

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

**MODELO DE AUMENTO DE ESCALA DE REATOR DE PIROLÍSE RÁPIDA PARA
PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DE RESÍDUO DE SISAL**

AUTORES:

David da Silva Vasconcelos¹, Carlos A. de M. Pires¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia

MODELO DE AUMENTO DE ESCALA DE REATOR DE PIRÓLISE RÁPIDA PARA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DE RESÍDUO DE SISAL

Abstract

The study of biofuels processes has advanced because of its ability to generate energy more cleanly, using abundant and renewable sources of raw material. Among the sources of biomass, the sisal (agave sisalana) residue is highly attractive because it corresponds to a by-product of the craft industry. In order to convert the sisal residue to other higher value-added products, highlighting rapid pyrolysis, which is the thermal decomposition process of the biomass in the absence of oxygen, where the biomass becomes bio-oil, coal and gases not condensable. This process mainly occurs in fluidized bed reactors because they have high temperature control and low particle residence time. The objective of this work is to develop equations that allow enlarging the scale of the reactor, by means of tests with two reactors of different diameters.

The main assumption was that reactors of different sizes must have the same conversions. The steps developed for this purpose, considered the development of equations to calculate the mass of the sand bed and the flows of nitrogen and biomass. As simplifying hypotheses, the residence time of the vapors, the geometry of the reactors and the heating rate of the reactional bed were constant. Keeping the residence time constant, calculated the new nitrogen flow. The temperature was also maintained for the reaction to occur in the two reactors under the same conditions. Additionally, sand bed height was 20 cm, the sand mass varied due to changes in reactor diameter. The new biomass flow was calculated from the biomass stationary mass of the new reactor and the residence time. Finally, from the experimental data, the conversion results validated the scale increase of the reactor.

Introdução

A matriz energética mundial é baseada em fontes de energia não-renováveis como derivados de petróleo, carvão e gás natural. Estes combustíveis fósseis são resultado da decomposição de matéria orgânica por milhares de anos e apresentam altas taxas de emissões de gases que provocam o efeito estufa, alta variação de preços de acordo com o mercado internacional e a elevada exploração mundial pode culminar no desaparecimento das fontes de obtenção destes combustíveis. Diante deste cenário, a busca por fontes de energia renováveis vem aumentando e um dos ramos dessa investida é o setor de biocombustíveis.

Os biocombustíveis são fontes de energia renovável derivados de biomassa de origem animal ou vegetal. A biomassa é qualquer matéria orgânica que está disponível na natureza de forma recorrente ou renovável, incluído plantas, madeira, entre outros resíduos que podem ser usados para produção industrial de energia, combustíveis, químicos e materiais (PEREZ, 2004), deste modo, esta matéria-prima se destaca pela disponibilidade e baixo custo de obtenção, tornando os biocombustíveis uma opção atrativa no âmbito econômico e ambiental.

Devido à sua alta disponibilidade, sobretudo no Brasil, o sisal (Agave sisalana) apresenta grande potencial como solução para a crise energética (Soeiro & Pires, 2017). O Brasil é o maior produtor mundial desta planta, sendo a Bahia responsável por 80% da produção que é destinada, principalmente, à indústria de cordoaria (fabricação de cordas, cordéis, tapetes etc). Neste processo produtivo, apenas as fibras do sisal são utilizadas e a maior parte é descartada e acumulada no campo na forma de mucilagem (resíduo do desfibramento).

Uma das alternativas para o aproveitamento da mucilagem (resíduo de sisal) é convertê-lo em outros produtos de maior valor agregado utilizando a pirólise rápida. A pirólise rápida é o processo de decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio, onde a biomassa é convertida em bio-óleo, carvão e gases não condensáveis. A pirólise rápida difere de outros processos de termo conversão pela utilização de temperatura moderada e pelo baixo tempo de residência das partículas no reator e, por apresentar estas características, o reator de leito fluidizado é largamente empregado neste tipo de processo.

Apesar das vantagens da produção de bio-óleo, muitas características importantes de operação podem variar em unidades de diferentes tamanhos (PEREZ, 2004), logo, o processo só é viável caso seja possível reproduzi-lo em uma unidade com capacidade de produção industrial. Segundo (ROSABAL, 1988), dois sistemas são semelhantes quando entre eles existe semelhança geométrica, cinemática e térmica, desta forma, estes critérios de similaridade também se aplicam ao aumento de escala do reator de leito fluidizado, fazendo com que diferentes tamanhos de produção apresentem as mesmas taxas de conversão de biomassa em bio-óleo.

A velocidade mínima de fluidização é um parâmetro muito importante na construção e operação de sistemas de leito fluidizado, por ser responsável pela mistura e homogeneização da temperatura do leito. Partindo desta análise, a velocidade mínima de fluidização está relacionada com as propriedades das partículas e do gás fluidizante, do diâmetro e da geometria do leito, e de características do distribuidor como proporção de orifícios e geometria (Karmakar et al., 2012; Yang, 2003).

Num processo de pirólise de biomassa, o rendimento em termos de produção de bio-óleo depende principalmente da taxa de aquecimento e transferência de calor do meio reativo, temperatura de reação e tempo de residência dos vapores no reator (BRIDGEWATER, MEIER E RADLEIN, 1999). Portanto, a pirólise rápida acontece a temperaturas moderadas e longos tempos de residência, com a máxima produção de bio-óleo ocorrendo a temperatura de aproximadamente 500°C e com tempo de residência do vapor de 0,5 a 5 segundos. (BRIDGEWATER, MEIER E RADLEIN, 1999).

Com isso, as principais variáveis que interferem na conversão do processo são: geometria do escoamento, temperatura de reação, taxa de aquecimento e transferência de calor e tempo de residência dos vapores no reator. Estes parâmetros serão considerados nas deduções que serão realizadas para obter as equações de scale-up do reator de leito fluidizado.

Metodologia

O scale-up de um reator de leito fluidizado busca dimensionar o equipamento necessário no processamento de maiores quantidades matéria-prima, mantendo o rendimento da reação de pirólise realizada na planta piloto. Este processo foi realizado no laboratório de engenharia de reações químicas (LERQ) da UFBA, onde foi construída uma planta piloto de pirólise rápida de resíduo de sisal. Um esquema simplificado do processo aplicado no LERQ pode ser visto na figura 1:

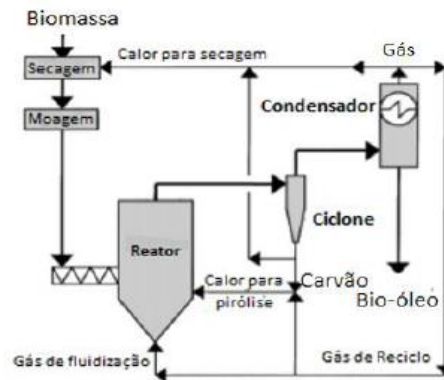


Figura 1 – Fluxograma de um processo de pirólise (Bridgwater, 1999)).

A utilização de reatores de diferentes tamanhos pode levar a variações nas propriedades do escoamento, acarretando em uma fluidização ineficiente do leito. Na construção dos dois reatores, controlou-se as variações nas propriedades do escoamento ao manter a mesma geometria cilíndrica e a mesma altura. As dimensões dos dois reatores são:

Tabela 1 – Dimensões dos reatores.

	Reator Menor	Reator Maior
Diâmetro (m)	0,1	0,125
Altura (m)	1	1

O leito arenoso é o responsável por controlar a temperatura do meio reacional e transferir calor para as partículas de biomassa injetadas no reator, permitindo a termo conversão destas partículas. Buscando manter a proporção entre o volume de areia e o volume do reator, a altura do leito de areia (L) foi fixada em 20 cm nos dois reatores, variando-se a massa de areia devido aos diferentes diâmetros.

Para o início da análise é importante ressaltar que as equações para o scale-up do reator foram desenvolvidas a partir da produção de bio-óleo esperada. Pressupondo-se dois sistemas semelhantes, o parâmetro de referência do processo será a conversão (X) em termos da vazão biomassa ($\dot{m}_b$) e vazão de bio-óleo produzido ($\dot{B}$):

$$\dot{B} = X \dot{m}_b \quad (1)$$

Para manter uma transferência de calor adequada após a injeção de biomassa, a proporção entre a vazão de biomassa e a massa areia no leito (K_m) deve ser mantida, com isso a massa de areia(ml) necessária será:

$$m_l = \dot{m}_b / k_m = \dot{B} / k_m X \quad (2)$$

A partir da equação x, calcula-se o volume (V_l) e a altura (L) do leito, sendo (ρ_l) a massa específica da areia e (A) a área de escoamento do gás fluidizante:

$$m_l = \rho_l V_l = \frac{\dot{B}}{k_m X} \quad (3)$$

$$V_l = A L = \frac{\dot{B}}{k_m X \rho_l} \quad (4)$$

$$L = \frac{\dot{B}}{k_m X \rho_l A} \quad (5)$$

Sabendo que V_r é o volume do reator, $\bar{v}$ a vazão volumétrica e v a velocidade do gás fluidizante, calcula-se o tempo de residência:

$$T_r = \frac{V_r - V_l}{\bar{v}} = \frac{(H-L)A}{vA} = \frac{(H-L)}{v} \quad (6)$$

Substituindo a altura do leito L na equação x:

$$H = T_r v + \frac{\dot{B}}{k_m X \rho_l \pi D^2} \quad (7)$$

Os sistemas serão semelhantes se os parâmetros T_r , v , k_m e X forem mantidos constantes.

Resultados e Discussão

A análise das equações desenvolvidas foi baseada em 4 ensaios de referência que serão realizados no reator de diâmetro 0,1 metros. Os ensaios realizados estão listados na tabela 2, onde os sinais correspondem a diferentes valores.

Tabela 2 – Testes experimentais realizados no Scale-up.

Reator	Ensaio	Vazão de N2	Vazão de Biomassa	Temperatura
Reator Maior	1	-	-	-
	2	+	-	-
	3	-	+	-
	4	-	-	+
Reator Menor	5	+	-	-
	6	-	+	-
	7	-	-	+
	8	-	-	-

As configurações experimentais de cada experimento e os correspondentes níveis de cada variável podem ser vistos na tabela 3.

Tabela 3 – Configurações experimentais.

Ensaio	Reator			
	Menor		Maior	
	-	+	-	+
Vazão de N2 (Nm ³ /h)	8	9	12,5	14,06
Temperatura (°C)	450	500	450	500
Vazão de biomassa (g/h)	610	1000	953	1562,5
Volume de areia (ml)	1570	1570,8	2454	2454

A tabela 3 foi construída a partir das equações desenvolvidas na seção anterior. Para exemplificar os cálculos realizados, tomou-se o ensaio 8 como referência:

Tabela 4 – Configurações operacionais do ensaio 8.

Vazão de N2 (Nm ³ /h)	Vazão de Biomassa (g/h)	Temperatura (°C)
8	610	450

A partir deste ensaio, obtêm-se valores para T_r , v , k_m e m_l :

$$v = \frac{\bar{v}}{A} = \frac{8 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi 0,1^2}{4} \text{ m}^2} = 1018,6 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 0,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_l = \rho_l V_l = 1456 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(\frac{\pi 0,1^2}{4} 0,2 \right) \text{ m}^3 \approx 2,287 \text{ kg}$$

$$k_m = \frac{m_b}{m_l} = \frac{610 \text{ g/h}}{2287 \text{ g}} \approx 0,27 \text{ h}^{-1}$$

$$T_r = \frac{V_{reator} - V_{leito}}{\bar{v}} = \frac{\left(\frac{\pi 0,1^2}{4} 1,0 - \frac{\pi 0,1^2}{4} 0,2 \right) \text{ m}^2}{8 \text{ m}^3/\text{h}} = 7,85 \times 10^{-4} \text{ h} \approx 2,83 \text{ s}$$

Para os reatores construídos no LERQ e considerando o ensaio de referência da tabela 2, substituindo os valores das constantes calculadas nas equações desenvolvidas anteriormente:

$$\bar{v} = 800D^2 \text{ (8)}$$

$$V_l = \frac{\pi D^2}{4} L = 0,157D^2 \text{ (9)}$$

$$m_l = V_l \times \rho_l = 228,59D^2 \text{ (10)}$$

$$\dot{m}_b = m_l k_m = 0,27m_l \text{ (11)}$$

$$H = 0,8 + 2,94 \times 10^{-5} \frac{\dot{B}}{D^2} = 1 \text{ metro}$$

Aplicando o diâmetro de 0,125 metros nas equações (8), (9), (10) e (11), é possível obter os mesmos valores correspondentes ao ensaio 1 e listados na tabela 3.

Os resultados obtidos nos 8 ensaios são descritos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados experimentais.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
Massa Total de óleo (g)	88,1	21,9	116,5	47,2	23,1	111,3	56,4	68,1
Conversão em massa de óleo	9,34%	3,37%	7,69%	4,95%	3,85%	13,3%	9,24%	11,16%
Vazão de biomassa (g/h)	953	953	1562,5	953	610	1000	610	610
Biomassa reagida (g)	943,6	650,5	1514,9	953,0	600,4	835,0	610,0	610,0

A vazão de bio-óleo esperada pode ser calculada com o auxílio da equação (1), utilizando as conversões obtidas nos ensaios 5, 6, 7 e 8:

$$\dot{B} = X \dot{m}_b \quad (1)$$

As discrepâncias relativas entre os valores experimentais e os valores previstos pela equação (1), estão listados na tabela 5:

Tabela 5 – Resultados e discrepância relativa.

Bio-óleo produzido (g)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Valor Experimental	88,10	21,89	116,50	47,17
Valor Esperado	105,31	25,05	201,85	88,07
Erro (%)	16,34%	12,61%	42,28%	46,44%

Os resultados obtidos nos ensaios 1 e 2 para o reator com diâmetro maior foram 16,33% e 12,59%, respectivamente. Apesar das discrepâncias relativas elevadas nos ensaios 3 e 4, os resultados podem ser considerados satisfatórios por se tratarem de ensaios realizados em uma planta piloto, logo, este tipo de escala apresenta flutuações que não são observadas em uma escala de bancada onde é mais fácil controlar algumas fontes de erros como: vazamentos, flutuações no controle da temperatura, etc. Desta forma, as equações desenvolvidas foram satisfatórias e são capazes de apresentar uma boa estimativa da produção de bio-óleo em uma escala industrial, permitindo a implementação de uma planta industrial de pirólise rápida de resíduo de sisal.

Conclusões

O primeiro passo para a criação de uma planta industrial de produção de bio-óleo é o scale-up do processo. Neste trabalho, foi possível reproduzir os resultados obtidos em uma planta piloto, possibilitando a implementação do processo de pirólise rápida de resíduo de sisal em uma escala industrial.

Após a variação da escala do reator e a aplicação das equações desenvolvidas para a determinação das variáveis operacionais, foi possível obter uma produção total de 88,1 gramas de bio-óleo para o reator com diâmetro maior e 21,9 gramas de bio-óleo utilizando um segundo ensaio de referência. Apesar das discrepâncias relativas elevadas, os resultados podem ser considerados satisfatórios por se tratarem de ensaios realizados em uma planta piloto, que geralmente gera flutuações que não são observadas em uma escala de bancada.

Por fim, os estudos envolvendo pirólise rápida de resíduo de sisal ainda estão em sua fase inicial e, em particular, o estudo do aumento de escala da unidade piloto de pirólise rápida do resíduo de sisal é um estudo pioneiro. Por este motivo, este trabalho pode ser utilizado como referência para estudos mais aprofundados sobre a viabilidade da implementação de uma unidade a nível industrial, considerando os aspectos particulares da produção local.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha família e ao meu orientador, Carlos A. M. Pires, pelo imenso apoio durante o processo de realização deste trabalho. Também agradeço a todos os meus colegas de

laboratório, que se esforçaram muito para realizar os experimentos dentro de um prazo apertado. Por fim, agradeço a Fapesb e a Universidade Federal da Bahia pela assistência financeira, técnica e motivacional.

Referências Bibliográficas

- Pérez, J. M. (2004). Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Romero, R. D., & Pires, C. A. (2016). Modelagem da pirólise de resíduo de sisal em um reator de leito fluidizado. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Engenharia Química, Salvador.
- Silva, M. F., & Pires, C. A. (2015). Recuperação do bio-óleo produzido a partir do resíduo de sisal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Engenharia Química, Salvador.
- BRIDGWATER, A.V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *OrganicGeochemistry* 30, 1999. p.1479-1493.
- GÓMEZ, E. O. Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão. 2002, 412 f. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- KARMAKAR, M. K.; HALDAR, S.; CHATTERJEE, P. K. Fluidization Behaviour of Binary Mixtures Using Sand and Biomass. *Int. J. Emer. Technol. Adv. Eng.*, n. 2, p. 651-657, 2012.
- YANG, W. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*; Edited by Wen-Ching Yang, p. 12-38, 2003.
- Soeiro, F., & Pires, C. A. (2017). Modelo de aumento de escala de uma unidade de produção de bio-óleo por pirólise de biomassa. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Engenharia Química, Salvador.
- ROSABAL, J. *Teoria del Escalado edición ISPJAM*, Santiago de Cuba, Cuba, 1988.