

PIRÓLISE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Carlos Alberto Apolinário Júnior, karlossjr@hotmail¹

José Silvio Pessoa Filho, jose.pessoa@ufu.br¹

Cassius Ricardo Nascimento Ferreira, cassiusferreira@gmail.com¹

Valério Luiz Borges, valerioluizborges@ufu.br¹

Solidônio Rodrigues de Carvalho, solidonio@ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Santa Mônica.

Resumo: Os resíduos sólidos urbanos causam problemas consideráveis no mundo, devido ao seu grande volume e dificuldade de tratamento. Dessa forma, alternativas e estratégias de reciclagem e de valorização desses resíduos estão sendo desenvolvidas de modo a reduzir o impacto criado por esses. Logo, por meio deste projeto, propôs-se buscar uma alternativa para valorizar energeticamente tais resíduos. Nesta pesquisa realizou-se a pirólise de materiais provenientes do aterro sanitário de forma a extrair seus subprodutos, ou seja, gases combustíveis para a produção de energia e, posteriormente, aplicou-se a análise imediata nos subprodutos sólidos. De um modo geral, concluiu-se que há potencial energético em materiais oriundos de resíduos urbanos e que o processo de pirólise pode ser efetivamente aplicado no processo de geração de gás de síntese e recuperação energética.

Palavras-chave: aterro sanitário, resíduo urbano, combustível, energia, pirólise.

1. INTRODUÇÃO

Uma vertente, problemática e atual, é a elevada produção de resíduos e o seu deficiente reaproveitamento (Paradela, 2007).

Segundo Brás (2011), os resíduos causam problemas consideráveis no mundo, devido ao seu grande volume e dificuldade de tratamento. Embora o aterro sanitário e a incineração sejam os métodos tradicionais de tratamento de resíduos, não constituem uma solução atrativa, visto que os depósitos adequados são caros e a incineração estimula a emissão de gases nocivos.

Hoje em dia, as economias do mundo são impulsionadas por estilos de vida baseados no consumidor, onde a produção de resíduos é o subproduto mais evidente e desfavorável de recursos intensivos. A taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) deverá aumentar para 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025 em todo o mundo. No entanto, nos países em desenvolvimento, a coleta, transporte e disposição de resíduos ainda é um desafio, enquanto nos países desenvolvidos tecnologias emergentes são usadas para produzir diferentes subprodutos, como calor, eletricidade, compostos e biocombustíveis (Moya et al., 2017).

A Tabela 1 mostra a composição elementar e as características de combustão de alguns biocombustíveis sólidos brutos (Wang et. Al., 2018). Embora o teor de cinza seja inferior a 1% em cavacos e toras de madeira, não foi observada diferença significativa no teor de cinzas entre o RSU e o carvão vegetal, ambos na faixa dos 4,5%. Em relação ao poder calorífico, o RSU demonstrou um PCI equivalente ao dos biocombustíveis sólidos, perdendo apenas para o carvão vegetal. Portanto, considera-se que os RSUs podem ser usados como potenciais combustíveis para a produção de energia.

Moya et al. (2017) avaliou diferentes tecnologias denominadas como waste-to-energy (WTE), ou seja, tecnologias capazes de transformar os resíduos em energia, a saber:

1.1. Incineração

No processo de incineração, por exemplo, os resíduos são queimados diretamente em uma câmara de combustão a uma temperatura adequada (900-950°C) usando gás de combustão e ar pré-aquecido (Tan et. al, 2014). Após o processo de incineração de resíduos, vapor superaquecido é produzido e, em seguida, é usado dentro de um sistema de cogeração para produzir energia e calor. A energia elétrica é produzida por uma turbina conectada a um gerador. O maior impacto ambiental da incineração de RSU é a produção e emissões de gases com efeito de estufa (GEE), causando problemas de saúde pública (Ashworth et. al, 2014). No Brasil, o processo de incineração de resíduos é proibido em alguns estados: Minas Gerais, Porto Alegre, entre outros.

Tabela 1. Análise elementar, análise imediata e poder calorífico de biocombustíveis sólidos.

Biocombustíveis Sólidos	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Teor de Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	PCS* (MJ/kg)	PCI** (MJ/kg)	Referência
Bagaço de Cana	47.8	5.9	45.7	0.5	9.24	2.9	16.4	14.9	Horst (2013)
Casca de arroz	37.4	5.43	33.2	0.38	9.19	18.4	14.4	-	Souza (2012)
Resíduos sólidos urbanos	51.2	6.2	40.1	0.1	-	4.4	-	17.2	Edo et al. (2016)
Cavaco de madeira	50.2	5.9	43.2	0.08	7.6	0.5	-	19.0	Johansson et al. (2004)
Toras de madeira	50.6	6.4	42.7	0.05	15/26/38	0.3	-	19.0	Johansson et al. (2004)
Carvão vegetal	72.2	2.9	23.6	1.3	4.6	4.7	26.0	-	Motghare et al. (2016)

*Poder Calorífico Superior (PCS)

**Poder Calorífico Inferior (PCI)

1.2. Gaseificação

O processo de gaseificação para produzir energia a partir de resíduos foi desenvolvido nas últimas três décadas (Arena, 2012). Basicamente envolve a oxidação parcial do RSU em uma atmosfera com baixo teor de oxigênio e seu principal produto é o gás combustível, denominado, gás de síntese. O gás de síntese, por sua vez, pode ser usado em ciclos a gás e a vapor para a produção de energia. A gaseificação pode reduzir a massa de resíduos em mais de 70%. Um estudo recente indicou que este tratamento térmico é uma opção viável para a conversão WTE, mitigando as emissões de gases de efeito estufa e o descarte em aterros sanitários (Thakare and Nandi, 2016). Neste processo, o RSU é inserido em um reator que trabalha entre 700-900°C. Parte da energia produzida pelo próprio resíduo dentro do reator é usada para produzir calor e gaseificar o resíduo restante.

1.3. Pirólise

Pirólise é a degradação térmica de resíduos sólidos na ausência de oxigênio. Calor externo é necessário para manter a temperatura entre 300 e 800 °C, dependendo dos materiais usados no processo (Agarwal et. al., 2013). Nesta tecnologia, os resíduos precisam ser pré-tratados. Então, requer a separação mecânica de vidro, metais e materiais inertes. Este processo começa com a decomposição térmica do material orgânico, a 300 °C, com oxigênio reduzido ou sem oxigênio, dentro de câmaras aquecidas. Então, a temperatura aumenta para 500-800°C em uma atmosfera não reativa e os bio-produtos finais de pirólise são GC (gases condensáveis), GNC (gases não condensáveis) e cinzas. O gás de síntese produzido durante o processo de pirólise é composto principalmente de metano, hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O poder calorífico líquido varia de 15 e 20 MJ/Nm³. Além disso, um estudo recente descobriu que, após a destilação de hidrocarbonetos líquidos (da pirólise de resíduos plásticos), o produto sintético resultante possui as mesmas propriedades do combustível petro-diesel (Zafar, 2014).

Logo, este estudo avaliou os resíduos sólidos urbanos como um valioso recurso de energia renovável e como uma oportunidade de recuperação de energia usando o processo de pirólise. Assim sendo, foi construída uma bancada em laboratório de forma a analisar o biocombustível e os subprodutos pós-pirólise.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Por meio de uma parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia, a Empresa Carbogás Energia e Furnas Centrais Elétricas SA, este trabalho teve como objetivo analisar o potencial energético de resíduos oriundos da cidade de Boa Esperança - Minas Gerais.

A Tabela 2 apresenta a composição do RSU e do combustível derivado de resíduo (CDR). O CDR consiste em resíduo após tratamento térmico para redução do teor de umidade e remoção de vidros e metais. Por meio de tal análise foi possível estimar o poder calorífico inferior do RSU e do CDR.

Tabela 2. Composição do RSU e CDR e estimativa do PCI.

Composição	Percentual em massa (%)	RSU (kg/h) Umidade: 50 (bu%)	RSU PCI (MJ/kg)	CDR (kg/h) Umidade: 15 (bu%)	CDR PCI (MJ/kg)
Matéria orgânica	35.20	806.67	6.65	474.50	5.65
Finos	3.00	68.75	0.56	40.40	0.48
Papéis	6.45	147.81	0.96	86.90	0.82
Papelão	6.00	137.50	0.95	80.90	0.80
Complexos	8.75	200.52	1.83	118.00	1.55
Têxtil	10.00	229.17	1.89	134.80	1.61
Têxtil da saúde	12.30	281.88	2.32	165.80	1.97
Plásticos	8.80	201.67	2.92	118.60	2.48
Vidros	1.40	32.08	0.00	0.00	0.00
Metais	5.20	119.17	0.00	0.00	0.00
Não classificados	2.90	66.45	0.00	32.40	0.00
Total	100.00	2291.67	18.08	1252.3	15.36

Os experimentos relativos ao processo de pirólise foram conduzidos no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e divididos basicamente em duas etapas:

Etapa A: consistiu em aplicar o processo térmico de pirólise em materiais de aterro;

Etapa B: realizou-se a análise imediata nos subprodutos sólidos da etapa anterior.

A Figura 1.a apresenta dois tipos de amostras de CDR: a amostra à esquerda, denominada de aterro, ou seja, resíduo sólido urbano aterrado, e a amostra à direita, denominada de rua, ou seja, as amostras foram colhidas antes de darem entrada no aterro. Na Fig. 1.b, verifica-se visualmente que se tratam de amostras heterogêneas compostas dos materiais listados na Tab. 1.



Figura 1. Amostras do aterro sanitário da cidade de Boa Esperança – Minas Gerais. (a) amostras aterro e rua. (b) material heterogêneo.

2.1. Pirólise de Resíduos Sólidos Urbanos

A pirólise é um processo de degradação térmica de materiais na ausência de oxigênio. Na maioria dos ciclos de pirólise há a formação de três subprodutos: resíduo sólido (“carvão”), gases condensáveis (GC) e gases não-condensáveis (GNC).

Os ensaios de pirólise foram realizados na bancada apresentada na Fig. 2 com aproximadamente 20g de amostra de CDR. A bancada é composta por um tubo cilíndrico vedado, denominado reator de pirólise. O reator é aquecido externamente até a temperatura de 500 °C por uma resistência elétrica acoplada a um controlador de

temperatura. No decorrer do processo de pirólise, os gases condensáveis ficavam retidos no “condensador” e os gases não condensáveis adentravam no cilindro denominado “combustão” para serem incinerados ou analisados. Ressalta-se que as cinzas e o carvão ficam retidos no reator de pirólise.

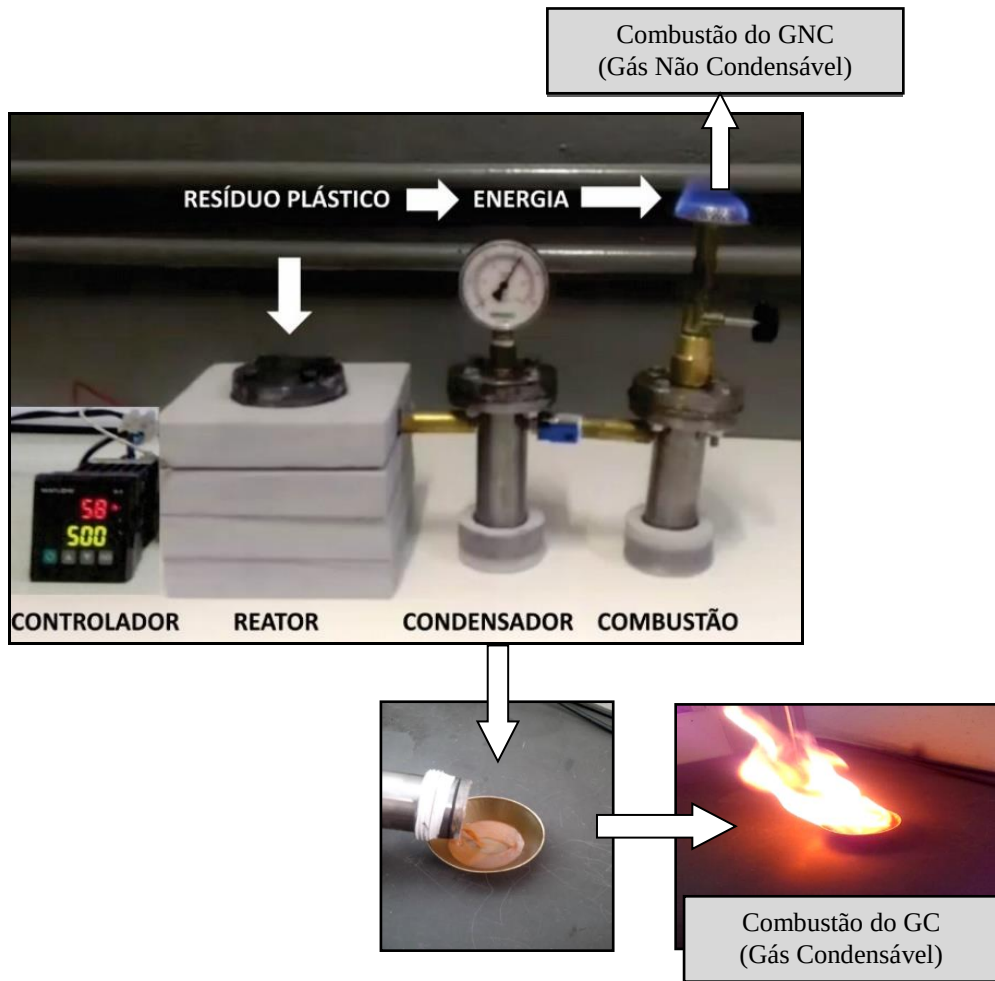


Figura 2. Bancada Experimental de Pirólise.

A Tabela 3 mostra o quadro ilustrativo dos experimentos.

Tabela 3. Quadro ilustrativo dos experimentos.

Amostra	Material	Temperatura	Tempo de residência no interior do reator	Resfriamento do reator
01	Aterro com TU=5,9%	500 °C (constante)	Até atingir a pressão de 10 bar (1 Mpa)	Ar à 25 °C
02	Rua com TU=6,6%			
03	Aterro com TU=0,0%			
04	Rua com TU=0,0%			

TU: teor de umidade em base úmida

2.2. Análise Imediata

Aplicada a pirólise nas amostras de aterro sanitário foram separados os produtos sólidos pós-pirólise para realização da análise imediata, que consiste na determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo conforme a norma ABNT NBR 8112/1986.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Na Tabela 4 são apresentados os produtos oriundos da pirólise de amostras do aterro de Boa Esperança – MG. Observa-se que após a pirólise os resíduos são convertidos em 60% de resíduos pós-pirólise (RPP), 15% de gases

condensáveis e 25% de gases não condensáveis (valores médios em unidade de massa).

Tabela 4. Produtos oriundos da pirólise de amostras do aterro de Boa Esperança - MG. Valor médio percentual em unidade de massa.

Parâmetro / Amostra	01	02	03	04	Média [%]
Resíduos pós-pirólise	55,4	64,3	62,7	61,0	60,0
Gases condensáveis	18,6	17,1	8,4	16,0	15,0
Gases não condensáveis	26,0	18,6	28,9	23,0	25,0

Na Fig. 3.a é possível visualizar o resíduo pós-pirólise (RPP); na Fig. 3.b, os gases condensáveis (GC); e na Fig. 3.c, a combustão dos gases não condensáveis (GNC). A partir de 20 g de resíduo urbano, produziu-se chama de coloração azulada e semelhante a identificada na combustão de gás natural.

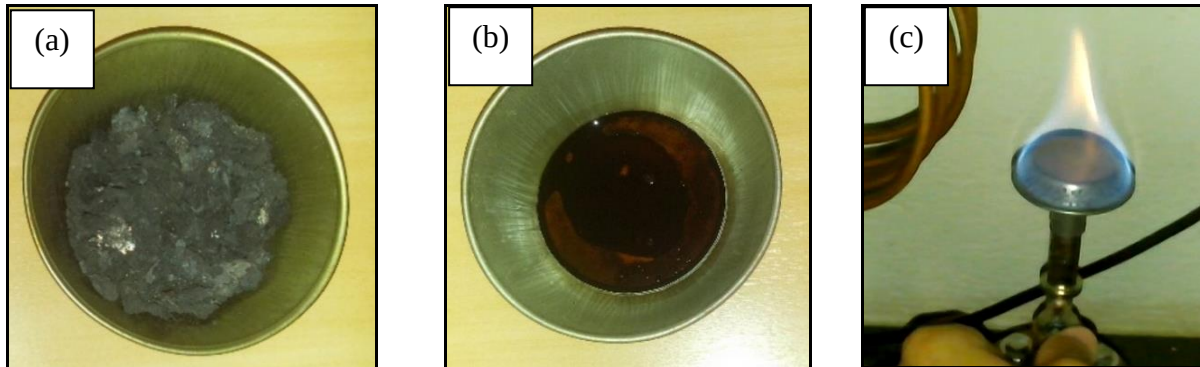


Figura 3. Produtos oriundos da pirólise de amostras do aterro de Boa Esperança – MG. (a) Resíduo pós-pirólise (RPP), (b) Gases condensáveis (GC) e (c) Gases não condensáveis (GNC) em combustão.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados referentes à análise imediata do RPP das amostras de aterro. Neste caso, obteve-se em média 3,0% para teor de umidade; 31,0% para teor de materiais voláteis; 43,0% para teor de cinzas; e 26,0% para teor de carbono fixo.

Tabela 5. Análise imediata dos resíduos pós-pirólise das amostras do aterro. Norma ABNT NBR 8112/1986.

Parâmetro / Amostra	RPP 01	RPP 02	RPP 03	RPP 04	Média
Teor de Umidade em base úmida TU [%]	7,0	1,7	2,8	0,9	3,0
Materiais Voláteis MV [%]	19,0	36,0	27,6	40,0	31,0
Cinzas CZ [%]	52,0	39,0	51,0	30,8	43,0
Carbono Fixo CF [%]	29,0	25,0	21,4	29,2	26,0

Finalmente, diante dos resultados obtidos, pode-se estimar que para cada 1,0 kg de resíduo sólido urbano seco destinado a pirólise em reator a 500 °C é possível gerar 150 g de GC e 250 g de GNC, ambos gases combustíveis. Além disso, há a formação de 600 g de resíduo pós-pirólise (RPP) dos quais 258g representam efetivamente cinzas.

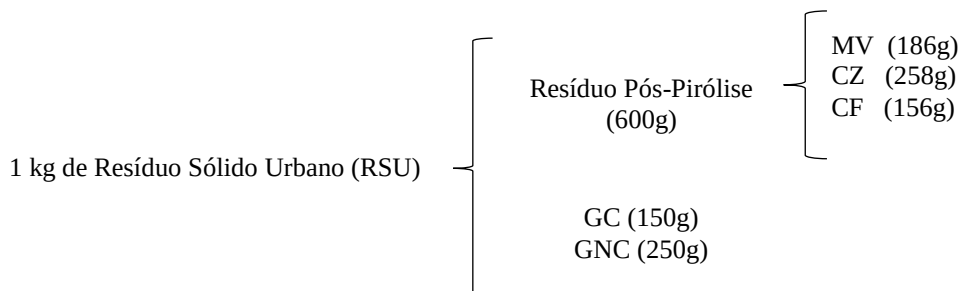


Figura 4. Estimativa de aproveitamento de resíduo sólido urbano

Conclui-se, portanto, que aumentando a temperatura de pirólise do reator para 700°C, conforme recomenda a norma ABNT NBR 8112/1986, seria possível converter 1,0 kg de RSU em 742g de gases combustíveis e 258g cinzas.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma proposta de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. Os testes experimentais foram conduzidos em laboratório usando um reator de pirólise de leito fixo e CDR oriundo da cidade de Boa Esperança, Minas Gerais.

Constatou-se que os RSUs são uma fonte potencial de energia nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. No entanto, claramente, há uma falta de transferência de tecnologia entre esses países. Há um grande número de tecnologias para produzir energia a partir de RSU, todavia poucos são os estudos e investimentos nesta preciosa fonte de energia renovável.

A pirólise de RSU na forma de CDR no reator de leito fixo mostrou-se conveniente. Notou-se que quanto maior a temperatura e pressão no interior do reator maior o percentual de GNC. Verificou-se ainda que os produtos obtidos a partir da pirólise de CDR consistiam em gases combustíveis e resíduos pós-pirólise. Em trabalhos futuros serão avaliados os percentuais de CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₆ e C₃H₈ entre outros hidrocarbonetos. Notou-se que o poder calorífico dos gases depende da temperatura de pirólise, aumentando com o aumento da temperatura e, portanto, sugerindo o uso do gás obtido em altas temperaturas como combustível.

De um modo geral, conclui-se que é possível obter gás combustível e energia a partir da pirólise de resíduos sólidos urbanos.

É importante ressaltar que a geração e fornecimento de energia renovável reflete o princípio estabelecido pelo órgão regulador de estimular a produção ecologicamente correta e sustentável.

5. AGRADECIMENTOS

Aos órgãos de fomento pelo suporte financeiro: CNPq, FAPEMIG e CAPES. Os autores agradecem ainda às Empresas Carbogás Energia e Furnas Centrais Elétricas SA pela parceria e auxílio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT, 1986, "NBR 8112: Carvão Vegetal – Análise Imediata – Método de Ensaio", Rio de Janeiro, Brazil, 5 p.
- Agarwal M., Tardio J., and Venkata Mohan S., 2013, "Critical analysis of pyrolysis process with cellulosic based municipal waste as renewable source in energy and technical perspective", *Bioresource Technology*, Vol. 147, pp. 361-368.
- Ashworth D. C., Elliott P., and Toledano, M. B., Arena U., 2012, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review", *Waste Management*, Vol. 32, pp. 625-639, April.
- Brás, D.M., 2011, "Estudo da Pirólise de Resíduos Plásticos Provenientes do Abate de Automóveis", Dissertação de Mestrado, UNL/FCT, Lisboa. <http://run.unl.pt/bitstream/10362/6888/1/Bras_2011.pdf>.
- Edo, M., Budarin, V., Aracil, I., Persson, P.E., Jansson, S., 2016, "The combined effect of plastics and food waste accelerates the thermal decomposition of refuse derived fuels and fuel blends", *Fuel* 180, pp. 424-432. <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.062>>
- Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., Potter, A., 2004, "Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets", *Atmos. Environ.* 38, pp. 4183-4195. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>>.
- Motghare, K.A., Rathod, A.P., Wasewar, K.L., Labhsetwar, N.K., Alibardi, L., Cossu, R., Ragazzi, M., 2016, "Comparative study of different waste biomass for energy application", *Waste Management*, p. 47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.032>.
- Moya, D., Aldás, C., Lópes, G., Kaparaju, P., 2017, "Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies", In *Proceedings of the 9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-17*, pp. 5-7, July 2017, Chania, Crete, Greece.
- Paradela, F.M.R., 2007, "Estudo da Pirólise de Misturas de Resíduos Plásticos e de Biomassa", Dissertação de Mestrado, UNL/FCT, Lisboa. <<http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/450>>.
- Souza, M. M., Da Silva, D. S., Rochadelli, R. Dos Santos, R. C., 2012, "Estimativa do poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de Pinus taeda", *Revista Floresta*, Vol. 42, No. 2, pp. 325-334.
- Tan S., Hashim H., Lee C., Taib M. R., and Yan J., 2014, "Economical and Environmental Impact of Waste-to-Energy (WTE) Alternatives for Waste Incineration, Landfill and Anaerobic Digestion", *Energy Procedia*, Vol. 61, pp. 704-708, 2014/01/01.
- Thakare S. and Nandi S., 2016, "Study on Potential of Gasification Technology for Municipal Solid Waste (MSW) in Pune City", *Energy Procedia*, Vol. 90, pp. 509-517.

Wang, T., Li, Y., Zhang, J., Zhao, J., Liu, Y., Sun, L., Liu, B., Mao, H., Lin, Y., Li, W., Ju, M., Zhu, F., 2018, "Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel", Waste Management 74, pp. 260–266. <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.043>>.
Zafar S., 2014, "Overview of Biomass Pyrolysis". <<http://www.bioenergyconsult.com/tag/biofuels/>>

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PYROLYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Carlos Alberto Apolinário Júnior, karlossjr@hotmail¹

José Silvio Pessoa Filho, jose.pessoa@ufu.br¹

Cassius Ricardo Nascimento Ferreira, cassiusferreira@gmail.com¹

Valério Luiz Borges, valerioluizborges@ufu.br¹

Solidônio Rodrigues de Carvalho, solidonio@ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Santa Mônica.

Abstract. *Municipal urban waste (MSW) causes considerable problems in the world due to its large volume and difficult treatment. In this way, alternatives strategies such as: recycling and recovery have been developed in order to reduce the impact created by them. Therefore, through this project, it was proposed an alternative methodology to valorize MSW energetically. In this research the pyrolysis of MSW from landfill was carried out in order to extract its by-products: combustible gases for energy production. Immediate analysis was applied in the solid by-products. In general, it was concluded that MSW is a renewable energy source and the pyrolysis process can be effectively adopted for the production of syngas and energy recovery.*

Keywords: *landfill, municipal solid waste, biofuel, syngas, pyrolysis.*