



## 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

### DESENVOLVIMENTO DE MODELO PRELIMINAR DA INTERAÇÃO ENTRE RADIÇÃO TÉRMICA, FULIGEM E OEC

SANTOS, Alex Álisson B.\*, TORRES, Ednildo A., PEREIRA, Pedro Afonso P.º

\*Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC– Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador–BA–Brasil, ° Laboratório de Energia e Gás – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (CiEnAm) – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Rua Professor Aristides Novis, nº 2 – Escola Politécnica, 3º Andar - Federação, Salvador–BA–Brasil, °° Instituto de Química – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (CiEnAm) – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Rua Barão de Geremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina

\*alex.santos@cimatec.fieb.org.br

#### RESUMO

O conceito de eficiência energética em equipamentos está cada vez mais em pauta com os desdobramentos do aquecimento global, e, dentre os equipamentos industriais, os queimadores possuem um dos maiores impactos nesta discussão por se tratar de um equipamento de combustão industrial. A procura de queimadores mais eficientes energeticamente é imprescindível para o adequado uso de combustíveis fósseis durante a fase de transição entre esta fonte de energia para as energias alternativas, a qual pode durar mais de cinquenta anos. O presente trabalho apresenta a metodologia de desenvolvimento de um modelo preliminar para a avaliação da interação entre a fuligem produzida na queima de combustíveis, a radiação térmica, e, a combustão enriquecida com oxigênio (OEC). A literatura apresenta trabalhos em que a utilização da técnica de OEC – técnica que possui pontos importantes de melhoria da eficiência térmica da combustão – causa em certas condições o aumento da formação de fuligem. A fuligem como um meio participante importante na radiação térmica, pode com a sua interação devidamente controlada com a OEC, trazer o aumento de eficiência térmica nos queimadores, implementando a transferência de calor das chamas para as superfícies de aquecimento, diminuindo com isso, o consumo de combustível. Palavras-chaves: Fuligem, Radiação Térmica, OEC, Oxigênio.

## INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um dos pontos fundamentais para a redução de gases estufas, emitidos dos processos de combustão industrial. Os queimadores industriais são, portanto, um dos principais equipamentos que devem ter a sua eficiência térmica implementada a fim de diminuir o consumo de combustíveis, como também reduzir a emissão de gases poluentes e estufas. Inúmeras técnicas são usadas para tal, como queima estagiada, queimadores com injeção de ar com swirl e recirculação de gases. Todavia, nem sempre a eficiência energética conseguida é suficiente para diminuir o consumo de combustíveis a níveis necessários na realidade atual.

Há cerca de uma década, surgiu o processo de combustão enriquecida por oxigênio (OEC), em que o ar de combustão é enriquecido por oxigênio, sendo que, segundo Baukal [1], traz resultados interessantes, como o aumento de produtividade, eficiência térmica, menor volume de gases de exaustão, maior eficiência dos processos de transferência de calor e redução do consumo de combustível. Esta é uma técnica já difundida em processos que trabalham com altas temperaturas como siderurgias, cerâmicas e em incineradores de resíduos, todavia sem registros de utilização em plantas termoelétricas e na indústria de petróleo e gás.

O uso desta técnica associada a queimadores pode trazer uma maior formação de fuligem em certas regiões da chama [2], e, sendo a fuligem um meio participante importante na radiação térmica, pode com a sua interação devidamente controlada com a OEC, trazer o aumento de eficiência térmica nos queimadores, implementando a transferência de calor das chamas para as superfícies de aquecimento através da radiação térmica.

Na literatura existem trabalhos que estudaram a emissão de radiação térmica e de fuligem em chamas abertas turbulentas difusas de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, variando as condições de operação desde a produção de convecção forçada no escoamento do ar até a condição de convecção livre [3].

A modelagem da formação de fuligem em chamas é uma difícil tarefa porque, sendo necessário contabilizar a interação entre a mistura de componentes causada pela turbulência, estrutura da chama, química da formação da fuligem e a radiação térmica [4].

Os efeitos da radiação transiente para a resolução da equação de entalpia total numa fração de mistura foram estudados [5]. Um simples, mas efetivo tratamento da radiação foi usado a partir de uma relação de estado da fração volumétrica da fuligem, baseada em dados experimentais. A taxa de dissipação da fração da mistura foi tratada como parâmetro. Uma única estrutura de chama foi observada, envolvendo um ponto de inflexão na temperatura quando analisada a partir da fração da mistura, próximo da camada de fuligem formada na chama, identificando a influência da fuligem na participação da transferência de calor na chama.

A formação da fuligem em chamas turbulentas pela interação de um modelo de formação [7] com o modelo de turbulência k-ε e um modelo de combustão laminar foi estudada [6]. Os efeitos da radiação foram computados assumindo que fração fixa da energia química gerada pela combustão é perdida na fronteira via radiação térmica. Resultados experimentais obtidos em chamas não pré-misturadas de propano foram próximos às predições do modelo.

O efeito de atenuação do fluxo de calor por radiação causado pelo efeito barreira das partículas de fuligem, notadamente um meio dominante nos processos de absorção/emissão da radiação térmica foi avaliado [8]. Os autores avaliaram que os efeitos de condução e convecção na chama não podem ser negligenciados.

As patentes americanas n° 5.199.866 [9], n° 5.256.058 [10] e a de n° 5.346.390 [11] apresentam queimadores e métodos para a produção de chamas luminosas. Todas estas patentes utilizam a técnica de enriquecimento da combustão com O<sub>2</sub>. Tem sido encontrado que alguns queimadores possuem baixa luminosidade para altas taxas de combustão. Chamas com baixa luminosidade, não possuem transferência de calor por radiação eficiente e produzem altas temperaturas de chama, ocasionando alta emissão de NO<sub>x</sub>. As chamas cobertas nestas patentes estão limitadas a queimadores com formatos cilíndricos.

Já a patente americana n° 5.302.112 [12] apresenta o desenvolvimento de um queimador que opera com uma menor emissão de NO<sub>x</sub> e de particulado. O queimador opera com enriquecimento de O<sub>2</sub>. Através de arranjos escalonados de mistura entre combustível e oxidante, os autores afirmam ter conseguido o controle da luminosidade da chama – indicativo de radiação térmica – e por conseqüência, o queimador seria capaz de operar com altas ou baixas temperaturas de chama, dependendo da aplicação desejada. Isto indica mais um aspecto do controle da radiação participante da fuligem (radiação luminosa) numa chama, em uma aplicação de aquecimento, em que altas produtividades devem estar alinhadas a baixa emissão de poluentes.

Na patente americana n° 5.575.637 [13] foi apresentado o desenvolvimento de um queimador que usa ar enriquecido, em que, segundo o autor, aumentaria a transferência de calor por radiação em faixas do espectro visível, em chamas de gás natural ou em outros combustíveis gasosos, devido a grande participação da fuligem neste mecanismo de transferência de calor. Além de um melhor efeito de transferência de calor por radiação, os autores informaram uma redução da emissão de NO<sub>x</sub>, ocasionado pela redução da temperatura de chama decorrente da transferência de calor da chama. Os autores afirmaram que chamas luminosas e não luminosas (produzidas pela emissão de radiação por H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>) produzem em torno de 15% e 6% da radiação no comprimento de onda entre 0,6 e 1,5 μm, respectivamente.

Também seria importante notar que a radiação induzida pela fuligem não está limitada a faixa de 0,6-1,5  $\mu\text{m}$ , como também em maiores comprimentos de onda.

A proposição de patente, já descrita anteriormente, de Slavejkov et al. [13] de um projeto de queimador que possibilita o aumento artificial da fuligem e em consequência a perda de calor por radiação da chama e a redução de emissão de  $\text{NO}_x$  foi avaliada [14]. Para esta avaliação, os autores utilizaram o teor de 30% de  $\text{O}_2$  no oxidante. Para esta condição, a avaliação numérica executada apresentou resultados que sugerem que a implementação da formação da fuligem pode ser uma ferramenta efetiva na estratégia de redução de redução de  $\text{NO}_x$  e maximização da transferência de calor.

Na literatura um estudo experimental em que foram analisadas as características da combustão e da radiação térmica em chamas de metano/ar e de metano/oxigênio, identificando o papel da fuligem na radiação foi implementado [15].

A influência da combustão intensificada com  $\text{O}_2$  (OEC) na formação da fuligem, radiação térmica e nas características de emissão de poluentes, em especial, especificamente de CO e  $\text{NO}_x$ , em chamas turbulentas de propano, gás natural e eteno foi estudada [16]. A concentração de fuligem foi calculada a partir dos dados experimentais pela técnica de extinção da luz de laser (LLE) utilizada primeiramente com este objetivo por Kent e Bastin [16].

Um estudo computacional foi elaborado baseado na fluidodinâmica computacional (CFD) da interação entre fuligem, radiação térmica e emissão de  $\text{NO}_x$  em chamas turbulentas difusas enriquecidas com  $\text{O}_2$ , utilizando como combustível o propano [17]. Os autores fizeram um modelo estruturado da dinâmica da turbulência, acoplada ao mecanismo químico de formação da fuligem e de  $\text{NO}_x$ , além do modelo de transferência de calor por radiação. Aqui vale ressaltar os modelos de formação de fuligem e de radiação utilizados no trabalho. O modelo seguido de formação da fuligem, avaliando desde o crescimento à oxidação desta, foi o de Wang e Frencklach [18], que associado à equação mestra de Smoluchowski de momentum, apresentada por Frencklach [19], forneceu a evolução da distribuição das partículas de fuligem, além de sua dinâmica.

O objetivo do estudo é apresentar uma metodologia e um modelo preliminar de avaliação da interação entre a radiação térmica, a formação da fuligem oriunda da queima do combustível e a OEC. Esta metodologia servirá de base inicial para o desenvolvimento de uma simulação numérica para a avaliação desta interação, que será associada posteriormente à formação de poluentes como o  $\text{NO}_x$  e materiais particulados, provenientes do processo de queima.

## **DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E DO MODELO PROPOSTO PARA A ANÁLISE**

Conforme citado anteriormente, o problema consiste na criação de uma metodologia para avaliar a interação entre a radiação térmica, fuligem e a OEC. Pelos estudos anteriores, a OEC produz um aumento da formação da fuligem em certas regiões da chama, o que, como meio participante da radiação, pode aumentar a transferência de calor da chama para superfícies a serem aquecidas.

Para a avaliação adequada desta interação, devem ser definidos modelos de formação da fuligem, da influência da OEC, e, da radiação térmica além, da definição das equações e métodos de resolução da equação de transferência de calor (RTE). Estes pontos são apresentados a seguir.

### **Modelo de Formação da Fuligem**

O modelo da formação da fuligem é necessário para identificar em cada posição da chama qual será a fração volumétrica da fuligem ( $f_v$ ).

Apresenta-se promissor, o modelo apresentado por Appel et al. [20], que basea-se na formação da partícula núcleo da fuligem através da formação dos primeiros hidrocarbonetos poli aromáticos (HPA), a partir do acetileno, benzeno e pireno. A partir disso é desenvolvido o parâmetro  $\alpha$  que indica a superfície reativa disponível para o crescimento superficial das partículas de fuligem.

Todavia, para o entendimento e execução do modelo, será necessário um maior entendimento da inter-relação entre o parâmetro  $\alpha$  e a fração volumétrica de fuligem ( $f_v$ ).

### **Fator de correção para o uso de OEC**

O fator de correção para o uso da OEC será levantado a partir de relações de estado determinadas a partir de dados experimentais levantados em dissertação de mestrado [21]. Este fator de correção é necessário, já que não existe modelo existente para a formação da fuligem com a OEC [17]. Portanto o modelo de avaliação de interação será semi-empírico.

Este foi avaliado para baixos níveis de enriquecimento do ar com  $\text{O}_2$ , sendo determinada para níveis de 23 e 25% de teor volumétrico de  $\text{O}_2$ .

O fator de relação será determinado entre a comparação da relação de estado para 21% e para a determinada para os níveis de 23 e 25%.

As relações são funções da fração volumétrica da fuligem ( $f_v$ ) e a posição axial da chama ( $L$ ). A seguir estas relações são apresentadas:

Relação de Estado para o Ar Atmosférico (21% O<sub>2</sub>):

$$f_v(ppm)_{21\%} = -8 \times 10^{-6} L^3 + 0,0016 L^2 - 0,1129 L + 5,0938 \quad (1)$$

Já a relação para a OEC, em baixos níveis de enriquecimento é dada por:

$$f_v(ppm)_{BN-OEC} = -2 \times 10^{-5} L^3 + 0,0047 L^2 - 0,2816 L + 7,281 \quad (2)$$

O fator de correção para o uso da OEC, para cada posição da chama, será dado por:

$$F(OEC) = \frac{f_v(ppm)_{BN-OEC}}{f_v(ppm)_{21\%}} \quad (3)$$

O mesmo será multiplicado aos valores determinados para  $f_v$  em cada posição da chama, simulando a fração volumétrica da fuligem com a OEC.

### Modelo da Radiação Térmica

Para a definição do modelo de radiação térmica em decorrência da fuligem, serão identificadas na chama duas regiões; a primeira será considerada como a zona de formação da fuligem (Zona 1), com pequenas partículas, enquanto a segunda será considerada como uma zona com a formação de aglomerados de partículas de fuligem (Zona 2) e a ocorrência da oxidação destes aglomerados.

Zona 1: Zona de Formação da Fuligem.

Hipóteses:

- Partículas pequenas e esféricas;
- Partículas seguem a condição de espalhamento de Rayleigh;
- Fuligem como um corpo cinza;
- Partículas possuem tamanho de até 80 nm.

Formulações:

Será identificado o coeficiente de absorção médio da partícula da fuligem para a resolução da equação de transferência de calor (RTE).

O coeficiente a ser utilizado no modelo para esta região será o coeficiente médio de Planck, definido por:

$$\kappa_P = \beta_P = 3,83 f_v C_0 \frac{T}{C_2} \quad (4)$$

sendo,

$$C_0 = \frac{36\pi k}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2 k^2} \text{ e } C_2 = 1,4388 \text{ cmK} \quad (5)$$

Zona 2: Zona de Aglomerados/ Oxidação da Fuligem.

Hipóteses:

- Partículas núcleos dos aglomerados pequenas e esféricas;
- Partículas seguem a condição de espalhamento de Rayleigh;
- Fuligem como um corpo cinza;

- Aglomerados com 100 partículas de fuligem com diâmetro unitário de 50 nm [22].

Formulações:

Por haver espalhamento da radiação por conta dos aglomerados, serão usados os coeficientes espectrais de absorção e o de extinção para a resolução da RTE.

### Equações de Resolução da RTE

Zona 1:

$$\nabla \cdot q = \kappa_p (4\sigma T^4 - \int_{4\pi} I d\Omega) = \kappa_p (4\sigma T^4 - G) \quad (6)$$

Zona 2:

$$\frac{\partial I_\eta}{\partial s} = s \nabla I_\eta = \kappa_\eta I_{b\eta} - \beta_\eta I_\eta + \frac{\sigma_{s\eta}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\eta(s_i) \phi_\eta(\hat{s}_i, \hat{s}) d\Omega_i \quad (7)$$

Para a zona 2, sendo uma análise espectral, será necessária uma avaliação espectral numérica, a qual demandará de alguns métodos conceituados para a resolução da RTE. A seguir, são indicados alguns dos métodos mais indicados (a partir da constatação em revisão bibliográfica) para a resolução:

- Método de Monte Carlo.
- Modelo FSK [22] ou,
- Modelo WSGG [22].

### Faixa do Espectro para a Análise

Conforme a revisão bibliográfica indica que a fuligem emite radiação térmica na faixa do visível e do infravermelho. Segundo a revisão, na faixa do visível e infravermelho a emissão é dada entre 0,6-1,45  $\mu\text{m}$  segundo Hwang e Gore [15], e, entre 0,6-1,5  $\mu\text{m}$  segundo Slavejkov *et al.* [13]. Também Modest [22], indica que a fuligem na chama possui interface na transferência de calor também na faixa de 3  $\mu\text{m}$ . Então a faixa a ser avaliada no modelo será de 0,6-3  $\mu\text{m}$ .

Todos estes itens propostos servirão em conjunto de modelo preliminar para a implementação da simulação numérica para a avaliação do problema físico a ser analisado, o da interação da radiação térmica, formação de fuligem, e da OEC. Este estudo faz parte de um trabalho desenvolvido pelo CiEnAm – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, da Universidade Federal da Bahia, a fim de desenvolver queimadores com maior desempenho energético e ambiental, ou seja, com menor consumo de energia e menor emissão de poluentes e gases estufas.

### CONCLUSÕES

O artigo apresenta a metodologia para a definição de um modelo preliminar da interação entre radiação térmica, fuligem e a OEC. Através do que foi apresentado, podemos concluir que alguns pontos devem ser trabalhados para a definição do adequado modelo para se iniciar a simulação numérica e a avaliação dos resultados. Posteriormente estes resultados serão validados com os resultados experimentais. Sendo assim podemos destacar os seguintes pontos de melhoria:

- Melhor entendimento do modelo de formação da fuligem de Appel *et al.* (2000);
- Melhor entendimento dos métodos de resolução espectral, e, definir o mais adequado para a resolução do problema;
- Refinar as correlações para a definição do fator de OEC;
- Avaliar a interface da turbulência no modelo, caso o regime a ser trabalho possua turbulência.

## REFERÊNCIAS

1. Baukal Jr., C.E. Oxygen-Enhanced Combustion. 1a ed. New York: CRC Press, 1998, 369p.
2. Santos, A.A.B., Goldstein Jr, L., Ferrari, C.A. Study of the Effect of Oxygen Enriched Air on the Formation of Soot in an Acetylene Diffusion Flame. In: 2nd National Congress of Mechanical Engineering, 2002, João Pessoa. João Pessoa: ABCM, 2002. CD-ROM.
3. Becker, H. A. e Liang, D. Total Emission of Soot and Thermal Radiation by Free Turbulent Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, v. 44, p. 305-318, 1982.
4. Faeth, G. M., Gore, J. P., Chuech, S. G., and Jeng, S. M., *Annu. Rev. Numerical Fluid Mech. Heat Trans.*, v. 2, p.1–38, 1989.
5. Gore, J. P., Jang, J. H., *J. Heat Transfer*, v, 114, p.234–242, 1992.
6. Fairweather, M., Jones, W. P., Lindstedt, R. P., *Combust. Flame*, v. 89, p.45–63, 1992.
7. Leung, K. M., Lindstedt, R. P., Jones, W. P., *Combust. Flame*, v. 87, p.289–305, 1991.
8. Chen, S.L., Ma, H.K., Chen, D.Y. Radiation Blockage by the Interaction of Thermal Radiation with Conduction and Convection in the Combustion of Condensed Fuels. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, v. 20, p. 145-157, 1993.
9. Joshi, M.L., Nabors, J.K., Slavejkov, A.G. Adjustable Momentum Self-Cooled Oxy/Fuel Burner for Heating in High Temperature Environments, U.S. Patent nº 5.199.866, 1993.
10. Slavejkov, A.G., Zurecki, Z., Joshi, M.L., Nabors, J.K. Method and Apparatus for Oxy-fuel Heating with Lowered NO<sub>x</sub> in High Temperature Corrosive Environments, U.S. Patent nº 5.256.058, 1993.
11. Slavejkov, A.G., Zurecki, Z., Joshi, M.L., Nabors, J.K. Method and Apparatus for Oxy-fuel Heating with Lowered NO<sub>x</sub> in High Temperature Corrosive Environments, U.S. Patent nº 5.346.390, 1994.
12. Nabors Jr, J.K., Andrews, W.C. Burner Apparatus and Method of Operation Thereof, U.S. Patent nº 5.302.112, 1994.
13. Slavejkov, A.G., Gosling, T.M., Knorr Jr, R.E.. Method and Device for Low NO<sub>x</sub> High Efficiency Heating in High Temperature furnaces, U.S. Patent nº 5.575.637, 1996.
14. Wang, L., Endrud, N.E., Turns, S.R., D'Agostini, M.D., Slavejkov, A.G.. A Study of the Influence of Oxygen Index on Soot, Radiation, and Emission Characteristics of Turbulent Jet Flames. *Combustion Science and Technology*, v.174, p. 45-72, 2002.
15. Hwang, S.S., Gore, J.P. Characteristics of Combustion and Radiation Heat Transfer of an Oxygen-Enhanced Flame Burner. *J. Power and Energy, Part A*, v. 216, p. 379-386, 2002.
16. Kent, J. H., Bastin, S. J. Parametric Effects on Sooting in Turbulent Acetylene Diffusion Flame, *Combust. Flame*, v. 56, p.29-42, 1984.
17. Wang, L., Haworth, D.C., Turns, S.R., Modest, M.F. Interactions Among Soot, Thermal Radiation, and NO<sub>x</sub> Emissions in Oxygen-Enriched Turbulent Nonpremixed Flames: A Computational Fluid Dynamics Modeling Study. *Combustion and Flame*, v. 141, p. 170-179, 2005.
18. Wang, H. Frenklach, M. *Combust. Flame*, v. 110, p. 173-221, 1997.
19. Frenklach, M. *Chem. Eng. Sci.* V. 57, p.2229–2239, 2002.
20. Appel, J., Bockhorn, H. Frenklach, M. Kinetic Modeling of Soot Formation with Detailed Chemistry and Physics: Laminar Premixed Flames of C<sub>2</sub> Hydrocarbons. *Combustion and Flame*, v. 121, p. 122-136, 2000.
21. Santos, A.A.B., Influência do Teor de O<sub>2</sub> e da Velocidade do Ar na Formação da Fuligem em Chamas Difusas de Acetileno com Escoamento Anular Paralelo do Oxidante, Campinas: Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2001.
22. Modest, M.F. Radiative Heat Transfer. 2a ed. New York: Academic Press, 2003, 822p.

## NOMENCLATURA

|               |  |
|---------------|--|
| $f_v$         | concentração da fuligem (ppm)  |
| $L$           | posição axial da chama (adimensional)  |
| $\kappa_P$    | coeficiente médio de Planck (cm <sup>-1</sup> )                                  |
| $\kappa_\eta$ | coeficiente de absorção espectral (cm <sup>-1</sup> )                            |
| $\beta_P$     | coeficiente de extinção de Planck (cm <sup>-1</sup> )                            |
| $\beta_\eta$  | coeficiente de extinção espectral (cm <sup>-1</sup> )                            |
| $C_0$         | constante de radiação (adimensional)   |
| $C_2$         | segunda constante de Planck (cmK)  |
| $n$           | parte real do coeficiente complexo de refração da partícula (adimensional)       |
| $k$           | parte imaginária do coeficiente complexo de refração da partícula (adimensional) |
| $q$           | fluxo de calor radiante (kW/m <sup>2</sup> )                                     |

|                  |  |
|------------------|--|
| $T$              | temperatura (K)  |
| $\sigma$         | constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ )                          |
| $\sigma_{s\eta}$ | coeficiente de espalhamento espectral ( $\text{cm}^{-1}$ )                                 |
| $I$              | fluxo de radiação incidente ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )                                     |
| $I_\eta$         | fluxo de radiação incidente espectral ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )                           |
| $I_{b\eta}$      | intensidade radiação corpo negro ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )                                |
| $G$              | irradiação espectral ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )  |
| $s$              | direção estudada   |
| $\phi_\eta$      | ângulo sólido da incidência da radiação espalhada de outra direção para a direção estudada |