

INFLUÊNCIA DO SWIRL NA FORMAÇÃO DE FULIGEM E NO_x NA QUEIMA DE GÁS NATURAL COM A APLICAÇÃO DA OEC

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹
Paulo Roberto de Freitas Neves, paulon@fieb.org.br¹
Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC – Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, Avenida Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, Brasil, CEP.: 41650-010

Resumo: Os queimadores industriais para a melhor eficiência energética e controle de chamas possuem aplicações com swirl (controle do número de rotação do escoamento do oxidante). Todavia seus efeitos com a utilização da combustão enriquecida por oxigênio (OEC) é pouco explorada na literatura no aspecto de sua influência acoplada a formação de fuligem e de NO_x dois poluentes importantes na atmosfera, o que é importante em aplicações com combustíveis fósseis para a redução do impacto ambiental da sua utilização. A OEC 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 objetivo do trabalho é avaliar a influência da OEC do swirl na formação da fuligem e de NO_x na queima de gás natural em uma chama confinada. Os teores volumétricos de oxigênio aplicados são de 21 e 25%.

Palavras-chave: gás natural, swirl, combustão, fuligem, NO_x

1. INTRODUÇÃO

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

Há pouco mais 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 (1998), 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 à queimadores pode trazer uma maior formação de fuligem em certas regiões da chama (Santos *et al.*, 2002), 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, aumentando 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, H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₂H₄ e C₂H₂ (Becker, 1982).

A modelagem da formação de fuligem em chamas é uma difícil tarefa já que vários aspectos precisam ser considerados como a mistura e difusão de componentes causada pela turbulência, estrutura da chama, química da formação da fuligem e a radiação térmica (Faeth *et al.*, 1989).

Os efeitos da radiação térmica transiente para a resolução da equação de energia foram estudados (Gore e Jang, 1992). Nesse estudo 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. Uma única estrutura de chama foi observada, envolvendo um ponto de inflexão na temperatura 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 apresentado por Leung *et al.* 1991, com o modelo de turbulência k-ε e um modelo de combustão laminar foi estudada (Fairweather *et al.* 1992).

Os efeitos da radiação foram computados assumindo que a 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 (Chen *et al.* 1993). Os autores avaliaram que os efeitos de condução e convecção na chama não podem ser negligenciados.

As patentes americanas nº 5.199.866 (Joshi *et al.*, 1993), nº 5.256.058 (Slavejkov *et al.*, 1993) e a de nº 5.346.390 (Slavejkov *et al.*, 1994) apresentam queimadores e métodos para a produção de chamas luminosas. Todas estas patentes utilizam a técnica de enriquecimento da combustão com O₂. Tem sido encontrado que alguns queimadores possuem baixa luminosidade mesmo para condições próximas as estequiométricas na combustão. Chamas com baixa luminosidade não possuem transferência de calor por radiação eficiente e produzem altas temperaturas de chama, ocasionando a alta emissão de NOx. Os processos desenvolvidos nessas patentes podem melhorar a transferência de calor em queimadores. As chamas cobertas nestas patentes estão limitadas a queimadores com formatos cilíndricos.

Já a patente americana nº 5.302.112 (Slavejkov *et al.*, 1993) apresenta o desenvolvimento de um queimador que opera com uma menor emissão de NOx e de particulado. O queimador opera com enriquecimento de O₂. 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 nº 5.575.637 (Nabors Jr *et al.*, 1993) 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 NOx, ocasionado pela redução da temperatura de chama decorrente da transferência de calor.

A proposição de patente, já descrita anteriormente, de Slavejkov *et al.* (1996) de um projeto de queimador que possibilita o aumento artificial da fuligem e conseqüentemente a perda de calor por radiação da chama e a redução de emissão de NOx foi avaliada (Wang, *et al.* 2002). Para esta avaliação, os autores utilizaram o teor de 30% de O₂ 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 NOx e maximização da transferência de calor.

Hwang, e Gore, 2002 desenvolveram 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 que o papel da fuligem na radiação foi potencializado.

Um estudo computacional foi elaborado baseado na fluidodinâmica computacional (CFD) da interação entre fuligem, radiação térmica e emissão de NOx em chamas turbulentas difusas enriquecidas com O₂, utilizando como combustível o propano (Wang *et al.*, 2005). Os autores fizeram um modelo estruturado da dinâmica da turbulência, acoplada ao mecanismo químico de formação da fuligem e de NOx, além do modelo de transferência de calor por radiação. Vale ressaltar que 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 (2005), que associado à equação mestra de Smoluchowski de momentum, apresentada por Frencklach (2002), forneceu a evolução da distribuição das partículas de fuligem além de sua dinâmica.

Na literatura também foram desenvolvidos estudos que correlacionaram a OEC com aspectos energéticos e ambientais com o uso de chamas confinadas, todavia sem a utilização de queimadores com swirl (Santos *et al.*, 2009, 2010, 2012).

Não foi identificado na literatura trabalhos sobre a utilização da OEC em queimadores com swirl que utilizam o controle da fuligem e de NOx para a avaliação do desempenho energético e ambiental.

O objetivo do trabalho é avaliar a influência da OEC do swirl na formação da fuligem e de NOx na queima de gás natural em uma chama confinada. Os teores volumétricos de oxigênio aplicados são de 21 e 25%.

2. METODOLOGIA E DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

O experimento analisa chamas geradas numa câmara de combustão, a qual consiste de um queimador com um tubo central com 5mm de diâmetro para a injeção de gás natural, e um swirler (dispositivo para injeção rotacional do oxidante) para escoamento do ar com número de swirl de 2,32. A chama é desenvolvida em uma câmara com 1.350mm de comprimento total e 187,3 mm de diâmetro. Gás natural escoo através do tubo interno, enquanto o ar puro, ou ar enriquecido, escoo através do swirler. O ar puro e oxigênio foram pré-misturados antes da entrada na câmara de combustão para a produção do ar enriquecido. Foram medidas no experimento a concentração da fuligem na chama, e a emissão de NOx na saída da câmara.

A radiação térmica foi medida nos mesmos pontos onde ocorreram as medições da concentração da fuligem na chama. A medição foi realizada através de um radiômetro com uma faixa de medição nos comprimentos de onda entre 0,6-3µm, de maior interesse para a radiação térmica emitida pela fuligem.

A concentração de NO_x – dada como a soma da concentração medida de NO e NO₂ – nos gases de exaustão foi medida na saída da câmara de combustão através de um analisador de gás portátil modelo TEMPSET 100, de fabricação da Telegan Monitoring Ltd. A Fig. 1 apresenta o dispositivo experimental. A Fig. 2 apresenta uma vista bidimensional da câmara de combustão com os seus dez pontos de medição para a concentração de fuligem e radiação térmica, enquanto a Fig. 3 apresenta vistas do queimador com swirl.

Para examinar os efeitos do teor de oxigênio no ar de combustão associada ao swirl, os testes foram realizados comparando os teores com ar puro (21% O₂) e 25% de O₂ no ar de combustão – nível de enriquecimento com O₂ de 4% –. Nos testes foram mantidos razões de equivalência (Φ) entre 1,1 – 0,9, dada como a relação entre a condição teórica de ar/combustível e a condição real testada. A vazão de gás natural foi mantida em 0,0003m³/s (18 L/min), estabelecido com 20°C e pressão atmosférica (101kPa). A Tab. 1 sumariza as condições usadas nas simulações.

Tabela 1. Condições testadas.

Teores de O ₂	Φ
21%, e	1,1
25%	1,0
	0,9



Figura 1. Dispositivo Experimental.

A concentração da fuligem (ϕ), dada em ppm, foi calculada através da técnica de extinção da luz de laser (*laser light extinction*), sendo:

$$\phi = \frac{\lambda}{6\pi \operatorname{Im} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]} K_{abs} \quad (1)$$

$$K_{abs} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_o}{I_L} \right) \quad (2)$$

λ , é o comprimento de onda do laser, L caminho óptico percorrido, I_o and I_L a intensidade do laser, antes e depois de percorrer a chama, e m é o índice refrativo da partícula de fuligem, adotado como m = 1.90-0.55i, conforme Lee e Tien

(1981), Hulst (1981) e Iuliis *et al.* (1998). No índice refrativo o item i representa a parte complexa, do número complexo que representa esse índice. Im na equação 1 representa a componente imaginária do cálculo em questão.

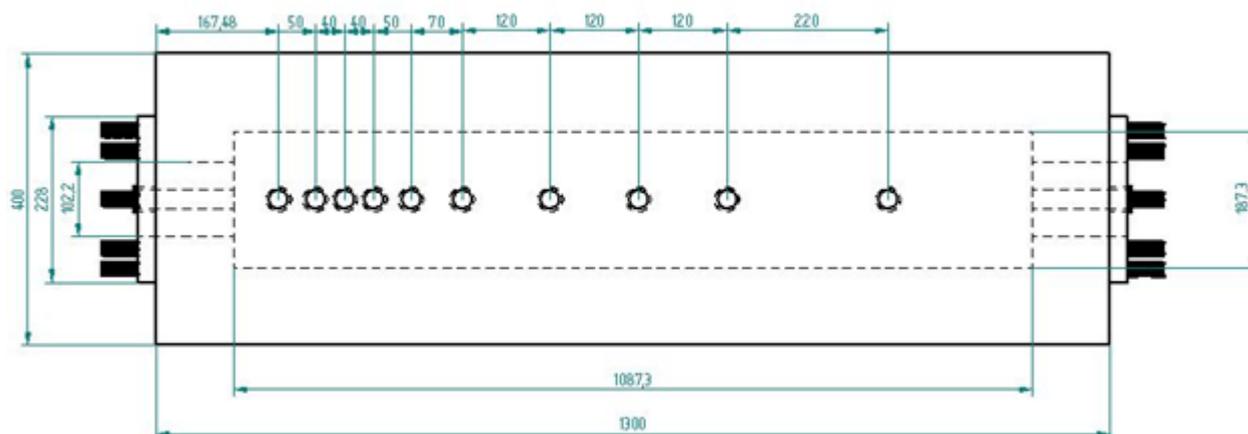


Figura 2. Vista longitudinal da câmara de combustão.

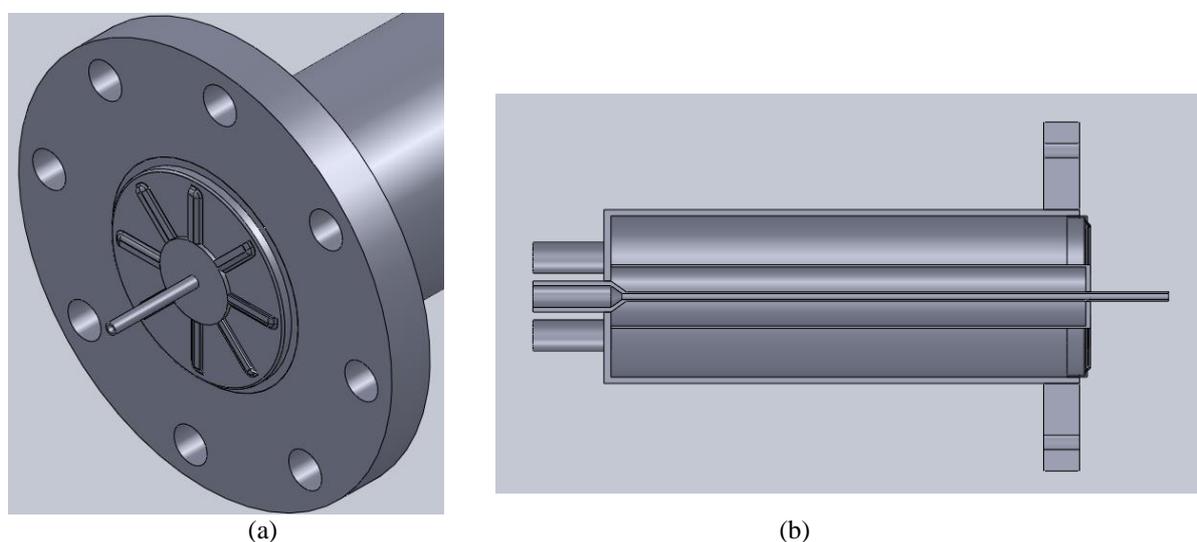


Figura 3. (a) Vista do Queimador com Swirl (b) vista em Corte do queimador com Swirl.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados com os dados identificados de concentração de fuligem, radiação térmica como também na emissão e NOx.

Na Fig. 4 é apresentada a emissão de NOx (NO e NO₂) para a razão de equivalência de 0,9, com os teores volumétricos de oxigênio de 21 (ar atmosférico) e 25%.

Como é verificado, na condição de $\Phi = 0,9$ a aplicação de um queimador com swirl ocasionou uma baixa emissão de NOx, imperceptível na escala indicada (a concentração de NOx é da ordem de 25 ppm). Isso possivelmente se dá pela recirculação gerada com o swirl que ocasionou uma redução de temperatura de chama, reduzindo a emissão do NOx térmico. Já com o uso da OEC associada ao swirl, houve um aumento da emissão de NOx, em especial do NO, causado possivelmente pelo aumento da temperatura de chama e possível baixa emissão de radiação térmica pela chama associada a baixa formação de fuligem (já que a radiação emitida pela chama é potencializada com a formação de fuligem). Isso poderá ser identificado com os resultados de formação de fuligem e radiação térmica.

Nas Fig. 5 e 6 são apresentados os resultados encontrados para a emissão de NOx para a condição de $\Phi = 1,0$ e 1,1 respectivamente. De maneira análoga, os resultados encontrados possuem o mesmo comportamento da condição de 0,9, possivelmente pela mesma justificativa.

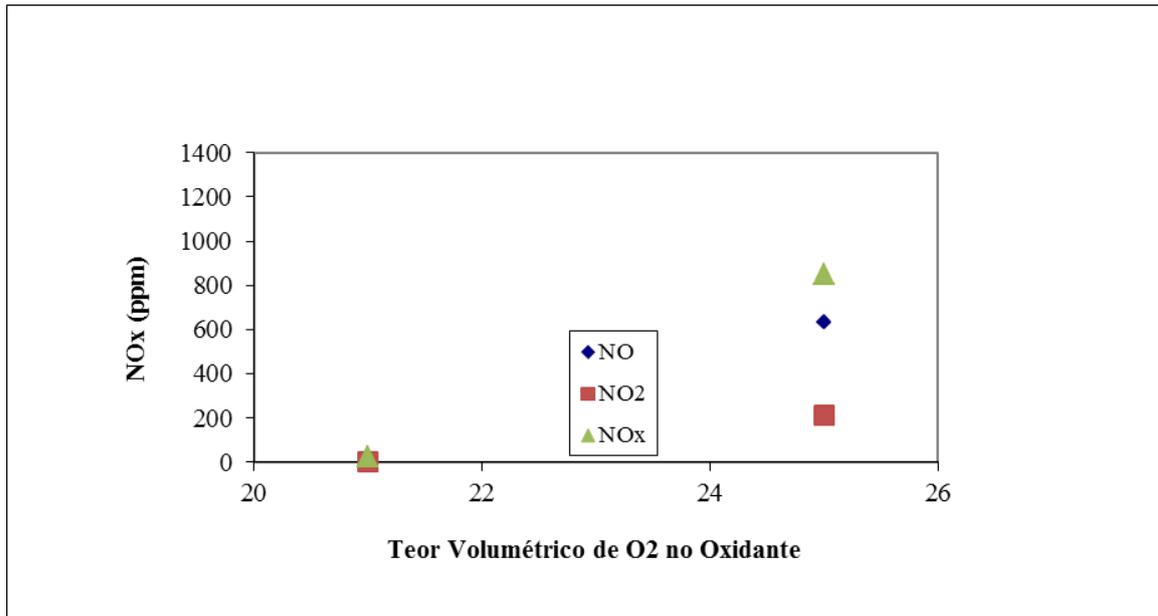


Figura 4. Emissão de NOx para $\Phi = 0,9$ e teores de O₂ de 21 e 25%.

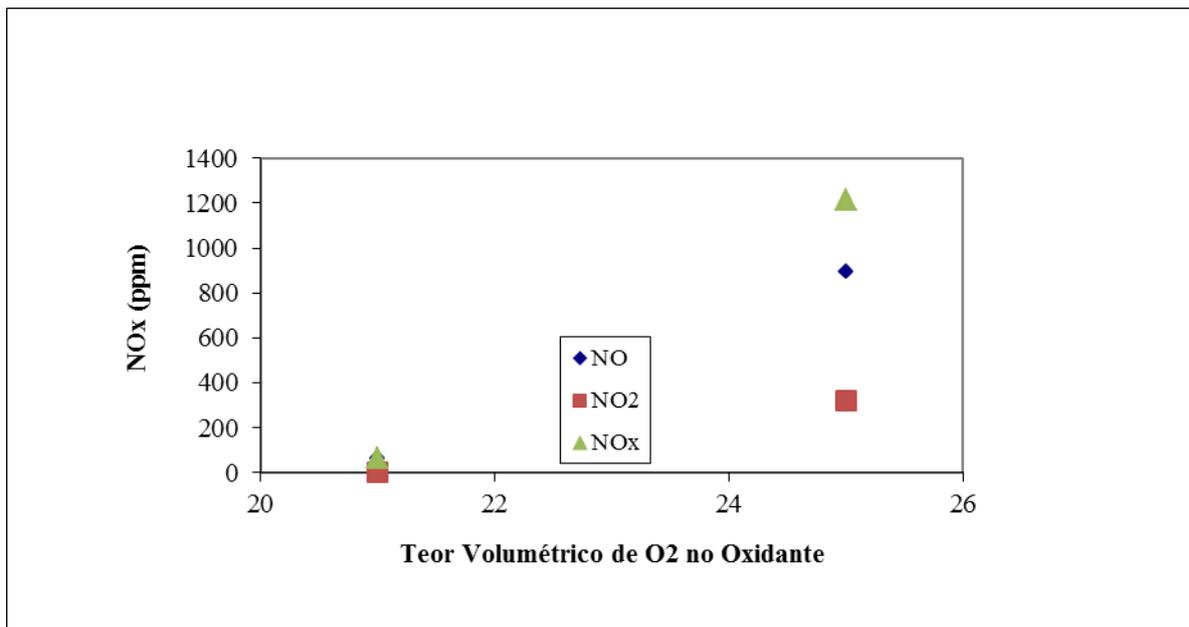


Figura 5. Emissão de NOx para $\Phi = 1,0$ e teores de O₂ de 21 e 25%.

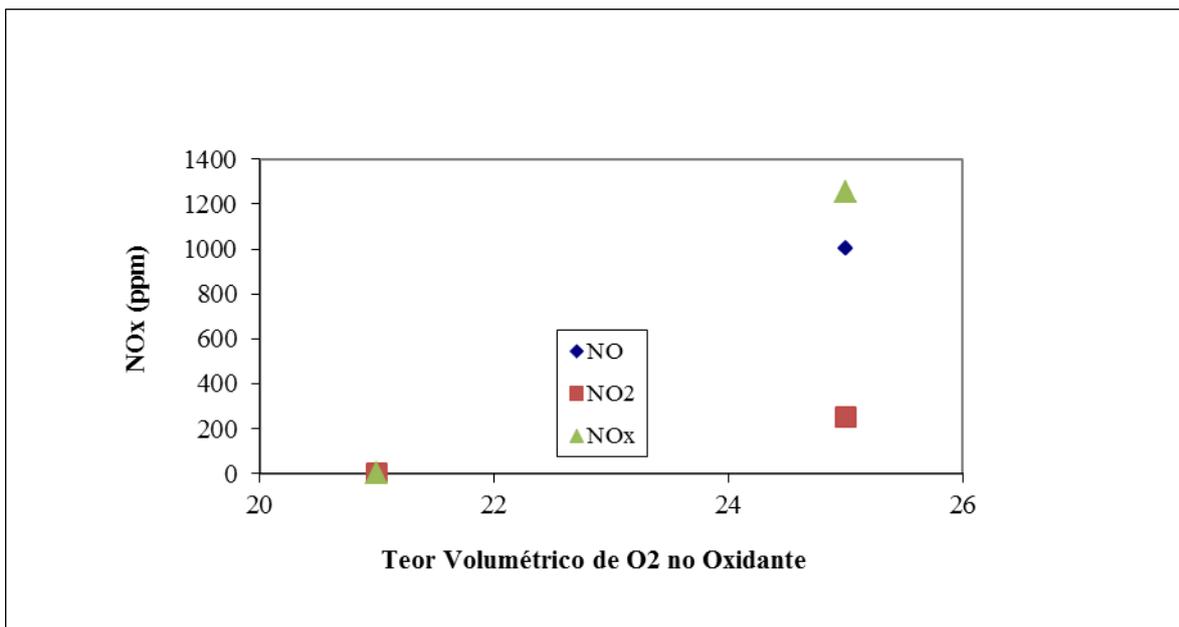


Figura 6. Emissão de NOx para $\Phi = 1,1$ e teores de O_2 de 21 e 25%.

Nas Fig. 7 e 8 são apresentadas a formação de fuligem ao longo da câmara (ao longo da posição longitudinal da chama) nas razões de equivalência de 0,9 e 1,1 com a queima de ar puro com o escoamento do ar com swirl. Percebe-se a baixa formação de fuligem em ambas as condições.

Da mesma forma, com a condição de 25% com swirl (Fig. 9 e 10), a formação de fuligem permanece com uma baixa formação. O mesmo comportamento é encontrado para a razão de equivalência de 1,0.

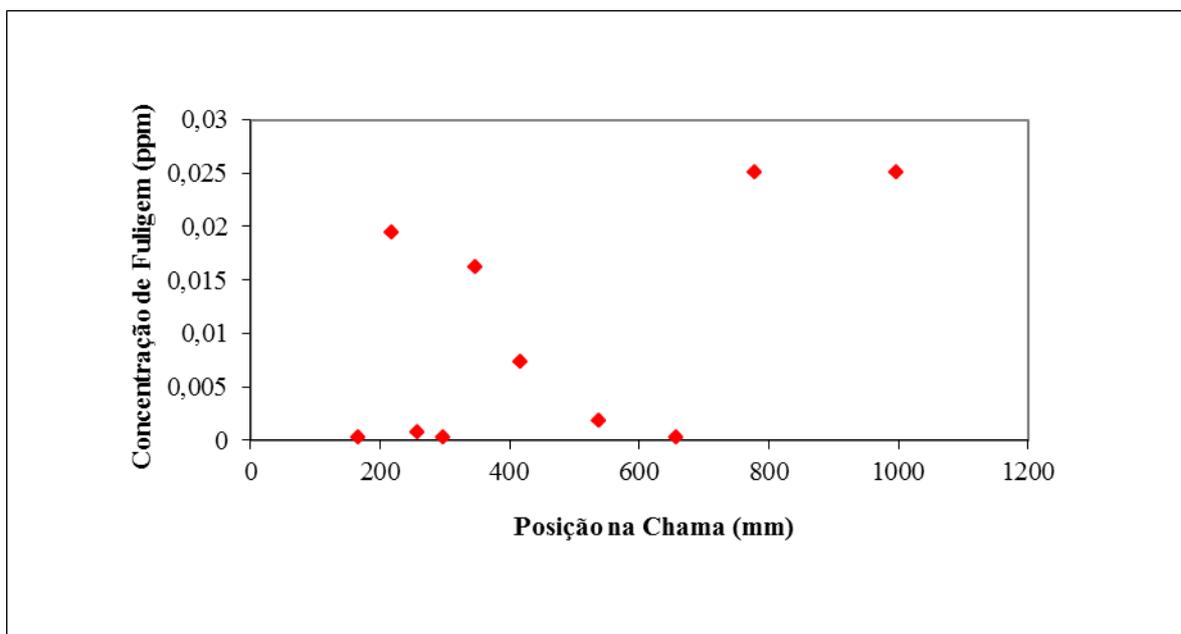


Figura 7. Concentração de fuligem ao longo da chama para $\Phi = 0,9$ e teor de O_2 de 21%.

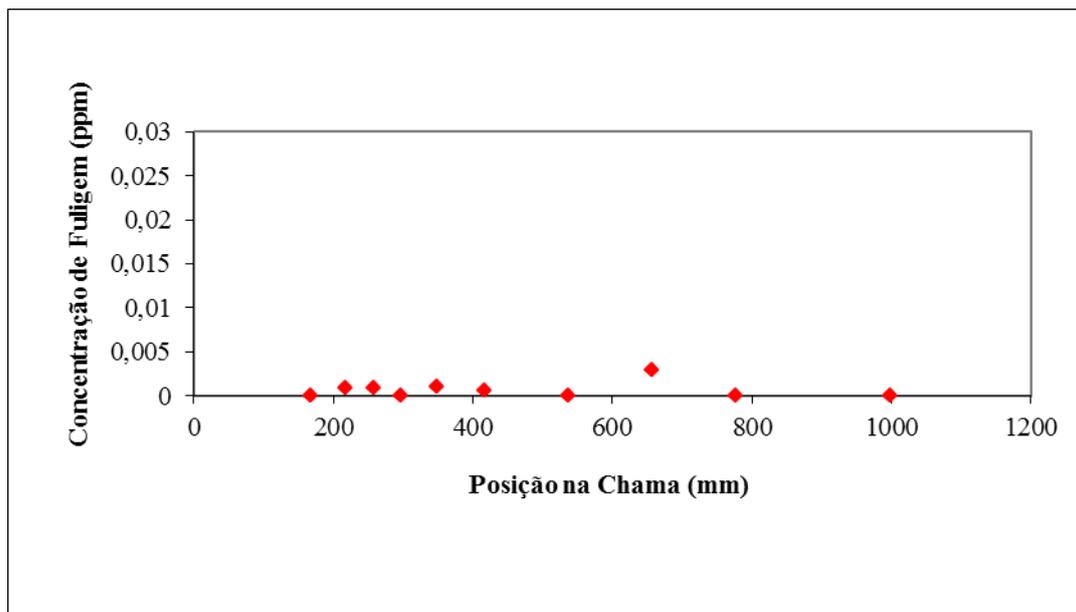


Figura 8. Concentração de fuligem ao longo da chama para $\Phi = 1,1$ e teor de O_2 de 21%.

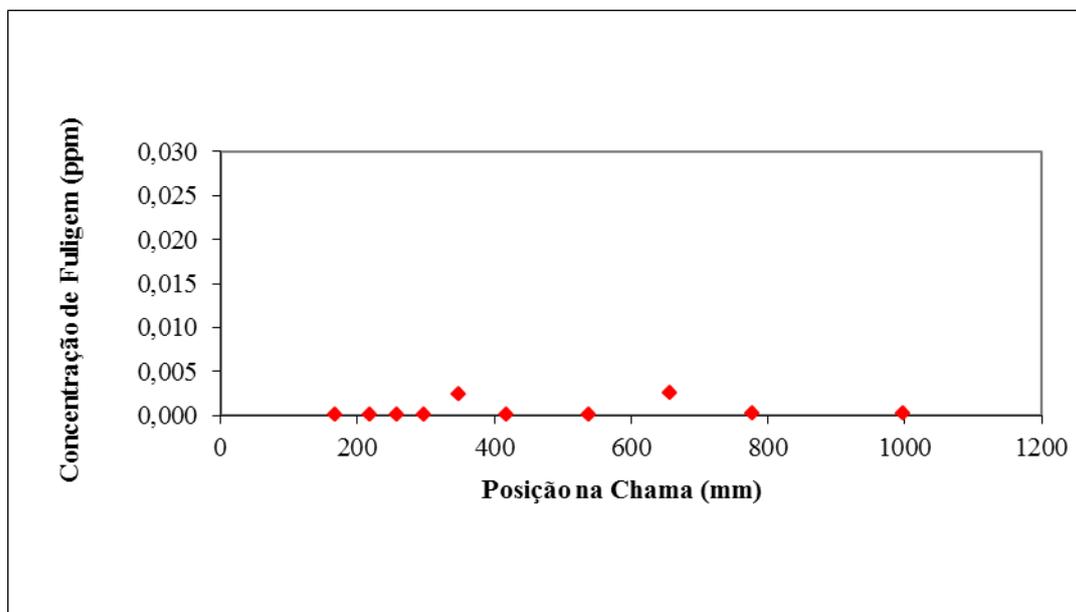


Figura 9. Concentração de fuligem ao longo da chama para $\Phi = 0,9$ e teor de O_2 de 25%.

As Fig. 11 e 12 apresentam o comportamento da radiação térmica emitida para a razão de equivalência de 0,9 nas condições de 21 e 25% com a queima com swirl, ao longo da posição longitudinal da chama.

Não houve aumento significativo da radiação térmica com o uso da OEC associada ao swirl. Apesar das chamas com a OEC possuírem uma maior energia disponível, a baixa formação de fuligem e possivelmente as zonas de recirculação criadas com o swirl, impediram um aumento acoplado da radiação térmica emitida, o que por sua vez também influenciou na emissão de NO_x anteriormente abordada. O mesmo comportamento foi encontrado para as razões de equivalência de 1,0 e 1,1.

Todavia, os resultados do trabalho são preliminares, e novos testes devem ser realizados para a confirmação das tendências aqui apresentadas.

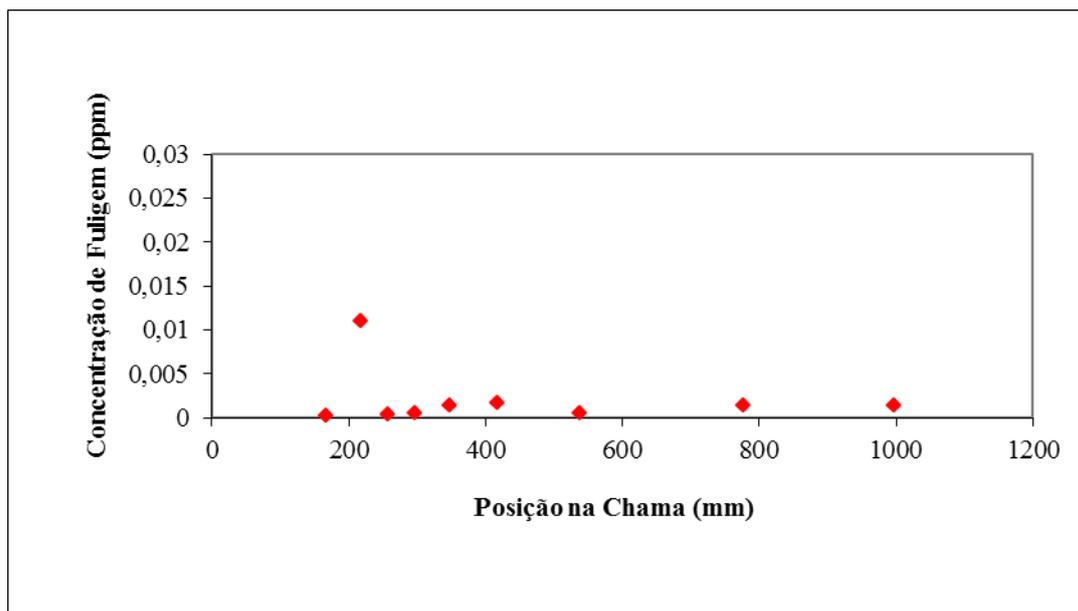


Figura 10. Concentração de fuligem ao longo da chama para $\Phi = 1,1$ e teor de O_2 de 25%.

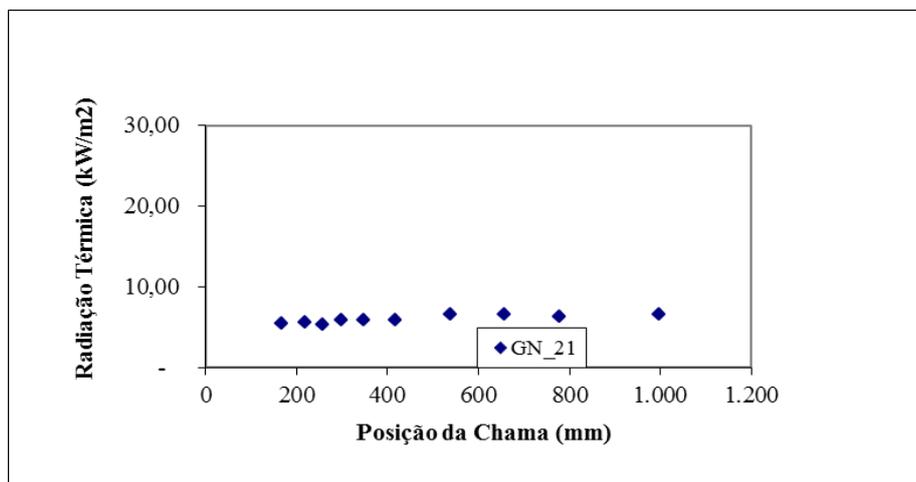


Figura 11. Radiação Térmica ao longo da chama para $\Phi = 0,9$ e teor de O_2 de 21%.

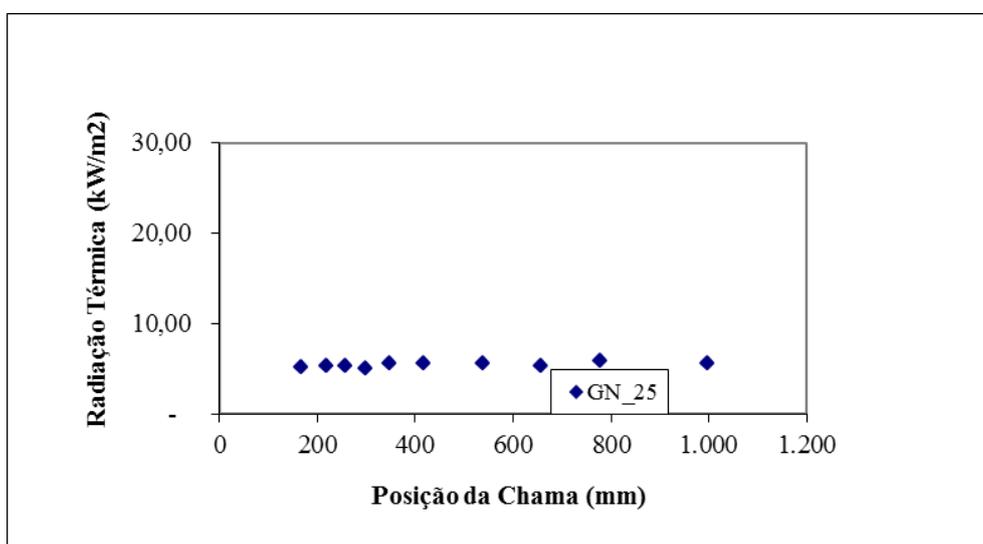


Figura 12. Radiação Térmica ao longo da chama para $\Phi = 0,9$ e teor de O_2 de 25%.

4. CONCLUSÕES

No trabalho em questão foram estudadas chamas de gás natural enriquecidas com oxigênio, através da técnica de enriquecimento com oxigênio (OEC) e com o uso de escoamento rotacional do ar (swirl). Como conclusões destacam-se:

- Não foi percebida influência do swirl na formação da fuligem com o uso combinado com a OEC.
- A emissão de NOx apresentou-se maior com o uso do swirl em combinação com a OEC, possivelmente pela não influência combinada entre a formação de fuligem e radiação térmica nos testes realizados, que reduz a temperatura de chama e conseqüentemente a emissão de NOx.

Todavia, por se tratar de resultados preliminares de um projeto de pesquisa ainda em curso, novos ensaios devem ser realizados para confirmar as tendências concluídas nesse trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio financeiro ao estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Baukal Jr., C.E. Oxygen-Enhanced Combustion. 1st ed. New York: CRC Press, 1998, 369p.
- Becker, H. A. e Liang, D., 1982, "Total Emission of Soot and Thermal Radiation by Free Turbulent Diffusion Flames", *Combustion and Flame*, v. 44, p. 305-318.
- Beltrame, A., Porsnev, P., Merchan-Merchan, W., Saveliev, A., Fridman, A., Kennedy, L.A., Petrova, O., Zhdanok, S., Amouri, F., Charon, O., 2001, "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flames", *Combustion and Flame*, v. 124, p. 295-310.
- Chen, S.L., Ma, H.K., Chen, D.Y., 1993, "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.
- Du, D.X., Axelbaum, R.L., Law, C.K., 1990, "The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flames", In: *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh : The Combustion Institute, Pittsburgh , p. 1501-1507.
- Ergut, A., Levendis, Y. A., Richter, H., Howard, J. B., Carlson, J., 2007, "The effect of equivalence ratio on the soot onset chemistry in one-dimensional, atmospheric-pressure, premixed ethylbenzene flames", *Combustion and Flame*, v. 151, p. 173-195.
- 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.
- Fairweather, M., Jones, W. P., Lindstedt, R. P., *Combust. Flame*, v. 89, p.45-63, 1992.
- Frenklach, M. *Chem. Eng. Sci.* V. 57, p.2229-2239, 2002.
- Ferrières, S. de, Bakali, A.E., Lefort, B., Montero, M., Pauwels, J.F., 2008, "Experimental and numerical investigation of low-pressure laminar premixed synthetic natural gas/O₂/N₂ and natural gas/H₂/O₂/N₂ flames", *Combustion and Flame*, v. 154, p. 601-623.
- Glassman, I., 1987, "Combustion", 2nd ed. Orlando: Academic Press Inc., p. 360-385.
- Glassman, I. e Yaccarino, P., 1980, "The Effect of Oxygen Concentration on Sooting Diffusion Flames", *Combustion Science and Technology*, v. 24, p. 107-114.
- Goldstein Jr., L., Fassani, F.L., Santos, A.A.B., Ferrari, C.A., 2002, "Experimental Study of Secondary Air Diffusion Effects on Soot Concentration along a Partially Premixed Acetylene/Air Flame", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, v. 29, No. 2, p. 223-231.
- Gülde, O.L., 1995, "Effects of oxygen in methane, propane and n- butane diffusion flames", *Combustion and Flame*, v. 101, p. 302-310.
- Gore, J. P., Jang, J. H., *J. Heat Transfer*, v. 114, p.234-242 , 1992.
- 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.
- Hwang, J.Y., Chung, S.H., Lee, W., 1998, "Effects of oxygen and propane addition on soot formation in counterflow ethylene flames and the role of C₃ chemistry", *Proc. Combust. Inst.*, v. 27, p. 1531-1538.
- Hwang S.S., Gore, J.P., 2002, "Characteristics of combustion and radiation heat transfer of an oxygen-enhanced flame burner", *Proc Instn Mech Engrs, J Power and Energy*, v. 216 Part A, p. 379-386.
- Hulst, H.C. "Light Scattering by Small Particles", New York: Dover Publications Inc., 1981.
- Hura, H.S., Glassman, L., 1988, "Soot formation in diffusion flames of fuel/oxygen mixtures", *Proc. Combust. Inst.*, v. 22, p. 371-378.
- Iulii, S., Barbini, M., Benecchi, S., Cignoli, F., Zizak, G., 1998, "Determination of the soot volume fraction in an ethylene diffusion flame by multiwavelength", *Combustion and Flame*, v. 115, p. 253-261.
- 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 n° 5.199.866, 1993.
- Kent, J.H., Bastin, S.J., 1984, "Parametric effects on sooting in turbulent acetylene", *Combustion and Flame*, v. 56, p. 29-42.

- Kumfer, B.M., Skeen, S.A. Chen, R., Axelbaum, R.L., 2006, "Measurement and analysis of soot inception limits of oxygen-enriched coflow flames", *Combustion and Flame*, v. 147, p. 233-242.
- Kumfer, B.M., Skeen, S.A., Axelbaum, R.L., 2008, "Soot inception limits in laminar diffusion flames with application to oxy-fuel combustion", *Combustion and Flame*, v. 154, p. 546-556.
- Lee, S.C., Tien, C.L., 1981, "Optical constants of soot in hydrocarbon flames", *Proc. Combust. Inst.*, v. 18, p. 1159-1166.
- Lee, K.O., Megaridis, C.M., Zelepouga, S., Saveliev, A.V., Kennedy, L.A., Charon, O. e Ammouri, F., 2000, "Soot Formation Effects of Laminar Coannular Nonpremixed Methane/Air Flames", *Combustion and Flame*, v. 121, p. 323-333.
- Leung, K.M., Lindstedt, R.P., 1991, "A simplified reaction mechanism for soot formation in non premixed flames", *Combustion and Flame*, v. 87, p. 289-305.
- Nabors Jr, J.K., Andrews, W.C. Burner Apparatus and Method of Operation Thereof, U.S. Patent nº 5.302.112, 1994.
- Saito, K., Williams, F.A., Gordon, A.S., 1986, "Effects of oxygen on soot formation in methane diffusion flames", *Combust. Sci. Technology*, v. 47, p. 117-138.
- 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.
- Santos, A. A. B.; Torres, E. A.; Pereira, P. A. P.; Twenty-Third International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2010, 638-1032-1.
- Santos, A. A. B.; Torres, E. A.; Pereira, P. A. P.; Twenty-Second International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2009, R30340B.
- Santos, A.A.B., Goldstein Jr, L., Ferrari, C.A., 2009, An Experiment on the Effect of Oxygen Content and Air Velocity on Soot Formation in Acetylene Laminar Diffusion Flame Produced in a Burner with a Parallel Annular Coaxial Oxidizer Flow, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, pp. 445-450.
- Slavejkov, A.G., Zurecki, Z., Joshi, M.L., Nabors, J.K. Method and Apparatus for Oxy-fuel Heating with Lowered NO_x in High Temperature Corrosive Environments, U.S. Patent nº 5.256.058, 1993.
- Slavejkov, A.G., Zurecki, Z., Joshi, M.L., Nabors, J.K. Method and Apparatus for Oxy-fuel Heating with Lowered NO_x in High Temperature Corrosive Environments, U.S. Patent nº 5.346.390, 1994.
- Slavejkov, A.G., Gosling, T.M., Knorr Jr, R.E.. Method and Device for Low NO_x High Efficiency Heating in High Temperature furnaces, U.S. Patent nº 5.575.637, 1996.
- Turns, S.R., 1996, "An Introduction to Combustion - Concepts and Applications", 1st ed. Singapore: McGraw-Hill Int. Editions, 543p.
- Wang, H. Frenklach, M. *Combust. Flame*, v. 110, p. 173-221, 1997.
- Wang, L., Endrud, N. E., Turns, S.R., D'Agostini, M.D., Slavejkov, A. G., 2002, "A study of the influence of Oxygen Index on soot, radiation, and emission characteristics of turbulent jet flames", *Combustion Science and Technology*, v. 174(8), p. 45-72.
- Wang, L., Haworth, D.C., Turns, S.R., Modest, M.F., 2005, "Interactions Among Soot, Thermal Radiation, and NO_x Emissions in Oxygen-Enriched Turbulent Nonpremixed Flames: A Computational Fluid Dynamics Modeling Study", *Combustion and Flame*, v. 141, p. 170-179.
- Wey, C., 1994, "Simultaneous measurements of soot formation and hydroxyl concentration in various oxidizer diffusion flames", *Int. Soc. for Optical Engineering*, v. 2122, p. 94-106.
- Zelepouga, S.A., Saveliev, A.V., Kennedy, L.A., Fridman, A.A., 2000, "Relative Effect of Acetylene and PAHs Addition on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames of Methane with Oxygen and Oxygen-Enriched Air", *Combustion and Flame*, v. 122, p. 76-89.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SWIRL INFLUENCE ON SOOT FORMATION AND NO_x OF NATURAL GAS FLAMES WITH OEC

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

Paulo Roberto de Freitas Neves, paulon@fieb.org.br¹

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

¹SENAI CIMATEC, Orlando Gomes Avenue, 1845, Piatã, ZIP code: 41650-010, Salvador/Bahia/Brazil.

Abstract: Industrial burners for better efficiency and control flames have applications with swirl control (the number of rotation of the oxidant flow). However its effects with the use of oxygen enhanced combustion (OEC) is little explored in the literature, like the aspect of their coupled influence on the formation of soot and NO_x, two major pollutants in the atmosphere, which is important in applications with fossil fuels to reduce the environmental impact of their use. The OEC brings interesting results, such as increased productivity, thermal efficiency, lower volume of exhaust gases, greater process efficiency heat transfer and reduced fuel consumption. This technique is already widespread in processes that work with high temperatures as steel mills, ceramics and waste incinerators, however no records of use in power plants and oil and gas industry. The objective the work is to evaluate the influence of the OEC with swirl on the formation of soot and NO_x in the burning of natural gas in a confined flame. The volumetric oxygen levels applied are 21 and 25%.

Keywords: natural gas, combustion, soot, NO_x, swirl.