

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS



APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PROCESSO DE PIRÓLISE¹

MARCELO MENDES PEDROZA², MAGDA CRISTINA FERREIRA DE ARAUJO GOMES³, ELAINE CUNHA DA SILVA PAZ², ARGEMIRO LIMA PEDROSA⁴, GLÁUCIA ELIZA GAMA VIEIRA⁵, JOÃO EVANGELISTA MARQUES SOARES⁶

¹Aceito para Publicação no 1º Trimestre de 2017.

²Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas, AE 310 SUL, Av. LO 05, Palmas–TO, Brasil, CEP.: 77.021-090. mendes@ifto.edu.br, elaine@ifto.edu.br.

³Facorplast Ind. Com. De Plásticos Ltda, Quadra 1112 SUL, Al 9, Lt 5, Palmas–TO, Brasil, CEP.: 77024-160.: mcferrara12@gmail.com.

⁴Instituto Federal do Tocantins, campus Porto Nacional, Avenida Tocantins, A.I., Loteamento Mãe Dedé, Porto Nacional–TO, Brasil, CEP.: 77500-000. pedrosa@ifto.edu.br.

⁵Universidade Federal do Tocantins, campus Palmas, Av. NS 15, 109 Norte, Palmas–TO, Brasil, CEP.: 77001-090. glau.eliza@ig.com.br.

⁶Prefeitura Municipal de Palmas, 104 NORTE, Av. JK Edifício Via Nobre Empresarial, Lt 28 A, Palmas–TO, Brasil, CEP.:77066-014. jemarquess@gmail.com

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo apresentar as características físicas e químicas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e avaliar o seu aproveitamento por meio do processo de pirólise. Essa revisão da literatura apresenta os RSU como uma fonte de matéria prima para o desenvolvimento de rotas térmicas de obtenção de produtos químicos valiosos. Os RSU são materiais heterogêneos constituídos principalmente de papel, papelão, plásticos, vidros, metais, têxteis, restos de comidas e materiais inertes. A pirólise é um processo endotérmico realizado

na ausência de oxigênio, gerando como produtos finais bio-óleo, gases e finos de carvão. As características da biomassa influenciam na composição do produto gerado a partir processo, bem como as condições de operação do reator. O bio-óleo apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados, o que aponta

para a possibilidade do seu uso como biocombustível. A fração gasosa obtida através da pirólise de RSU possui alto poder calorífico e é composta por hidrocarbonetos, hidrogênio, CO e CO₂. O carvão também pode ser empregado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas de efluentes industriais, substituindo o carvão ativado comercial. Reatores de pirólise de RSU em escala real devem apresentar um sistema de purificação do gás de síntese como forma de evitar a contaminação ambiental através de compostos presentes na fração gasosa.

Palavras-chave: energia, biocombustíveis, bio-óleo, carvão.

ENERGY UTILIZATION OF URBAN SOLID WASTE IN PYROLYSIS PROCESS.

Abstract

This work aims to present the physical and chemical characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) and to evaluate its use through the pyrolysis process. This review of the literature presents MSW as a source of raw material for the development of thermal routes to obtain valuable chemicals. MSW are heterogeneous materials consisting mainly of paper, cardboard, plastics, glass, metals, textiles, food waste and inert materials. Pyrolysis is an endothermic process performed in the absence of oxygen, generating as final products bio-oil, gases and coal fines. The biomass characteristics influence the composition of the product generated from the process, as well as the operating conditions of the reactor. The bio-oil presents high calorific power and absence of sulfur compounds, which points to the possibility of its use as biofuel. The gas fraction obtained through the MSW pyrolysis has high calorific value and is composed of hydrocarbons, hydrogen, CO and CO₂. Coal can also be employed in the removal of heavy metals and organic substances from industrial effluents, replacing commercial activated carbon. Real-scale MSW pyrolysis reactors must present a synthesis gas purification system as a way of avoiding environmental contamination through compounds present in the gas fraction.

Key-words: energy, biofuels, bio-oil, coal.

Introdução

Os Resíduos sólidos urbanos (RSU) consistem principalmente de resíduos domésticos e comerciais. Segundo a Norma Brasileira NBR 10004 de 1987, esses resíduos são compostos principalmente de papel, papelão, plásticos, vidros, metais, têxteis, restos de comidas e resíduos de jardins. Como tal, os resíduos contêm uma proporção elevada de materiais renováveis que podem serem utilizadas para recuperação de energia ou para a produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Segundo dados obtidos na literatura, são gerados em todo o mundo a cada ano uma grande quantidade de RSU: cerca de 246 milhões de toneladas no EUA, 28 milhões de toneladas no Reino Unido e 40 milhões toneladas no Japão (WILLIAMS, 2005). O Banco Mundial espera que a geração mundial de RSU atinja 2,2 bilhões de toneladas até 2025. A estimativa atual de geração de RSU é de 1,3 bilhão de toneladas por ano (BERNARDI, 2014).

No Brasil, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2012 foram coletadas 183,5 mil toneladas de resíduos sólidos por dia, em 90% do total de domicílios, o que representa 98% das moradias urbanas, mas apenas 33% das rurais. A matéria orgânica representa 51,4% do lixo diário, e 31,9% é composto de material reciclável (alumínio, plásticos, papel, aço, metais e vidro).

Estudo feito pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), os brasileiros geraram em 2010 cerca de 60,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), crescimento de 6,8 % sobre 2009. Desses, quase 23 milhões de toneladas, ou 42,4 %, foram depositadas em locais inadequados: lixões ou aterros controlados — onde o chorume, líquido originado pela decomposição, não é tratado e pode contaminar os lençóis d’água.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo IBGE em 2012, revela uma tendência positiva com relação à situação de destinação final do lixo coletado no país nos últimos anos. Observa-se, portanto que, boa parte dos RSU no Brasil é descartada comumente em aterros sanitários. Os resíduos de saúde passam pelo processo de incineração, objetivando diminuir a sua quantidade antes da sua destinação final. Outras opções de eliminação de resíduos que podem ser adotadas são a compostagem e a digestão anaeróbica. No entanto, segundo o estudo do IBGE, tais processos são aplicados a pequenas quantidades dos

resíduos descartados.

Apesar das vantagens associadas ao processo de incineração de resíduos sólidos urbanos, tais como recuperação de calor dos resíduos e redução considerável do volume de RSU, tal processo apresenta numerosas desvantagens, incluindo produção de grandes volumes de gases de combustão, fluxo de resíduos perigosos associados com as cinzas produzidas durante o tratamento térmico e uma baixa imagem pública (WILLIAMS, 2005). Além disso, tem contra si os elevados custos operacionais e de investimentos, tanto nas instalações de usinas, como em outras instalações de proteção ambiental, que são imprescindíveis.

No Brasil, atualmente, a situação da incineração é um pouco mais polêmica uma vez que esta é somente utilizada para resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos e parte dos resíduos hospitalares. Não se tem registro de aproveitamento do potencial energético gerado no processo no país.

Em contra partida, a disposição de RSU via aterro sanitário é um processo menos oneroso se comparado à incineração, mas aterros mais próximos dos pontos de coleta de resíduos são cada vez mais escassos e os custos de transporte desses resíduos são cada vez mais elevados.

A pirólise surge como um processo alternativo de destinar adequadamente materiais com potencial poluidor do meio ambiente bem como uma forma de agregação de valor aos RSU por se tratar de um processo de conversão energética de uma biomassa, onde a degradação térmica dos componentes moleculares ocorre na ausência parcial ou total de oxigênio entre temperaturas de 300 a 1000 °C. Observa-se que os produtos obtidos apresentam maior potencial energético que daquelas biomassas empregadas no processo (PEDROZA *et al.*, 2014).

A Biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, suscetível a ser transformada em energia ou bioenergia. O uso da mesma se apresenta como uma boa opção energética, pois é renovável e gera baixas quantidades de poluentes.

A pirólise de matéria orgânica ou biomassa tem uma capacidade de fornecer produtos

finais com valor agregado tais como o bio-óleo, a fração gasosa e o carvão, podendo ser utilizados a nível industrial. O óleo resultante da pirólise de biomassa, usualmente denominado de bio-óleo, além de ser um combustível líquido renovável, apresenta vantagem sobre derivados do petróleo, pode ser fonte para a produção de várias substâncias químicas.

A pirólise de resíduos sólidos urbanos tem sido estudada extensivamente, a fim de avaliar as influências de parâmetros de funcionamento (ou seja, temperatura, tempo de residência das fases, diâmetro da partícula do resíduo, influência de catalisadores). O emprego de RSU em processo térmico contribui para a diversificação do plano energético brasileiro. O bio-óleo é um líquido que apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados, o que aponta para a possibilidade de aplicação deste produto como biocombustível. O bio-óleo pode ser utilizado em substituição do óleo diesel em caldeiras, ligantes na fabricação de briquetes siderúrgicos, emulsões para asfalto, aditivos de gasolina e óleo – diesel. A fração gasosa obtida tem alto poder calorífico e é composta por hidrocarbonetos de até 6 carbonos, hidrogênio, CO e CO₂. O gás de síntese (CO e H₂) é representativo na mistura e pode ser empregado em processos químicos (síntese do metanol, da amônia e reações do Tipo Fischer-Tropsch para obtenção de gasolina ou mesmo diesel). O carvão também pode ser empregado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial. Além disso, podem ser utilizados em caldeiras e fornos tubulares, fornos comerciais (pizzaria, padaria, dentre outros) e uso doméstico (lareiras e churrasqueiras) (VIEIRA *et al.*, 2009; PEDROZA *et al.*, 2014).

Diante destas considerações, o objetivo deste estudo de caráter teórico foi contextualizar a produção e a destinação final de RSU. Neste contexto, destacando o processo de pirólise como uma importante alternativa para o aproveitamento de biomassas e forma potencial de agregação de valor e de obtenção de produtos químicos renováveis e até mesmo na substituição de petroquímicos, insumos da indústria química.

Metodologia

Esta pesquisa constituiu-se de uma revisão da literatura com a finalidade de retratar os resíduos sólidos urbanos como uma fonte de possibilidades para o desenvolvimento de rotas térmicas de obtenção de produtos químicos (bio-óleo, carvão e gases) menos impactantes ao

meio ambiente e alternativos aos produtos petroquímicos. Algumas pesquisas e estudos demonstram que a pirólise de biomassa contribui para a diversificação da matriz energética brasileira, sendo esse processo térmico uma importante alternativa de aproveitamento e agregação de valor ao resíduo sólido ao transformá-lo em matéria-prima de processos. Os trabalhos analisados para a produção deste foram consultados através das bases de dados Science Direct, Scielo, Scopus, etc. Os principais termos utilizados para a pesquisa foram: “resíduos sólidos urbanos”, “pirólise”, “biomassa”, “produção de resíduos”, “aproveitamento energético” e “bio-óleo”.

Resultados e Discussão

Os dados obtidos durante esse levantamento bibliográfico foram expostos de forma numérica. A discussão dos resultados se deu através da análise crítica dos autores fundamentada nos dados reportados na literatura.

Características e Produção de Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo a Lei Nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), resíduos sólidos são restos resultantes de atividades humanas, nos estados sólido ou semissólido, gasoso ou até mesmo líquido. Ainda podem ser classificados quanto à sua origem e quanto à sua periculosidade, conforme consta no Art. 13 da PNRS (BRASIL, 2010). Quanto à origem, os resíduos sólidos podem ser classificados em: domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais, resíduos da construção civil, de saúde, de atividades agrossilvopastoris, serviços de transporte, mineração e de serviços de saneamento básico. Quanto à periculosidade, são considerados os resíduos perigosos e não perigosos, sendo os perigosos aqueles que apresentam risco à saúde pública ou a qualidade ambiental, em razão de suas características. Na Tabela 1 são destacadas as principais fontes geradoras de resíduos sólidos urbanos.

Tabela 1 – Atividades geradoras de resíduos sólidos urbanos

Atividades geradoras	Componentes	% do Total de RSU
Residencial	Desperdício de cozinha, papéis, plásticos, vidro, metais, têxteis, resíduos de jardins, terra, entre outros	50 a 75
Comercial	Papéis, plásticos, madeira, restos de comida, vidro, metais, resíduos especiais e perigosos	10 a 20
Institucional	Semelhante ao comercial	5 a 15
Indústria	Restos de processo industrial, fragmentos, entre outros. Incluindo restos de comida, cinzas, demolição e construção, especiais e perigosos.	5 a 30
Limpeza de vias e áreas públicas	Resíduos de pedestres, terra, folhas, fezes, entre outros.	10 a 20

Fonte: JARAMILLO (2007), PEDROZA (2011)

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2012), a geração de RSU no país cresceu 1,3%, de 2011 para 2012, índice que é superior à taxa de crescimento populacional urbano no país no período, que foi de 0,9 % (ABRELPE, 2012). A quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados por habitante/dia varia de local para local e até mesmo com a época do ano. Os dados registrados para a geração per capita de RSU no Brasil para os anos de 2011 e 2012 foram de 381,6 e 383,2 kg/hab/ano, respectivamente. Em geral, quanto maior o produto interno bruto (PIB) de um país, maior é a quantidade gerada de RSU e maior a fração de materiais como o plástico, papel, vidro e metais. A quantidade de RSU coletados em 2012 cresceu em todas as regiões, em comparação ao dado de 2011. A região sudeste continua respondendo por mais de 50% do RSU coletados e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta do país (Figura 1).

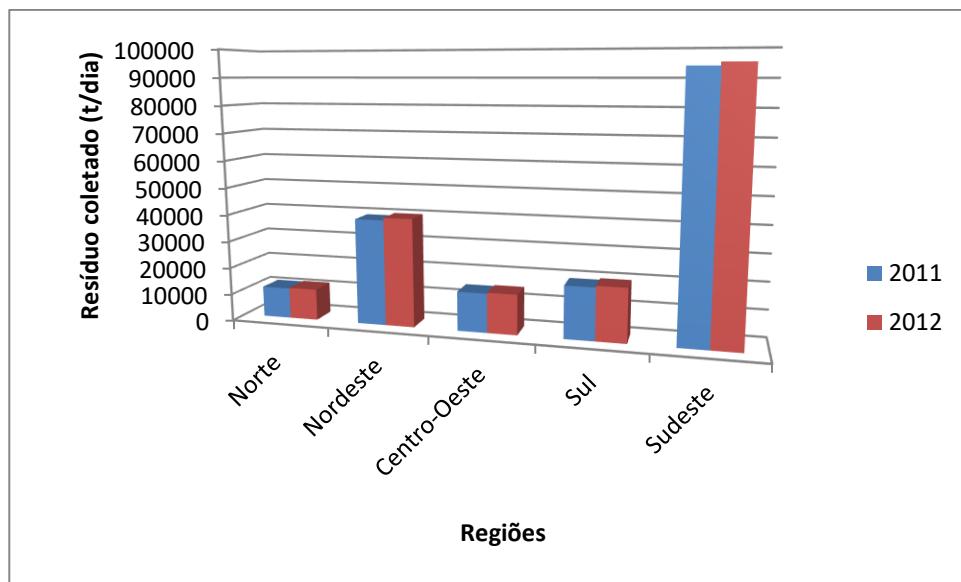


Figura 1 – Produção de resíduos sólidos no Brasil. Fonte: ABRELPE (2012)

A Tabela 2 apresenta a composição gravimétrica de RSU em vários tipos de países. Observa-se que a participação da matéria orgânica tende a diminuir nos países industrializados, provavelmente em decorrência da grande incidência de alimentos semipreparados disponíveis no mercado consumidor. Percebe-se também que os países mais pobres geram menor quantidade de resíduos sólidos recicláveis.

T

Tabela 2 – Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos

Composição (% base úmida)		Países		
		Produção baixa	Produção média	Industrializados
Vegetais e material putrescível		40 a 85	20 a 65	20 a 50
Papel		1 a 10	15 a 40	15 a 40
Plásticos		1 a 5	2 a 6	2 a 10
Metais		1 a 5	1 a 5	3 a 13
Vidros		1 a 10	1 a 10	4 a 10
Couro e pneus		1 a 5	1 a 5	2 a 10
Inertes (cinzas, terra e areia)		1 a 40	1 a 30	1 a 20
Outras Características				
Umidade (%)		40 a 80	40 a 60	20 a 30
Densidade (kg/m ³)		250 a 500	170 a 330	100 a 170
Poder calorífico inferior (kcal/kg)		800 a 1.100	1.100 a 1.300	1.500 a 2.700

Fonte: JARAMILLO (2007)

Processos Térmicos de Resíduos Sólidos Urbanos

Na Figura 2 são apresentados os três principais processos térmicos disponíveis para a conversão de biomassa: Pirólise, Gaseificação e Combustão (BRIDGWATER, 2011).

A combustão da biomassa constitui o sistema mais empregado para o aproveitamento de resíduos lenhosos; representa cifras relativamente importantes dentro da estrutura de consumo energético dos países menos desenvolvidos. A combustão produz gases quentes atingindo temperaturas de 800 a 1000 °C. Cerca de 80% da combustão de biomassa ocorre nos trópicos. Ela é a maior fonte de produção de gases tóxicos, material particulado e gases do efeito estufa no planeta, influencia a química e a física atmosférica, produz espécies químicas que mudam significativamente o pH da água da chuva, e afeta o balanço térmico da atmosfera pela interferência na quantidade de radiação solar refletida para o espaço (KHIARI *et al.*, 2004).

O objetivo principal da gaseificação é a conversão de biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial com ar, oxigênio ou vapor de água a altas temperaturas, tipicamente, na faixa de 800 – 900 °C. Este gás cujo poder calorífico se situa entre 4 – 6 MJ/Nm³, pode ser queimado diretamente ou usado como combustível para motores de combustão interna e turbinas a gás (BRIDGWATER, 2011).

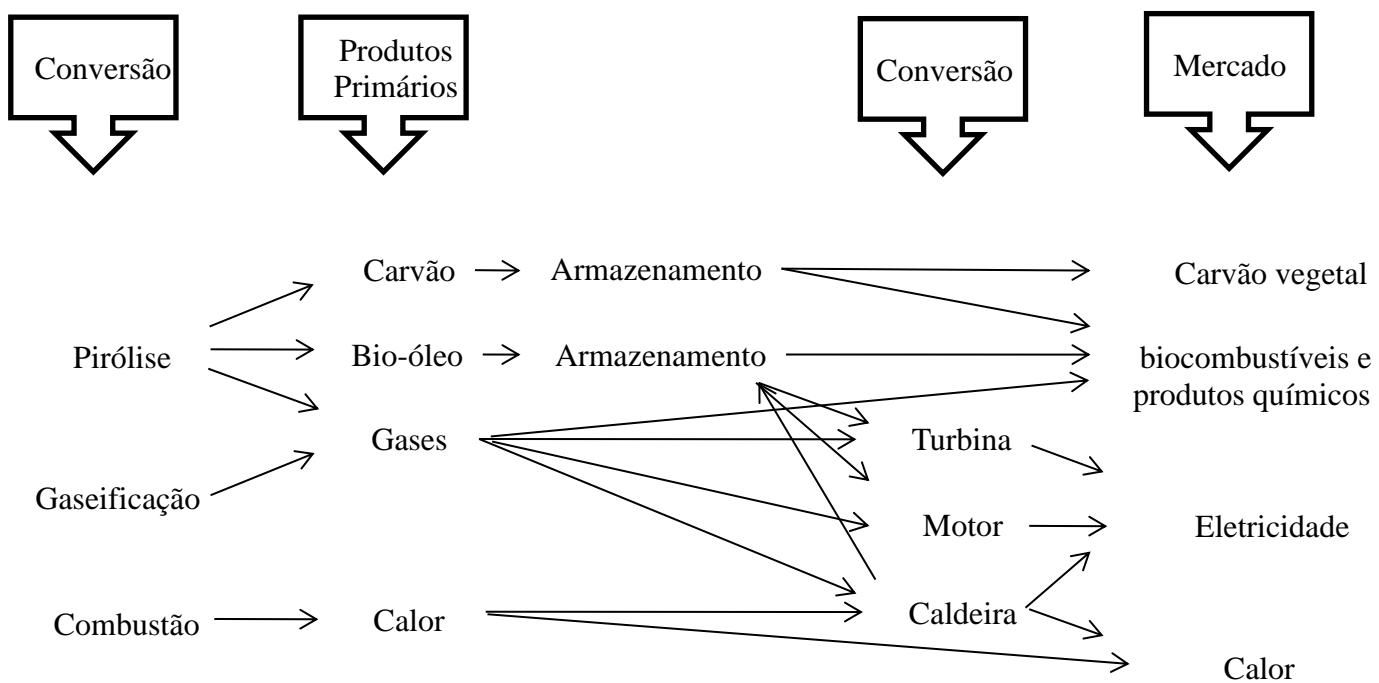


Figura 2 – Produtos da conversão térmica de biomassa. Fonte: BRIDGWATER (2011)

Segundo PEDROZA *et al.*, (2010) a pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou em um ambiente com uma concentração de oxigênio baixa capaz de evitar a gaseificação do material orgânico. A pirólise geralmente ocorre a uma temperatura que varia desde os 400 °C até o início do regime de gaseificação.

As principais variáveis que controlam os processos térmicos são: (1) taxa de aquecimento, (2) temperatura, (3) tempo de residência das fases sólida e gasosa e (4) diâmetro da partícula do sólido. De acordo com estas variáveis de processos, os tipos de pirólise foram subdivididos em: (1) carbonização; (2) convencional; (3) rápido; (4) flash-líquido; (5) flash-gás; (6) ultra; (7) vácuo; (8) hidro-pirólise e (9) metano-pirólise (PEDROZA, 2011), conforme Tabela 3.

O processo de pirólise convencional é utilizado para a produção de carvão, no entanto a pirólise rápida é considerada um processo avançado, no qual, podem ser obtidas quantidades consideráveis de bio-óleo. As temperaturas nesse caso podem variar entre 550 e 650°C (PEDROZA *et al.*, 2014).

A carbonização, uma variante do processo de pirólise, é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, durante a carbonização do resíduo sólido ocorre a produção de bio-óleo e ácido piro-lenhoso (PEDROZA *et al.*, 2011).

O processo de pirólise rápida pode ser empregado durante a obtenção de elevados rendimentos de bio-óleo com a operação do reator nas seguintes condições: (a) taxas elevadas de aquecimento variando entre 600 e 1200 °C/min, (b) temperatura de reação de 500 °C, (c) tempo de residência dos vapores menor que 2 segundos, (d) rápida transferência de massa do interior da partícula para a superfície e rápido resfriamento de vapores e (e) biomassa com diâmetro de partícula de até 2 mm e umidade em torno de 10 % (GÓMEZ, 2002).

Tabela 3 – Variantes do Processo de Pirólise

Variantes do processo	Tempo de Residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
Carbonização convencional	Horas/dias	400 – 450	carvão vegetal
rápida	5 – 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
flash-líquido	0,5 – 5 seg	500 – 550	bio-óleo
flash-gás	< 1 seg	< 650	bio-óleo
Vácuo	< 1 seg	> 650	gás combustível
metano-pirólise	2 – 30 seg	400	bio-óleo
hidro-pirólise	< 10 seg	>700	produtos químicos
	< 10 seg	<500	bio-óleo e produtos químicos

Fonte: PEDROZA (2011)

Efeito das variáveis que influenciam no processo de pirólise

De acordo com VIEIRA *et al.*, (2011), os processos de degradação térmica de materiais orgânicos são influenciados por diversos fenômenos físicos e químicos. Os processos de pirólise acontecem através de reações químicas complexas, os quais dependem qualitativa e quantitativamente das condições reacionais e das características próprias da biomassa. As principais variáveis relacionadas com as condições de operação do sistema pirolítico são: taxa de aquecimento do reator, temperatura de reação, tempo de residência das fases sólida e vapores e pressão no reator (GÓMEZ, 2002).

As variáveis empregadas na pirólise de biomassa, tais como temperatura final, taxa de aquecimento e tipo de atmosfera, têm grande influência no rendimento e composição das frações sólida, gasosa, líquida orgânica e aquosa obtidas no processo. O aumento da temperatura do reator pode direcionar a obtenção de maiores rendimentos das frações oleosa e gasosa bem como um baixo conteúdo da fração sólida. A redução no rendimento da fração sólida com o aumento da temperatura deve ser atribuída a um aumento da volatilização dos hidrocarbonetos sólidos no carvão, bem como ao efeito de gaseificação dos resíduos de carbono (SÁNCHEZ *et al.*, 2009).

O aumento de produtos gasosos está associado às reações secundárias de craqueamento dos vapores em altas temperaturas. No entanto, a decomposição secundária da fração sólida em altas temperaturas também pode contribuir para a formação de produtos gasosos não condensáveis, devido às reações heterogêneas entre os componentes do sólido e gasosos, como H₂O (PEDROZA *et al.*, 2010).

O tempo de residência dos vapores no reator de pirólise também influencia na obtenção dos tipos de produtos obtidos no processo. Longos tempos de residência dos vapores podem favorecer a fração sólida, com consequente diminuição das frações líquidas e gasosa (SÁNCHEZ *et al.*, 2009).

Segundo GÓMEZ (2002), o rendimento de produtos voláteis se incrementa na medida em que a taxa de aquecimento aumenta. Para altas taxas de aquecimento e temperaturas, os produtos líquidos do processo dentro do reator podem sofrer craqueamento, aumentando-se a produção de gás. A produção de carvão é máxima quando a taxa de aquecimento e a temperatura são baixas. A transferência de calor no reator pode ser alcançada por radiação térmica, convecção ou condução, dependendo das faixas de temperatura na qual se desenvolve as reações de pirólise. Para reatores de contato direto entre a biomassa e o meio de aquecimento, as condições são mais favoráveis para garantir taxas de aquecimento maiores no material sólido, entretanto, no caso onde o aquecimento é indireto devem ser estabelecidas condições favoráveis relacionadas com o tamanho de partícula da biomassa, visando-se favorecer uma efetiva transferência de calor. A taxa de aquecimento é função direta do tamanho das partículas do sólido a ser pirolisado. À medida que o tamanho das partículas aumenta, existe maior resistência

à condução térmica, e consequentemente, uma diminuição da taxa de aquecimento dentro das partículas.

A pressão do reator também interfere na formação dos produtos do processo. Segundo VIEIRA *et al.*, (2009), à medida que a pressão diminui, também diminui o tempo de residência dos produtos voláteis. O aumento dos rendimentos dos produtos líquidos é favorecido a temperaturas moderadas e baixas pressões. Durante a pirólise feita a vácuo, os produtos gasosos de decomposição e o vapor de água são removidos rapidamente do sistema, o que favorece o aumento do rendimento dos líquidos, e consequente diminuição da produção de carvão (INGUANZO *et al.*, 2002). A pirólise de biomassa em atmosfera de vapor de água pode direcionar a obtenção de um maior rendimento do bio-óleo, sendo o líquido constituído de teores elevados de materiais parafínicos (SÁNCHEZ *et al.*, 2009).

A umidade e o tamanho da partícula da biomassa são as principais variáveis associadas com as características do sólido e que têm grande influência na dinâmica do processo térmico (PEDROZA *et al.*, 2014).

Segundo SHIE *et al.*, (2003), a umidade tem um impacto importante sobre o consumo de energia para a secagem da biomassa. De acordo com Sánchez *et al.*, (2009), o teor de água obtida depois da pirólise, é geralmente, superior ao teor de umidade da biomassa, o que indica que há formação do líquido durante as reações do processo.

O tamanho das partículas interfere nos fenômenos que ocorrem durante a pirólise do resíduo sólido. O incremento do tamanho de partícula desfavorece a transferência de calor no sólido, levando assim a um regime de aquecimento dentro da partícula menos intenso. Para um tamanho determinado de partícula, o tipo do reator determina o mecanismo de transferência de calor. Na faixa de temperatura na qual ocorre a pirólise (350 – 1000 °C), governam os mecanismos de condução e convecção sobre a radiação, de maneira que, para alcançar a máxima transferência de calor entre o foco quente e a biomassa no reator, e conseguir uma dada distribuição de produtos, a biomassa deve ter um tamanho de partícula adequado (GOMÉZ, 2002). A Figura 3 mostra a forma de preparação de biomassa para ser empregada durante a reação de pirólise, visando à obtenção de maior quantidade de bio-óleo.

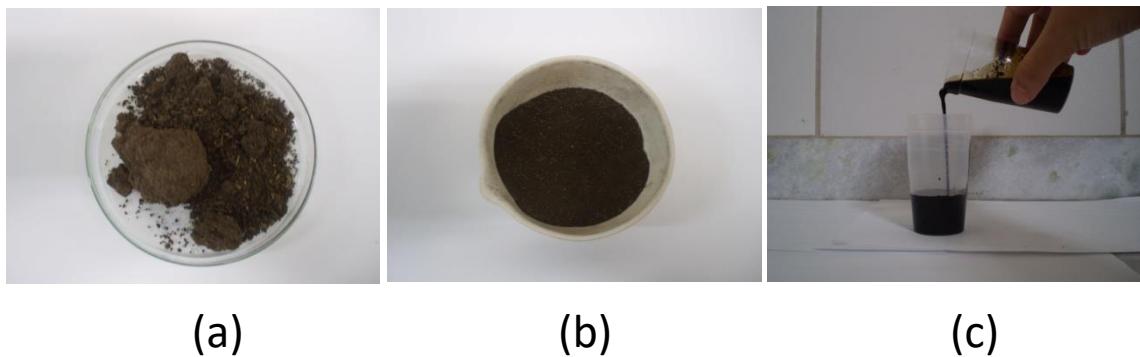


Figura 3 – Pirólise de biomassa residual: (a) biomassa bruta, (b) amostra de biomassa depois de moagem e (c) bio-óleo obtido no processo

Experiências de pirólise de resíduos sólidos urbanos

HAJI *et al.*, (2013) investigaram as características de carvão ativado produzido a partir da pirólise de resíduo sólido urbano. A pirólise do resíduo foi realizada em reator de leito fixo feito de aço inox com as seguintes dimensões: 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 5 cm. O carvão foi ativado com solução de KOH 1,0 M empregando as temperaturas de 700 e 800 °C e durante 60 e 120 minutos. A caracterização do carvão ativado se deu através das seguintes técnicas: Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e difração de raios X (DRX). O carvão ativado produzido em todos os tratamentos apresentou os grupos funcionais OH, CH e CO de éster alifático. Não foram observadas diferenças significativas no grau e a distância entre as camadas de cristais nos tratamentos estatísticos empregados. Os resultados da pesquisa mostram que uma maior formação de poros no carvão ativado se deu em temperaturas mais altas e maiores tempos de ativação das amostras. O rendimento de carvão ativado variou de 52,75 a 57,60 %. Os resultados da caracterização de propriedades carvão foram as seguintes: Umidade (1,11-5,41%), material volátil (13,68-17,34%), cinzas (20,36-26,59%) e carbono fixo (56,14-62,31%). O poder de adsorção do carvão foi de 409,52 mg/g de iodo e 14,03 % de benzene para o carvão produzido a 800 °C durante 120 min (HAJI *et al.*, 2013).

WANG *et al.*, (2015) investigaram a implantação de cinco plantas de pirólise para o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos no estado de Carolina do Norte, Estados Unidos. Segundo os autores, o processo de pirólise tem os seguintes gastos energéticos: (1) transporte de resíduos, (2) energia para peletização de resíduos, (3) eletricidade para produção e melhoramento de bio-óleo e (4) energia para transporte de bio-óleo e outros produtos. Para a

verificação do balanço energético do processo, os autores informam que se torna importante determinar o rendimento de obtenção de bio-óleo da planta pirolítica e da produção de diesel através do melhoramento do líquido. Segundo dados da pesquisa, os gastos de energia do processo são os seguintes: (1) energia para paletização = 0,14 MJ/kg RSU, (2) energia para pirólise do material = 1,79MJ/kg RSU e (3) energia do melhoramento do combustível = 0,84 MJ/kg RSU. De acordo com os dados apresentados, a energia obtida no processo é de 0,0035 kg diesel/kg RSU e a taxa de conversão de resíduos sólidos em bio-óleo é de 50%. Segundo a investigação, durante o melhoramento do bio-óleo, são formados também hidrogênio e carvão, com uma produção de 5,5 e 2,7 MJ/kg RSU, respectivamente. Os autores também compararam o processo de pirólise de RSU com outros três tipos de tratamentos (aterro sanitário, digestão anaeróbia e incineração), com o propósito de se avaliar os potenciais impactos ambientais desses sistemas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Os resultados mostram que as usinas de pirólise rápida para a produção de bio-óleo apresentam menores impactos ambientais quando comparados com a disposição de RSU em aterros sanitários. A pesquisa revela que a pirólise rápida de resíduos sólidos urbanos tem um menor Potencial de Aquecimento Global (GWP) que outras tecnologias de aproveitamento de resíduos, aqui apresentadas. Os autores informam que o índice GWP da pirólise rápida de resíduos sólidos é de apenas 36,8, 18,0 e 21,8 % dos índices da digestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário, respectivamente.

ISLAM *et al.*, (2004) estudaram a obtenção de biocombustível obtido a partir do processo de pirólise de um resíduo sólido urbano constituído apenas de papel da cidade de Bangladesh. O resíduo foi pirolisado num reator de leito fixo com sete centímetros de diâmetro e 38 centímetros de comprimento. Nos estudos realizados, foram utilizados três tamanhos diferentes da matéria prima: entre 0 e 1 centímetros; entre 1 e 2 centímetros e com as dimensões originais do resíduo. Todo o material foi seco a uma temperatura de 110 °C por 24 horas antes de cada experimento. O reator de pirólise foi operado nas seguintes temperaturas: 300, 350, 400, 450 e 500 °C. Foi utilizado nitrogênio gasoso como gás de arraste de vapores no sistema pirolítico. Com a utilização dos resíduos sólidos com as dimensões originais foi observada a obtenção de maior quantidade de bio-óleo. A temperatura em que se observou uma melhor eficiência na produção de produto líquido foi a de 450 °C. Temperaturas inferiores não atingiam o ponto ideal da pirólise, e temperaturas superiores provocavam decomposições secundárias do resíduo sólido. Os autores informam que os fatores principais que envolvem na porcentagem dos produtos finais são: tempo, temperatura e dimensão da partícula do resíduo. O bio-óleo obtido foi considerado altamente oxigenado, por possuir o teor de oxigênio na faixa dos 52,91

%, apresentando um baixo poder calorífico (13,1 MJ/Kg), alta densidade (1205 kg/m³), teor de cinzas de 0,35% e pH igual a 1,5. O líquido também possui uma quantidade de carbono e hidrogênio próximos aos do óleo derivado da biomassa e supera a densidade do óleo diesel. A pesquisa mostra uma enorme vantagem ecológica e energética, haja vista que utiliza o papel (resíduo sólido abundante) para obter um óleo que pode ser refinado e utilizado como combustível caracterizado como proveniente de fontes renováveis.

BUAH *et al.*, (2007) realizaram pirólise de resíduos sólidos municipais em reator de leito fixo com o objetivo de se recuperar carvão, bio-óleo e gases combustíveis. O material utilizado possuía um diâmetro médio de 8 mm para minimizar problemas de transferência de calor durante a pirólise. O reator de leito fixo tinha 40 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro interno e foi construído de aço inoxidável, aquecido com forno elétrico. O reator foi operado nas temperaturas de 400, 500, 600 e 700 °C. Segundo os autores, a temperatura do processo interfere na recuperação dos produtos da pirólise. A porcentagem do rendimento do carvão diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise de 400 a 700 °C, enquanto que a do bio-óleo e dos produtos gasosos aumentou nesse intervalo de temperatura. Segundo dados da pesquisa, as características do carvão obtido no processo dependiam do tamanho da partícula analisada e a fração gasosa possuia alto poder calorífico, e de acordo com os autores, esses gases poderiam ser utilizados para a geração de energia. Segundo as análises realizadas com o bio-óleo obtido no processo, verificou-se que o líquido é quimicamente complexo e altamente oxigenado, e tem o potencial de ser usado como matéria-prima petroquímica ou como um substituto de combustível líquido convencional.

LUO *et al.*, (2010) estudaram a pirólise de três componentes representativos nos resíduos sólidos urbanos (plástico, lixo de cozinha e madeira). Os ensaios foram realizados em um reator de leito fixo de quartzo (diâmetro interno = 6 cm e comprimento = 80 cm). A temperatura do leito foi de 800 °C, sendo o reator aquecido a uma taxa de 20 °C/min. Para avaliar a influência do tamanho das partículas sobre o desempenho de pirólise dos resíduos, cada amostra foi separada em três tamanhos diferentes (0-5 mm, 5-10 mm e 10-20 mm). Para todas as amostras testadas, o tamanho de partícula tem um efeito sobre os rendimentos e composição dos produtos do processo. Menor tamanho de partícula resulta em maior rendimento de gás com menos alcatrão e carvão, sendo essa influência mais significativa para resíduo de cozinha e menor para o plástico. Os autores informam que o efeito do tamanho da partícula sobre a produção de gás pode ser estudado a partir de dois aspectos opostos: (1) o menor tamanho da partícula, devido à maior área de superfície, melhora a transferência de calor

e massa e, portanto, tem velocidades de aquecimento mais rápidas, produzindo gases mais leves e baixos teores de carvão e alcatrão e (2) o aumento do tamanho das partículas pode prolongar o tempo de residência do material volátil na partícula sólida, favorecendo assim as reações secundárias do craqueamento térmico do alcatrão na partícula, e assim o maior rendimento da fração gasosa. Segundo os pesquisadores, quanto menor o tamanho do sólido a ser pirolisado maior o conteúdo de H₂ e CO na fração gasosa, bem como o teor de carbono fixo e cinzas na fração sólida obtida, e essa influência é bem mais importante para as amostras com teor de carbono e cinzas fixos mais elevados, como o lixo de cozinha, e menos representativo para o plástico por possuir em sua constituição maior teor de voláteis.

O rendimento e a composição dos produtos produzidos a partir da pirólise dos resíduos sólidos urbanos, em especial os óleos e gases, são largamente afetados pelo tipo de matéria-prima, a temperatura do processo, a taxa de aquecimento e o tipo de reator adotado. A tecnologia da pirólise comercial de resíduos existente deve estar combinada com outros processos tais como gaseificação e combustão, sendo necessário o estágio de tratamento de gases durante o processo (CHEN *et. al.*, 2014).

Estudo realizado por CHEN *et. al.*, (2014) revela que o número de usinas de pirólise de RSU vem aumentando devido à vantagem de se converter o resíduo sólido em energia. Essa tecnologia está recebendo maior atenção em muitos povoados e cidades da China, porque gás, petróleo e carvão ainda são necessários em pequenas cidades e vilas onde a escassez de combustíveis comerciais é frequente e também devido à dificuldade de encontrar novos locais para a disposição dos resíduos sólidos. Os autores informam que as frações submetidas ao processo de pirólise são principalmente papel, tecido, plástico e resíduos de quintais. Resíduos de alimentos altamente úmidos devem ser separados antes da degradação térmica, evitando assim, o gasto energético para a vaporização da água presente na biomassa. De acordo com os autores, os reatores de pirólise comumente empregados são: leito fixo, forno rotativo, leito fluidizado e reatores tubulares. No entanto, apenas fornos rotativos e reatores tubulares são aplicados às instalações de grande porte.

THANGALAZHY-GOPAKUMAR *et al.*, (2015) realizaram um estudo a partir do lodo de óleo de Palma, obtido na Malásia para a produção de bio-óleo e bio-carvão por meio da técnica de pirólise. O lodo utilizado nos experimentos foi seco a 65 °C por 72 horas. Os ensaios de pirólise foram realizados em um reator de leito fixo de quartzo de diâmetro interno igual a 7 cm e comprimento de 70 cm, sendo operado a 550 °C. As propriedades físicas do bio-óleo produzido do lodo foram analisadas e comparadas com as normas da ASTM e também foi

avaliada a aplicação do bio-carvão como adsorvente de metais (cádmio) e no tratamento de águas residuárias. Os resultados obtidos foram: (a) rendimento de bio-óleo de $27,4 \pm 1,7\%$; (b) poder calorífico de $22,2 \pm 3,7$ MJ/Kg; (c) teor de cinza de $0,23 \pm 0,01\%$ e (d) pH alcalino (9,4). O rendimento de obtenção de carvão foi de $49,9 \pm 0,3\%$ e sua eficácia na remoção de Cd⁺ foi de $89,4 \pm 2\%$, valor aproximado da remoção do carvão ativado comercial. Segundo os autores a taxa de aquecimento real foi de $24 \pm 1,4$ C / min., sendo considerada pirólise lenta. No entanto, o processo foi semelhante ao de pirólise rápida, por sua alta produtividade de óleo e de alta densidade de energia. O pH chamou muita atenção neste estudo, sendo uma solução para o bio-óleo lignocelulósico (pH muito ácido), através de sua mistura com o bio-óleo do lodo, trazendo-o para próximo a neutralidade.

ZHOU *et al.*, (2015) estudaram a formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAP) em bio-óleo proveniente de processo de pirólise de nove fracções de resíduos sólidos urbanos, incluindo hemi-celulose, celulose, lignina, pectina, amido, polietileno (PE), poliestireno (PS), cloreto de polivinilo (PVC) e *politereftalato de etileno* (PET). A pirólise das amostras foi realizada utilizando um reator de leito fixo. O sistema foi composto por um reator de pirólise seguido de sistema de coleta de alcatrão e de coleta de gás. Durante os experimentos foi utilizado N₂ (100 mL/min) como gás de transporte de vapores e o tempo de residência de voláteis foi de aproximadamente 2,6 segundos. O reator operou na temperatura de 800 °C. Os resultados da pesquisa mostraram que o material PS foi o que mais gerou HAP, seguido por PVC, PET e lignina. De forma geral, os pesquisadores informam que a formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos acontece em maior proporção nas amostras de plásticos e em menor quantidade para as outras amostras estudadas. No grupo das biomassas, a lignina gerou a maior quantidade de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Naftalina foi o hidrocarboneto policíclico detectado em maior abundância e a quantidade de 1-methynaphthalene e 2-methynaphthalene também foi notável. Fenantreno e fluoreno foram os mais abundantes de 3 anéis aromáticos, enquanto benzo[a] antraceno e chrysene foi encontrado nas amostras de bio-óleo de PS, PVC e PET. Os hidrocarbonetos aromáticos de 2 anéis dominaram todas as amostras de bio-óleo analisadas. Suas concentrações variaram entre 40 e 70 %. Os autores informam que para os resíduos PS, PET e lignina, os compostos HAP podem ser gerados diretamente da matéria-prima, pois para esses resíduos os anéis aromáticos já fazem parte das suas estruturas químicas.

ZHOU *et al.*, (2014) estudaram a pirólise de três tipos de resíduos (PVC, palha de arroz e madeira) em um sistema de TG – FTIR. Os ensaios termogravimétricos foram realizados com

fluxo de nitrogênio a uma taxa de 100 mL/min. A taxa de aquecimento foi de 10 K/min, sendo a temperatura final do processo de 1000 °C. Os produtos gasosos gerados durante a pirólise foram analisados em FTIR acoplado ao TGA. O maior teor de cinzas foi observado nas amostras de madeira (7,54% em peso) e o conteúdo de material volátil nas amostras de PVC foi de 94,93% em peso. Palha de Arroz e madeira têm composições elementares semelhantes e PVC tem conteúdo de cloro de 56,35 % em peso. Antes dos ensaios de pirólise, as amostras foram secas a 105 °C para eliminar a umidade. Durante a pirólise de palha de arroz foram observados os seguintes componentes: CO₂, CO, H₂O e HCN. A produção máxima de CO₂ e CO ocorreu a 300 °C. Segundo os autores, a madeira é composta principalmente de hemicelulose, celulose e lignina, sendo que o processo de pirólise do material é dividido em três etapas. A primeira etapa acontece na faixa de temperatura de 50 a 400 °C, devido à pirólise dos componentes hemicelulose e celulose. Os produtos gasosos observados foram H₂O, CO₂, CO, grupo alquil e carboxil na temperatura de 344,6 °C. As estruturas da hemicelulose e celulose contém grande quantidade de grupos hidroxil e éter que produzem durante o processo CO₂ e CO. O segundo e terceiro períodos de perdas de massas foram provenientes da pirólise da lignina. A pirólise de PVC pode ser dividida em três fases. A perda de massa da primeira fase foi de 56 % em peso, e a taxa de perda de massa máxima ocorreu em 285,8 °C. Os principais produtos gasosos observados foram HCl e benzeno. Foi observado que em temperaturas elevadas acontece a formação de hidrocarbonetos alifáticos.

HAJI *et al.*, (2013) estudaram a ativação do carvão obtido a partir da pirólise de resíduos sólidos urbanos (bamboo, galhos e outras madeiras). O carvão foi ativado com solução de KOH 1,0 M. A ativação foi realizada a 700 e 800 °C e durante 60 e 120 minutos. O processo de ativação do carvão foi realizado em reator de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro e 100 cm de comprimento. O carvão ativado foi caracterizado por técnicas instrumentais (FTIR, DRX e MEV). Foram determinadas também outras características nas amostras (rendimento, teor de umidade, teor de cinzas e conteúdo de material volátil e índice de iodo). O rendimento de carvão ativado produzido nos experimentos variou entre 72,0 e 82,7 %, sendo observado um aumento do rendimento com o aumento da temperatura. O conteúdo de umidade nas amostras de carvão ativado variou entre 1,1 e 5,4 % e o teor de cinzas oscilou entre 20,3 e 26,6 %. O índice de iodo do carvão ativado variou entre 309,5 e 409,5 mg/g. O poder de adsorção de benzeno nas amostras de carvão ativado variou entre 5,4 e 14,0 %. Os pesquisadores observaram que nas condições de temperatura de 800 °C e tempo de ativação de 120 minutos foram obtidas amostras de carvão com melhores características (superfície constituída de uma maior quantidade de

poros e com grandes diâmetros).

Pirólise de Resíduos em escala piloto e tratamento de gases do processo

Encontra-se em desenvolvimento no Brasil um projeto de desenvolvimento de uma Unidade de Aproveitamento Energético de Resíduos por meio de Tecnologia de Pirólise em reator de tambor Rotativo, em escala piloto no município de Boa Esperança (MG). O objetivo principal do projeto é apresentar uma nova solução técnica para o tratamento de RSU, combinada com a capacidade de minigeração de energia. Este projeto é financiado por Furnas Centrais Elétricas e tem a participação das seguintes instituições e empresas: Universidade Federal Fluminense, Centro para Inovação e Competitividade, Innova Renovaveis Ltda e CDIOX Safety Ltda.

Segundo RODRIGUES *et al.*, (2014), a usina de pirólise é dividida em seis setores: (a) recepção; (b) pré-tratamento; (c) pirólise; (d) tratamento do gás de síntese; (e) pulmão e queimador e (f) geração de energia elétrica, e ao operar na sua capacidade nominal produz aproximadamente 830 Nm³/h de gás de síntese, com um poder calorífico de cerca de 4.500 kcal/Nm³. Desse total, 330 Nm³/h são utilizados no aquecimento do reator para alimentar o processo de pirólise, sendo o restante utilizado nos grupos geradores a gás (500 Nm³/h) para geração de energia elétrica.

De acordo com os inventores (RODRIGUES *et al.*, 2014), o gás de síntese formado durante o tratamento térmico dos resíduos sólidos é purificado por meio de um processo de lavagem, sendo assim transformado em gás de síntese com alto teor de pureza, sem nenhum agente contaminante, diferente das tecnologias tradicionais desse tipo. Essa operação unitária fornece um gás de síntese com características aceitáveis para utilização na geração de energia elétrica e térmica em grupos geradores a gás. Os sistemas com essa tecnologia para tratar RSU não produzem resíduos perigosos como as cinzas voláteis que contenham alta concentração de dioxinas e furanos, e os resíduos sólidos da produção são basicamente os metálicos, que não tenham sido separados nas etapas prévias, e o resíduo inerte definido como “biochar”, que possui características benéficas para a utilização na fertilização de quase todos os tipos de solo.

Considerações Finais

As características físicas e químicas da biomassa apontam para utilização do resíduo como precursor para a produção de biocombustíveis. Os líquidos provenientes de processo de conversão termoquímica de resíduos sólidos urbanos desempenham um papel importante na matriz energética mundial no futuro devido a seu alto valor energético. Recentemente, além da produção de biocombustível convencional através de rotas biológicas, combustíveis líquidos a partir da recuperação de resíduos sólidos tem vindo a aumentar recebendo atenção. O bio-óleo obtido da pirólise de RSU pode ter suas características aprimoradas em processos catalíticos e usado como combustível, bem como, empregado em refinarias de petróleo. O resíduo sólido obtido durante a pirólise de RSU pode ser usado para produzir carvão ativado. A fração gasosa também pode ser empregada para produção de combustíveis líquidos através do processo Fisher-Tropsck, bem como, empregada em processo de combustão para geração de energia. Diferentemente das composições do gás natural e diesel comercializados no Brasil, o bio-óleo e a fração gasosa produzidos no processo de pirólise de RSU apresentam baixos níveis de compostos sulfurados, o que mostra a importância da investigação dessas novas fontes de energia segundo o aspecto ambiental.

A grande dificuldade encontrada para a implantação de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos está relacionada à questão ambiental durante o processo de licenciamento do empreendimento, bem como aos aspectos relacionados à falta de investimento financeiro por gestores públicos nesse setor. Vale destacar que a seleção de novas áreas para a construção de novos aterros é cada vez mais difícil devido às exigências desses tipos de sistemas de tratamento de resíduos e da legislação ambiental vigente. Um dos pontos positivos da tecnologia de pirólise de RSU é a questão do pequeno espaço para a instalação do empreendimento. As usinas de pirólise podem ter dimensões reduzidas, podendo ser instaladas em galpões relativamente pequenos no interior de áreas industriais. Os produtos obtidos durante a pirólise de RSU possuem caráter sustentável e de valor agregado.

Referências

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012.** Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2010.pdf>. Acesso em: 09/10/2015.

BASSANI, R. M. M. **Caracterização de resíduos sólidos de coleta seletiva em condomínios residenciais – Estudo de caso em Vitória – ES.** 2011. 187 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2011.

BERNARDI, A. G. **Organic municipal solid waste (MSW) as feedstock for biodiesel production: A financial feasibility analysis.** 2014. 129 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 12 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 4 maio 2005, Seção 1, p. 63-65.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Energy**, v.1, p.1 – 27, 2001.

BUAH, W. K., CUNLIFFE, A. M., WILLIAMS, P.T. Characterization Of Products From The Pyrolysis Of Municipal Solid Waste, **Trans IChemE**, v. 85, p. 450-457, 2007.

CHEN, D., YIN, L., WANG, H., HE, P. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, v. 34, p. 2466–2486, 2014.

FILHO, F. D. E. S. **Estimativa do Aproveitamento de Energético do Biogás gerado por Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** 2013. 242 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2013.

FRANÇA, L. M. **Cooperativas de catadores e parcerias com gestores públicos: aspectos promotores de autonomia.** 2012. 106 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2012.

FRANCESCHINI, G. **Autogestão e tecnologia em cooperativa de catadores/as de resíduo - uma análise intersubjetiva sob a óptica do campo ciência, tecnologia e sociedade.** 2011. 144 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2011.

GOMES, A. A. **Gestão de resíduos sólidos como estratégia de sustentabilidade ambiental nos grandes eventos.** 2014. 103 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado Profissional em Turismo) – Universidade de Brasília. Brasília. 2014.

GOMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão.** 2002. 103 f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

HAJI, A.G., PARI, G., NAZAR, M., HABITATI, Characterization of activated carbon produced from urban organic waste. **Internat. J. Sci. Eng.**, v. 5, p. 89-94, 2013.

INGUANZO, M., DOMINGUEZ, A., MENÉNDEZ, J. A., BLANCO, C. G., PIS, J. J. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gases

- fractions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 63, p. 209 - 222, 2002.
- ISLAM, M. N., ISLAM, M. N., BEG, M. R. A. The fuel properties of pyrolysis liquid derived from urban solid wastes in Bangladesh. **Bioresource Technology**, v. 92, p. 181–186, 2004.
- ISLAM, M. N., ISLAM, M. N., BEG, M. R. A., ISLAM, R. M. Pyrolytic oil from fixed bed pyrolysis of municipal solid waste and its characterization. **Renewable Energy**, v. 30, p. 413–420, 2005.
- JARAMILLO, J. **Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales**. 1. Ed. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, 2007.
- KHIARI, B., MARIAS, F., ZAGROUBA, F., VAXELAIRE, J. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. **Desalination**, v.167, p. 39-47, 2004.
- LIMA, C. L. **A questão ambiental na Amazônia: Resíduos Sólidos Urbanos e sua representação imagética**. 2013. 204 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília. Brasília. 2013.
- LUO, S., XIAO, B., HU, Z., LIU, S. Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. **International journal of hydrogen energy**, v. 35, p. 93–97, 2010.
- MAEDA, E. E. **Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos nos municípios do Estado de São Paulo, a partir dos Planos Municipais de Gestão Integrada**. 2013. 144 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento) – Universidade Federal de São Paulo. São Carlos. 2013.
- OLIVEIRA, R. M. M. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: O programa de coleta seletiva da região metropolitana de Belém – PA**. 2012. 111 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado – Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente Urbano) – Universidade da Amazônia. Belém. 2012.
- PEDROZA, M. M., SOUSA, J. F., VIEIRA, G. E. G., BEZERRA, M. B. D. Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 108-115, 2014.
- PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F. Características químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 4, p. 1-13, 2011.
- PEDROZA, M. M. Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo. 2011. 210 f. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2011.
- PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, p. 147-157, 2010.

RODRIGUES, V., COSENZA, C. A. N., BARROS, C. F., KRYKHTINE, F., FORTES, L. E. N. S. Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Produção de Energia: Análise de Legislação para Viabilidade Econômica de Soluções Conjuntas. In: XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2014, Rezende (RJ), **Anais...Rezende**, 2014, p.1 - 10.

SANCHEZ, M. E., MENÉNDEZ, J. A., DOMÍNGUEZ, A., PIS, J. J., MARTÍNEZ, O., CALVO, L. F., BERNAD, P. L. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 933-940, 2009.

SHIE, J., LIN, J., CHANG, C., LEE, D., WU, C. Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, p. 51-64, 2003.

THANGALAZHY-GOPAKUMAR, S., AL-NADHERI, W.M.A., JEGARAJAN D., SAHU, J.N., MUBARAK, N.M., NIZAMUDDIN, S. Utilization of palm oil sludge through pyrolysis for bio-oil and bio-char production. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 65 – 69, 2015.

VIEIRA, G. E. G., PEDROZA, M. M., SOUSA, J. F., PEDROZA, C. M. O Processo de Pirólise como Alternativa para o Aproveitamento do Potencial Energético de Lodo de Esgoto – Uma Revisão. **Revista Liberato**, v. 12, p. 81 – 95, 2011.

VIEIRA, G. E. G., ROMEIRO, G. A., SELLA, S. M., DAMASCENO, R. N., PEREIRA, R. G. Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 1544 – 1547, 2009.

WANG, H., WANG, L., SHAHBAZI A. Life cycle assessment of fast pyrolysis of municipal solid waste in North Carolina of USA. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 511-519, 2015.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal**. Second ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2005.

ZHOU, H., MENG, A., LONG, Y., LI, Q., ZHANG, Y. Interactions of municipal solid waste components during pyrolysis:A TG-FTIR study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 108, p. 19–25, 2014.

ZHOU, H., WU, C., ONWUDILI, J. A., MENG, A., ZHANG, Y., WILLIAMS, P. T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formation from the pyrolysis of different municipal solid waste fractions, **Waste Management**, v. 36, p. 136–146, 2015.