



## **Gaseificação da fração polimérica contida no rejeito (FPR) da triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU) para a geração de energia**

**Lazzarotto, I.P.<sup>1</sup>, Ferreira, S.D.<sup>2</sup>, Junges, J.<sup>2</sup>, Bassanesi, G.<sup>3</sup>, Godinho, M.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade de Caxias do Sul (ivan@gaiambiental.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>3</sup>Universidade de Caxias do Sul

### **RESUMO**

O presente estudo reporta a avaliação do potencial energético do gás obtido a partir da gaseificação da fração polimérica contida no rejeito (FPR) do processo de triagem do sistema de coleta seletiva dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) do município de Garibaldi – RS. A FPR foi caracterizada quanto sua composição gravimétrica. Os ensaios de gaseificação foram conduzidos a 900°C em um reator de leito fluidizado borbulhante. A partir dos resultados dos experimentos de gaseificação com vapor d'água como agente de gaseificação foi possível estimar a geração de aproximadamente 1,8 MW de energia elétrica a partir do processamento de toda a FPR gerada na região da Serra Gaúcha.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Polímeros; Gaseificação

Área temática: Resíduos Sólidos



## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 10 anos a produção mundial de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou de 680 para 1.300 milhões de toneladas por ano, o que representa um incremento de 0,64-1,2 kg por pessoa ao dia (HOORNWEG; BHADA, 2012). Projeções atuais estimam que até o ano de 2025 o planeta atinja valores de geração de resíduos per capita de 1,42 kg por pessoa ao dia (Couto, Silva, & Rouboa, 2016; Scarlat et al., 2015). De acordo com dados do Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos, foram coletados no ano de 2015, aproximadamente 80 milhões de toneladas de RSU, sendo que apenas 42,6 milhões de toneladas (53,3%) possuem disposição final ambientalmente adequada (ABRELPE, 2015). No Estado do Rio Grande do Sul, 57% dos municípios possuem áreas contaminadas, sob suspeita ou áreas com potencial de contaminação, em decorrência da disposição inadequada dos resíduos gerados pelas atividades urbanas (FEPAM; ENGEPIO, 2015). É necessária uma abordagem integrada para o gerenciamento de resíduos sólidos, a fim de permitir que as autoridades locais/nacionais reduzam a quantidade total de resíduos gerados e recuperem materiais de interesse para reciclagem e para geração de energia (SCARLAT et al., 2015).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na NBR 10004/2004, define os Resíduos Sólidos como sendo resíduos em estado sólido e semissólido, oriundos de atividades de procedência doméstica, industrial, de serviços, de varrição, comercial, agrícola e hospitalar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Os RSU possuem características e quantidades que variam de acordo com a região estudada. Tais variações são dependentes do estilo e dos padrões de vida, da estrutura socioeconômica, consumo de produtos, regulamentações locais, dentre outros (BAAWAIN *et al.*, 2017). Os principais RSU coletados são compostos basicamente de material polimérico, papel, metais, têxteis, resíduos orgânicos, couro, borracha, metais, vidro, cerâmica, materiais do solo e outros materiais diversos (CZAJCZYŃSKA *et al.*, 2017).

Uma das principais estratégias para a redução da quantidade de RSU dispostos nos aterros sanitários é a criação de sistemas de coleta seletiva. A coleta seletiva visa recolher os resíduos segregados na fonte e está relacionada com a reciclagem destes resíduos (BRASIL; MINISTÉRIO DA SAÚDE; FUNASA, 2015). Centrais de triagem ou recuperação de materiais visando o processamento de RSU são possíveis estratégias para o seu gerenciamento. O objetivo principal dessas centrais é o de reduzir, em volume e/ou em massa, os resíduos a serem encaminhados para aterro sanitário. Assim sendo, o foco das centrais de triagem é a separação de materiais recicláveis e não recicláveis e envio dos mesmos para processos corretos de tratamento (VRANCKEN; LONGHURST; WAGLAND, 2017).

À luz da Lei Federal nº 12.305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), são considerados rejeitos de RSU, os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Define, ainda, que disposição final ambientalmente adequada é a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010). Com o intuito de atender a referida lei, cerca de 86% dos municípios do Estado do Rio Grande do Sul contam com serviço de triagem de RSU (FEPAM; ENGEPIO, 2015). Os rejeitos da triagem dos resíduos recicláveis, como por exemplo a fração polimérica, podem ser utilizados como uma promissora matéria prima para produção de energia por meio de processos de conversão termoquímica.

O conteúdo energético dos resíduos pode ser recuperado através de processos termoquímicos (combustão, pirólise ou gaseificação) ou processos biológicos (digestão anaeróbica) (SCARLAT *et al.*, 2015). Tecnologias para o gerenciamento de RSU encontram-



se disponíveis na literatura, tais como: incineração com recuperação de energia, pirólise e gaseificação, gaseificação por arco de plasma, combustível derivado reciclado e biometanação por digestão anaeróbia (OUDA *et al.*, 2015). Os poluentes emitidos no processo de gaseificação são inferiores quando comparados com as técnicas de incineração (combustão direta), além de proporcionarem uma conversão mais rápida se comparada com processos microbiológicos (THAKARE; NANDI, 2015).

Dentre os processos de conversão termoquímica, a gaseificação figura como um método promissor na conversão de resíduos para energia (*waste to energy – WTE*). A gaseificação oferece uma solução atrativa tanto para a disposição/destinação de resíduos sólidos como para os problemas energéticos (COUTO *et al.*, 2017; SIKARWAR *et al.*, 2017). A gaseificação é a transformação termoquímica de um substrato (sólido ou líquido) em uma mistura de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), tar, água, sulfato de hidrogênio e outras espécies (em quantidades traço), cujas frações são determinadas por variáveis operacionais tais como: propriedades do substrato, agente de gaseificação, temperatura e pressão do reator (SIKARWAR *et al.*, 2017; ARAFAT; JIJAKLI; AHSAN, 2015). A gaseificação é sugerida, ainda, como ambientalmente correta para a maior parte de resíduos sólidos (ARAFAT; JIJAKLI; AHSAN, 2015).

Diferentes autores têm reportado dados sobre a gaseificação de polímeros com vapor de água como agente de gaseificação. Hofbauer; Wilk (2013) reportaram um rendimento de gás de aproximadamente 1 Nm<sup>3</sup>/kg<sub>POLIETILENO</sub> para a gaseificação de polietileno a 850°C, com um concentração de hidrogênio (H<sub>2</sub>) de cerca de 40% (mol/mol). Erkiaga *et al.* (2013) verificaram que a temperatura é um fator importante na avaliação do rendimento e da composição do gás no processo de gaseificação, tendo sido observado o rendimento máximo de gás a temperatura de 900°C (3,5 Nm<sup>3</sup>/kg). He *et al.* (2009), estudaram a gaseificação dos resíduos de polietileno e obtiveram um rendimento de gás a 900°C de 2 Nm<sup>3</sup>/kg. Os referidos resultados reportados foram obtidos a partir da gaseificação a vapor de polímeros na presença de catalisadores.

O presente estudo visa avaliar o potencial do gás combustível produzido no processo de gaseificação não catalítica com vapor de água da fração polimérica contida no rejeito (FPR) dos RSU gerados no Município de Garibaldi – RS para a geração de energia.

## METODOLOGIA

A caracterização dos RSU foi realizada na Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis de Garibaldi (COOCAMREG). Para a caracterização da FPR foi utilizado o procedimento de coleta proposto no *Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste* (ASTM INTERNATIONAL, 2016) e na Norma Brasileira para amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004). O procedimento contempla a realização de 60 amostragens entre os dias 21/03/2017 e 23/03/2017, ao final da esteira de triagem. As 60 amostras foram divididas para cada uma das rotas de coleta estabelecidas pelo serviço de coleta seletiva, tendo sido realizadas 15 amostragens em intervalos de 15 minutos, sendo que cada amostra possui o volume de 0,2 m<sup>3</sup>. Do montante coletado foi obtida uma amostra de 3,0 m<sup>3</sup>, a qual passou pelo processo de quarteamento, gerando uma amostra final para caracterização de 0,75 m<sup>3</sup>.

O quarteamento foi realizado para cada grupo de 15 amostras, as quais foram dispostas em uma pilha e separadas em quatro quadrantes. Dos quatro quadrantes foram eliminados dois, em diagonal, e os dois restantes foram agrupados em uma nova pilha, a qual foi novamente dividida em quatro quadrantes. Dois dos quadrantes foram eliminados e dois foram selecionados para realizar a caracterização dos resíduos e determinação de sua composição gravimétrica. O mesmo procedimento foi realizado para a totalidade de amostras coletadas. Após a identificação visual de cada tipo de resíduo sólido presente no rejeito, os mesmos foram separados e pesados, em balança comercial, para determinação da massa de cada uma das



frações obtidas. Os resíduos retornaram para a esteira de onde foram retirados, com exceção dos resíduos de materiais poliméricos.

A fração polimérica presente no rejeito (FPR) foi encaminhada para o Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBio) da Universidade de Caxias do Sul, onde foram segregados de acordo com a identificação contida nas embalagens. Os resíduos foram cominuídos em moinho de facas e posteriormente se realizou a análise imediata, onde a amostra foi submetida aos procedimentos descritos na norma ASTM D1762.

O reator utilizado para os ensaios de gaseificação opera por sistema de batelada. Inicialmente, o reator foi aquecido com uma taxa de 30 °C/min até atingir a temperatura final de 900 °C, sob fluxo (0,5 L/min) de gás inerte (N<sub>2</sub>). Após alcançar a temperatura final, o fluxo de vapor foi ajustado em 0,3 kg/h e a amostra (30 g) foi inserida no interior do reator. O reator opera a pressão atmosférica, enquanto o vapor d'água utilizado como agente de gaseificação foi produzido em um gerador de vapor (vapor saturado a 7 bar). Na saída do gerador há uma válvula redutora de pressão para a alimentação do reator. O reator opera em regime de leito fluidizado borbulhante com uma velocidade superficial de aproximadamente 3 cm/s.

A condensação dos vapores formados foi conduzida seguindo a norma CEN BT/TF 143 (adaptada), fazendo-se uso de cinco borbulhadores (impingers). Em cada borbulhador foram adicionados 70 mL de álcool isopropílico, com exceção do primeiro e do último borbulhador, que permaneceram vazios. Todos os borbulhadores foram acondicionados em uma caixa com banho de gelo, sal e álcool isopropílico, com o intuito de manter os borbulhadores sob baixa temperatura. A jusante dos borbulhadores há um gasômetro para determinar o volume dos gases gerados ao longo dos experimentos de gaseificação. O momento em que a amostra foi inserida no interior do reator foi considerado como  $t_0 = 0$  min. As amostras dos gases gerados foram coletadas entre os tempos 0–90 min, totalizando 12 coletas por experimento. Após transcorridos os 90 minutos de reação, o aquecimento foi suspenso, cessado o fluxo de vapor d'água e retornada ao fluxo de N<sub>2</sub> para resfriamento do sistema até a temperatura ambiente.

Os gases não-condensáveis (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) foram analisados por cromatografia gasosa (marca Dani Instruments Spa., modelo Master GC) provido de detector por condutividade térmica (TCD – Thermal Conductivity Detector). A coluna capilar utilizada foi do modelo Carboxen 1006 (Supelco), com comprimento de 30 m, 0,53 mm de diâmetro interno e 30 µm de espessura de filme. A análise de hidrocarbonetos com maior massa molar (etano/propano/propeno/ acetileno/propadieno/n-butano/isobutano/isobuteno) foi realizada com detector de ionização de chama (FID) usando uma coluna capilar de Agilent® Technologies.

O rendimento de gás seco (Y) foi obtido a partir da eq (1).

$$Y \left( \frac{NL}{kg_{FPR}} \right) = \frac{\Delta V}{m_{FPR}}$$

onde:

$\Delta V$ : volume de gás não-condensável produzido no intervalo de tempo (NL).

$m_{FPR}$ : massa de FPR alimentada no experimento (kg).

O poder calorífico superior (PCS) do gás combustível foi obtido a partir da eq (2).

$$PCS \left( \frac{MJ}{Nm^3} \right) = \frac{\sum y_i \cdot \Delta H c^0}{0,0224}$$

onde:

$y_i$  : fração molar do gás i no tempo t;

$\Delta H c^0$ : calor de combustão de cada gás combustível (J/mol).

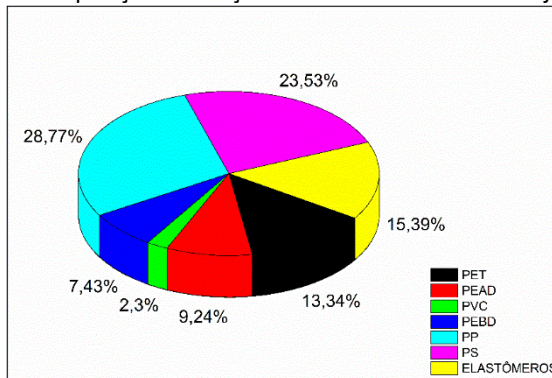


## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O município de Garibaldi possui uma geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos de 0,577 kg/hab.dia, dado que se encontra abaixo dos valores apresentados no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul (FEPAM; ENGEIO, 2015) para municípios com menos de 50.000 habitantes (0,65 kg/hab.dia). Considerando-se o total de resíduos coletados anualmente pelo sistema de coleta seletiva foi possível verificar que 586,432 toneladas de resíduos recicláveis tem sido encaminhados para aterro sob forma de rejeito. Destes, 251,447 toneladas representam a FPR.

O rejeito da triagem de RSU provenientes da coleta seletiva de resíduos do município de Garibaldi – RS apresenta predominância de resíduos não recicláveis, tendo apresentado como componente majoritário resíduo orgânico e sanitário (27,18%), seguido por resíduos de material têxtil (23,54%). Analisando a fração reciclável obtida foi possível observar que a fração polimérica representa 29,77% dos rejeitos enviados para aterro sanitário. A FPR caracterizada possui a composição apresentada na figura 1. Tais resultados demonstram que os resíduos contidos no rejeito da triagem da coleta seletiva do município de Garibaldi, ainda possuem alternativas para evitar o seu envio para disposição em aterros.

Figura 1 – Composição da Fração Polimérica contida no Rejeito (FPR)



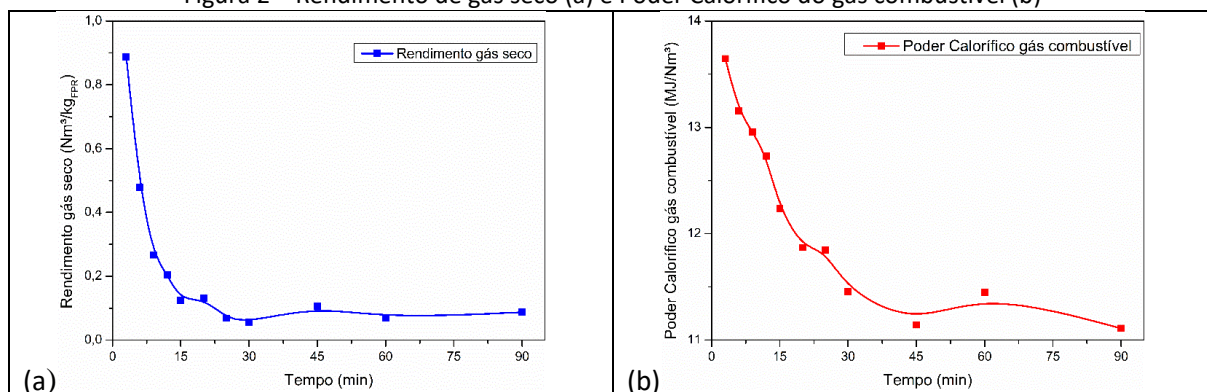
Os resultados obtidos pela análise imediata da amostra apresentaram os seguintes valores (%m/m): 93,2 – matéria volátil, 3,3 – cinzas e 3,5 – carbono fixo (obtido por diferença). Hofbauer; Wilk (2013) verificaram que amostras compostas por diferentes materiais poliméricos (industriais) apresentaram resultados para matéria volátil próximos a 99 % e resultados de cinzas abaixo de 1 %. He et al (2009) obtiveram, para amostras de resíduos de polietileno, valores de matéria volátil de 99,85 % e cinzas de 0,15 %. Considerando que neste trabalho foram utilizados resíduos sólidos na forma direta, a presença de matéria orgânica promove a variação de resultados frente aos encontrados na literatura, onde os artigos utilizam os materiais para uso industrial e não os seus resíduos.

A variação do rendimento de gás seco em função do tempo de reação é apresentada na figura 2a, enquanto a variação do poder calorífico do gás combustível é apresentada na figura 2b. A análise cromatográfica indicou a ausência dos hidrocarbonetos de maior massa molar em todas as coletas. Desta forma, o gás combustível gerado na gaseificação do FPR é composto dos seguintes gases não-condensáveis:  $H_2/CO/CO_2/CH_4$ . O rendimento total de gás seco foi de 2,48  $Nm^3/kg_{FPR}$ . A partir da figura 1a é possível observar duas regiões bem distintas, sendo que na primeira ( $t < 6$  minutos) há um elevado rendimento de gás seco ( $Y \approx 850$   $NL/kg_{FPR}$ ), e na segunda região ( $t > 6$  minutos) há uma redução significativa do rendimento de gás seco ( $Y \approx 100$   $NL/kg_{FPR}$ ). O poder calorífico do gás combustível apresenta comportamento semelhante ao longo do tempo de reação, sendo que na primeira região ( $t < 9$  minutos) há uma redução constante e linear do poder calorífico, enquanto na segunda região o poder calorífico do gás combustível se mantém relativamente constante ( $PCS \approx 10$   $MJ/Nm^3$ ).



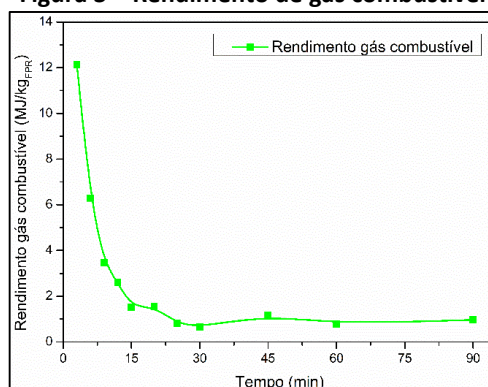


Figura 2 – Rendimento de gás seco (a) e Poder Calorífico do gás combustível (b)



A Figura 3 apresenta o rendimento energético do gás combustível em função do tempo de reação. Tendo em vista que o rendimento do gás combustível é obtido a partir do rendimento de gás seco e do poder calorífico do gás combustível, o seu comportamento é semelhante ao observado para os referidos parâmetros, ou seja, possui um valor elevado na primeira região de reação ( $t < 6$  min) e diminui significativamente na segunda região de reação ( $t > 6$  min). O seu valor máximo é observado com 3 minutos de reação (13,5 MJ/kgFPR) e fica relativamente constante na segunda região ( $\approx 1$  MJ/kgFPR).

Figura 3 – Rendimento de gás combustível



Considerando-se a geração de RSU no município de Garibaldi, bem como a geração da FPR, são produzidos aproximadamente 0,69  $\text{ton}_{\text{FPR}}/\text{dia}$ , para o total de 33.624 habitantes do município. Considerando a operação de unidade de gaseificação de FPR operando com vapor de água com tempo de reação de 6 minutos (rendimento médio de 12,6 MJ/kgFPR) seria obtida uma potência térmica de 0,1 MW. De acordo com dados da Fundação de Economia e Estatística (FEE) do estado do Rio Grande do Sul, o município de Garibaldi está inserido no COREDE Serra, o qual possui uma população de 943.032 habitantes (FEE/2016). Extrapolando-se os dados para a região da Serra Gaúcha há um potencial de geração de aproximadamente 2,8 MW de potência térmica. Considerando a utilização de um ciclo Rankine para a geração de energia elétrica (rendimento de aproximadamente 20%), a gaseificação do FPR poderia gerar em torno de 1,8 MW de energia elétrica.

## CONCLUSÕES

O rejeito da triagem de RSU provenientes da coleta seletiva de resíduos do município de Garibaldi – RS apresenta predominância de resíduos não recicláveis, tendo apresentado



como componente majoritário resíduo orgânico e sanitário (27,18%), seguido por resíduos de material têxtil (23,54%).

A gaseificação do FPR com vapor de água em um reator de leito fluidizado apresentou um rendimento total de gás seco foi de  $2,48 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{\text{FPR}}$ . O rendimento de gás seco apresentou duas regiões bem distintas, sendo que na primeira ( $t < 6$  minutos) há um elevado rendimento de gás seco ( $Y \approx 850 \text{ NL/kg}_{\text{FPR}}$ ), e na segunda região ( $t > 6$  minutos) há uma redução significativa do rendimento de gás seco ( $Y \approx 100 \text{ NL/kg}_{\text{FPR}}$ ). O poder calorífico do gás combustível apresenta comportamento semelhante ao longo do tempo de reação, sendo que na primeira região ( $t < 9$  minutos) há uma redução constante e linear do poder calorífico, enquanto na segunda região o poder calorífico do gás combustível se mantém relativamente constante ( $\text{PCS} \approx 10 \text{ MJ/Nm}^3$ ).

Os resultados obtidos neste trabalho indicam um elevado potencial para a geração de energia a partir da gaseificação com vapor de água da FPR, sendo que pode-se estimar que a instalação de uma unidade para a gaseificação da FPR poderia produzir aproximadamente 0,7 MW de energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e a Universidade de Caxias do Sul (UCS) por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias (PGEPROTEC).

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10007/2004 - Amostragem de resíduos sólidos. 2004. p. 25. Disponível em: <<http://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-10007-amostragem-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>>.

ABRELPE. **Panorama of solid waste in Brazil 2015. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015.** [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>.

ARAFAT, H. A.; JIJAKLI, K.; AHSAN, A. Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. **Journal of Cleaner Production**, 2015. v. 105, p. 233–240. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.071>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004/2004 - Resíduos sólidos - Classificação. **Biotemas**, 2004. v. 18, n. 2, p. 7–18. Disponível em: <<https://www.mendeley.com/research/classifica??o-res?duos-s?lidos-industriais-com-base-em-testes-ecotoxicol?gicos-utilizando-daphnia-ma/%5Cnhttps://www.journal.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/21407>>.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. 2016. v. 92, p. 1–6.

BAAWAIN, M. *et al.* Ultimate composition analysis of municipal solid waste in Muscat. **Journal of Cleaner Production**, 2017. v. 148, p. 355–362. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.013>>.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305. **Diário da República, 1ª série - nº 116 Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305**, 2010. n. Pdr 2020, p. 3901–3902. Disponível em: <<https://dre.pt/application/file/67508032>>.



BRASIL; MINISTÉRIO DA SAÚDE; FUNASA. **Manual de Saneamento**. 4 ed. ed. Brasília - DF: [s.n.], 2015.

COUTO, N. *et al.* Exergy analysis of Portuguese municipal solid waste treatment via steam gasification. **Energy Conversion and Management**, 2017. v. 134, p. 235–246. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.040>>.

COUTO, N. D.; SILVA, V. B.; ROUBOA, A. Assessment on steam gasification of municipal solid waste against biomass substrates. **Energy Conversion and Management**, 2016. v. 124, p. 92–103. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.077>>.

CZAJCZYŃSKA, D. *et al.* Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector. **Thermal Science and Engineering Progress**, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2451904917300690>>.

ERKIAGA, A. *et al.* Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, 2013. v. 109, p. 461–469. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.022>>.

FEPAM; ENGEPIO. Plano Estadual de Resíduos Sólidos no Rio Grande do sul. **Rio Grande Sul**, 2015. Disponível em: <<http://www.pers.rs.gov.br/noticias/arq/ENGB-SEMA-PERS-RS-40-Final-rev01.pdf>>.

HE, M. *et al.* Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2009. v. 34, n. 3, p. 1342–1348. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.023>>.

HOORNWEG, D.; BHADA, P. What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management. **Urban development series knowledge papers**, 2012. v. 281, n. 19, p. 44 p. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25270340>>.

OUDA, O. K. M. *et al.* Waste-to-energy potential in the Western Province of Saudi Arabia.pdf. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, 2015. v. 29, n. 3, p. 212–220.

SCARLAT, N. *et al.* Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. v. 50, p. 1269–1286. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>>.

SIKARWAR, V. S. *et al.* Progress in biofuel production from gasification. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2017. v. 61, p. 189–248.

THAKARE, S.; NANDI, S. Study on Potential of Gasification Technology for Municipal Solid Waste (MSW) in Pune City. **Energy Procedia**, 2015. v. 90, n. December 2015, p. 509–517. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.218>>.

VRANCKEN, C.; LONGHURST, P. J.; WAGLAND, S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. **Waste Management**, 2017. v. 61, p. 40–57. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>>.