ISSN: 2594-6153

Estimação da temperatura da chama na combustão de bagaço de cana-de-açúcar utilizando espectrometria na faixa da região de luz visível

Paulo Roberto Tazinazo Cândido, Carlos Teofilo Salinas Sedano

Universidade Santa Cecília (Unisanta), Santos-SP, Brasil

E-mail: prtcandido@hotmail.com

Resumo: A medição de temperatura em processos de combustão é um desafio na engenharia. Recentemente, a utilização de diferentes tipos de resíduos sólidos de biomassa para geração de energia tem alcançado importância no mundo. No Brasil, o resíduo de biomassa que é mais utilizado nas usinas é o bagaço de cana-de-açúcar. Neste trabalho foram realizados testes experimentais numa câmara de combustão para a estimação da temperatura da chama na combustão de bagaço de cana-de-açúcar. Foi utilizado um espectrômetro na faixa de luz visível. Foram obtidos espectros da chama durante a combustão de amostras de bagaço e a intensidade de radiação calculada. Para o cálculo da temperatura foi utilizado o método das duas cores. Medições mostram temperaturas na zona de reação da chama na faixa de 1500 K a 1600K.

Palavras-chave: Combustão; Cana-de-Açúcar; Espectrografia.

Flame temperature estimation in sugarcane biomass combustion using visible wavelength spectrography.

Abstract: Temperature measurement in combustion processes is a challenge in engineering applications. In recent years, the use of different types of biomass solid waste for power generation has reached worldwide importance. In Brazil, the solid biomass residue that is most used in the power plants is sugarcane bagasse. In this work experimental tests were performed in a combustion chamber to estimate the flame temperature in the combustion of sugarcane bagasse. A spectrometer in the visible light range was used. Flame spectra were obtained during the combustion of bagasse samples and the radiation intensities as a function of wavelength was calculated. The temperature was calculated using the two-color method. Measurements show temperatures in the flame reaction zone in the range of 1500 K to 1600K.

Keywords: Combustion; Sugarcane; Spectrography.

Introdução

Radiação térmica é a forma de radiação emitida pelos corpos por causa de sua temperatura. Esta energia é emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas [1]. Medindo a taxa de radiação térmica emitida por um corpo opaco de área A é possível determinar sua temperatura (T), pois estão relacionados conforme a lei de Stefan-Boltzmann. A radiação térmica é emitida pelo corpo opaco em vários comprimentos de onda e direções. Os espectrômetros são instrumentos capazes de medir, para diversos comprimentos de onda, o

ISSN: 2594-6153

fluxo de energia térmica emitida pelo corpo por unidade de área (irradiação espectral em $W.m^{-2}.nm^{-1}$).

Utilizando-se método de "Duas Cores" estima-se a temperatura do corpo a partir dos valores de irradiação espectral em dois comprimentos de onda. Pode-se estimar a temperatura para vários pares de comprimento de onda e desconsiderar valores muito divergentes por meio de métodos estatísticos. Neste estudo utilizou-se os comprimentos de onda da região visível ao olho humano (400nm a 700nm) e da região infravermelho próxima dessa (até 1.100nm), para qual o espectrômetro utilizado é sensível. Medir a temperatura é base para outros estudos espectrométricos sobre a liberação na combustão de elementos ou moléculas que podem, quando combinados a outros presentes no ambiente, produzirem substâncias corrosivas para as instalações industriais como fornos e caldeiras. Também é possível avaliar se a combustão é estequiométrica, ou se está rica ou pobre em oxigênio, informação importante para os responsáveis pela operação dos processos industriais. Biomassa, principalmente a proveniente do bagaço de cana-de-açúcar gerado pelas usinas de açúcar e álcool brasileiras, tem sido utilizada para geração de energia elétrica a partir de sua queima em caldeiras e os estudos sobre sua combustão são relevante para minimização dos efeitos nocivos às instalações e ao meio ambiente, bem como para subsidiar projetos de malhas de controle eficazes para os processos industriais.

Objetivo

Estimar, utilizando métodos espectrométricos, a temperatura da chama produzida na combustão de biomassa proveniente da cana-de-açúcar. Para atingir o objetivo, foram realizadas experiências em câmara de combustão experimental da Universidade Santa Cecília para coleta dos espectros da combustão de biomassa; realizadas estimação da temperatura utilizando o método de "Duas Cores" e realizado tratamento estatístico dos dados resultantes com a finalidade de eliminar valores inconsistentes provenientes de ruídos.

Material e Métodos

Os experimentos para coleta dos espectros de combustão do bagaço de cana-de-açúcar foram realizados na câmara de combustão experimental apresentado na figura 1. A câmara de combustão foi construída utilizando tubos de aço inox de 100mm de diâmetro com chama produzida por bico de Meker e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). O tubo inferior tem comprimento de 120mm e uma grelha na parte superior para retenção da biomassa. Furos longitudinais no tubo superior com diâmetro de 10mm e distância entre centros de 15mm permitem a inserção da lente do espectrômetro para coleta dos dados espectrais.

ISSN: 2594-6153

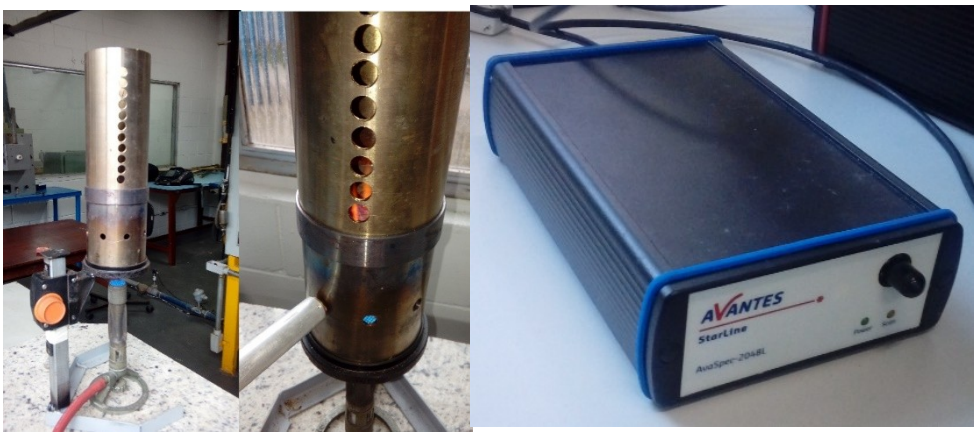

Figura 1. a) Câmara de Combustão Experimental, b) Espectrômetro.

Nos experimentos, a biomassa de cana-de-açúcar, previamente seca, foi inserida pelo topo da câmara de combustão pré-aquecida até o ponto em que a grelha apresentava a cor vermelho fraco. Em tratamento térmico, considera-se que o metal está a temperatura aproximada de 800K quando ele emite radiação térmica no comprimento de onda correspondente a esta cor. Após inserção da biomassa na câmara de combustão, a chama do bico de Meker era apagada para não influenciar nos resultados dos experimentos e não consumir o oxigênio do ar necessário para a combustão da biomassa. Passados aproximadamente 15s, período em que a umidade restante era vaporizada, a biomassa entrava em combustão e os espectros de radiação térmica foram coletados pelo espectrômetro e os sinais tratados num computador pelo software Avantes 8.0. O método de "Duas Cores" para estimação de temperatura tem esse nome devido a utilizar dois comprimentos de onda [2]. Os espectrômetros disponibilizam espectros de radiação térmica com valores de potência térmica irradiada para diversos comprimentos de onda, o que permite estimar a temperatura várias vezes usando pares de comprimento de onda. A temperatura é calculada da equação [2],

$$T_{i,j} = \frac{C_2\left({}^{1}/_{\lambda_j} - {}^{1}/_{\lambda_i}\right)}{\left(Ln\left({}^{I_i}/_{I_j}\right) + 5Ln\left({}^{\lambda_i}/_{\lambda_j}\right)\right)} \qquad (1)$$

onde, $T_{i,j}$ é a temperatura estimada para o par de comprimentos de onda i, j. C_2 é $hc\ /\ k$ (h é a constante de Plank; k é a constante de Boltzmann; c a velocidade da luz). $\lambda_i\ e\ \lambda_j$ são os comprimentos de onda. $I_i\ e\ I_j$ são as potências térmicas irradiadas nos comprimentos de onda $i, j\ em\ (W.m^{-2}.nm^{-1})$). As emissividades nos comprimentos de onda i, j foram desconsideradas na equação, pois, se $\lambda_i\ e\ \lambda_j$ estiverem suficientemente próximos, a suposição de que ${}^{\varepsilon_i}/_{\varepsilon_j} \cong 1$ permite simplificar a equação de Plank removendo os termos referentes as

emissividades [2]. Essa é uma prática comumente usada para remover esses termos.

Resultados

Neste trabalho usamos máxima diferença de 30nm entre comprimentos de onda para estimar a temperatura da chama. Nesta situação, assumimos que $^{\varepsilon_i}/_{\varepsilon_j} \cong 1$ e usamos Eq. (1) para os cálculos. Depois de realizar três experimentos capturando os espectros da chama, para cada um deles se fez cálculos de estimação da temperatura pelo método das "Duas Cores" utilizando distâncias $\Delta\lambda$ de 10, 15, 20, 25 e 30 nm entre pares de comprimentos de onda. As melhores estimativas foram utilizando 25 e 30nm. Na figura 2 se mostra o espectro da combustão nos três experimentos. Na figura 3 as temperaturas estimadas para os experimentos.

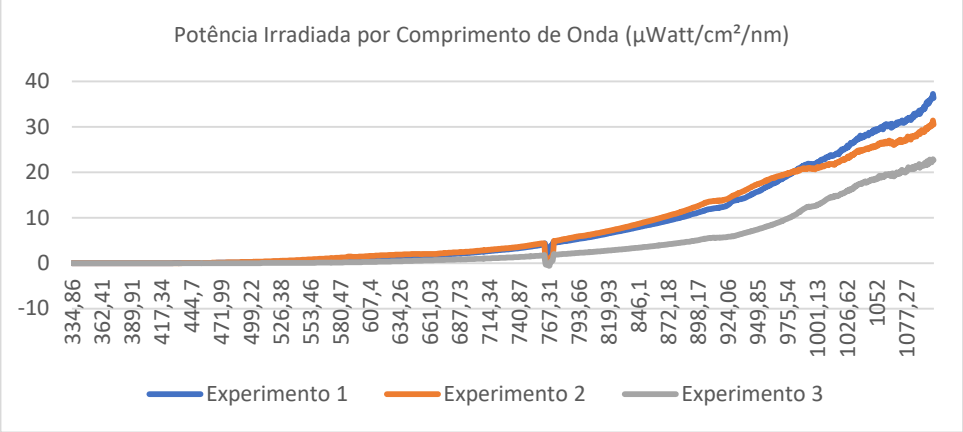

Figura 2 – Espectro nos três experimentos.

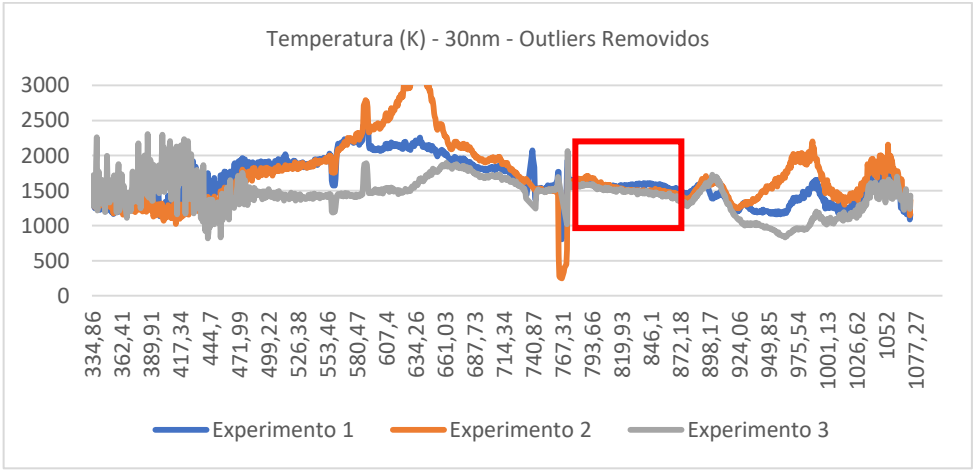

Figura 3 – Temperatura estimada utilizando $\Delta\lambda$ de 30nm.

Discussão

Os cálculos de estimação da temperatura foram realizados para várias distâncias entre

comprimentos de onda $\Delta\lambda$: 10, 15, 20, 25 e 30 nm. As estimativas de temperatura foram plotadas em gráficos para determinação das regiões com menores perturbações devido a ruídos. As estimativas de temperaturas muito divergentes em relação à média (*outliers*) foram removidas estatisticamente do resultado utilizando o "Critério de Chauvenet" [3].

Analisando os gráficos de temperatura estimada com distância de 30nm entre os pares de comprimentos de onda, os quais apresentam maior estabilidade, verificou-se que na faixa de comprimentos de onda entre 775nm e 860nm (indicada na figura 3 pelo retângulo vermelho) o comportamento é semelhante em todos os experimentos. A tabela 1 apresenta as médias e desvios padrão para essa faixa de comprimentos de onda.

Tabela 1 – Média e desvio padrão das temperaturas estimadas na faixa de 775nm a 860nm

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Temperatura Média em K (M)	1.581,6	1.557,7	1.509,6
Desvio Padrão em K (DP)	25,6	70,0	48,4
Desvio % (DP / M x 100)	1,6%	4,5%	3,2%

Conclusões

A média das temperaturas médias apresentadas na tabela 1 é de 1.549,6 K e, excetuando-se o experimento 1, ela está contida nas faixas de desvios de cada experimento, conforme tabela 2; o que denota adequada repetibilidade do espectrômetro e na execução dos procedimentos para coleta de dados. Mesmo para o experimento 1, a média ficou fora da faixa de desvio por apenas 6,3 K.

Tabela 2 – Faixas dos desvios padrão das temperaturas médias

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Temperatura Média em K + 1 DP	1.607,2	1.627,7	1.558,0
Temperatura Média em K - 1 DP	1.556,0	1.487,8	1.461,2

A comparação dos resultados obtidos neste trabalho com outros métodos de estimação de temperatura é importante para validação. Os dados obtidos por meio do espectrômetro podem ser utilizados para outros fins; por exemplo, para estimar volumes de componentes químicos liberados na combustão do bagaço de cana-de-açúcar.

Referências

1. Çengel YA, Ghajar AJ. Transferência de calor e massa. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH; 2012.
2. Rossow, RA. Blackbody temperature calculations from visible and near-ir spectra for gas-fired furnaces. Dissertation. Columbia: Faculty of the Graduate School University Of Missouri-Columbia; 2005.
3. Soares M. Medições múltiplas - Critério de Chauvenet. Acessado em 28 de setembro de 2019. Disponível em: <https://www.mspc.eng.br/dir70/med06.php>.