

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO CONFINADA DE GÁS DE SÍNTESE EM CONDIÇÕES DE MISTURAS POBRES COM DOPAGEM DE ACETILENO ASSOCIADA À OEC

Mariana Mendes Wilfinger, marianawilfinger@gmail.com¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

Elis Assunção da Silva Macedo, lismacedo19@gmail.com¹

Turan Dias de Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845, Salvador/BA, Brasil, 41.650-010.

Resumo: A combustão industrial é um método amplamente utilizado na atualidade por apresentar inúmeras vantagens, porém, apresentando também desvantagens inerentes ao processo, a exemplo principal da elevada quantidade de emissão de gases poluentes. Nessa pesquisa, a formação de fuligem é um dos pontos a serem analisados na combustão de gás de síntese considerando a eficiência energética e exergia da combustão confinada desse gás em condições de misturas pobres utilizando o acetileno associado à técnica da OEC – Oxygen Enhanced Combustion, com o objetivo de atenuar tais efeitos de emissões. O acetileno é utilizado em pequenas quantidades no combustível, pois é apontado em estudos como um importante precursor na formação de fuligem. A metodologia utilizada baseou-se em considerar 12 condições distintas com diferentes concentrações de acetileno no combustível e oxigênio no ar, além de diferentes condições de mistura, entre pobre e estequiométrica, para efeito de comparação. Assim, a temperatura adiabática de chama, exergia dos exaustos e eficiência energética foram calculados. Com os dados analisados, é possível inferir que tanto a dopagem de acetileno quanto o enriquecimento com oxigênio são responsáveis por um aumento na eficiência da queima, enquanto a condição de mistura pobre diminui essa eficiência.

Palavras-chave: Gás de síntese, Combustão, Fuligem, OEC, Mistura pobre.

1. INTRODUÇÃO

Para Medwellet *et al.* (2011), a combustão representa grande parte da fonte de energia em economias industrializadas, e espera-se que continue sendo uma fonte de energia majoritária no futuro previsível, trazendo como consequência o aumento de emissões dos gases do efeito estufa na atmosfera, acompanhando a maior demanda de energia. Com a necessidade da redução do impacto ambiental da combustão, novas rotas energéticas começam a ser desenvolvidas. Surge então a gaseificação de biomassa, com a produção do *syngas*, o gás de síntese – composto basicamente por H_2 e CO. Além da reduzida emissão de poluentes, uma grande vantagem da utilização de biomassa na geração de energia é a sua disponibilidade em todo o planeta, ao contrário, por exemplo, do carvão ou gás natural (HEIDENREICH *et al.*, 2015).

A biomassa compreende uma ampla gama de diferentes tipos de materiais, como madeira, resíduos de florestas e agricultura, algas, resíduos da indústria alimentícia, etc (HEIDENREICH *et al.*, 2015). Para essa pesquisa é considerada a composição típica do gás de síntese gerado a partir da gaseificação da madeira, indicada por Silva *et al.* (2016), com razão de H_2/CO de aproximadamente 0,7, sendo que razões variando entre 0,2 e 1,6 são comumente encontradas na literatura. Essa propriedade depende tanto da matéria-prima utilizada na gaseificação, quanto do processo de gaseificação utilizado e as suas condições de aplicação.

Apesar de provocar baixa emissão, a combustão de gás de síntese traz também uma baixa eficiência energética por conta da reduzida propensão à formação de fuligem – material particulado sólido composto basicamente por carbono produzido na combustão. De acordo com Liu *et al.* (2014), a presença do hidrogênio no combustível também funciona como um inibidor da fuligem.

De acordo com Silva (2016), a radiação térmica é a principal forma de transferência de calor na chama. Durante o processo de combustão, a radiação torna-se ainda mais importante, uma vez que, a altas temperaturas, esse tipo de transferência é ainda mais aparente. Durante a combustão, essa transferência é afetada fortemente por partículas e gases que emitem e espalham ondas eletromagnéticas, aumentando a energia transportada por essas ondas.

Apesar de a fuligem ser um dos mais perigosos componentes tóxicos presentes nos gases de exaustão, e ser capaz de danificar pás de turbinas usadas para geração de energia ou em motores de aviões a jato, além de ser prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana (SKEEN *et al.*, 2010), de acordo com Santos (2001), a presença de fuligem na chama

aumenta a transferência de calor por radiação térmica, aumentando a produtividade e eficiência térmica da combustão. Portanto, o acoplamento de combustíveis não poluentes com a utilização de técnicas que promovam de forma controlada a formação de fuligem pode ser benéfico para o aumento da eficiência energética de sistemas com queima com gás de síntese.

A fim de aumentar a formação de fuligem na chama, foi utilizada a dopagem de acetileno, já que, segundo Santos (2010), evidências experimentais indicam que o acetileno seja um importante intermediário no processo de formação de fuligem. Desse modo, foram utilizadas dopagens de 1 e 2% de acetileno, para que seja possível comparar o efeito da adição de acetileno ao combustível à eficiência da chama.

Como outra maneira de elevar a eficiência da combustão de gás de síntese, foi utilizada uma queima em condição de mistura pobre. Tal condição é caracterizada por razões de equivalência da equação de combustão inferiores a 1.

A razão de equivalência de uma combustão é definida pela relação entre a razão ar-combustível (divisão da quantidade de ar pela quantidade de combustível em reação) real pela estequiométrica. Quanto à razão de equivalência, uma combustão pode ser classificada como pobre, rica ou estequiométrica.

Uma razão de equivalência menor que 1, indica uma razão ar-combustível real maior que a estequiométrica, configurando uma condição de mistura pobre, enquanto uma razão maior que 1 indica uma mistura pobre, e uma razão igual a 1 caracteriza uma mistura estequiométrica.

De acordo com Dunn-Rankin (2008), processos de combustão operando em condições de misturas pobres (razão ar/combustível maior que a estequiométrica) podem apresentar elevada eficiência, além de baixa emissividade de poluentes, uma vez que as temperaturas de chama são tipicamente baixas. Com isso, emissão de gases poluentes é reduzida com a utilização desse tipo de técnica.

Apesar de vantajosa, a queima em condição de mistura pobre pode gerar uma diminuição na eficiência da combustão, uma vez que, uma vez efetivada a queima, o volume de ar na câmara de combustão é maior do que em condições estequiométricas. Desse modo, parte da energia gerada é destinada a aquecer o gás presente na câmara, representando uma diminuição na energia líquida liberada.

O excesso de ar auxilia o processo de combustão, pois, com o maior contato do combustível com o ar, maior é a probabilidade de ocorrência de uma combustão completa. Foram analisadas misturas com razão ar/combustível (relação entre a razão ar/combustível estequiométrica e real) de 1 e 0,7, ou seja, em condição estequiométrica e de mistura pobre.

O ar atmosférico naturalmente possui uma proporção de cerca de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em base volumétrica. Em um processo de combustão, o combustível reage apenas com o oxigênio presente no ar, logo é de grande interesse aumentar a quantidade de oxigênio presente no ar durante um processo de combustão para que mais moléculas de combustível possam ser queimadas, de forma a realçar a eficiência da queima. Além disso, uma concentração maior de oxigênio implica em uma quantidade menor de nitrogênio, que é um gás inerte e reduz a temperatura da chama, funcionando como um diluente.

A técnica de aumentar a porcentagem de oxigênio presente no ar é chamada de OEC – Oxygen Enhanced Combustion, e é utilizada em processos de combustão para melhora dos resultados.

Além disso, a utilização da OEC promove, em algumas regiões da chama, um aumento na produção de fuligem, de modo a influenciar positivamente nos resultados esperados por essa pesquisa.

De acordo com Baukal (1998), a OEC traz bons resultados como o aumento da produtividade, eficiência térmica, menor volume de gases de exaustão, maior eficiência dos processos de transferência de calor e redução do consumo de combustível. Apesar de ser possível realizar queimas com grandes enriquecimentos de oxigênio, é possível utilizar um enriquecimento máximo de 7% de oxigênio para que não haja necessidade de mudanças de retrofit nos queimadores onde ocorre a combustão. Desse modo, frações de até cerca de 30% de oxigênio no ar podem ser utilizadas em equipamentos industriais genéricos com apenas algumas pequenas modificações.

Os compostos do NO_x (N₂O, NO e NO₂) são os maiores problemas na emissão de gases poluentes, logo, a sua redução traria interessantes consequências (já que o NO₂ é convertido em HNO₃, que contribui, por exemplo, com a chuva ácida). Utilizando a OEC, com o mesmo volume de ar poderiam ser oxidadas mais moléculas de combustível reduzindo, assim, a emissão desses combustíveis poluentes. A redução das emissões de gases de efeito estufa na carbonização, por meio da combustão dos mesmos, além das vantagens para o meio ambiente, pode ser economicamente interessante, a partir da possibilidade de gerar projetos de créditos de carbono, pois há, nesse processo, a redução da emissão, principalmente de metano, que é cerca de 21 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono.

Como uma das maneiras de quantificar o aumento na eficiência da combustão por conta da aplicação das técnicas selecionadas, foi calculada a exergia na combustão. Essa grandeza reflete o quão eficiente é a combustão em termos de exergia disponível no combustível e nos produtos.

A exergia de uma mistura é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido de um sistema, ou seja, a é a energia que realmente pode ser aproveitada de um sistema. A eficiência exergética é também chamada de eficiência de segunda lei, enquanto a eficiência energética, também calculada nessa análise, é chamada de eficiência de primeira lei.

Essa pesquisa tem como principal objetivo analisar a eficiência energética e exergia associada de uma chama de gás de síntese, utilizando técnicas de combustão a fim de aumentar a formação de fuligem na chama e reduzir as emissões atmosféricas, melhorando a transferência de calor por radiação em combustíveis com pouca propensão a ela, como no gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa. Futuramente, para medição das emissões atmosféricas advindas da combustão será utilizado um analisador de gases com tecnologia suficiente para atender altas especificações no controle da combustão e da emissão dos poluentes. De acordo com Kawas (2014) o aparelho é capaz de medir a porcentagem de O₂, CO, NO_x, SO₂, pressão atmosférica, temperatura e porcentagem de CO₂, além da eficiência da

combustão. A análise foi realizada em condições que servirão de base para os testes experimentais em câmara de combustão confinada, verificando teoricamente os níveis de eficiências de 1ª e 2ª lei, temperaturas envolvidas no processo em questão, tanto na chama quanto na saída dos exaustos, permitindo uma avaliação qualitativa inicial dos experimentos a serem realizados.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação da eficiência tanto de 1ª lei como 2ª lei foram analisadas as diversas condições a serem testadas em experimento, com também os níveis de temperatura adiabática de chama para cada uma das 12 condições do experimento. Foram consideradas dopagens de acetileno de 1% e 2%, para efeito de comparação da influência da ação do acetileno da eficiência.

Foram consideradas misturas com razão de equivalência 1 e 0,7, ou seja, mistura estequiométrica e pobre, respectivamente, e ar de queima com 21, 25 e 30% de oxigênio, respeitando o valor máximo para que não sejam necessárias mudanças de equipamento.

A fim de calcular a temperatura adiabática de chama do gás de síntese, em cada uma das condições, foi utilizada a metodologia proposta por Van Wylen *et al.* (1995), a partir da Eq. (1), que iguala a entalpia dos reagentes à entalpia dos produtos da combustão.

$$H_r = H_p \quad (1)$$

Para o cálculo da exergia do combustível, foi utilizada a Eq. (2) proposta por Silva (2009), aplicável para combustíveis gasosos.

$$\frac{ex_{comb}}{PCI} = 1,0334 + 0,0015 \frac{H}{C} - 0,0058 \frac{1}{C} \quad (2)$$

Sendo H e C as frações mássicas de Hidrogênio e Carbono no combustível, respectivamente, ex_{comb} a exergia do combustível, e PCI o poder calorífico inferior do gás.

Com o intuito de calcular a exergia dos produtos, foi utilizada a Eq. (3), para cada um dos produtos em cada condição.

$$ex_{prod} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

A eficiência exergética do processo foi calculada a partir da Eq. (4), apresentada por Santos *et al.* (2014).

$$ef_{ex} = 1 - \left(\frac{ex_{prod}}{m_{comb} * ex_{comb}} \right) \quad (4)$$

Para o cálculo teórico das eficiências e temperatura dos produtos foi considerada uma perda de energia para o ajuste da temperatura a ser utilizada nos cálculos (temperatura dos produtos). A estimativa de perda, e, com isso, o nível da redução de temperatura na chama, teve como base os dados experimentais apresentados por Santos *et al.* (2014), que foram obtidos para a queima de gás natural em câmara de geometria e condições de testes similares às que serão utilizadas para continuidade dessa pesquisa. Essa consideração é apenas uma inferência dos níveis de temperatura a serem encontrados nos experimentos futuros, baseada em dados experimentais com geometrias similares, mas com um nível de impressão já que os combustíveis são distintos.

Uma vez que os dados apresentados por Santos *et al.* (2014) dizem respeito a condições de enriquecimento de 20%, 23% e 25%, os resultados relacionados à eficiência na condição de 30% foram considerados como sendo aproximadamente equivalentes aos na condição de 25%, uma vez que a tendência de variação tende permanecer a mesma.

3. RESULTADOS

Com base na metodologia detalhada no tópico anterior, foram encontrados os resultados a seguir. A Tabela 1 apresenta os dados para a queima sem enriquecimento de Oxigênio, ou seja, com ar atmosférico, composto por 21% de oxigênio. Percebe-se que, nesse caso, tanto a eficiência energética quanto a exergia disponível são afetadas positivamente pela dopagem de acetileno, assim como pela condição de mistura pobre.

Tabela 1. Dados calculados para ar com 21% de oxigênio.

% de C ₂ H ₂	Razão de equivalência	Temperatura adiabática (K)	Temperatura dos Exaustos (K)	Eficiência energética (%)	Exergia Específica (kJ/kg)
1	1	1784,88	735,53	79	221,39
2		1831,09	1081,64		496,15
1	0,7	1577,76	952,51	60	373,48
2		1612,47	1373,97		765,81

A Tabela 2 aponta os dados calculados para ar com 25% de Oxigênio, ou seja, com 4% de excesso de ar. Nesse caso, os resultados para condição estequiométrica foram superiores aos anteriores, enquanto foram inferiores na condição de mistura pobre, expressando que a eficiência de 1ª Lei e exergia foram aumentadas pelo enriquecimento de oxigênio, enquanto foram reduzidas pela condição de mistura pobre.

Tabela 2. Dados calculados para ar com 25% de oxigênio.

% de C ₂ H ₂	Razão de equivalência	Temperatura adiabática (K)	Temperatura dos Exaustos (K)	Eficiência energética (%)	Exergia Específica (kJ/kg)
1	1	1881,07	797,22	81	252,23
2		1933,18	1123,40		539,41
1	0,7	1679,61	751,61	77	221,77
2		1719,61	1130,39		534,74

Por fim, a Tabela 3 aponta os dados calculados para ar com 30% de Oxigênio, ou seja, com 9% de excesso de ar. Nesse caso, os resultados foram ainda superiores aos anteriores, expressando, mais uma vez, que a eficiência e exergia foram aumentadas pelo enriquecimento de oxigênio. Nesse caso, a condição de mistura pobre apresentou valores superiores aos das mesmas condições com 9% de excesso de ar.

Tabela 3. Dados calculados para ar com 30% de Oxigênio.

% de C ₂ H ₂	Razão de equivalência	Temperatura adiabática (K)	Temperatura dos Exaustos (K)	Eficiência energética (%)	Exergia Específica (kJ/kg)
1	1	1977,10	878,64	81	328,22
2		2035,39	1256,61		673,81
1	0,7	1784,16	831,34	77	283,41
2		1829,90	1177,49		583,86

Com relação à temperatura esperada da chama (tendo como base a temperatura adiabática de chama e eficiência energética), houve uma variação quanto ao aumento ou diminuição com o uso da combustão pobre. Essa flutuação se dá pela maneira pela qual a transferência de energia ocorre na câmara de combustão. Esse tipo de condição tem a característica de reduzir a formação de NO_x, composto formado a altas temperaturas.

Quanto à exergia, é possível definir que, em condições estequiométricas, assim como a energética, é beneficiada positivamente com a utilização da técnica da OEC, assim como utilizando a dopagem de acetileno no combustível. Em contrapartida, a condição de mistura pobre continua influenciando de maneira negativa tal eficiência.

4. CONCLUSÃO

A partir dos dados apresentados no tópico anterior, é possível inferir que a dopagem de acetileno na queima aumenta tanto eficiência energética quanto a exergia, assim como esperado, por conta do elevado poder calorífico dessa substância em combustão. Em procedimentos experimentais, é esperado que a dopagem de acetileno permaneça aumentando a eficiência, uma vez que a sua presença potencializará a formação de fuligem e, com isso, a transferência de calor por radiação e eficiência térmica da chama.

Em contrapartida, a diminuição da razão ar/combustível, ou seja, aplicação da condição de mistura pobre reduz tal eficiência e alterna entre aumentar e reduzir a exergia, uma vez que, em condições de misturas pobres, há uma maior massa de nitrogênio presente no ar cuja temperatura deve ser elevada pelo combustível, representando uma diminuição na energia liberada na combustão. A variação da exergia depende da maneira como essa energia é transferida.

Já o excesso de ar aumenta as eficiências, uma vez que, com uma quantidade maior de oxigênio na chama, maiores são as interações entre as moléculas de combustível e de oxigênio provocando a combustão, e, por consequência, maiores são as chances de uma combustão completa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao SENAI CIMATEC e ao CNPq pelo apoio financeiro e tecnológico no desenvolvimento do projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Baukal Jr., C.E., 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion". 1ª ed. New York: CRC Press, 369 p.
- Dunn-Rankin, Derek; Miyasato, Matt M.; Pham, Trinh K., 2008, "Lean Combustion: Technology and control". 2ª ed. Oxford: Elsevier, 267p.
- Heidenreich, Steffen; Foscolo, Pier Ugo, 2015, "New concepts in biomass gasification". Progress in Energy and Combustion Science, v. 46, pp. 72-95.
- Kawas, H. B., Monitoramento das emissões atmosféricas de caldeiras de projetos distintos. Campo Mourão: UTFPR, 2014.
- Kumfer, B. M.; Skeen, R.L.; Axelbaum R.L., 2008, "Soot inception limits in laminar diffusion flames with application to oxy-fuel combustion". Combustion and Flame, v. 154, pp. 546-556.
- Liu, F., Ai, Y., Kong, W., 2014, "Effect of hydrogen and helium addition to fuel on soot formation in an axisymmetric coflow laminar methane/air diffusion flame", International Journal of Hydrogen Energy, pp. 3936-3946.
- Medwell, Paul R., 2011, "The influence on the soot distribution within a laminar flame of radiation at fluxes of relevance to concentrated solar radiation". Combustion and Flame, v. 158, pp. 1814-1821.
- Olm, Carsten., 2015 "Comparison of the performance of several recent syngas combustion Mechanisms". Combustion and flame, v. 162, pp.1793-1812.
- Santos, A.A.B.; OLIVEIRA, T.D.; Vilas Boas, L.D.B., 2014, "Exergy Analysis Of Natural Gas Confined Flames With OEC". 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belém do Pará, pp. 10-13.
- Santos, Alex Álisson Bandeira., 2010, "Investigação do uso da combustão enriquecida com O₂ em chamas confinadas de gás natural". 247 f. Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Santos, Alex Álisson Bandeira, 2001, "Influência do teor de O₂ e da velocidade do ar na formação de fuligem em chamas difusas de Acetileno com escoamento anular paralelo do oxidante". 144 f. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.
- Silva, Lucas Casaes Pimentel; SANTOS, Alex Álisson Bandeira, 2016, "Desenvolvimento de um dispositivo experimental para o estudo da formação de fuligem e da radiação térmica na combustão de gás de síntese em condições de misturas pobres associada à OEC". IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Ceará.
- Silva, Reginaldo Ferreira da. 2009, "Análises energética e exergética de uma micro central de cogeração inserida em uma planta de carbonização de madeira reflorestada". 180 f. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Skeen, S.A.; Yablonsky, G.; Axelbaum, R.L., 2010. "Characteristics of non-premixed oxygen-enhanced combustion: II. Flame structure effects on soot precursor kinetics resulting in soot-free flames". Combustion and flame, v. 157, pp. 1745-1752.
- Wylen, Gordon J. Van; SONNTAG, Richard; BORGNAKKE, Claus., 1995, "Fundamentos da termodinâmica clássica". 4ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 589p.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFICIENCY ANALYSIS OF SYNGAS CONFINED COMBUSTION IN LEAN MIXTURE CONDITIONS WITH ACETYLENE DOPING ASSOCIATED TO OEC

Mariana Mendes Wilfinger, marianawilfinger@gmail.com¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

Elis Assunção da Silva Macedo, lismacedo19@gmail.com¹

Turan Dias de Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845, Salvador/BA, Brasil, 41.650-010.

Abstract. *Industrial combustion is a widely used method nowadays, for it features numerous advantages, although it also features disadvantages inherent to the process, to the example of the high emission of polluting gases. In this research, soot formation is one of the matters to be analyzed in syngas confined combustion, considering the energetic and exergetic efficiency of the confined on this gas confined combustion, in lean mixture conditions using acetylene associated to the OEC - Oxygen Enhanced Combustion - technique, with the goal of attenuating such emission effects. Acetylene is used in small amounts in the fuel, for it is pointed in studies as an important precursor in soot formation. The used methodology was based on considering twelve different conditions with different acetylene concentrations in the fuel and oxygen in the air, besides different mixture conditions, between lean and stoichiometric, for comparison effects. Thereby, the adiabatic flame temperature, products exergy and energetic efficiency were calculated. With the analyzed data, it is possible to infer that both the acetylene doping and the oxygen enhancement are responsible for an increase in the combustion efficiency, while the lean condition decreases this efficiency.*

Keywords: Syngas, Combustion, Soot, OEC, Lean Combustion.