética dos resíduos sólidos urbanos através do processo de incineração. O poder calorífico inferior foi estimado através dos modelos baseados na composição física, análise centesimal e análise química elementar. No cálculo da potência elétrica foi considerado o valor médio do PCI obtido através das equações 1 a 7. O valor médio obtido para o PCI dos resíduos sólidos urbanos de Santo foi de $(10,60 \pm 1,65)$ MJ/kg. A potência elétrica estimada para o ano de 2015 foi de $18,24 \pm 2,84$ e $19,46 \pm 3,03$ para o ano de 2020. Os resultados mostram que é possível recuperar cerca de 28 % da energia contida nos resíduos sólidos urbanos. Concluímos que o poder calorífico inferior dos resíduos plásticos contribui com 44 % do total do PCI dos resíduos sólidos urbanos produzidos no município de Santo André, os resíduos de alimentos contribuem com 22 %, papel e papelão com 16 %, os materiais têxteis com 13 %, borracha e madeira com 4 e 1 %, respectivamente. Os materiais plásticos, papel e papelão juntos contribuem com 6,36 MJ/kg, isto é, 60 % do valor do poder calorífico inferior dos resíduos sólidos urbanos. Estes materiais determinam a viabilidade do processo de incineração dos RSU.

ABSTRACT: This paper aims to estimate the potential for energy conversion of municipal solid waste generated in the municipality of Santo André, São Paulo, Brazil, through the incineration process using technical coefficients available in the literature. For it was necessary to estimate the lower calorific value of the waste. To estimate the lower calorific several empirical data based on the composition of MSW (municipal solid waste) mathematical models were used. The estimated value of the lower calorific value was (10.60 ± 1.65) MJ/kg. The estimate for the year 2015 electric power was 18.24 ± 2.84 and 19.46 ± 3.03 for the year 2020. Conclude that it is possible to recover approximately 28% of the energy contained in municipal waste. The plastic materials, paper and cardboard together contribute to 60% of the lower heating value. These materials determine the viability of the incineration process of municipal solid waste.

Keywords: Municipal solid waste, lower calorific value, electricity, estimation.

REFERÊNCIAS

- Abu-Qudais, M., e Abu-Qudais, H. A. (2000). Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization. *Energy conversion and management*, 41(9), 983-991.
- Akkaya, E., e Demir, A. (2009, May). Energy content estimation of municipal solid waste by multiple regression analysis. In *Proceedings of the 5th international advanced technologies symposium (IATS'09)* (pp. 13-15).
- Caraschi, J. C., e Leão, A. L. (2008). Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. *Acta Scientiarum. Technology*, 24, 1599-1602.
- Chang, M. B., e Huang, C. K. (2001). Characteristics of energy flow in municipal solid waste incinerator. *Journal of environmental engineering*, 127(1), 78-81.
- Chang, N. B., Chang, Y. H., e Chen, W. C. (1997). Evaluation of heat value and its prediction for refuse-derived fuel. *Science of the total environment*, 197(1), 139-148.
- Chang, Y. F., Lin, C. J., Chyan, J. M., Chen, I. M., e Chang, J. E. (2007). Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. *Journal of environmental management*, 85(4), 891-899.
- Cooper, C. D., Kim, B., e MacDonald, J. (1999). Estimating the lower heating values of hazardous and solid wastes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(4), 471-476.
- Dong, C., Jin, B., e Li, D. (2003). Predicting the heating value of MSW with a feed forward neural network. *Waste Management*, 23(2), 103-106.
- Fruergaard, T., Ekvall, T., e Astrup, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27: 724-737.
- Gohlke, O. (2009). Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance. *Waste Management and Research*.
- Grosso, M., Motta, A., e Rigamonti, L. (2010). Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, 30(7), 1238-1243.
- JNMSWF, (1991). Design Guide for the Facility of Solid Waste Disposal, Tokyo. Japan National Municipal Solid Waste Foundation.
- Kathirvale, S., Muid Yunus, M. N., Sopian, K., e Samsuddin, A. H. (2004). Energy potential from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable energy*, 29(4), 559-567.
- Khan, M. A., e Abu-Ghararah, Z. H. (1991). New approach for estimating energy content of municipal solid waste. *Journal of Environmental Engineering*, 117(3), 376-380.
- Kokalj, F., e Samec, N. (2013). Combustion of Municipal Solid Waste for Power Production.
- Koufodimos, G., e Samaras, Z. (2002). Waste management options in southern Europe using field and experimental data. *Waste Management*, 22(1), 47-59.
- Lin, C. J., Chyan, J. M., Chen, I., e Wang, Y. T. (2013). Swift model for a lower heating value prediction based on wet-based physical components of municipal solid waste. *Waste management*, 33(2), 268-276.
- Lin, C.H., (2000). Model to evaluate lower heat value of solid waste in Taiwan, Tung Nan Institute of Technology, Taipei, Taiwan, ROC.
- Lin, J. G. (1998). Feasibility study on prediction of properties of municipal solid waste with time series models. *Journal of hazardous materials*, 58(1-3), 47-57.

- Liu, J. I., Paode, R. D., e Holsen, T. M. (1996). Modeling the energy content of municipal solid waste using multiple regression analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(7), 650-656.
- Manrique, S., Franco, J., Núñez, V., e Seghezzi, L. (2010). Perspectiva bioenergética de los residuos sólidos urbanos en el Valle de Lerma. *AVERMA*, 14(6), 47-54.
- Meraz, L., Domínguez, A., Kornhauser, I., e Rojas, F. (2003). A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition. *Fuel*, 82(12), 1499-1507.
- Ogwueleka, T. C., e Ogwueleka, F. N. (2010). Modelling energy content of municipal solid waste using artificial neural network. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 7(3), 259-266.
- Pavlas, M., e Touš, M. (2009). Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 11(1), 19-29.
- Pavlas, M., Touš, M., Klimek, P., e Bébar, L. (2011). Waste incineration with production of clean and reliable energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(4), 595-605.
- Ragošnić, A. M., Wartha, C., e Kirchner, A. (2008). Energy efficiency in waste-to-energy and its relevance with regard to climate control. *Waste Management & Research*, 26(1), 70-77.
- Reimann, D.O. (2006) CEWEP Energy Report I (status 2001–2004). CEWEP, Bamberg, Germany.
- Ryu, C., e Shin, D. (2012). Combined heat and power from municipal solid waste: Current status and issues in South Korea. *Energies*, 6(1), 45-57.
- Santos, G. G. D. (2011). Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Semasa, (2013). Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares do município de Santo André ano base 2013. Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André.
- Shu, H. Y., Lu, H. C., Fan, H. J., Chang, M. C., e Chen, J. C. (2006). Prediction for energy content of Taiwan municipal solid waste using multilayer perceptron neural networks. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 852-858.
- Sora, M. J. (2013). Incineration overcapacity and waste shipping in Europe: the end of the proximity principle?. *Fundacio Ent* January 7th.
- Talyan, V., Dahiya, R. P., Anand, S., e Sreekrishnan, T. R. (2007). Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi. *Resources, conservation and recycling*, 50(3), 240-259.
- Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. *Integrated solid waste management*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, New York: McGraw-Hill; 1993. Chapter 4.
- Thipkhumthod, P., Meeyoo, V., Rangsunvigit, P., Kitiyanan, B., Siemanond, K., & Rirkosomboon, T. (2005). Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 84(7), 849-857.