



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL A PARTIR DE RESÍDUOS DE EMBALAGENS TETRA PAK EM LEITO FLUIDIZADO: IDENTIFICAÇÃO DE FATORES QUE AFETAM A MISTURA DE PARTÍCULAS DE AREIA E COMPÓSITO PEBD/AL

FUEL PRODUCTION FROM TETRA PAK PACKAGES WASTE IN FLUIDIZED BED: IDENTIFICATION OF FACTORS AFFECTING THE MIXTURE OF PARTICLES OF SAND AND LDPE/AL COMPOSITE

Arthur Cesar Selvatici Filho¹, Diunay Zuliani Mantegazini^{2*}, & Marcelo Silveira Bacles^{1,3}

¹Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

²Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

³Programa de Pós-Graduação em Energia, Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

¹ arthurselvatici@gmail.com ^{2*} diunayzmantegazini@gmail.com ³ marcelo.bacles@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido em: 16.10.2021

Aprovado em: 11.11.2021

Disponibilizado em: 23.11.2021

PALAVRAS-CHAVE:

Alumínio; Fluidodinâmica; Energia; Embalagens cartonadas.

KEYWORDS:

Aluminum; Fluid dynamics; Energy; Carton packages.

***Autor Correspondente:** Mantegazini, D. Z.

RESUMO

Rotas integradas pirólise catalítica e refino possibilitam a conversão de poliolefinas proveniente de resíduos de embalagens cartonadas pós-consumo em combustíveis e produtos químicos de interesse comercial. Essa tecnologia contribui para a redução dos impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado desses resíduos. Além disso, a recuperação do compósito PEBD/Al (polietileno de baixa densidade e alumínio) via pirólise permite a obtenção de produtos com altos valores agregados, tais como a parafina e alumínio com alto teor de pureza. A originalidade desta pesquisa deve-se ao desenvolvimento de uma coluna cilíndrica de leito fluidizado com um sistema de guilhotinas. A inserção de um sistema de guilhotinas a coluna cilíndrica permite avaliar a concentração axial de partículas de compósito PEBD/Al. Além disso, esta pesquisa visa investigar o efeito da velocidade de injeção do ar e da fração mássica de compósito PEBD/Al sobre o índice de mistura de partículas (I_m), mediante a um

planejamento experimental ³². Sob o ponto de vista da mistura de partículas no leito, a análise de resultados indica que a produção de combustível a partir de poliolefinas pode ser favorecida quando o reator é empregado com velocidade ar 25 % acima da mínima fluidização.

ABSTRACT

Integrated routes for catalytic pyrolysis and refining enable the conversion of polyolefins from post-consumer carton packaging waste into fuels and chemical products of commercial interest. This technology contributes to the reduction of environmental impacts resulting from the inappropriate disposal of these wastes. In addition, the recovery of the LDPE/Al composite (low-density polyethylene and aluminum) by pyrolysis allows obtaining products with high added values, such as paraffin and aluminum with high purity. The originality of this research is due to the development of a cylindrical column of fluidized bed with a guillotine system. Insertion of a guillotine system to cylindrical column allows evaluating the axial concentration of LDPE/Al composite particles. In addition, this research aims to investigate the effect of the air injection velocity and the mass fraction of LDPE/Al composite on the particle mixing index (I_m), using an experimental design ³². The results show that the air injection velocity and the mass fraction of LDPE/Al composite affect the mixing index (I_m). From point of view of particle mixing in the bed, data analysis indicates the fuel production from polyolefins is favored in the reactor when a gas velocity 25% above the minimum is used.



1. INTRODUÇÃO

A produção de plástico tem crescido constantemente desde o início de sua produção na década de 1930. Além disso, o desenvolvimento de novos plásticos em conjunto com materiais compósitos estenderam ainda mais suas aplicações. No entanto, a baixa deterioração dos plásticos acarreta sérios problemas ambientais e um grande desafio na gestão de resíduos (Lopez *et al.*, 2018; Miandad *et al.*, 2016). O desenvolvimento de rotas de valorização de resíduos plásticos enfrentam desafios relacionados às características complexas desses resíduos (Kumar *et al.*, 2011). Os plásticos possuem baixa condutividade térmica, o que impede o rápido e uniforme aquecimento do polímero no ambiente de reação. Além disso, o plástico fundido tem uma natureza pegajosa, o que causa sérios problemas operacionais (Lopez *et al.*, 2017).

Diversas alternativas de valorização têm sido propostas, que vão desde rotas primárias de reciclagem direta até rotas quaternárias de valorização energética (Al-Salem *et al.*, 2010). A reciclagem terciária oferece maior número de vantagens quando comparada com a reciclagem primária. A reciclagem terciária de resíduos plásticos apresenta tanto impacto tecnológico, contribuindo para o desenvolvimento da indústria química, quanto ambiental, permitindo a recuperação de materiais com alto valor agregado, além da redução de energia utilizada na extração de alumínio virgem proveniente da indústria (Braido *et al.*, 2018; Mantegazini, Neves, *et al.*, 2021; Solis & Silveira, 2020). Vários métodos e tecnologias de reciclagem terciária têm chamado à atenção e têm potencial para serem úteis no estágio comercial, por exemplo, a pirólise e o plasma (Armenise *et al.*, 2021).

A pirólise tem sido aplicada há milhares de anos para a produção de carvão, mas foi apenas nos últimos 30 anos que a pirólise tornou-se de considerável interesse para produção de combustível e energia (Bridgwater, 2012). A maioria das pesquisas tem se concentrado na degradação térmica de resíduos plásticos amplamente utilizados, como as poliolefinas. A pirólise catalítica de poliolefinas em conjunto com o craqueamento catalítico de parafinas em refinarias permite a produção de combustíveis e de produtos químicos de grande interesse industrial, (Armenise *et al.*, 2021; Chenier, 2002). Além de apresentar menores níveis de emissões de gases de efeito estufa quando comparadas com outras técnicas, como incineração e gaseificação (Geyer *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2021) A rota de reciclagem térmica de resíduos modernos como, por exemplo, oriundos de embalagens cartonadas pós-consumo (polietileno de baixa densidade e alumínio - PEBD/Al) podem produzir grupos aromáticos (benzeno, tolueno e xileno), olefinas leves (eteno, propeno e butadieno) e alumínio com alta pureza (Jung *et al.*, 2010; Mantegazini, Xavier, *et al.*, 2021).

A fim de minimizar as limitações de transferência de calor e problemas físicos na pirólise de resíduos plásticos, diferentes configurações de reatores têm sido propostas na literatura (Lopez *et al.*, 2017). Pesquisas recentes apontam que reatores de leito fluidizado podem ser empregados na conversão de poliolefinas por meio de pirólise catalítica. Altas taxas de transferência de calor e massa, baixos tempos de residência, bom controle de temperatura, além de bons níveis de mistura são algumas das vantagens do uso do reator de leito fluidizado (Barbarias *et al.*, 2018; Bridgwater, 2012; Kaminsky, 2021; Lopez *et al.*, 2017; Orozco *et al.*,



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/Al. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

2021; Zhao *et al.*, 2020). Além disso, leitos fluidizados podem operar com alimentação contínua, o que é essencial para o escalonamento do processo (Kang *et al.*, 2008). Entretanto, os leitos fluidizados compostos por misturas binárias de partículas ainda apresentam desafios operacionais que impedem a obtenção uniforme de produtos. Isso ocorre devido à segregação de partículas, fenômeno caracterizado por concentrações heterogêneas das partículas presentes no reator.

Na maioria dos processos a segregação é indesejável, já que o fenômeno afeta a fluidodinâmica da mistura, conduzindo a uma fluidização irregular (instável) e comprometendo a eficiência do processo de transferência de calor e massa no leito (Daleffe *et al.*, 2005). Melo *et al.* (2016) e Freitas *et al.* (2017) analisaram o escoamento gás-sólido em leitos de jorro e fluidizado, respectivamente, compostos por misturas de compósito PEBD/Al e areia. De acordo com os autores, foram evidenciados regimes estáveis de escoamento em leito fluidizado borbulhante e em leito de jorro. Além disso, a segregação de partículas é mais evidente em condições operacionais próximas da mínima fluidização para os leitos fluidizado e/ou de mínimo jorro para leitos de jorro cônicos.

Baseado nos desafios evidenciados a respeito da segregação de partículas de uma planta de pirólise de resíduos plásticos em leito fluidizado esta pesquisa possui como novidade o desenvolvimento de uma coluna cilíndrica de leito fluidizado com um sistema de guilhotinas e apresentação de um planejamento de experimentos para avaliar a segregação de partículas de compósito PEBD/Al. O sistema de guilhotinas permite obter a concentração axial de partículas em três regiões da coluna de leito fluidizado. O uso de um planejamento de experimentos 2^3 possibilita investigar o efeito da velocidade de injeção do ar e da fração mássica de compósito sobre o índice de mistura (I_m). Este procedimento contribui para assegurar a mistura de partículas na partida da planta de reator de leito fluidizado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e caracterização das partículas

Para a realização dos ensaios fluidodinâmicos foram escolhidas partículas de compósito PEBD/Al (polietileno de baixa densidade e alumínio) e areia. O compósito PEBD/Al é considerado um valioso subproduto oriundo da reciclagem de embalagens cartonadas pós-consumo. Já a areia é utilizada como material inerte, com finalidade de estabilizar o processo e melhorar a transferência de calor.

A redução de tamanho do compósito foi realizada através de um moinho de facas. As partículas de compósito foram selecionadas por peneiramento e apresentaram diâmetro médio de 1,02 mm e a areia de 0,462mm (Tyler Bertel, de 16 e 20 mesh, respectivamente). A massa específica e a porosidade foram determinadas utilizando, respectivamente, as seguintes metodologias: picnometria líquida e densidade bulk, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

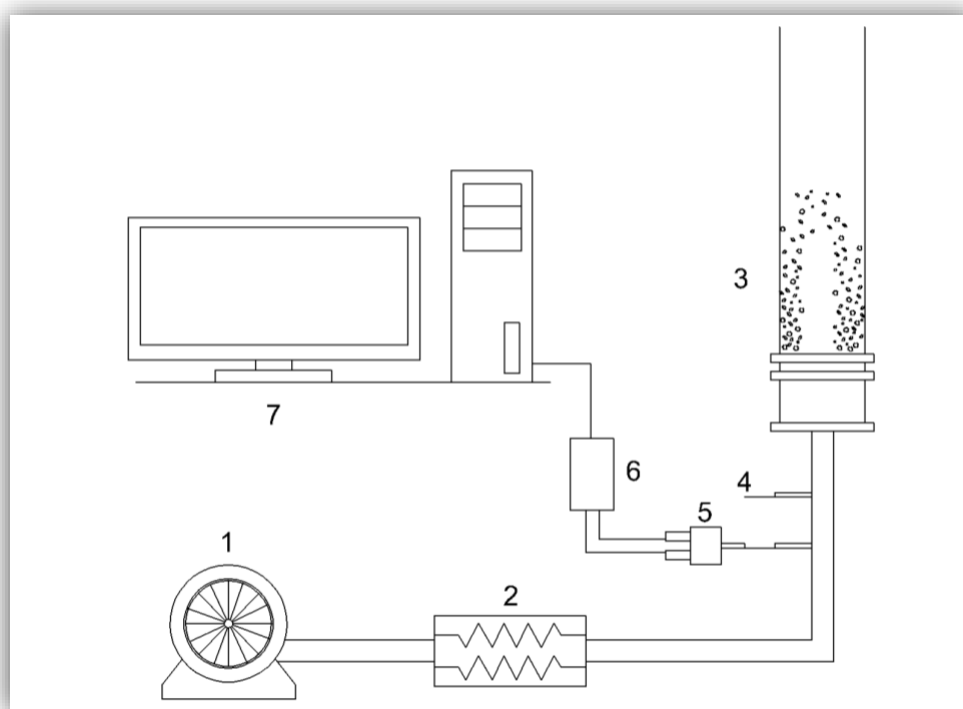
Tabela 1. Propriedades físicas das partículas.

Partículas	Diâmetro (m)	Massa específica (Kg/m ³)
Compósito PEBD/Al	1015 x 10 ⁻⁶	950 ± 30
Areia	462 x 10 ⁻⁶	2660 ± 60

2.2 Unidade experimental

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados em uma unidade de leito fluidizado em escala de bancada. A unidade está localizada no Laboratório de Eficiência Energética do PPGEN/CEUNES/UFES, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1. Esquema da unidade experimental: 1 – soprador de ar; 2 - aquecedor; 3 – coluna cilíndrica; 4 - termopar; 5 - transdutor de pressão; 6 - placa de aquisição de dados; 7 – microcomputador.



A unidade experimental consiste em soprador centrífugo IBRAM de 2 CV de potência e vazão máxima de ar de 4,5m³/min, um sistema de aquecimento de ar (com controle de temperatura PID) e um transdutor de pressão (marca Dwyer, modelo 616C-4 operando em uma faixa de 0–20 in H₂O com ± 1% de precisão) localizado no tubo de entrada de ar (ou seja, pouco abaixo da coluna cilíndrica). Os sinais analógicos são endereçados, filtrados e processados por uma placa de aquisição de dados A/D (analógico/digital) da *National Instruments*. A aquisição de dados é feita a partir do software *LabVIEW 7* e o processamento do sinal ocorre através de um computador (Core i3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM).

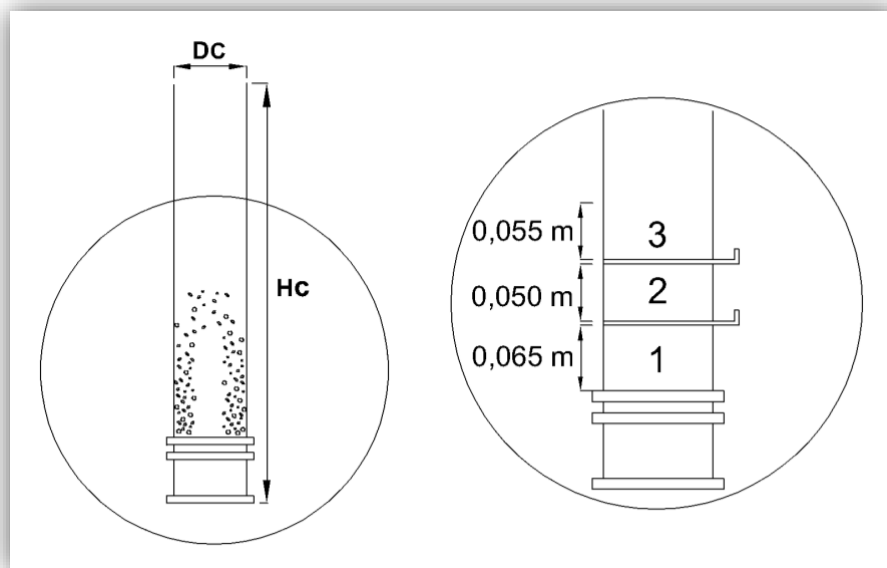
Para analisar a concentração de compósito PEBD/Al em diferentes regiões axiais, foi desenvolvida uma coluna cilíndrica com um sistema de guilhotinas. Fendas transversais foram dispostas ao longo do eixo axial da coluna de PVC. A introdução do sistema de guilhotinas



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e composto PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

(guilhotinas de aço carbono) possibilita dividir a coluna em três diferentes regiões. A Figura 2 exibe os detalhes e as dimensões da coluna cilíndrica e do sistema de guilhotinas.

Figura 2. Detalhes e as dimensões da coluna cilíndrica ($D_c = 0,1\text{ m}$; $H_c = 0,72\text{ m}$) e do sistema de guilhotinas.



2.3 Procedimentos experimentais

2.3.1 Condição de mínima fluidização

A análise de dados da queda de pressão em função da velocidade de injeção do ar permite obter a condição de mínima fluidização (menor velocidade de ar injetada no leito em que ocorre o regime de fluidização). Esse conjunto de dados são obtidos através da atenuação do fluxo de ar no leito.

Inicialmente, a coluna é preenchida com uma dada mistura de partículas de composto PEBD/Al e areia até atingir a altura de 0,17 m. Na sequência ocorre a injeção de ar no leito através do soprador centrífugo, o fluxo de ar é aumentado até que o regime de fluidização seja alcançado. Após alcançado o regime de fluidização, ocorre o processo de redução do fluxo de injeção de ar.

Sob baixas vazões de injeção de ar é inserido um bocal no topo da coluna cilíndrica, permitindo a obtenção de dados precisos. Com o auxílio de um anemômetro de fio quente (inserido na lateral do bocal) são determinadas as velocidades médias do centro do bocal. Enquanto que para altas vazões de injeção de ar (acima de 0,40 m/s) é utilizado um anemômetro do tipo ventoinha (*KMI Instruments - AMI 300*) posicionado sob o topo da coluna.

2.4 Segregação de partículas

Para quantificar a segregação de partículas é utilizado o sistema de guilhotinas para uma dada condição operacional estabelecida no projeto de experimentos (Tabela 2). O leito permanece em regime de fluidização por 5 minutos. Na sequência, a velocidade de injeção de ar é



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

interrompida e as guilhotinas são introduzidas na coluna cilíndrica, dividindo o leito em três diferentes regiões (Região 3 – topo, região 2 – centro, região 1 – fundo) (Figura 2).

Para avaliar a concentração de partículas em cada uma das secções é necessário inicialmente a separação do compósito PEBD/Al da areia, esse processo ocorre através do peneiramento. Posteriormente é quantificada a massa de cada componente, para obter a fração mássica de partículas de compósito PEBD/Al ($X_{C,Ri}$) em cada região, como mostra a Equação 1:

$$X_{C,Ri} = \frac{M_{C,Ri}}{M_{C,Ri} + M_{S,Ri}} \quad (1)$$

Onde, $M_{C,Ri}$ é a massa de partículas de compósito PEBD/Al em cada região do leito e $M_{S,Ri}$ é a massa de areia em cada região do leito.

Para quantificar a segregação de partículas de misturas binárias é utilizado o índice de mistura (I_m), que pode ser calculado através da Equação 2:

$$I_m = \frac{X_{C,Ri}}{X_{CO}} \quad (2)$$

Onde, $X_{C,Ri}$ é a fração mássica de partículas de compósito PEBD/Al em cada região do leito e X_{CO} é a fração mássica de compósito PEBD/Al inicial no leito (definida pelo limite do fator fração mássica empregado no planejamento de experimentos).

A definição dessa equação (2) foi baseada na definição encontrada em Nienow *et al.* (1987) e Olazar *et al.* (1993).

2.5 Planejamento Experimental

A Tabela 2 exhibe o planejamento de experimentos fatorial 3^2 realizados em triplicata. O objetivo é avaliar os efeitos da fração mássica de compósito PEBD/Al (X_c) e da velocidade de injeção do ar (V/V_{mf}) sobre o índice de mistura (I_m) de partículas no leito.

Para verificar o efeito de diferentes regimes de escoamento (leito borbulhante e fluidizado) sob a mistura, são empregados valores de velocidades de injeção de ar de 10, 25 e 40% da mínima fluidização. Além disso, o leito fluidizado é composto por misturas de areia e compósito PEBD/Al contendo fração mássica igual a 10, 20 e 30% em massa. A escolha desta faixa é justificada, com o intuito de analisar o efeito da resistência ao escoamento do ar com a mudança de volume de partículas do leito. Por outro lado, o aumento volumétrico de compósito no leito eleva, por consequência, a sua capacidade de processamento de resíduo. Os limites dos fatores são mostrados na Tabela 2, com as suas respectivas codificações empregadas na análise estatística de dados.

Tabela 2. Limites dos parâmetros de estudo do leito.

Variável	Codificação	Limite inferior	Limite médio	Limite superior
V (m/s)	Sem	1.1	1.25	1.4
X (%)	Sem	0.1	0.2	0.3
V, X	Com	-1	0	1

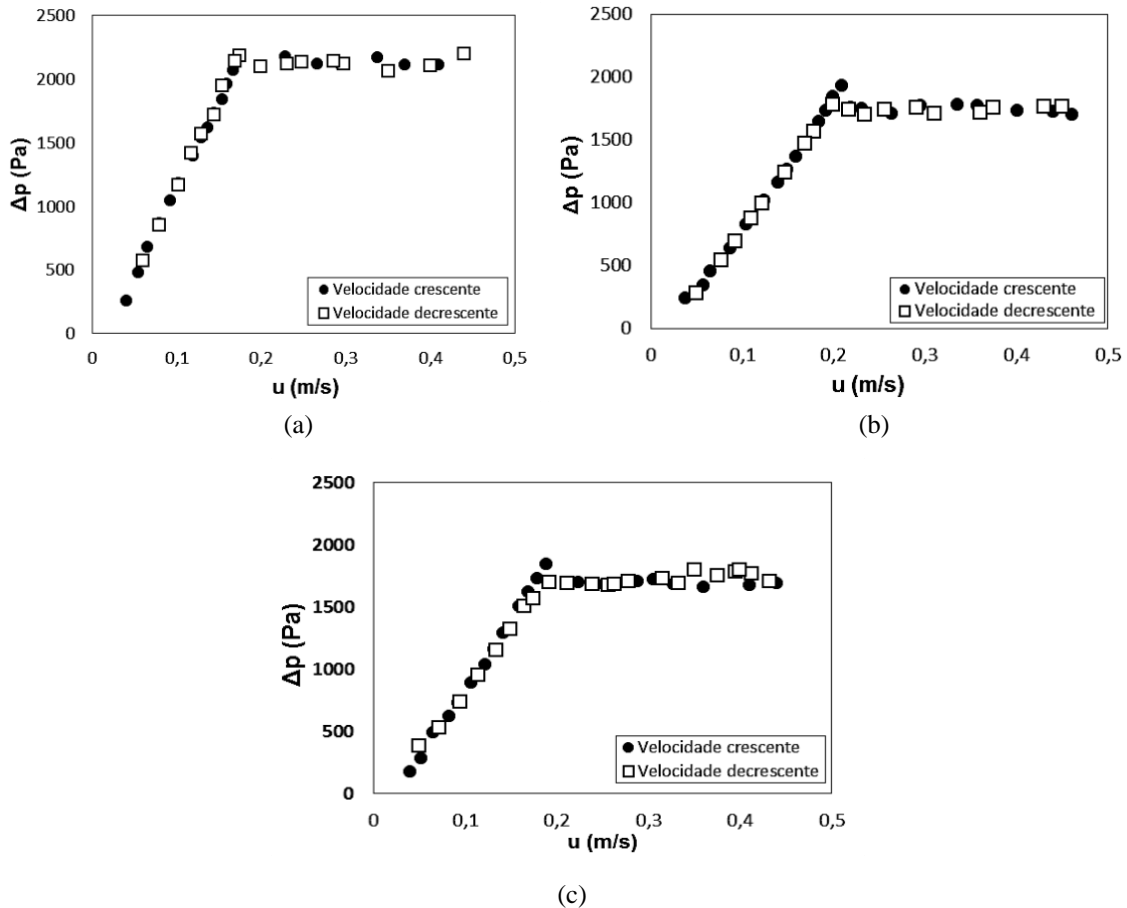


3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Regimes de escoamentos e condições operacionais

A Figura 3 exibe os dados de queda de pressão no leito obtidos em função da velocidade de injeção de ar.

Figura 3. Queda de pressão no leito em função da velocidade do ar: (a) fração mássica de 10% PEBD/Al; (b) fração mássica de 20% PEBD/Al e (c) fração mássica de 30% PEBD/Al.



A partir da análise dos gráficos exibidos na Figura 3, é possível identificar os diferentes regimes de escoamento (regime de leito fixo e o de leito fluidizado). Para velocidades de injeção de ar 30% maior do que a de mínima fluidização ocorre a mudança de regime borbulhante para regime fluidizado turbulento, que pode ser visualmente identificado através da coluna de vidro transparente.

O regime de leito fixo é notado quando há uma relação linear da queda de pressão em função da velocidade de injeção de ar no leito, além da porosidade do leito ser constante. Enquanto o regime fluidizado é notado quando a queda de pressão é constante com o aumento da velocidade de injeção de ar. No regime de mínima fluidização, a força de arrasto do fluido sobre as partículas se iguala à força da gravidade das partículas (peso e força de empuxo), logo, a queda de pressão no leito é igual ao peso das partículas. Sob estas condições do leito, a velocidade mínima de fluidização (V_{mf}) é obtida experimentalmente pela curva característica



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

(Δp vs V_{mf}) usando o procedimento de velocidade decrescente do ar no leito. Os valores operacionais do leito no regime de mínima fluidização são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores da velocidade de mínima fluidização (V_{mf}) e da queda de pressão (Δp) obtidos para diferentes frações mássicas de compósito PEBD/Al de acordo com o planejamento experimental.

Fração mássica PEBD-Al (%)	Velocidade mínima de fluidização (m/s)	Queda de Pressão (Pa)
10	0,23	2130
20	0,21	1934
30	0,19	1843

Para a faixa de fração mássica empregada, nota-se que não há mudança das variáveis operacionais do leito. Isso é explicado devido a diferença de massa específica entre o compósito e a areia. A densidade do compósito PEBD/Al é menor do que a da areia, dessa forma, quando a fração mássica do compósito PEBD/Al é alterada (10 a 30%) não há uma variação significativa do peso do leito.

3.2 Efeitos das variáveis sobre o índice de mistura (I_m)

Para analisar os efeitos das variáveis sobre o índice de mistura (I_m) foi utilizado o nível de significância de 10%. Este valor foi escolhido devido à variação do desvio padrão variando entre 1 a 8%. A Tabela 4 exibe a estimativa dos efeitos dos fatores sobre o índice de mistura (I_m).

Tabela 4. Estimativa dos efeitos sobre o índice de mistura de partículas (I_m).

	Efeito	p-valor
Região	-0,1437	0
V^2	-0,02474	0,009
$V*X$	0,01098	0,089
$X*Região$	0,02628	0,001

Analisando os efeitos dos fatores (velocidade de injeção de ar, fração mássica e regiões axiais do leito) sobre o índice de mistura (I_m) para um grau de confiança de 90%, tem-se o efeito quadrático da velocidade de injeção de ar, da interação entre a velocidade de injeção de ar e a fração mássica de compósito PEBD/Al, além da fração mássica de compósito com as regiões axiais do leito influenciando na variável resposta (I_m).

3.3 Modelos

A Tabela 5 apresenta as equações do modelo. Ao nível de significância de 10%, conclui-se que o coeficiente de correlação (R^2) é altamente significativo para todas as regiões (0,90).

Tabela 5. Modelos para prever o índice de mistura (I_m) nas regiões do fundo, centro e topo.

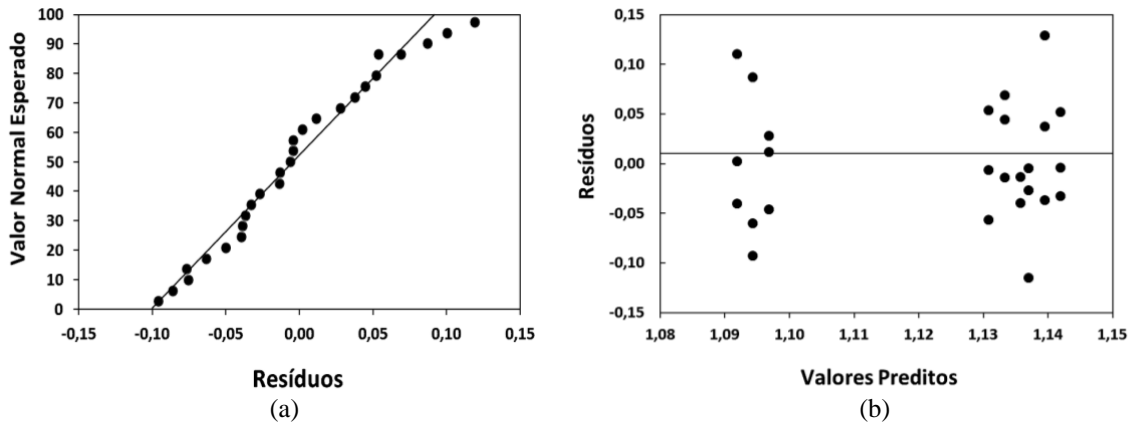
Região	R^2	Equação
Topo	0,9063	$I_m = 1,13958 - 0,02507 V^2 - 0,02355 X - 0,01223 V*X$
Centro		$I_m = 1,06907 - 0,02507 V^2 - 0,00136 X - 0,00732 V*X$
Fundo		$I_m = 0,88912 - 0,02507 V^2 + 0,02491 X + 0,01955 V*X$

A Figura 4-a exibe o gráfico de probabilidade normal como uma função dos resíduos. Enquanto que a Figura 4-b exibe os resíduos como uma função dos valores preditos.



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

Figura 4. (a) Probabilidade normal x resíduos; (b) Valores preditos x resíduos.



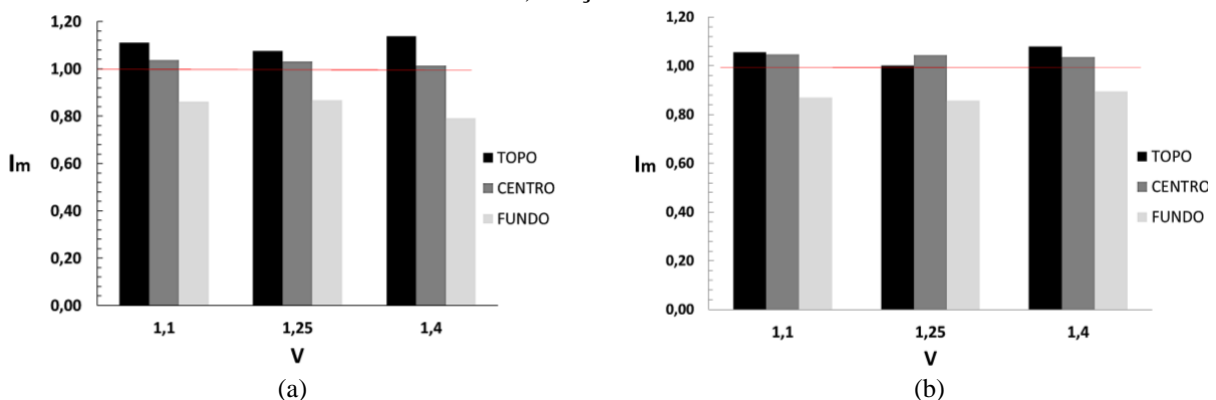
Analisando a Figura 4 percebe-se que os resíduos seguem uma distribuição normal, estão normalmente distribuídos e aleatórios em torno do zero. Desta forma, pode-se assegurar que o modelo consegue prever adequadamente todas as tendências dos dados experimentais e é adequado para prever os resultados experimentais.

3.4 Avaliação da condição operacional desejada

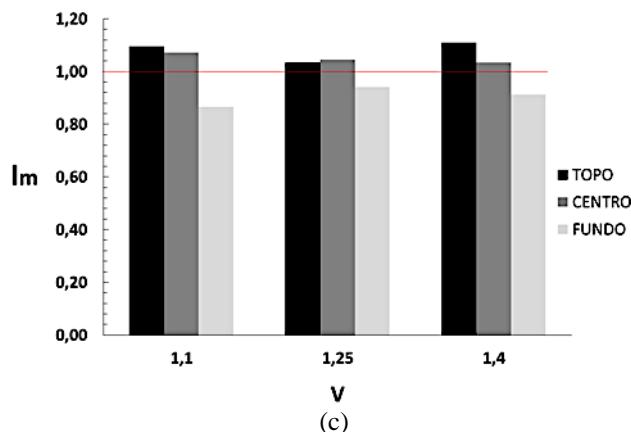
A Figura 5 mostra o índice de mistura (I_m) em função da velocidade de injeção de ar no leito para cada fração mássica de compósito PEBD/Al (10 a 30%), parametrizado pelas regiões do leito.

Baixos índices de segregação no leito fluidizado borbulhante são evidenciados para 30% de compósito e velocidade de injeção do ar 25% acima da mínima de fluidização, conforme observado na Figura 5. O uso de velocidade de injeção do ar superior a 25% de mínima fluidização não favorece a mistura de partículas. Isso provavelmente ocorre devido à mudança do regime de escoamento, do leito borbulhante para o leito fluidizado turbulento.

Figura 5. Índice de mistura (I_m) em função da velocidade de injeção de ar para as 3 regiões do leito (fundo, centro e topo): a) fração mássica de 10% PEBD/Al; b) fração mássica de 20% PEBD/Al e c) fração mássica de 30%.



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.



Comparando os valores de índices de misturas (I_m) obtidos nessa pesquisa ($D_c/D_s=2,22$) com os apresentados por Santos, (2020) ($D_c/D_s = 0,3$), observa-se que razões de diâmetro (D_c/D_s) menores que 2,22 melhoram a mistura de partículas no leito fluidizado borbulhante.

4. CONCLUSÃO

Com base na análise estatística dos dados experimentais pode-se concluir que:

- a velocidade de injeção do ar e a fração mássica de compósito PEBD/Al apresentam efeitos sobre o índice de mistura (I_m);
- ao nível de significância de 10%, o modelo apresenta um bom ajuste aos dados experimentais, sendo adequado para prever o índice de mistura (I_m) do leito;
- condições operacionais que favorecem a mistura de partículas são obtidas para velocidade de injeção de ar 25 % acima da velocidade de mínima fluidização e para concentração de compósito PEBD/Al igual 30%.

REFERÊNCIAS

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P. & Baeyens, J. (2010). The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(1), 103–129. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2009.09.001>
- Armenise, S., SyieLuing, W., Ramírez-Velásquez, J. M., Launay, F., Wuebben, D., Ngadi, N., Rams, J. & Muñoz, M. (2021). Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105265. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105265>
- Barbarias, I., Lopez, G., Artetxe, M., Arregi, A., Bilbao, J. & Olazar, M. (2018). Valorisation of different waste plastics by pyrolysis and in-line catalytic steam reforming for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 156, 575–584.
- Braido, R. S., Borges, L. E. P. & Pinto, J. C. (2018). Chemical recycling of crosslinked poly(methyl methacrylate) and characterization of polymers produced with the recycled monomer. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 132, 47–55. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2018.03.017>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.01.048>



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

Chenier, P. (2002). Survey of Industrial Chemistry. In *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* (3rd editio, Vol. 32, Issue 3). Kluwer Academic/Plenum Publishers. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(93\)80016-a](https://doi.org/10.1016/0255-2701(93)80016-a)

Daleffe, R. V., Ferreira, M. C. & Freire, J. T. (2005). Drying of pastes in vibro-fluidized beds: Effects of the amplitude and frequency of vibration. *Drying Technology*, 23(9–11), 1765–1781. <https://doi.org/10.1080/07373930500209681>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.1700782>

Jung, S. H., Cho, M. H., Kang, B. S. & Kim, J. S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.009>

Kaminsky, W. (2021). Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis. *Fuel Communications*, 8, 100023. <https://doi.org/10.1016/J.JFUECO.2021.100023>

Kang, B. S., Kim, S. G. & Kim, J. S. (2008). Thermal degradation of poly(methyl methacrylate) polymers: Kinetics and recovery of monomers using a fluidized bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2007.07.001>

Kumar, S., Panda, A. K. & Singh, R. K. (2011). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.05.005>

Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J. & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 576–596. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.032>

Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J. & Olazar, M. (2017). Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 73, pp. 346–368). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142>

Mantegazini, D. Z., Neves, F. L., Xavier, T. P. & Bachelos, M. S. (2021). Review on Advanced Technologies for Aluminum Recovery From Carton Packages Waste Using Pyrolysis. *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, 117–129. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v7i1.34583>

Mantegazini, D. Z., Xavier, T. P. & Bachelos, M. S. (2021). Conical spouted beds for waste valorization: Assessment of particle segregation in beds composed of sand and Tetra Pak residues. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101334. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101334>

Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazza, A. S., Rehan, M. & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2016.06.022>

Nienow, A. W., Naimer, N. S. & Chiba, T. (1987). Studies of Segregation / Mixing in Fluidised Beds of Different Size Particles Studies of Segregation mixing in Fluidised Beds of Different Size Particles. *The Society of Chemical Engineers*, 457–460.

Olazar, M., José, M. J. S., Peñas, F. J., Aguayo, A. T. & Bilbao, J. (1993). Stability and



Citação (APA): Selvatici, A. C., Filho, Mantegazini, D. Z., & Bachelos, M. S. (2021). Produção de combustível a partir de resíduos de embalagens tetra pak em leito fluidizado: identificação de fatores que afetam a mistura de partículas de areia e compósito PEBD/AL. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 133-144.

Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary Mixtures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 32(11), 2826–2834. <https://doi.org/10.1021/ie00023a053>

Orozco, S., Alvarez, J., Lopez, G., Artetxe, M., Bilbao, J. & Olazar, M. (2021). Pyrolysis of plastic wastes in a fountain confined conical spouted bed reactor: Determination of stable operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 229.

Santos, A. C. O. (2020). *Segregação de misturas binárias de areia e compósito PEBD/Al em leito fluidizado para pirólise rápida de resíduos cartonados*. Tese (Mestrado em Energia), UFES, São Mateus-ES.

Solis, M. & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128–138. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.01.038>

Zhao, D., Wang, X., Miller, J. B. & Huber, G. W. (2020). The Chemistry and Kinetics of Polyethylene Pyrolysis: A Process to Produce Fuels and Chemicals. *ChemSusChem*, 13(7), 1764–1774. <https://doi.org/10.1002/CSSC.201903434>

Zhou, N., Dai, L., Lyu, Y., Li, H., Deng, W., Guo, F., Chen, P., Lei, H. & Ruan, R. (2021). Catalytic pyrolysis of plastic wastes in a continuous microwave assisted pyrolysis system for fuel production. *Chemical Engineering Journal*, 418, 129412. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.129412>

