



PROTÓTIPO DE REATOR PARA CONVERSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PRODUTO DE MAIOR VALOR AGREGADO

Igor Cristelli de Sousa Silva (*), Camila Nunes Costa Corgozinho, Luiz Carlos Santos, Renata Costa Silva Araujo, Daniel Bastos de Rezende

* Universidade Federal de Minas Gerais, igorcriselli@gmail.com

RESUMO

O Brasil apresenta índice de coleta de lixo superior ao da média mundial, sendo coletado 92% do resíduo sólido urbano produzido. No entanto, o país ainda é muito dependente de maneiras rudimentares de tratamento de resíduos (depósitos em lixões e aterros), o que é visto pela taxa de reciclagem inferior a 4%. Uma gestão inadequada do lixo é insustentável ao longo prazo e não está em acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela ONU. Em contrapartida, tecnologias mais sustentáveis para o tratamento dos resíduos estão emergindo, como por exemplo a pirólise. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi construir um protótipo de um reator laboratorial capaz de transformar os resíduos sólidos urbanos em produtos de maior valor agregado por meio da pirólise. As dimensões de um reator de leito fluidizado foram calculadas usando equações de projeto consolidadas na literatura. O protótipo foi impresso com o uso de tecnologia 3D e seu funcionamento foi validado por meio de testes a frio. Observou-se que o projeto é adequado para a construção de um reator em aço inoxidável e consequente realização da pirólise dos resíduos sólidos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Leito fluidizado; Lixo; Pirólise; Protótipo; Resíduo Sólido Urbano.

ABSTRACT

Brazil has a higher garbage collection rate than the world average, with 92% of the urban solid waste produced being collected. However, the country is still very dependent on rudimentary ways of treating waste (deposits in dumps and landfills), which is seen by the recycling rate below 4%. Inadequate waste management is unsustainable in the long run and is not in line with the UN's proposed Sustainable Development Goals. On the other hand, more sustainable technologies for the treatment of waste are emerging, such as pyrolysis. In this context, the objective of this work was to build a prototype of a laboratory reactor capable of transforming solid urban waste into products of greater added value through pyrolysis. The dimensions of a fluidized bed reactor were calculated using design equations consolidated in the literature. The prototype was printed using 3D technology and its operation was validated through tests at room temperature. It was observed that the project is suitable for the construction of a stainless steel reactor and the consequent pyrolysis of solid urban waste.

KEY WORDS: Fluidized bed; Garbage; Pyrolysis; Prototype; Municipal Solid Waste.



INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são produtos da atividade humana tanto doméstica quanto industrial, e sua composição varia conforme os aspectos sócio-geográficos e hábitos de consumo de um município. Tipicamente, incluem restos alimentícios, papel, plástico, metal, vidro e outros (folhas, têxteis e eletrônicos, por exemplo). Atualmente, a produção global de RSU é estimada em 1,9 bilhão de toneladas por ano, da qual 70% é recolhida pelos sistemas de gerenciamento de resíduos dos municípios. Do total recolhido, aproximadamente 70% é disposto em lixões ou aterros, 19% é reciclado e 11% é usado para recuperação energética (NANDA; BERRUTI, 2021). No Brasil, a quantidade gerada é de 79 milhões de toneladas por ano, das quais 92% são coletadas. Apesar do índice de coleta superior à média global, a taxa de reciclagem nacional é inferior a 4% (ABRELPE, 2020).

O despejo de lixo em aterros e lixões, além de consumir muito espaço, compete por terra com a agricultura e áreas residenciais, atrai animais indesejados, como ratos e baratas, e pode poluir o solo, lençóis freáticos e a atmosfera, incluindo a liberação de gases do efeito estufa. Além dos malefícios do descarte inadequado dos RSU, a grande quantidade gerada anualmente e o potencial de se converter RSU em produtos de maior valor agregado urge com que técnicas efetivas de tratamento sejam consolidadas.

Tratamentos termoquímicos podem ser utilizados para transformar RSU em produtos de interesse que incluem sólidos, líquidos e gases que, a depender da técnica utilizada, podem ser usados como combustíveis ou como insumos químicos para a indústria (NANDA; BERRUTI, 2021). Os tratamentos termoquímicos usuais são a incineração, liquefação, gaseificação e pirólise, dos quais a incineração é o mais comum. Todos apresentam vantagens e desvantagens, no entanto, a pirólise tem se mostrado uma tecnologia promissora por conta da diversidade de aplicação dos seus produtos e por ser uma tecnologia mais madura em relação as outras rotas termoquímicas (exceto incineração) (KAN; STREZOV; EVANS, 2016).

A pirólise ocorre na ausência de atmosfera oxidante juntamente com o fornecimento de calor, transformando a matéria-prima em biocarvão, bio-óleo e gás pirólítico. Dependendo da taxa de aquecimento e do tempo de residência do vapor, a pirólise é classificada como lenta ou rápida, e suas condições de operação e produtos diferem entre si. A fração líquida (bio-óleo) é majoritariamente obtida através da pirólise rápida e é um dos produtos de maior interesse, dada sua facilidade de armazenamento e transporte. Existem estudos que reportam rendimentos acima de 60% de bio-óleo para a pirólise rápida de RSU (CHHABRA; SHASTRI; BHATTACHARYA, 2020; KLEMETSrud *et al.*, 2016). Algumas aplicações do bio-óleo incluem combustível para caldeiras, fornos, motores e turbinas elétricas. Além disso, por meio de processos de *upgrading*, o bio-óleo pode ser usado como combustível para veículos (BRIDGWATER, 2012).

Para melhorar o rendimento dos produtos líquidos devem ser atendidos os seguintes parâmetros durante a pirólise rápida (BRIDGWATER, 2012):

- Altas taxas de aquecimento e de transferência de calor para a matéria-prima;
- Tempo de residência do gás de pirólise no meio reacional inferior a 2 segundos;
- Temperatura intermediária (cerca de 500 °C) e uniforme ao longo do reator.

Um tipo de reator que cumpre todos esses requisitos é o de leito fluidizado. Esses reatores têm sido extensamente estudados na pirólise de RSU por possuírem excelentes propriedades de transferência de calor e massa, distribuição uniforme de catalisador (caso exista) e de matéria-prima, fácil escalonamento, possibilidade de operação contínua ou em batelada e ampla aplicação industrial (CHEN *et al.*, 2014; CHHABRA; SHASTRI; BHATTACHARYA, 2020).

OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é desenvolver um reator contínuo de leito fluidizado em escala laboratorial para conversão de RSU em produtos de maior valor agregado. Como objetivos específicos do trabalho, citam-se: a construção do protótipo do reator por meio de impressão 3D; uso do protótipo para a realização de testes de fluidização a frio.

METODOLOGIA

Cálculos de projeto

O dimensionamento do reator foi feito baseado na metodologia de Kunni e Levenspiel (1969), na qual a velocidade mínima de fluidização é determinada pela Equação de Ergun, dada pela Equação 1.



$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1)$$

Em que: d_p = Diâmetro da partícula (m); ε_{mf} = Porosidade do leito na condição de mínima fluidização; g = Aceleração gravitacional (m/s^2); ϕ_s = Esfericidade do sólido; u_{mf} = Velocidade mínima de fluidização (m/s); μ = Viscosidade do gás de fluidização (Pa.s); ρ_g = Massa específica do gás de fluidização (kg/m^3); ρ_s = Massa específica do sólido (kg/m^3).

A velocidade mínima de fluidização é calculada para o sólido inerte, neste caso, o sólido escolhido é a areia normal de granulometria fina (0,15 a 0,3 mm), cuja densidade é de $2610 kg/m^3$. A esfericidade da areia foi considerada 0,7 e a porosidade do leito na condição mínima de fluidização 0,48 (KUNII E LEVENSPIEL, 1991). Tradicionalmente, o nitrogênio é o gás de fluidização usado e considerou-se o seu comportamento como o de um gás ideal nas condições de operação de temperatura 773,15 K e pressão 1 MPa. Os parâmetros de densidade e viscosidade do nitrogênio nestas condições de temperatura e pressão são $0,44 kg/m^3$ e $3,72 \times 10^{-5} kg/(m.s)$, respectivamente.

Calculou-se, também, a velocidade máxima de fluidização (u_{max}), que representa o equilíbrio entre as forças de arraste e a força peso dos materiais do leito. Se velocidade máxima de fluidização, definida pela Equação 2, for ultrapassada, ocorrerá o arraste das partículas do leito.

$$u_{max} = \frac{d_p^2 g (\rho_s - \rho_g)}{\mu} \quad (2)$$

A altura do reator necessária para um tempo de residência dos gases no interior do reator menor que 2 segundos foi calculada em função da velocidade de alimentação do gás. Para tanto, utilizou-se 10 vezes a velocidade mínima de fluidização. Esta velocidade representa um grau de agitação dentro da faixa de leito borbulhante e não ultrapassa o limite imposto pela velocidade máxima de fluidização (KUNII E LEVENSPIEL, 1991). Pensado na futura construção do reator em aço inoxidável, os diâmetros internos e externos foram baseados nas dimensões de tubos comerciais.

Testes de fluidização a frio

Foram conduzidos experimentos a fim de se observar o comportamento do leito de inertes sob diferentes condições de vazão de ar e características do leito (granulometria e massa total da areia). Para estes testes, foi utilizado ar em temperatura ambiente como gás fluidizante. O ar foi introduzido no reator pela entrada de gás inferior por meio de um soprador de ar HONDA de potência 750 W, sendo a vazão controlada com auxílio de um rotâmetro. Por conta da pequena escala do protótipo, não foi possível avaliar a perda de carga durante o funcionamento do sistema, uma vez que o manômetro disponível para medição não se mostrou suficientemente sensível.

RESULTADOS

De acordo com os parâmetros descritos na metodologia, o reator projetado tem 2" de diâmetro externo, espessura da parede interna de 1,8 mm e 0,4 m de comprimento. Uma representação do projeto e do reator fabricado em impressora 3D é apresentada na Figura 1.

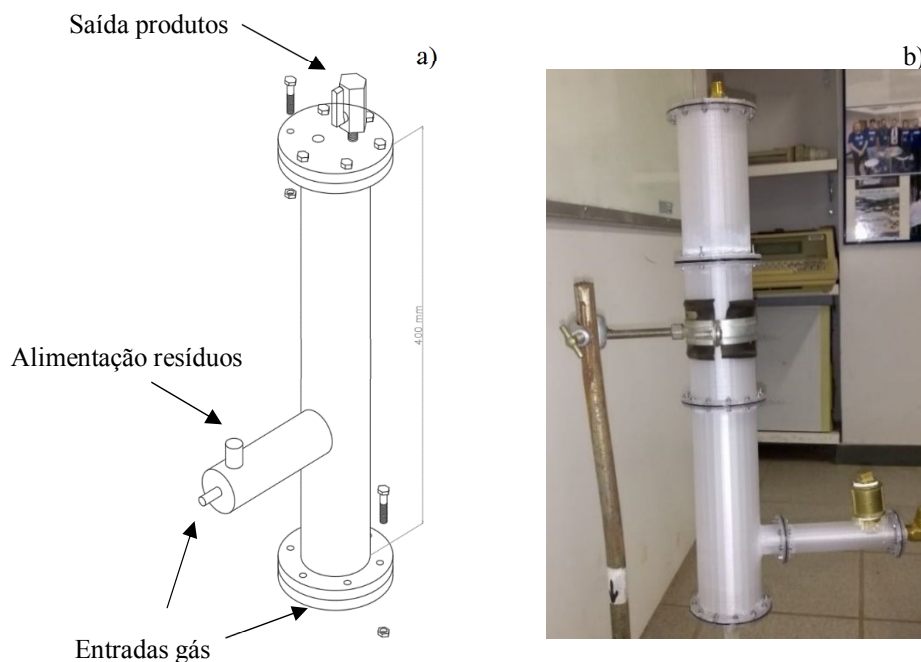


Figura 1: a) Projeto do reator e b) Reator impresso em 3D. Fonte: Autores.

O reator conta com um tubo de alimentação acoplado na parte inferior lateral do corpo principal. Este tubo de alimentação tem $\frac{3}{4}$ " de diâmetro externo, espessura da parede interna de 1,8 mm e conta com uma entrada de gás secundária, responsável pelo arraste pneumático das partículas ao interior do reator. O sistema de alimentação é removível para possibilitar tanto a operação em batelada quanto a contínua. Para a avaliação da temperatura interna, há uma conexão para termopar na parte superior do reator.

Devido a limitação do tamanho das peças que podem ser impressas em 3D, o corpo do reator foi dividido em três partes que se conectam por flanges. Para a impressão 3D do equipamento utilizou-se filamento translúcido (ABS Premium cristal) para as principais partes e filamento flexível preto para os anéis de vedação, posicionados entre as conexões. O filamento translúcido permite a visualização do comportamento do leito durante os estágios de fluidização, permitindo assim, o estudo das condições de fluidização antes da construção do pirólisador em aço inox.

Os parâmetros utilizados nos testes de fluidização a frio, bem como o comportamento do leito observado, estão expostos na Tabela 1, a seguir.



Tabela 1. Testes de fluidização com diferentes características do leito (quantidade mássica e granulometria da areia), altura, vazão e comportamento observado

Areia					
Teste	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Altura do leito (cm)	Comportamento
I	0,725	155	2,5	4,5	Borbulhante
II	0,725	325	2,5	10	Borbulhante
III	1,125	250	3	7	Fixo
			3,2	7	
			3,8	7	
			4,5	7	
			5,5	7	
IV	1,125	165	6,2	7	Fixo
			3	4	
			3,2	4	
			3,8	4	
			4,5	4	
			5,5	4	
			6,2	4,5	

Conforme visto na Tabela 1, os testes realizados com areia de menor granulometria (I e II) foram capazes de atingir o regime de fluidização borbulhante. Para condições semelhantes de operação, outros pesquisadores também atingiram o regime borbulhante de operação (HEIDARI *et al.*, 2014; WEBER *et al.*, 2015).

Já nos testes III e IV, nos quais foram usadas areia de maior dimensão, não foi possível atingir o regime borbulhante, mesmo em condições de vazão de 6,2 m³.h⁻¹. Estes resultados estão relacionados com o fato da granulometria da areia utilizada nos cálculos teóricos (0,15 a 0,3 mm) ser muito menor do que nos experimentos reais. Apesar disso, acredita-se que seria possível atingir a fluidização caso a vazão do gás de arraste fosse elevada, porém, nesse trabalho, optou-se por não seguir esse caminho.

Deve-se levar em consideração também, que as propriedades do ar atmosférico nas condições de temperatura ambiente podem ser aproximadas como: densidade de 1,22 kg/m³ e viscosidade de 1,7x10⁻⁵ kg/(m.s). Condições muito diferentes daquelas previstas para o N₂ em uma temperatura condizente com a de um processo de pirólise (≈ 500 °C). Além disso, em geral, as propriedades de um fluido aquecido diminuem o valor de velocidade mínima requerida para fluidização, conforme descrito pela Equação de Ergun (Eq. 1).

De maneira geral, o protótipo do reator se mostrou adequado para permitir operações em leito borbulhante. Este regime de fluidização é capaz de promover uma rápida troca de calor, uniformidade da temperatura ao longo do reator e bom controle de temperatura (KUNII E LEVENSPIEL, 1991), portanto, atende os requisitos necessários para a reação de pirólise rápida.

CONCLUSÕES

O protótipo de reator proposto neste trabalho foi construído e impresso em tecnologia 3D com sucesso. Além disso, também foi possível validar o uso do reator para operação em leito fluidizado.

Como dificuldade encontrada durante o trabalho cita-se a limitação do tamanho das peças que podem ser impressas em 3D. Problema que foi contornado dividindo-se o reator em três partes e utilizando filamento flexível nas conexões dessas partes para garantir a vedação do equipamento. Além disso, não foi possível avaliar a queda de pressão (perda de carga) durante o funcionamento do protótipo.



Conclui-se o trabalho com a perspectiva de utilização do reator em aço inoxidável baseado nesse protótipo para a transformação de RSU (lixo) em produtos de maior valor agregado, como por exemplo, biocombustíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em 10.03.2021
2. BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 38, p. 68–94, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
3. CHEN, D. *et al.* Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 2466–2486, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
4. CHHABRA, V.; SHASTRI, Y.; BHATTACHARYA, S. Laboratory-Scale Performance of Pyrolysis of Unsegregated Municipal Solid Waste. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 59, n. 52, p. 22656–22666, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04745>
5. FEAM. **Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais – Volume I – Geração per capita**. 2017. Disponível em http://feam.br/images/stories/2018/ASCOM_DIVERSOS/Gera%C3%A7%C3%A3o_per_capita_site.pdf. Acesso em 09.02.2021
6. HEIDARI, A. *et al.* Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of Eucalyptus grandis in fluidized bed reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 2594–2602, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.046>
7. KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 57, p. 1126–1140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
8. KLEMETSrud, B. *et al.* Characterization of Products from Fast Micropyrolysis of Municipal Solid Waste Biomass. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 10, p. 5415–5423, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00610>
9. KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. New York: John Wiley & Sons, INC., 1969. 534.
10. NANDA, S.; BERRUTI, F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 403, n. Setembro 2020, p. 123970, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>
11. WEBER, C. *et al.* Fast pyrolysis of fresh bio waste and ensiled municipal green cut. **Chemie-Ingenieur-Technik**, [s. l.], v. 87, n. 12, p. 1696–1706, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cite.201500040>