

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA NA DETERMINAÇÃO DE BALANÇO DE MASSA DE BIO-ÓLEO OBTIDO VIA PIRÓLISE A PARTIR DE CDR

Marcelo Ap. Mendonça¹ (marmend@ipt.br), Guilherme P. de Rosa¹ (lcl@ipt.br), Caio C. Spindola¹ (caiocso@ipt.br), Juliana A. da Silva¹ (julianasilva@ipt.br), Adriana Garcia¹ (adrianag@ipt.br), Carina B. F. Braga¹ (carinab@ipt.br), Robson C. Martins² (robson@bioware.com.br), Juan M. Perez² (juan@bioware.com.br)

1 Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Centro de Química e Manufaturados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

2 Desenvolvimento de Tecnologias em Energias e Meio Ambiente LTDA - BIOWARE

RESUMO

A necessidade de estudos de alternativas para disposição dos resíduos sólidos é uma realidade tanto no contexto brasileiro quanto no mundial. Entende-se que não existe uma solução única para a questão ambiental do descarte de resíduos, segundo a PNRS devem ser esgotadas todas as possibilidades antes da disposição final dos resíduos sólidos em aterros considerando: reutilizar, reciclar, recuperar e aproveitar o resíduo como energia ou compostagem. Dentre essas alternativas, o estudo da pirólise mostra que a conversão de resíduos sólidos em subprodutos líquidos, sólidos e gasosos, apresentam promissoras aplicações comerciais a serem estudadas, podendo reduzir o volume de resíduos que hoje em dia não possuem destinação adequada. Esta tecnologia pode ser considerada energeticamente autossustentável na medida em que não necessita de energia externa para operação, no entanto, ainda possui custos de operação elevados. No intuito de economizar gastos e ainda considerando o ponto de vista prático e científico, aplicou-se um modelo matemático o qual se verificou possível prever não apenas o balanço mássico da pirólise, como também a escolha do produto preferencial com base na composição alimentada sem a necessidade de inúmeros ensaios.

Palavras-chave: resíduo sólido urbano, pirólise, bio-óleo.

MATHEMATICAL MODEL APPLIED IN THE DETERMINATION OF BIO-OIL MASS BALANCE OBTAINED BY PYROLYSIS FROM CDR

ABSTRACT

The need for alternative researches of solid waste disposal is a reality in the Brazilian context, as well as in the global context. It is comprehended that there is no single solution to the environmental issue of waste disposal, however, according to the National Solid Waste Policy (PNRS), all the possibilities must be exhausted before landfill disposal, considering: reuse, recycle, recover, and use waste to energy or composting. Among these alternatives, the pyrolysis research shows that the conversion of waste into liquid, solid and gaseous byproducts present promising commercial applications to be studied. It can reduce the volume of waste that nowadays does not have adequate disposal. This technology can be considered energy-saving, once it does not require external power for operation; however, it still has high operating costs. In order to save costs and still considering the practical and scientific point of view, we applied a mathematical model which confirms that it is possible to predict not only the pyrolysis mass balance, but also the choice of the preferred product based on the fed composition without the need of countless trials.

Keywords: municipal solid waste, pyrolysis, bio-oil

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, a destinação do resíduo sólido urbano (RSU) vem se tornando um problema crescente para as prefeituras. Uma população maior gera mais resíduos e se expande para novos terrenos. Para agravar esse cenário, a coleta, transporte e armazenamento são fatores complexos nesse processo, uma vez que envolvem riscos à saúde e ao meio ambiente (ABRELPE, 2015).

No Brasil, o caminho adotado para a tentativa de solucionar esse problema do RSU foi a adoção da Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS determina que a destinação final em aterro só ocorra depois de esgotadas as possibilidades de reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético do resíduo sólido. Contudo, a falta de investimentos, cultura política, industrial e da população dificulta sua implementação de forma ideal (ABRELPE, 2015).

De modo geral, os resíduos sólidos urbanos são uma mistura complexa de diferentes substâncias que podem ser recicladas. Após etapa de separação e classificação, é possível obter uma fração de RSU mais homogênea composta basicamente por materiais plásticos, papéis e papelão, madeira e tecido, denominado de CDR – combustível derivado resíduo. O papel e o plástico são os itens mais significativos na coleta seletiva. Por possuírem elevado teor de carbono e poder calorífico, são considerados bons CDR's para a geração de energia ou para a produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (BUAH, et al., 2007).

Além da composição ser relativamente constante, a facilidade em transporte, armazenamento e atenuação de deterioração, faz com que o CDR seja superior quanto às características físicas e de combustão quando comparado a outros rejeitos (COZZANI, 1995).

De acordo com (SANTOS, et al., 2014), o Brasil ainda é muito incipiente no aproveitamento de RSU para geração de energia se comparado com outros países. No entanto, possui um grande potencial, considerando as 90 milhões de pessoas que vivem em regiões metropolitanas, gerando 1,2 Kg de resíduo por dia, sendo 45% do total com potencial para aproveitamento energético. Ou seja, 17,5 milhões de toneladas de resíduos por ano teriam o potencial de gerar 8,7 milhões de MWh processadas em usinas de recuperação energética (URE) – projetadas segundo Resolução SMA nº 79/2009. Mais de 50% do que chamamos lixo, e que formará os chamados "lixões", é composto por materiais que podem ser reutilizados ou reciclados (JARDIM, 1995).

O índice de reciclagem no Brasil ainda é baixo, cerca de 3 % do RSU (ABRELPE, 2015), a taxa de reciclagem de papel e papelão gira em torno de 67 %. O PET é o segmento que vem obtendo melhor resultado, com taxas de reciclagem pós-consumo da ordem de 60 %. O PEBD aparece em segundo lugar, com uma reciclagem pós consumo de cerca de 20 %; todos os outros polímeros (PEAD, PP, PS e PVC), porém, apresentam taxas inferiores a 10 % (MANSOR et al., 2010). O aumento da reciclagem desses materiais (papel, papelão e plásticos) é importante para o Brasil, devido á fatores ambientais, econômicos e sociais.

A busca por outras soluções podem ser estudadas, como por exemplo, a utilização do CDR contaminado que é jogado em aterros, rejeitos da compostagem e biodigestão ou de materiais recuperados dos aterros, desde que esgotadas todas as possibilidades previstas na PNRS.

Dentre as tecnologias existentes para aproveitamento energético do RSU ou CDR, a incineração é uma tecnologia amplamente difundida no mundo, reduz a quantidade de resíduos em aterro sanitário. Mesmo assim, possui vários fatores que impedem de ser difundida no Brasil, tais como: adequação à PNRS, alto custo quando comparado ao aterro sanitário, desmitificação do processo e vantagens quanto a sua utilização. Em vista disso, outras tecnologias vêm sendo estudada: uma delas é a conversão termoquímica (pirólise) de resíduos em líquido (bio-óleo e ácidos), sólido (carvão) e gás.

A pirólise é um processo de degradação térmica do combustível sólido, a qual pode ser realizada em ausência completa do agente oxidante ou em uma quantidade tal que a gaseificação não ocorra extensivamente. Esse processo ocorre em altas temperaturas e envolve várias reações químicas, cuja fração aquosa orgânica líquida é denominada de bio-óleo (PÉREZ, 2004).

Esse trabalho estudou um modelo matemático, a fim de estimar o rendimento dos produtos obtidos da pirólise em reator de bancada de leito fixo. Para realizar esses cálculos foi necessário uniformizar as amostras de CDR para obter um modelo numérico eficaz.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi estimar o balanço de massa dos produtos obtidos da pirólise das amostras de CDR empregando a modelagem de misturas.

3. METODOLOGIA

3.1 Preparação e caracterização de amostras

Foram utilizados papéis A4 usados como rascunho e caixas de papelão comuns (ondas E e BC) picados em pedaços de 1 cm x 1 cm. Para as amostras de poliestireno (PS) e polipropileno (PP), foram utilizados copos plásticos descartáveis provenientes do refeitório do IPT, lavados e picotados.

Após a preparação das amostras, foram realizados os ensaios físico-químicos (análise imediata e análise elementar) e foi determinada a perda de massa através da análise termogravimétrica (TGA) para a caracterização da matéria-prima (Tabela 1).

Tabela 1 - Ensaios para a caracterização das matérias-primas.

Análise	Ensaios	Unidade	Norma
Imediata	Umidade Total	% Massa	ASTM E1756
	Umidade Residual	% Massa	ASTM E1756
	Matérias Voláteis	% Massa	ASTM D1762
	Teor de Carbono Fixo	% Massa	ASTM D3172
	Teor de Cinzas	% Massa	ASTM E1755
Elementar	CHN	% Massa	ASTM D5373
	Teor de Oxigênio	% Massa	ASTM D3176
	Teor de Enxofre	% Massa	ASTM D4294
Potencial energético	Poder Calorífico Superior e Inferior	MJ/Kg	ASTM D5865
Termogravimétrica	TGA	-	ASTM E 1131

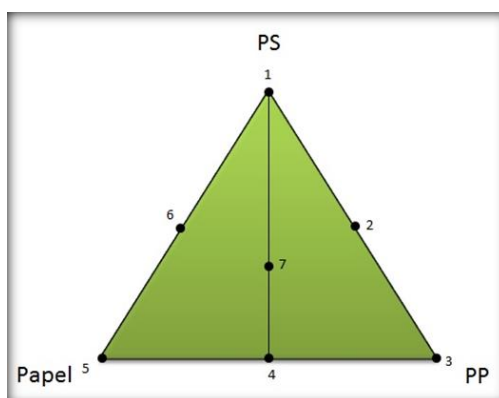
3.2 Obtenção de bio-óleo, carvão e gás por transformação termoquímica

Esse trabalho foi desenvolvido em cooperação entre o IPT e a empresa Bioware. Foi utilizado um reator em aço inox, em escala de bancada, com leito fixo, capacidade de 3 L, temperatura máxima 500 °C, condensador tubular vertical em aço inox com entrada e saída para água, à temperatura ambiente, onde o retorno era interligado com um reservatório para reaproveitamento de água. A fração líquida foi recolhida em frasco de vidro tipo erlenmeyer. O reator foi instalado dentro de uma capela provida de sistema de exaustão.

3.3 Planejamento experimental

Com base na literatura de NETO et al. (2002), o diagrama para os testes de pirólise do CDR (Figura 1) foi montado pelos elementos poliestireno (PS), polipropileno (PP) e papel (papel + papelão). Cada numeral apresentado no diagrama (pontos de 1 a 7) indica os componentes individuais (1, 3 e 5), as misturas binárias (2, 4 e 6) e a mistura ternária (7).

Figura 1 - Diagrama do planejamento dos experimentos de pirólise do CDR



A Equação 1 contém termos cruzados que descrevem as interações entre dois componentes, e por isso ele geralmente consegue reproduzir satisfatoriamente os valores da resposta nos vértices e nas arestas do triângulo, que representam respectivamente os componentes puros e suas misturas binárias. Sendo b_1^* o coeficiente da resposta medida em (PS), b_2^* em (PP), b_3^* em (Papel), b_{12}^* em (PS+PP), b_{13}^* em (PS+Papel) e b_{23}^* a resposta em (PP+Papel).

$$y = b_1^* x_1 + b_2^* x_2 + b_3^* x_3 + b_{12}^* x_1 x_2 + b_{13}^* x_1 x_3 + b_{23}^* x_2 x_3 \quad (1)$$

Para calcular o coeficiente da equação de modelo quadrático (misturas puras e binárias) utilizarmos as seguintes Equações (2, 3 e 4).

$$b_{PS}^* = y_1 \quad b_{(PS+PP)}^* = 4y_{12} - 2(y_1 + y_2) \quad (2)$$

$$b_{PP}^* = y_2 \quad b_{(PS+Papel)}^* = 4y_{13} - 2(y_1 + y_3) \quad (3)$$

$$b_{Papel}^* = y_3 \quad b_{(PP+Papel)}^* = 4y_{23} - 2(y_2 + y_3) \quad (4)$$

A determinação da superfície de resposta no interior do triângulo (misturas de três componentes) é dado pela Equação 5. Que nada mais é acrescentar um termo cúbico ao modelo quadrático da equação anterior considerando a identidade $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ e fazendo substituições apropriadas tem-se:

$$y = b_1^* x_1 + b_2^* x_2 + b_3^* x_3 + b_{12}^* x_1 x_2 + b_{13}^* x_1 x_3 + b_{23}^* x_2 x_3 + b_{12}^* x_1 x_2 (x_1 - x_2) + b_{13}^* x_1 x_3 (x_1 - x_3) + b_{23}^* x_2 x_3 (x_2 - x_3) + b_{123}^* x_1 x_2 x_3 \quad (5)$$

Para que não seja necessário realizar dez ensaios diferentes, tendo em vista que a equação 5 possui dez termos e então seria necessário calcular dez coeficientes, adota-se um único termo cúbico, por aproximação, para que o modelo passe a descrever satisfatoriamente toda região experimental. Esta expressão de modelo cúbico especial, com apenas um termo a mais que o modelo quadrático (Equação 6) faz com que seja necessário apenas um ensaio adicional de mistura ternária.

$$y = b_1^* x_1 + b_2^* x_2 + b_3^* x_3 + b_{12}^* x_1 x_2 + b_{13}^* x_1 x_3 + b_{23}^* x_2 x_3 + b_{123}^* x_1 x_2 x_3 \quad (6)$$

Para a mistura de três componentes, o coeficiente do termo cúbico é dado por (Equação 7) onde y_{123} é a resposta observada para a mistura ternária (Papel+PP+PS) na proporção de (1:1:1).

$$b_{(PS+PP+Papel)}^* = 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3) \quad (7)$$

Nesse trabalho, conforme a sequência do diagrama, foram realizados ensaios em triplicata para cada tipo de composição, ou seja, para o componente individual PS (ponto 1), a mistura binária Papel + PP (ponto 4) e para a mistura ternária Papel + PS + PP (7), a fim de calcular o desvio padrão para avaliação da repetibilidade dos testes e para as demais composições foi realizada uma única determinação, totalizando 13 testes de pirólise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da matéria-prima foi importante para avaliar inicialmente as propriedades que determinam seu comportamento durante o processo de conversão térmica e a geração dos produtos, auxiliando dessa forma para ajustar parâmetros da reação de pirólise.

Os resultados dos ensaios físico-químicos realizados para a caracterização da matéria-prima estão descritos na Tabela 2. Os ensaios foram realizados em base seca. Como era de se esperar as amostras de papel e papelão tiveram composição similar quanto à análise elementar (CHNSO), matérias voláteis e poder calorífico 15 MJ/kg em média (valores típicos ao de amostras de biomassa, conforme resultados apresentados no trabalho de MENDONÇA, et al., 2008). Já o teor de cinzas teve valor maior para papel (13,8 %) e em seguida papelão (8,3 %), invertendo os resultados do carbono fixo (7,3 % e 12,4 %), respectivamente. Como os plásticos são derivados petróleo, compostos principalmente por hidrocarbonetos, apresentaram características diferentes quando comparado com as amostras de papel e papelão, com teores maiores de carbono (84 % a 92%), hidrogênio (8 % a 15 %), matérias voláteis (próximo a 100 %), poder calorífico (41 % a 47 %) e, teores baixos de cinza, carbono fixo e oxigênio. Os teores de enxofre e nitrogênio foram baixos para todas as amostras analisadas.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios físico-químicos da matéria prima.

Tipo de Amostra	C (%)	H (%)	N (%)	Cinzas (%)	Matérias Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	S (%)	O (%)	PCS
Papelão	41,2	5,96	0,2	8,3	79,3	12,4	0,10	44,24	15,59
Papel	38,6	5,62	0,199	13,8	78,9	7,3	0,09	41,98	14,36
PS	91,6	8,21	0,19	0,09	98,0	2,0	0,09	0,19	41,04
PP	84,1	14,57	0,19	0,1	99,9	0,0	0,09	1,2	46,62

As amostras de papel e papelão tiveram comportamentos similares, onde a maior perda de massa (cerca de 60 %) ocorreu na segunda perda de massa a uma temperatura média de 190 °C a 411 °C. Já as amostras de plásticos tiveram praticamente sua perda total de massa ocorrendo na primeira perda de massa (de 300 °C a 500 °C). Quanto ao resíduo sólido o valor residual ficou na faixa dos 20 % para as amostras de papel e papelão e em torno de 1 % para os plásticos.

Conforme citado no planejamento experimental, foi utilizado o modelo cúbico especial (Equação 6) para estimativa das diferentes misturas. A Tabela 3 apresenta os rendimentos dos produtos sólido (carvão), líquido (óleo + fração aquosa) e gás obtidos após pirólise do CDR. O desvio padrão, calculado de três repetições, foi utilizado para avaliar a precisão dos testes da pirólise. Para um único componente, no caso o poliestireno, o desvio obtido foi o menor quando comparado com as misturas binárias e ternárias. Contudo, para a fração líquida, o desvio padrão seguiu uma ordem crescente, sendo 1,01 % para a pirólise de poliestireno, 2,22 % para a pirólise da mistura (PP + Papel) e 3,79 % para a mistura ternária. Já para o rendimento dos produtos sólidos e gasosos a menor precisão foi observada para a mistura (PP + Papel). A melhor precisão foi observada para o gás do PS com desvio padrão de 0,46 %.

Para o modelo matemático do rendimento líquido da pirólise de CDR foram calculados os coeficientes (b_i) de i componentes e suas respectivas frações, conforme mostrado na Tabela 4. O alto valor do coeficiente $b_{PP,PS}$ (19,47) sugere imediatamente uma forte interação sinérgica entre

os componentes polipropileno e poliestireno. Avaliação análoga pode-se fazer para o coeficiente dos componentes poliestireno e papel (5,52) e inversamente pode-se considerar interação negativa forte para o coeficiente dos componentes polipropileno e papel (-13,23), e interação fortemente negativa para a mistura dos três componentes (-135,82). Entretanto, a prática estatística indica a interpretação dos resultados após ter uma estimativa de sua margem de erro. Como não foram realizadas repetições para todas as amostras, não foram calculadas as estimativas dos erros padrão dos coeficientes, portanto o modelo foi mantido integralmente sem adotar um modelo simplificado, caso alguns dos seus coeficientes tivessem valores menores aos seus respectivos erros.

Tabela 3 - Rendimento dos produtos da pirólise de CDR em porcentagem massa

Sequência CDR	Balanço (% massa)								
	Sólido			Líquido			Gás		
	Valores	Média	Desvio Padrão	Valores	Média	Desvio Padrão	Valores	Média	Desvio Padrão
1 (PS)	16,40	15,20	1,44	78,40	79,33	1,01	5,20	5,47	0,46
	15,60			79,20			5,20		
	13,60			80,40			6,00		
2 (PP+PS)	7,67	--	--	66,33	--	--	26,00	--	--
3 (PP)	0,80	--	--	43,60	--	--	55,60	--	--
4 (Papel + PP)	29,33	26,44	5,00	35,33	37,78	2,22	35,33	35,78	5,01
	20,67			38,33			41,00		
	29,33			39,67			31,00		
5 (Papel)	33,14	--	--	38,57	--	--	28,29	--	--
6 (Papel+PS)	25,00	--	--	60,33	--	--	14,67	--	--
7 (Papel+PS+PP)	28,00	29,33	3,21	49,00	50,11	3,79	23,00	20,56	2,22
	33,00			47,00			20,00		
	27,00			54,33			18,67		

Tabela 4 - Coeficientes b_i dos i componentes para construção do modelo do rendimento líquido

i	x_1 (PS)	x_2 (PP)	x_3 (Papel/Papelão)	Coeficientes (b_i)
1	1	0	0	79,33
3	0	1	0	43,60
5	0	0	1	38,57
2	1/2	1/2	0	19,47
6	1/2	0	1/2	5,52
4	0	1/2	1/2	-13,23
7	1/3	1/3	1/3	-135,82

O modelo para o rendimento líquido da pirólise de CDR foi então representado pela Equação 8.

$$\hat{y} = 79,33x_1 + 43,60x_2 + 38,57x_3 + 19,47x_1x_2 + 5,52x_1x_3 - 13,23x_2x_3 - 135,82x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Para a estimativa do rendimento dos produtos carvão (equação 9) e gás (equação 10), pode-se obter modelos utilizando o mesmo procedimento para obtenção do rendimento líquido.

$$\hat{y} = 15,20x_1 + 0,80x_2 + 33,14x_3 - 1,33x_1x_2 + 3,31x_1x_3 + 37,89x_2x_3 + 230,10x_1x_2x_3 \quad (9)$$

$$\hat{y} = 5,47x_1 + 55,60x_2 + 28,29x_3 - 18,13x_1x_2 - 8,84x_1x_3 - 24,66x_2x_3 - 94,28x_1x_2x_3 \quad (10)$$

Com esses modelos então, é possível estimar diferentes proporções de componentes do CDR, conforme variação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados nas diversas cidades brasileiras, por exemplo. A Tabela 5 apresenta alguns resultados estimados variando a composição de CDR.

Importante destacar que para testar a qualidade dos modelos será necessário a preparação de novas misturas reais que não foram utilizadas na modelagem, e observar como os valores previstos por cada modelo.

Tabela 5 – Resultados estimados variando a composição de CDR

<i>i</i>	<i>x</i> ₁ (PS)	<i>x</i> ₂ (PP)	<i>x</i> ₃ (Papel/Papelão)	Sólido (%)	Líquido (%)	Gás (%)
1	0,1	0,1	0,8	33	42	25
2	0,1	0,8	0,1	10	46	44
3	0,8	0,1	0,1	18	72	10
4	0,2	0,2	0,6	34	44	22
5	0,2	0,6	0,2	20	47	32
6	0,6	0,2	0,2	23	63	14
7	0,3	0,3	0,4	31	48	21
8	0,3	0,4	0,3	28	49	23
9	0,4	0,3	0,3	28	53	19
10	0,6	0,1	0,3	25	63	12
11	0,1	0,3	0,6	33	40	27
12	0,3	0,1	0,6	32	50	19
13	0,7	0,1	0,2	22	68	11
14	0,1	0,2	0,7	34	41	26
15	0,2	0,1	0,7	33	46	22

5. CONCLUSÃO

Foi possível empregar a modelagem de misturas como ferramenta matemática e determinar o rendimento da pirólise, como também estimar as frações (sólido, líquido e gasoso) do produto final. As equações demonstradas facilitaram observar os resultados que seriam obtidos caso se quisesse modificar a formulação de uma mistura, considerando que o ultimo componente será sempre o que faltar para completar 100%. Ao utilizar essa modelagem é viável realizar a otimização do produto final e processo, uma forma mais segura de avaliar a potencialidade de conversão de energia de um determinado resíduo.

6. AGRADECIMENTO

Ao IPT pela oportunidade oferecida em desenvolver projetos de pesquisa e desenvolvimento. À Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (FIPT) por disponibilizar recursos para o desenvolvimento desse projeto.

A equipe técnica do LCL e Laboratório de Análises Químicas – LAQ pela caracterização dos produtos obtidos.

A equipe da Bioware pelo apoio na realização dos testes de pirólise.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2015. São Paulo (SP).

BUAH, W. K.; CUNLIFFE, A. M.; WILLIAMS, P. T. Characterization of products from the pyrolysis of municipal solid waste. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 85, n. 5, p. 450–457, 2007.

COZZANI, V., NICOLELLA, C., PETARCA, L., ROVATTI, M., TOGNOTTI, L., 1995. A fundamental study on conventional pyrolysis of a refuse-derived fuel. *Ind. Eng. Chem. Res.*34.

JARDIM, N. S.; WELLS C.(Coords.). *Lixo Municipal - Manual de Gerenciamento Integrado*. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas; CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. São Paulo, 1ª ed., 1995. 278 p.

MANSOR, Maria Teresa C.; CAMARÃO, Teresa Cristina R. Costa; CAPELINI, Márcia; KOVACS, André; FILET, Martinus; SANTOS, Gabriela de A.; SILVA, Amanda Brito. *Resíduos sólidos (cadernos de educação ambiental, 6)*. Secretaria do Estado do meio ambiente. Coordenadoria de planejamento ambiental. São Paulo: SMA, 2010.

MENDONÇA, M. A.; GARCIA, A.; ANTONOFF, H. B. Determinação do poder calorífico em diferentes tipos de biomassa. In: *SIAGRE 2008 - Simpósio Brasileiro de Agroenergia, 2008, Botucatu - SP. SIAGRE 2008, 2008.*

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 2ª. ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2002. 401 p.

PÉREZ, J.M. *Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leiteo fluidizado: critérios para sua otimização*. 2004. 189f. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola, UNICAMP, São Paulo – SP.

SANTOS, A. T.L.; NIRVANI, S.H.; SHHLINDWEIN, J. A.; FERREIRA, E.; STACHIW, R. Aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos para produção de composto orgânico. *Revista Brasileira de Ciências da Amazônia*, v. 3, n. 1, p. 15-28, 2014.