



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Determinação da Curva de Alimentação de Biomassa por Rosca Sem-fim de uma Fornalha de Leito Fluidizado Circulante em Escala de Laboratório

Christopher Matheus Novach de Moraes

Engenharia Mecânica - UTFPR - PG

Jhon Jairo Ramirez Behainne

Engenharia Mecânica - UTFPR - PG

Resumo: Este trabalho teve como objetivo determinar as curvas de alimentação da fornalha piloto de leito fluidizado circulante utilizando serragem e comparar com a da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar, com o intuito de validar se o alimentador é capaz de suprir a quantidade de biocombustível requerida em função da quantidade de ar acrescentada na fornalha. Para isso, realizou-se cálculos relacionados à alimentação da rosca sem fim e à quantidade de biocombustível necessária para a fluidização do leito, com base no fluxo de ar que percorre pelo riser e a razão mássica de ar por combustível. Concluiu-se que a serragem requer a menor quantidade mássica para a fluidização do leito, reduzindo o consumo de combustível e otimizando o espaço de armazenamento. Além disso, a rotação necessária para a alimentação e o intervalo de rotação são duas vezes menores em comparação às demais biomassas, permitindo maior precisão operacional e adaptação ao processo.

Palavras-chave: Rosca Sem-fim, Fluidização Rápida. Combustão de Biomassa. Fornalha de Laboratório.

Determination of the Biomass Feeding Curve by the Screw Feeder of a Circulating Fluidized Bed Pilot Furnace

Abstract: This study aimed to determine the feeding curve of the circulating fluidized bed pilot furnace using sawdust, and compare it with rice husk and sugarcane bagasse, to validate whether the feeder can supply the amount of biofuel required depending on the amount of air added to the furnace. For this purpose, calculations were made related to the feed of the screw and the amount of biofuel required for fluidization of the bed, based on the air flow through the riser and the mass ratio of air to fuel. It was concluded that sawdust requires the lowest mass quantity for bed fluidization, reducing fuel consumption and optimizing storage space. In addition, the rotation required for feeding and the rotation interval are twice as low compared to other biomasses, allowing greater operational precision and adaptation to the process.

Keywords: Screw Feeder. Fast Fluidization. Biomass Combustion. Lab-Scale Furnace.

1. Introdução

A fornalha de um sistema de combustão é o espaço onde ocorre a queima completa do combustível de forma controlada, fornecendo condições para que a formação dos gases aquecidos seja realizada com o maior rendimento possível (Melo, 2003). No meio

industrial, há diversos modelos e tipos de fornalhas, como fornalhas de queima em suspensão, de leito móvel sobre grelha e de leito fluidizado, estas últimas podendo ser do tipo borbulhante ou circulante (Bizzo, 2003).

O uso das fornalhas de Leito Fluidizado Circulante (LFC) é bastante comum em caldeiras industriais que demandam alta potência térmica ou mecânica/elétrica com elevado rendimento térmico e baixas emissões de poluentes (Basu, 2006). A fluidização nessas fornalhas ocorre quando um leito de partículas sólidas, composto pelo combustível e material inerte, se comporta como um fluido ao ser atravessado pelo ar de combustão em sentido ascendente. No regime de fluidização rápida, as partículas do leito são arrastadas para fora da coluna e retornadas à base dela de forma cíclica, formando assim um leito fluidizado circulante (Martins, 2015).

A fornalha de LFC é composta por quatro componentes principais: o riser, ou coluna onde ocorre a combustão do combustível com ar na presença de inertes (normalmente areia) em movimento ascendente; o ciclone, que tem a função de separar o material gasoso do sólido; a coluna de retorno ou standpipe, que armazena as partículas retidas pelo ciclone para impedir o retorno dos gases de combustão; e a válvula de recirculação dos sólidos, que cria uma região de alta pressão para transportar as partículas novamente ao riser. Na geração de vapor em caldeiras, o circuito de fluidização também conta com trocadores de calor internos que são expostos à suspensão gás-sólido em alta temperatura, aproveitando assim a energia térmica disponível (Hilgemberg, 2021). Nesse tipo de sistema, é possível adotar elevadas velocidades de fluidização, trazendo vantagens para o processo de combustão (Silva, 2013).

Para alimentar o combustível nas fornalhas de LFC utilizam-se diversos mecanismos ou dispositivos, cuja seleção depende, principalmente, da escala do equipamento, seja esta comercial, piloto ou de laboratório/bancada. Assim, é comum utilizar alimentadores do tipo correia transportadora, válvula rotativa e rosca sem-fim, com auxílio ou não de injeção pneumática (Basu, 2006). No geral, os alimentadores de tipo rosca sem-fim podem controlar facilmente a vazão mássica de alimentação do combustível em qualquer escala variando a rotação do eixo (Ribeiro, 2017). Nesse tipo de alimentador, o passo e o diâmetro da rosca podem ser constantes do início ao fim, ou também variar ao longo do eixo longitudinal, determinando assim características específicas de alimentação do combustível sólido. Adicionalmente, a inclinação do alimentador e o volume do material a ser alimentado são fatores que podem influenciar no desempenho operacional desse tipo de alimentador (Petrulho, et al., 2020). Dentre as vantagens desse alimentador, pode-se citar o menor investimento inicial e o menor espaço ocupado na instalação (Gualberto, 2019).

Neste trabalho, o material utilizado como combustível na fornalha de estudo é biomassa lignocelulósica, sendo ela representada por matéria orgânica de origem vegetal que, ao ser oxidada na temperatura adequada, gera energia térmica útil com menor impacto ambiental se comparado com a obtida a partir de combustíveis fósseis (Raízen, 2022). No Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar é o principal recurso potencial utilizado para geração de calor a partir de biomassa lignocelulósica (MME, 2023). Além do bagaço, a casca de arroz e a serragem de madeira também possuem alto potencial para a produção de energia térmica em fornalhas (Lima et al., 2019; Embrapa, 2021).

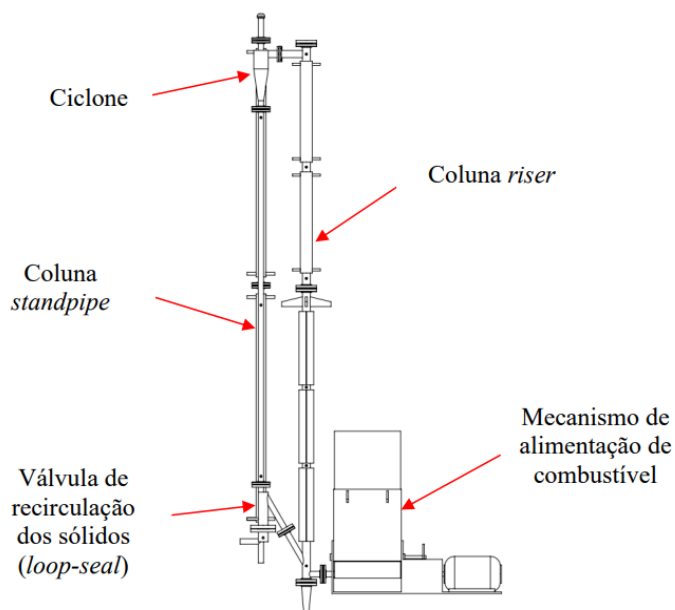
Tendo em vista o desenvolvimento em laboratório de um equipamento versátil para pesquisas experimentais de combustão de biomassas em fornalhas de leito fluidizado circulante construídas em pequena escala, do qual não há muita informação disponível na literatura, este trabalho determina as curvas da alimentação ou de dosagem de serragem,

casca de arroz e bagaço da cana-de-açúcar por meio de um mecanismo de rosca sem-fim com velocidade de giro controlada, em função do excesso de ar empregado na fornalha e do fator de carga da biomassa armazenada no silo de combustível.

2. Metodologia

Na fornalha de LFC construída em escala de laboratório, ilustrada na Fig. 1, a combustão da biomassa deverá ocorrer quando o combustível, com até 5% de proporção mássica, for misturado com um leito de partículas composto por material inerte (areia). O combustível no leito será oxidado pelo ar alimentado em altas velocidades enquanto é transportado em sentido ascendente, liberando calor na presença de um regime de contato gás-partícula conhecido como fluidização rápida.

Figura 1 – Esquema da fornalha de leito fluidizado circulante de laboratório



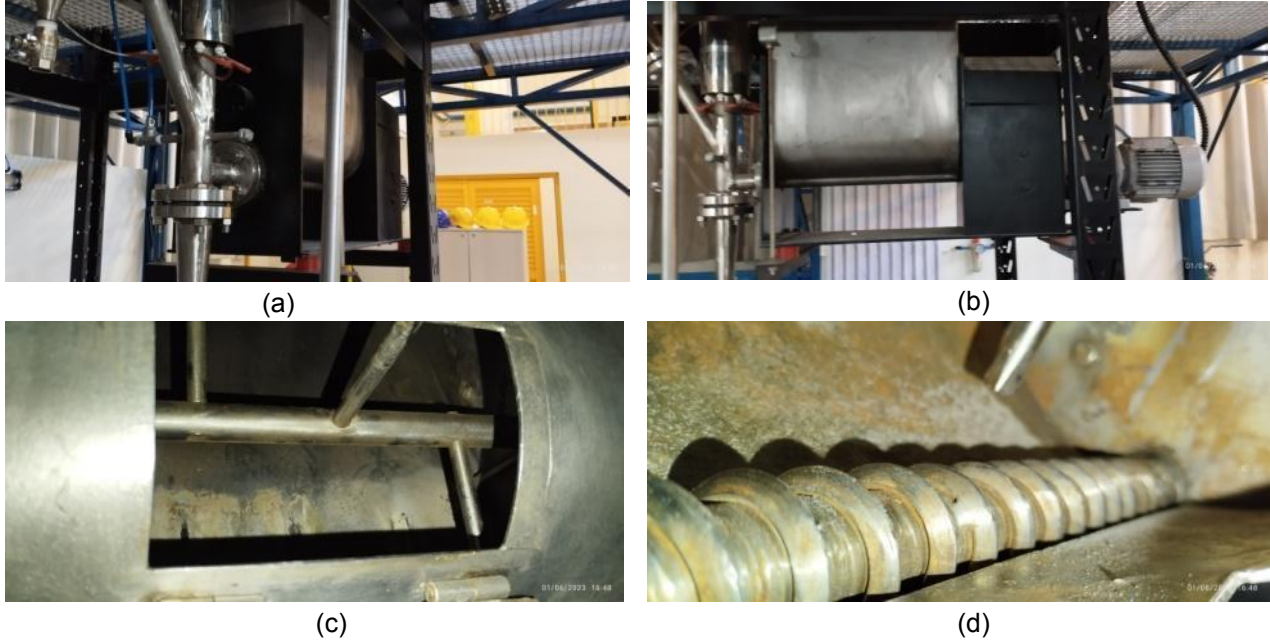
Fonte: Hilgemberg (2020)

No caso da fornalha em estudo, a velocidade apropriada do gás para levar o leito ao regime de fluidização rápida variará entre as velocidades de transporte de 2,7 m/s no momento da partida a temperatura ambiente, e 5,2 m/s na condição de combustão plena mantida a uma temperatura de aproximadamente 800°C (Hilgemberg, 2021).

Ao ocorrer a combustão no riser, uma porção das partículas do leito é direcionada ao ciclone, que separa o material sólido do gasoso. Os gases são liberados para a atmosfera, enquanto cinzas, material inerte do leito e combustível parcialmente queimado saem pela base do ciclone e se acumulam na coluna standpipe, localizada acima da válvula de recirculação dos sólidos, neste caso, uma válvula do tipo loop-seal. Nessa válvula, dosa-se a quantidade de particulado que irá recircular continuamente pelo sistema, sendo isso possível mediante injeção de ar comprimido fornecido na base da válvula loop-seal.

O sistema de alimentação de combustível, apresentado na Fig. 2, possui quatro componentes principais: o silo de biomassa, as pás giratórias internas, a rosca sem-fim e o motorreductor.

Figura 2 – (a) frente do silo; (b) lateral do silo; (c) pás internas; (d) rosca sem-fim do alimentador



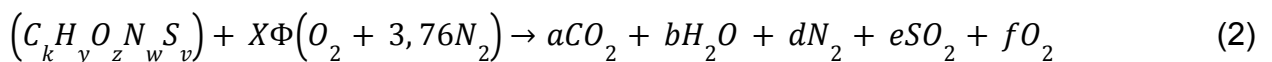
Fonte: Autoria própria (2024)

O silo que armazena a biomassa alimentada na fornalha de LFC é ilustrado nas Fig. 2-a e 2-b. Ele é construído em aço inoxidável AISI 304 e tem capacidade de armazenamento de aproximadamente 72 L. As pás giratórias internas, ilustradas na Fig. 2-c, estão posicionadas logo acima da rosca sem-fim para impedir a formação de arco na base do silo, assegurando que a rosca sem-fim seja sempre abastecida com biomassa. Esse dispositivo contém quatro pás com 0,09 m de comprimento cada uma, uniformemente distribuídas ao longo do comprimento do eixo. A rosca sem-fim que alimenta a fornalha de LFC, apresentada na Figura 2-d, é acionada por um motorreductor com potência de 1,0 cv, que tem velocidade de giro regulada por inversor de frequência. O perfil da rosca do alimentador possui diâmetro externo de 0,025 m e passo de 0,014 m, fixada em um eixo de 0,019 m e comprimento total de 0,55 m.

Para determinar a curva de alimentação do combustível com o mecanismo de rosca sem-fim acoplado à fornalha de LFC, inicialmente se faz necessário calcular as vazões mássicas requeridas das biomassas escolhidas, com as quais consegue-se atender o excesso de ar da combustão. Essa demanda de biomassa pode ser conhecida a partir da respectiva razão mássica ar/combustível ($R_{m,ac}$), definida pela Eq. (1):

$$R_{m,ac} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \quad (1)$$

O valor de $R_{m,ac}$ é calculado com os dados da análise elementar da biomassa, que neste caso, é representada como um combustível de composição química equivalente $C_k H_y O_z N_w S_v$ na reação de combustão genérica mostrada na Eq.(2):



Onde Φ é o coeficiente de excesso de ar. Os demais coeficientes estequiométricos da Eq. (2), na base de 100 kg de combustível, são determinados ao resolver o sistema de equações formado pelas Eq. (3) a (7), referentes ao balanço molar por elemento químico participante:

$$C: k = a \quad (3)$$

$$H: y = 2b \quad (4)$$

$$O: z + 2X\Phi = 2a + b + 2e + 2f \quad (5)$$

$$N: w + 7,52X\Phi = 2d \quad (6)$$

$$S: v = e \quad (7)$$

Dessa forma, o valor de $R_{m,ac}$ é dado por (Bizzo, 2003):

$$R_{m,ac} = 1,38X\Phi \quad (8)$$

Para este estudo, as biomassas escolhidas foram a serragem de madeira, a casca de arroz e o bagaço da cana-de-açúcar, cuja composição elementar é apresentada na Tab. 1. Os coeficientes de excesso de ar utilizados foram 1,2, 1,3 e 1,4, correspondentes a combustão com excessos de ar de 20%, 30% e 40%, respectivamente.

Tabela 1 – Análise elementar das biomassas estudadas

Biomassa	Elementos (% massa em base seca)					Cinzas
	C	H	O	N	S	
Serragem	48,9	5,8	43,3	0,3	0,1	1,6
Casca de arroz	41,0	4,3	35,9	0,5	-	18,3
Bagaço de cana-de-açúcar	44,8	5,4	39,5	0,4	-	9,8

Fonte: Sánchez (2010)

Em relação à vazão mássica do ar de combustão ($\dot{m}_a$), o seu valor foi calculado a partir da Eq. (9):

$$\dot{m}_a = \rho_a \cdot A \cdot V \quad (9)$$

Na qual, ρ_a é a densidade do ar; A é a área da seção transversal interna da coluna riser da fornalha de LFC, e V é a velocidade superficial do ar no riser. No caso de uma fornalha de LFC, torna-se necessário atingir o regime de fluidização rápida, em que o valor de V deve ser igual ou superior à velocidade de transporte das partículas inertes do leito. Com base nos dados apresentados por Hilgemberg (2021) para a velocidade de transporte das mesmas partículas usadas neste estudo, a faixa de velocidade do escoamento de ar pelo riser foi escolhida entre 2,7 m/s e 5,2 m/s na temperatura média de leito de 800°C.

Para o cálculo da densidade do ar, considerado aqui como gás ideal, utilizou-se a Eq. (10):

$$\rho_a = \frac{p}{RT} \quad (10)$$

Onde p é a pressão absoluta; R é a constante específica do gás, e T é a temperatura absoluta, resultando numa densidade de gás de $0,36 \text{ kg/m}^3$. Finalmente, o riser da fornalha de LFC possui um diâmetro interno de 41 mm , disponibilizando uma área de seção transversal (A) de $0,0013 \text{ m}^2$.

A capacidade do alimentador, que pela sua vez deve satisfazer a demanda de combustível da fornalha de LFC, foi determinada utilizando a Eq. (11), referente a um dosador do tipo rosca sem-fim (SCREW CONVEYOR DESIGN, s.d.):

$$\dot{m}_c = 60 \frac{\pi}{4} D^2 S N \alpha \rho C \quad (11)$$

Na qual, D é o diâmetro da rosca ($0,0254 \text{ m}$); S é o passo da rosca ($0,01397 \text{ m}$); N é a velocidade de giro da rosca (rpm - variável); α é o fator de carga; ρ é a densidade do material solto (kg/m^3), e C é o fator de correção de inclinação.

Uma vez que a rosca de alimentação acoplada na fornalha de LFC existente está posicionada horizontalmente, o fator de correção C é 1. O fator de carga α é determinado pelo ângulo de repouso dos sólidos no interior do silo, o qual, nos casos estudados, caracteriza um fluxo livre. No entanto, esse fluxo é influenciado por fatores como a compactação das partículas de acordo com o nível do combustível no silo, a abrasividade e a leveza da biomassa no processo de transporte. Esses fatores, contudo, não são considerados pela bibliografia na definição do valor de α . Levando em conta o efeito combinado desses parâmetros, adotou-se um valor de α variando entre 0,35 e 0,4. Cabe ressaltar que, quanto maior for o valor de α , mais facilmente ocorre o transporte do material solto no interior do silo (SCREW CONVEYOR DESIGN, s.d.).

A densidade do material solto (ρ) correspondente às biomassas foram: 200 kg/m^3 para a serragem (medida em laboratório); $115,9 \text{ kg/m}^3$ para a casca de arroz (Mühlen et al., 2021); e 100 kg/m^3 para o bagaço da cana-de-açúcar (Silva e Moraes, 2008).

3. Resultados e discussões

A Tab. 2 mostra os valores calculados para a razão mássica ar/combustível em função do excesso de ar utilizado na combustão.

Tabela 2: Razões mássicas ar/combustível em função do excesso de ar

Excesso de ar	Razão mássica ar/combustível		
	Serragem	Casca de arroz	Bagaço de cana-de-açúcar
20%	6,92	5,59	6,36
30%	7,48	6,06	6,90
40%	8,06	6,52	7,43

Fonte: Autoria própria (2024)

De acordo com os resultados obtidos, um aumento no excesso de ar de 20% para 40%, faixa esta normalmente aplicada em fornalhas de LFC (Basu, 2006), representa uma diminuição aproximada de apenas 16% na demanda de fornecimento do combustível para o sistema de alimentação das biomassas analisadas. Isto sugere que o mecanismo da dosagem de combustível não precisará trabalhar entre extremos muito afastados, diminuindo assim o tempo de resposta do sistema para se adaptar às mudanças na carga térmica da fornalha. No entanto, isto também poderia dificultar o controle da temperatura para mantê-la constante em certo patamar, uma vez que a temperatura do leito costuma variar consideravelmente com pequenas mudanças no excesso de ar aplicado (Ramirez-Behainne, 2007).

Nas Tab. 3 e 4 são apresentados, em função do excesso de ar, os resultados simulados da capacidade de alimentação mínima e máxima da rosca sem-fim instalada na fornalha de LFC. Estas tabelas correspondem aos fatores de carga de 0,35 e 0,40, respectivamente. O aumento de aproximadamente 14% no fator de carga trouxe, como esperado, uma diminuição na velocidade de rotação da rosca sem-fim na mesma porcentagem, com a qual é satisfeita a demanda na alimentação de combustível.

Tabela 3: Alimentação de biomassa com fator de carga de 0,35

Condição extrema com excesso de ar	Capacidade de alimentação da Serragem (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)	Capacidade de alimentação da Casca de Arroz (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)	Capacidade de alimentação do Bagaço de Cana-de-açúcar (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)
20% (min)	0,67	22,54	0,83	48,17	0,73	49,11
20% (max)	1,29	43,39	1,59	92,29	1,40	94,18
30% (min)	0,61	20,52	0,76	44,11	0,67	45,07
30% (max)	1,19	40,03	1,47	85,32	1,29	86,78
40% (min)	0,57	19,17	0,71	41,21	0,62	41,71
40% (max)	1,10	37,00	1,30	75,45	1,20	80,73

Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar a condição de combustão que leva à maior demanda de combustível, correspondente ao uso do excesso de ar de 20%, verifica-se que, para todas as biomassas estudadas, o valor da potência térmica específica da fornalha de LFC supera o valor limite reportado na literatura, sendo este valor perto de 4,5 MW de energia térmica liberada pela combustão por metro quadrado de seção transversal do riser em fornalhas de LFC comerciais (Basu, 2006). Ao considerar os respectivos valores médios de poder calorífico reportados na literatura para cada biomassa, percebe-se que a potência específica da fornalha de LFC atinge o valor máximo de 5,5 MW/m². Isto sugere que, para o adequado funcionamento em escala de laboratório, a fornalha de LFC precisaria operar com excessos de ar acima de 30%.

Tabela 4: Alimentação de biomassa com fator de carga de 0,4

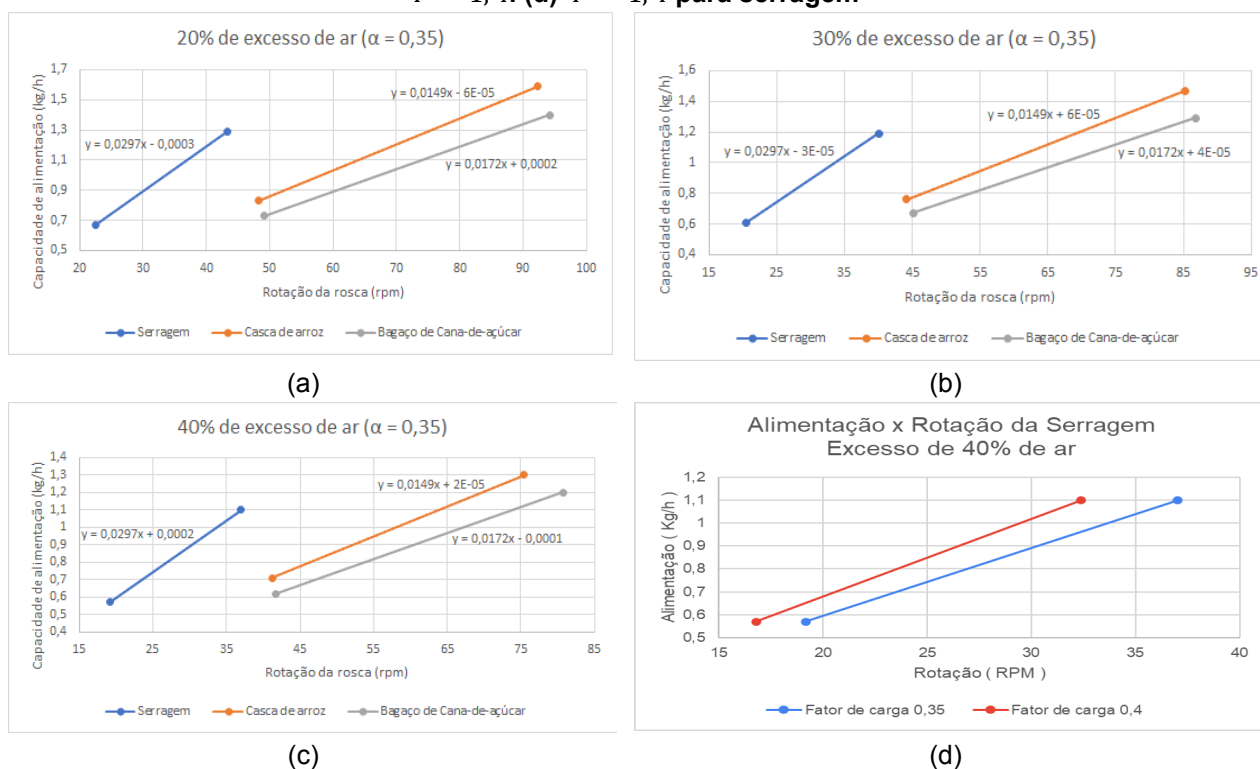
Condição extrema com excesso de ar	Capacidade de alimentação da Serragem (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)	Capacidade de alimentação da Casca de Arroz (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)	Capacidade de alimentação do Bagaço de Cana-de-açúcar (kg/h)	Rotação da Rosca (rpm)
20% (min)	0,67	19,72	0,83	42,15	0,73	42,97

20% (max)	1,29	37,97	1,59	80,75	1,40	82,41
30% (min)	0,61	17,95	0,76	38,60	0,67	39,44
30% (max)	1,19	35,02	1,47	74,66	1,29	75,93
40% (min)	0,57	16,78	0,71	36,06	0,62	36,49
40% (max)	1,10	32,37	1,30	66,02	1,20	70,63

Fonte: Autoria própria (2024)

A Fig. 3 ilustra o comportamento das curvas de alimentação de biomassa determinadas a partir do modelo adotado. Nessa, as Fig. 3a, 3b e 3c mostram as curvas em função da rotação da rosca sem-fim, para os excessos de ar de 20%, 30% e 40%, respectivamente. Já, na Fig. 3d é apresentada a comparação das curvas para apenas a serragem de madeira, a fim de verificar o efeito produzido pela mudança no fator de carga utilizado com excesso de ar de 40%.

Figura 3. Curvas de alimentação de biomassa. (a) $\alpha=0,35$; $\Phi = 1, 2$. (b) $\alpha=0,35$; $\Phi = 1, 3$. (c) $\alpha=0,35$; $\Phi = 1, 4$. (d) $\Phi = 1, 4$ para serragem



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados das Fig. 3a a 3c indicam que a serragem de madeira consegue ser atendida dentro de uma faixa mais estreita para a velocidade de rotação da rosca sem-fim. Observa-se também que, para operar a fornalha de LFC com as três biomassas analisadas, a rosca sem-fim do sistema de alimentação deverá ter a sua velocidade de rotação regulada entre um valor mínimo próximo de 15 rpm e um valor máximo perto de 100 rpm. De acordo com dados da literatura, verifica-se que essa faixa de operação da rosca sem-fim é totalmente factível para implementação no atual sistema experimental disponível em laboratório. Conforme apresentado por Ribeiro (2017), um dispositivo de alimentação com características similares consegue alimentar até 2,7 kg/h de biomassa na rotação de 150 rpm.

5. Conclusões

Mediante a implementação de um modelo matemático que considerou o efeito do excesso de ar utilizado na combustão e o requerimento mínimo da velocidade do ar para o regime de fluidização rápida, foram obtidas curvas de comportamento linear para o fornecimento de três biomassas lignocelulósicas por rosca sem-fim acoplada a uma fornalha de leito fluidizado circulante de pequena escala, com capacidade térmica de aproximadamente 7kW.

Ao comparar o uso da serragem de madeira, da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar como combustíveis a serem alimentados, as simulações realizadas indicaram que a primeira requer a utilização de menores velocidades de rotação e operação dentro de uma faixa mais estreita, o que se reflete em uma maior inclinação da curva de alimentação. Esse resultado é consequência do maior poder calorífico médio da serragem, em comparação com as demais biomassas consideradas neste estudo. Dessa forma, a utilização da serragem de madeira também contribui para a otimização do espaço no silo de armazenamento, devido à sua maior densidade energética.

Além disso, a menor faixa de velocidade de rotação exigida no uso da serragem possibilita um melhor tempo de resposta da fornalha, adaptando-se mais eficientemente às necessidades do processo de combustão. Há ainda a vantagem operacional de menor formação de cinzas — aproximadamente 11 e 6 vezes menos do que as geradas pela casca de arroz e pelo bagaço de cana-de-açúcar, respectivamente.

Finalmente, conclui-se que as faixas de rotação da rosca sem-fim encontradas, entre aproximadamente 15 rpm e 100 rpm, podem ser plenamente atendidas pelo sistema experimental instalado, porém, com a restrição no uso de excessos de ar mínimos perto de 30%, a fim de cumprir com o limite da potência específica máxima da fornalha recomendada na literatura.

Para trabalhos futuros, recomenda-se comparar o modo de alimentação por rosca sem-fim com outros sistemas de alimentação, com o objetivo de validar se esta é, de fato, a melhor opção para a fornalha em estudo. Outra proposta seria a realização prática da alimentação, visando validar o fator de carga. Ressalta-se que os valores encontrados na literatura não consideram variáveis como a umidade do combustível e a compactação do material no silo, sendo possível, portanto, desenvolver um fator de correção a ser incorporado à equação atual.

Referências

BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. 2ª edição Editora da UFSC, Florianópolis, 1995.

BIZZO, Walmir. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2003.

GUALBERTO, Victor Soares. **Projeto preliminar de transportador helicoidal aplicado à indústria salineira de Mossoró e região**. 2019.

EMBRAPA. **Palestra faz um panorama da utilização da biomassa de madeira para energia no Oeste do Paraná**. 8 nov. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/66038649/palestra-faz-um-panoram-a-da-utilizacao-da-biomassa-de-madeira-para-energia-no-oeste-do-parana>. Acesso em: 5 abr 2024.

HILGEMBERG, Flavio Augusto. **Especificação de Condições de Partida de uma Fornalha Piloto em Leito Fluidizado Circulante**. 2021. 12 f. Dissertação (Iniciação Científica em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

LIMA, Amanda Moreira et al. **A casca de arroz como fonte de energia em empresas beneficiadoras do grão**. *Exacta*, v. 17, n. 4, p. 375-382, 2019.

MARTINS, Camila Almeida. **Simulação do perfil axial de pressão na coluna riser de um leito fluidizado circulante**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

MELO, F. A. O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos**. 2003. Tese (Pós-graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2003.

MME, Brasil. **Biomassa: resíduos que são transformados em energia**. 23 out. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>. Acesso em: 23 nov. 2024.

MÜHLEN, Camila Von et al. **Características físicas e absorptivas da casca de arroz e da maravalha usadas como cama avícola**. XXX Congresso de Iniciação Científica, Pelotas, 2021.

PETRULHO, ALEX SANDRO; FELIPPE, ANDRÉ LUIZ; DE ALMEIDA, ROGERIO. **Análise de falha: rosca-de-descarga**. Faculdade de Americana, Curso de Engenharia Mecânica, 2020.

RAÍZEN. **Energia a partir da biomassa: entenda o que é e para que serve!** Blog Raízen, 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/energia-biomassa>. Acesso em: 23 nov. 2024.

RAMIREZ-BEHAINNE, J. J. **Estudo das emissões de mercúrio na combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

RIBEIRO, Kaique Castro Jeová Batista. **Projeto conceitual de um alimentador de rosca sem fim para suprimento de biomassa a uma caldeira de leito fluidizado**. 2017. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SÁNCHEZ, Caio Glauco. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. 1. ed. São Paulo: Átomo, 2010. 432 p. ISBN 9788576701262.

SCREW CONVEYOR DESIGN. PowderProcess.net. Engineering resources for powder processing industries. França. Disponível em: https://powderprocess.net/Equipments%20html/Screw_Conveyor_Design.html. Acesso em: 15 fev. 2025.

SILVA, A. T. O. S. **Análise Termodinâmica de uma Central de Biomassa Lenhosa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia / Universidade Nova de Lisboa, março de 2013.

SILVA, Marcelo Bacci da; MORAIS, Anderson dos Santos. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro.