

INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES ROTACIONAIS DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO NA COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM UM FORNO TUBULAR DE QUEDA LIVRE (DTF) E CORRELAÇÃO COM AS EMISSÕES GASOSAS

Glauber Cruz, glaubercruz@gmail.com¹

Arthur Vinicius Sousa Silva, arthsilva6@gmail.com¹

Paula Cristina Garcia Manoel Crnkovic, paulam@sc.usp.br²

¹Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Mecânica, São Luís (MA), Brasil,

²Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos (SP), Brasil

Resumo: Para melhor entender a real influência que a velocidade de rotação do sistema de alimentação de um forno tubular de queda livre (Drop Tube Furnace - DTF) exerce no desempenho dos processos térmicos e correlacionar as emissões gasosas geradas, foram realizados testes com variações dessas velocidades rotacionais para amostras de sementes de tucumã e bagaço de cana-de-açúcar. O sistema de alimentação consiste em um parafuso-rosca com furos ao longo de sua superfície para injeção de gás de arraste e transporte das biomassas, com uma velocidade de rotação máxima de 15 rpm. As velocidades rotacionais variaram de 30, 35, 40, 45 e 50% para as amostras de sementes de tucumã e 40, 45, 50, 60 e 70% para bagaço de cana-de-açúcar. Constatou-se que o fluxo de massa aumentou linearmente com o aumento da velocidade rotacional do sistema de alimentação e, conseqüentemente, as emissões gasosas.

Palavras-chave: biomassas, emissões gasosas, DTF

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados pelos diversos seguimentos industriais, e em alguns casos domésticos, são classificados em 3 categorias. Na primeira são contemplados os resíduos florestais, tais como lascas de madeiras, serragem, cascas, desbastes, caules, galhos, etc. Na segunda categoria, os resíduos agrícolas como bagaços, as diversas palhas e cascas de cereais; e por último, as chamadas biomassas urbanas, originárias dos resíduos sólidos municipais, institucionais, comerciais e industriais, resíduos de renovação, construção e demolição, por exemplo, as madeiras tratadas, trilhos de trem e o concreto de postes de energia (SAIDUR *et al.*, 2011; MCKENDRY, 2002).

Atualmente há um crescente interesse mundial pela substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, por exemplo, as biomassas, as quais são conhecidas como potenciais fontes geradoras de energia de forma sustentável (MCKENDRY, 2002). As biomassas podem ser convertidas diretamente em calor, eletricidade ou transformadas em combustíveis líquidos ou gasosos, com grandes chances de serem utilizadas como tecnologias para a produção de energia elétrica, células combustíveis e geração de vapor para as turbinas a gás. Considerando-se a diversidade das biomassas, tanto em relação à composição química quanto à reatividade, estudos mais abrangentes são importantes para que estes materiais possam ser aplicados de maneira eficiente.

As emissões gasosas dos principais poluentes atmosféricos geradas pelas biomassas durante os processos de termoconversão podem ser classificados em dois grupos. O primeiro grupo consiste dos poluentes atmosféricos (CO , CO_2 , NO_x e SO_2), que são principalmente influenciados pelas propriedades do biocombustível (WERTHER *et al.*, 2000). Do outro grupo, fazem parte os poluentes não queimados (CO , HC , alcatrões, HAP 's, C_nH_m e partículas de *char*), os quais são principalmente influenciados pelo equipamento de combustão e/ou condições de processo.

Esses poluentes atmosféricos gerados são usualmente devido a uma combustão convencional pobre, a qual pode ser atribuída à baixa temperatura da câmara de combustão, mistura ar-combustível insuficiente e/ou curto tempo de residência dos gases combustíveis na zona térmica de combustão. Os resíduos agrícolas podem apresentar essas características, pois dependem do projeto do forno e das condições de operação do sistema de queima (CRUZ, 2015).

Uma das maiores exigências para que a alimentação de combustíveis sólidos seja realizada de forma eficiente em um processo térmico é que haja um fluxo de massa totalmente homogêneo, contínuo, sem interrupções ou grandes

flutuações no interior do sistema de conversão ou câmara de combustão (JOPPICH e SALMAN, 1999; GABRA *et al.*, 1998).

Dentro do contexto mencionado, o objetivo desse trabalho foi analisar a influência que a velocidade de rotação do sistema de alimentação de um forno tubular de queda livre (DTF) exerceu no desempenho dos processos térmicos (combustão direta) e a correlação com as emissões gasosas geradas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 mostra as biomassas utilizadas neste estudo, ou seja, semente de tucumã e bagaço de cana-de-açúcar em suas formas *in natura*, as quais apresentaram diferenças bem distintas entre si, tais como coloração, tamanhos e formatos de partículas. As amostras do bagaço de cana são provenientes da região Sudeste do País (Estado de São Paulo) e foram concedidas pelo grupo Raizen da colheita 2011/2012, enquanto que a semente de tucumã foi extraída da região Norte (parte da Floresta Amazônica, mais precisamente do Estado do Pará) e fornecidas pelo grupo de pesquisa em Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (ProTEA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os espécimes passaram por processos de lavagem para retirada de impurezas, secagem em estufa para retirada da umidade excedente, moagem em moinho de facas para diminuição de granulometria e peneiramento para separação em tamanhos médios de partícula, aproximadamente, 460 µm.

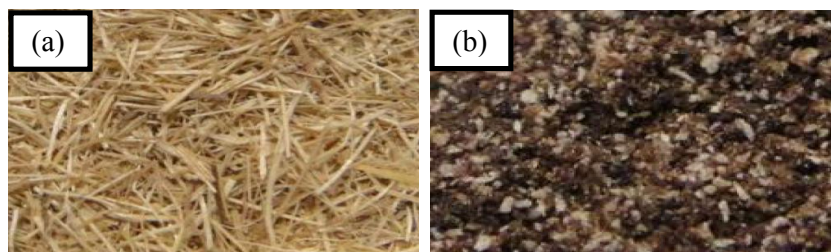


Figura 1: Biomassas estudadas: (a) bagaço de cana-de-açúcar e (b) semente de tucumã.

A Tabela 1 mostra a análise composicional (C, H, N, O, e S), além do teor de umidade, cinzas e fórmula química das biomassas estudadas.

Tabela 1: Percentual da composição química das biomassas, teores de umidade e cinzas.

Biomassas	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O* (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)	Fórmula química
Bagaço de cana	45,05	5,57	0,25	n. d.	37,93	6,4	4,8	$C_{3,754}H_{5,57}N_{0,018}O_{2,371}$
Semente de tucumã	48,83	6,71	0,88	n. d.	32,98	5,3	5,3	$C_{4,069}H_{6,71}N_{0,063}O_{2,061}$

n.d. - abaixo do limite de detecção do equipamento

A Figura 2 mostra o forno tubular de queda livre (DTF), utilizado para a combustão convencional (80% N₂-20% O₂) das biomassas deste trabalho e o estudo das emissões gasosas produzidas pelas amostras de biomassas durante o processo de conversão térmica, ou seja, combustão convencional.

Para o sistema de alimentação do forno DTF, foi desenvolvido um transportador por parafuso com rosca, o qual pode ser visto na Figura 3, com furos proporcionais e equidistantes ao longo de toda a superfície e com um pequeno sistema de injeção de ar em uma das laterais, para auxiliar a perfeita retirada das amostras da superfície do parafuso com rosca. Tal sistema permitiu uma alimentação contínua para os dois materiais lignocelulósicos.



Figura 2: Forno tubular de queda livre (DTF) utilizado para a combustão das biomassas.



Figura 3: Parafuso-rosca com furos ao longo de toda a superfície – parte do sistema de alimentação e controle da velocidade rotacional.

A velocidade de rotação máxima para esse sistema foi de 15 rpm. Foram realizados testes com variações da rotação máxima para as velocidades rotacionais de 30, 35, 40, 45 e 50% para as amostras de semente de tucumã e de 40, 45, 50, 50 e 70% para o bagaço de cana-de-açúcar.

Um analisador de gases (SICK GMS 810), mostrado na Figura 4, foi utilizado para detectar e capturar as concentrações emitidas pelos principais poluentes atmosféricos durante os processos de combustão de biomassas no DTF, como SO_2 , CO , NO , CO_2 e O_2 . Foi usado um programa computacional *SOPAS Engineering Tool*, acoplado ao analisador por meio de uma estação de trabalho, para comunicação, captura de dados das emissões e calibração do equipamento.



Figura 4: Analisador de gases utilizado para monitorar os principais poluentes atmosféricos.

Foi desenvolvido também um programa de aquisição de dados em *Labview*, na versão 8.6, a fim de ajustar os parâmetros do sistema de alimentação por parafuso-rosca (velocidade rotacional) e monitoramento das emissões. Por meio desse software foi possível salvar os dados obtidos em intervalos de tempo de 0,3 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra as médias dos principais poluentes atmosféricos (SO_2 , CO , CO_2 e NO) gerados pela combustão convencional (80% N_2 – 20% O_2) das sementes de tucumã no DTF. A concentração de O_2 para ambas as amostras foi

um parâmetro utilizado para quantificar e qualificar a eficiência do processo de combustão, ou seja, quanto maior o consumo de O_2 dentro da câmara de combustão, melhor o desempenho desse processo.

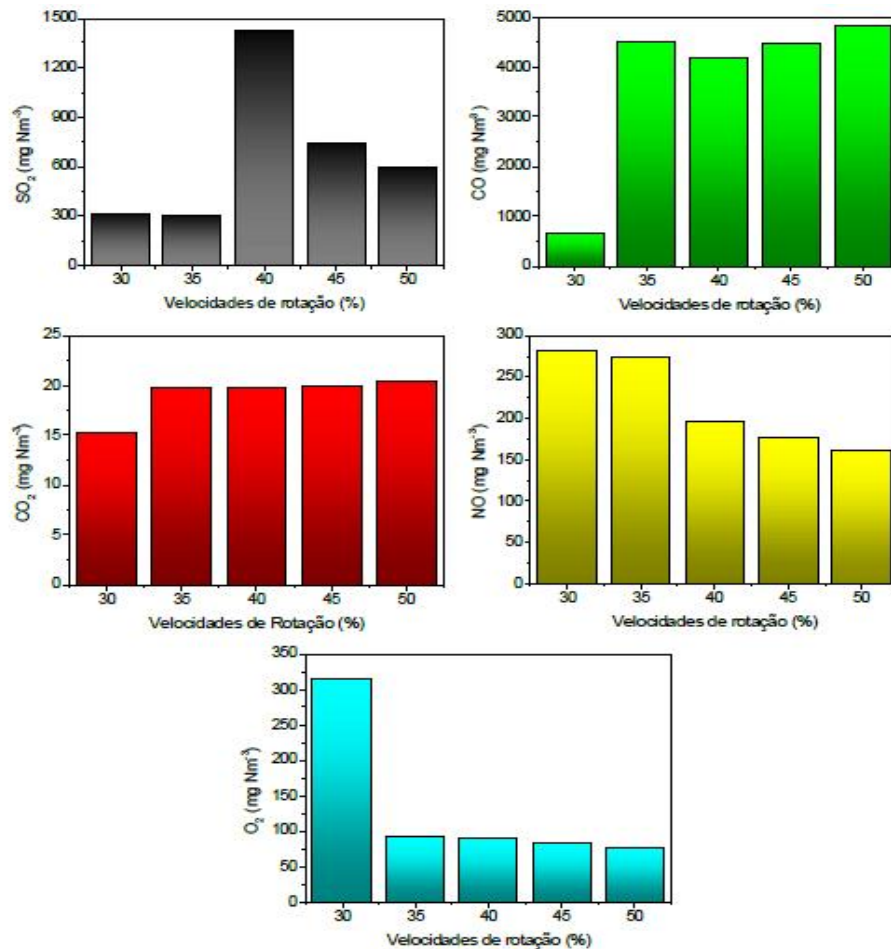


Figura 5: Médias dos principais poluentes atmosféricos gerados na combustão convencional de semente de tucumã em um DTF com 5 velocidades de rotação.

A formação do SO_2 em sistemas térmicos é um indicativo de uma combustão completa (SARTOR *et al.*, 2014; WILLIAMS *et al.*, 2012). O valor máximo desse poluente foi apresentado para a velocidade de 40%, apresentando um decaimento linear para 45 e 50%. Apesar dos valores elevados de SO_2 , o processo de combustão pode ser considerado ineficiente devido à elevada produção de CO, que ocorre devido a uma mistura inadequada da atmosfera de ar com o combustível dentro do DTF.

O comportamento da combustão pode ser observado pela variação conjunta das concentrações de CO_2 e O_2 . Notou-se que o aumento das emissões de CO_2 está intrinsecamente relacionado com a diminuição de O_2 . Este comportamento ocorreu para as rotações acima de 35%. Para as emissões de NO com velocidades de rotação de 30 e 35% foi observado uma diminuição gradual. À medida que as velocidades aumentaram de 40 a 50%, as concentrações de NO diminuíram de forma linear (CRUZ, 2015).

As concentrações de O_2 apresentaram um decaimento exponencial à medida que as velocidades de rotação aumentaram de 30 para 50%. Tal efeito pode ter sido provocado pelo aumento na turbulência na câmara de combustão, favorecendo o processo devido uma maior interação e difusão entre as partículas do combustível e a atmosfera de ar (ALVAREZ *et al.*, 2014; KUO, 1986).

A Figura 6 mostra as médias de SO_2 , CO, CO_2 e NO gerados durante a combustão convencional (80% N_2 - 20% O_2) do bagaço de cana-de-açúcar no DTF.

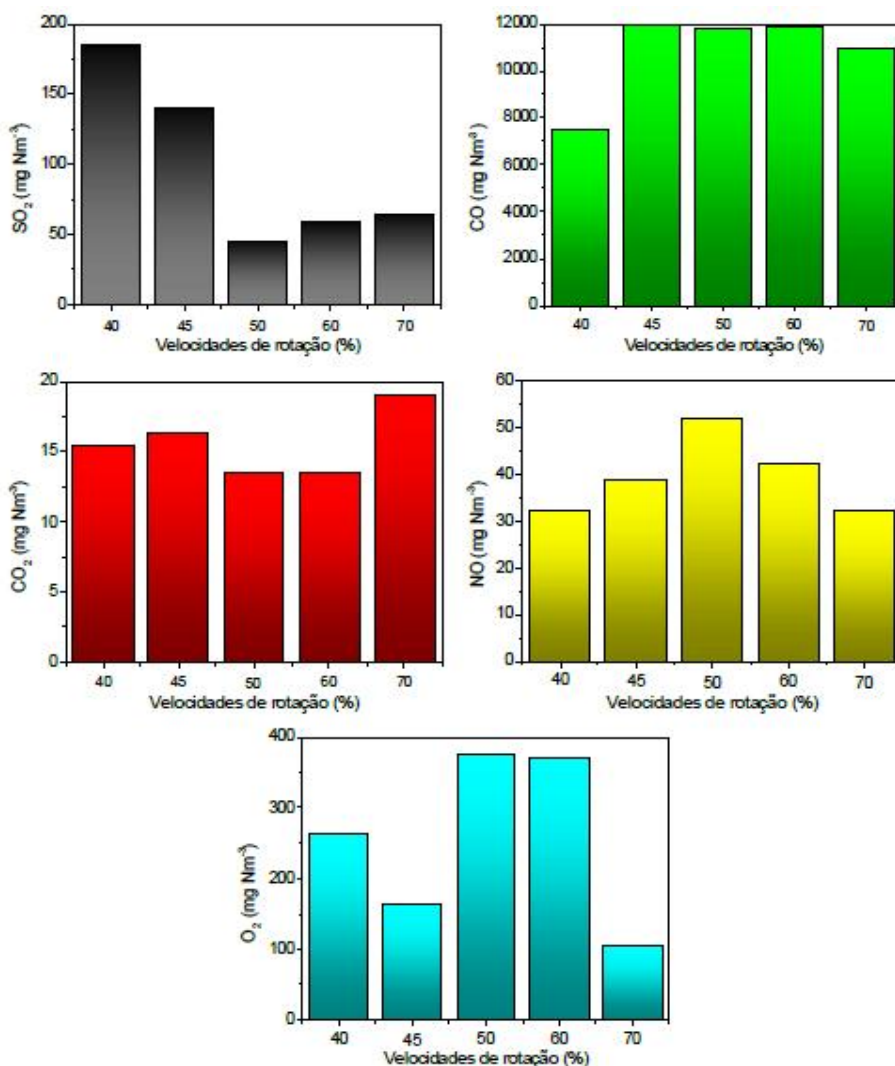


Figura 6: Médias dos principais poluentes atmosféricos gerados na combustão convencional do bagaço de cana-de-açúcar em um DTF com 5 velocidades de rotação.

Para as velocidades de rotação de 40 a 50% para as amostras de bagaço de cana-de-açúcar, observou-se uma diminuição na emissão de SO₂, as quais sofreram um aumento para as velocidades rotacionais de 50 a 70%. Para o CO, os menores valores foram observados para a velocidade de 40%, confirmando a mistura adequada ar-combustível (NUSSBAUMER, 2003). Entretanto, verificou-se um aumento neste poluente para as velocidades de alimentação a partir de 45%, o que pode ser efeito de uma queima pobre dessa biomassa.

As emissões de CO₂ para o bagaço de cana apresentaram o mesmo comportamento observado para as amostras de semente de tucumã. O conteúdo de nitrogênio no bagaço de cana-de-açúcar é, aproximadamente, 67% inferior em relação ao outro material lignocelulósico. As emissões de NO exibiram um crescimento gradual entre as velocidades de 40 e 50%. As concentrações de O₂ em todas as velocidades rotacionais possibilitaram observar o consumo rápido e quase que total do oxigênio no interior do DTF para ambas as biomassas.

4. CONCLUSÕES

Entre as duas amostras estudadas, isto é, semente de tucumã e bagaço de cana-de-açúcar, e considerando-se a melhor condição de rotação (50%), pode-se estimar que o bagaço de cana-de-açúcar apresentou-se mais reativo no processo de combustão (80% N₂ – 20% O₂) do que a semente de tucumã, pois esta biomassa proporcionou um consumo superior de O₂, ou seja, 79,5%. Apesar dos materiais possuírem composições químicas diferentes, os mesmos apresentaram semelhanças na análise imediata em suas formas *in natura*, ou seja, de materiais orgânicos em torno de 90%, com valores de umidade inferiores a 7% e cinzas de, aproximadamente, 5%. Por fim, entende-se perfeitamente que o fluxo de massa aumentou linearmente com o aumento da velocidade de rotação do sistema de alimentação com parafuso-rosca na combustão das biomassas e, consequentemente, as emissões gasosas geradas.

5. REFERÊNCIAS

- Álvarez, L. *et al.* Biomass co-firing under oxy-fuel conditions: a computational fluid dynamics modeling study and experimental validation. *Fuel Processing Technology*, v. 120, n. 1, p. 22-33, 2014.
- Cruz, G. Características físico-químicas de biomassas lignocelulósicas e a correlação entre duas emissões e os resíduos gerados sob diferentes condições atmosféricas em um forno de queda livre (DTF). Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- Gabra, M.; SALMAN, H.; JELLSTROM, B. K. Development of a sugar cane residue feeding system for a cyclone gasifier. *Biomass and Bioenergy*, v. 15, n. 2, p. 143-153, 1998.
- Joppich, A.; Salman, H. Wood powder feeding, difficulties and solutions. *Biomass and Bioenergy*, v. 16, n. 3, p. 191-198, 1999.
- Kuo, K. K. *Principles of Combustion*. New York: Wiley, 1986.
- Mckendry, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.
- Nussbaumer, T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy and Fuels*, v. 17, n. 6, p. 1510-1521, 2003.
- Saidur, R. *et al.* A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.
- Sartor, K. *et al.* Prediction of SO_x and NO_x emissions from a medium biomass boiler. *Biomass and Bioenergy*, v. 65, n. 1, p. 91-100, 2014.
- Werther, J. *et al.* Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 26, n. 1, p. 1-27, 2000.
- Williams, A. *et al.* Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 38, n. 2, p. 113-137, 2012.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

INFLUENCE OF THE ROTATIONAL VELOCITIES OF THE SUPPLY SYSTEM IN THE COMBUSTION OF BIOMASSES IN A DROP TUBE FURNACE AND CORRELATION WITH THE EMISSIONS

Glauber Cruz, glaubercruz@gmail.com¹

Arthur Vinicius Sousa Silva, arthrsilva6@gmail.com¹

Paula Cristina Garcia Manoel Crnkovic, paulam@sc.usp.br²

¹Federal University of Maranhão, Mechanical Engineering Department, São Luís (MA), Brazil

²University of São Paulo, Engineering School of São Paulo, Mechanical Engineering Department, São Carlos (SP), Brazil

Abstract. *In order better to understand the real influence that rotation velocity of the feeding system of a Drop Tube Furnace (DTF) exerts in the performance of the thermal processes and to correlate the gaseous emissions generated, experiments were performed with variations of these rotational velocities for tucumã seed and sugarcane bagasse samples. The feed system consists of a threaded-screw with holes along its surface for carrier gas and biomass transport, with a maximum rotation velocity of 15 rpm. The rotational velocities ranged from 30, 35, 40, 45 and 50% for tucumã seed samples and 40, 45, 50, 60 and 70% for sugarcane bagasse. It was found that the mass flow increased linearly with increase rotational velocity of the feed system and, consequently, gaseous emissions.*

Keywords: *biomasses, gaseous emissions, DTF*