

Artigo

Avaliação das Taxas de Emissão de Formaldeído e Acetaldeído em Chamas de Gás Natural Confinado com OEC**Santos, A. A. B.;*** dos Santos, F. N.; Torres, E. A.; Pereira, P. A. P.*Rev. Virtual Quim.*, 2016, 8 (4), 1181-1191. Data de publicação na Web: 9 de agosto de 2016<http://rvq.sbq.org.br>**Evaluation of Formaldehyde and Acetaldehyde Emission Rates in Natural Gas Confined Flames with OEC**

Abstract: This study evaluates experimentally the technique of oxygen enhanced combustion – OEC – and its interaction with emission rates of both formaldehyde and acetaldehyde – precursors for the production of tropospheric ozone and other atmospheric pollutants – in natural gas confined flames. The experiment analyzed low enrichment with oxygen, which does not require significant existing equipment changes. The emission rates were verified by analysis in liquid chromatography. Through the use of oxidizer enrichment of 2 and 4%, the emission rates of formaldehyde and acetaldehyde were reduced with OEC in comparison with the use of atmospheric air as oxidant. The formaldehyde/acetaldehyde ratio on the tested conditions indicates a likely preferential reduction of formaldehyde emissions.

Keywords: Formaldehyde; Acetaldehyde; Oxygen Enhanced Combustion; OEC.

Resumo

Este estudo avalia experimentalmente a interação da técnica de combustão enriquecida com oxigênio – OEC – com as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído – precursores para a produção de ozônio troposférico e outros poluentes atmosféricos – em chamas confinadas de gás natural. O experimento analisou condições de baixo enriquecimento com oxigênio, o que não requer mudanças significativas em equipamentos existentes. As taxas de emissão de acetaldeído e formaldeído foram verificadas através da cromatografia líquida. Os resultados demonstraram que o enriquecimento de 2 e 4% do oxidante reduz as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído com OEC em comparação com o uso do ar atmosférico como oxidante. A proporção de formaldeído/acetaldeído nas condições testadas indicou uma provável redução preferencial de emissões de formaldeído.

Palavras-chave: Formaldeído; Acetaldeído; Combustão enriquecida com oxigênio; OEC.

* Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia, CEP 41650-010, Salvador-BA, Brasil.

✉ alex.santos@fieb.org.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20160084](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160084)

Avaliação das Taxas de Emissão de Formaldeído e Acetaldeído em Chamas de Gás Natural Confinado com OEC

Alex Álisson B. Santos,^{a,*} Fábio N. dos Santos,^b Ednildo A. Torres,^{c,d} Pedro A. P. Pereira^{b,d}

^a Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia, CEP 41650-010, Salvador-BA, Brasil.

^b Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química, CEP 40170-290, Salvador-BA, Brasil.

^c Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, CEP 40210-730, Salvador-BA, Brasil.

^d Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia e Ambiente, CEP 40170-290, Salvador-BA, Brasil.

* alex.santos@fieb.org.br

Recebido em 6 de agosto de 2016. Aceito para publicação em 6 de agosto de 2016

1. Introdução
2. Materiais e Métodos
3. Resultados e Discussão
4. Conclusões

1. Introdução

A Combustão enriquecida com oxigênio (OEC) pode melhorar o processo de combustão pela sua influência positiva nas características de chamas (maior limite de inflamabilidade, melhor ignição, controle da estabilidade e da forma), como também trazendo menores volumes de gases de combustão, aumento da produtividade e da eficiência térmica (maior eficiência de processo de transferência de calor, qualidade de produto melhorada; redução do consumo de combustível, redução de custos de matéria-prima, custos reduzidos de novos equipamentos e, possivelmente, aumento da produção em equipamento existente).¹

O ar atmosférico contém cerca de 21% de oxigênio em volume. Baixos níveis de enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, ou seja, índices de O₂ abaixo de 30%, são normalmente utilizados em aplicações de modernização em que apenas pequenas modificações para os equipamentos existentes são necessárias.

Em uma chama difusa, característica dos queimadores industriais mais populares, os reagentes são inicialmente separados, e a reação ocorre apenas na interface entre o combustível e o oxidante onde mistura e reação ocorrem. A adição de oxigênio em chamas de difusão pode ser realizada pela adição direta do combustível, ou pelo ar de combustão em um queimador com um oxidante anular, paralelo ou de contrafluxo.¹

Os queimadores industriais são uma importante fonte de emissão de poluentes na atmosfera, entre os quais, dióxidos de nitrogênio (NO_x), partículas em suspensão e aldeídos, tais como formaldeído e acetaldeído, que são precursores importantes na formação do ozônio e oxidantes fotoquímicos na atmosfera. As emissões de formaldeído e acetaldeído não são monitoradas em fontes fixas de combustão no país, já que não há legislação para a regulamentação dessas emissões no Brasil. Essas fontes fixas de combustão, como caldeiras e fornos, são utilizadas em indústrias e estabelecimentos comerciais como hotéis, shoppings e restaurantes. A exaustão dessas fontes fixas é dada através de dutos e chaminés acopladas aos equipamentos, local onde deve ser realizado o monitoramento dessas emissões, semelhante como é feito o monitoramento das emissões reguladas. A emissão de formaldeído e acetaldeído na atmosfera já fora estudada por diferentes autores.²⁻¹⁷

Muitas pesquisas visam avaliar as emissões de formaldeído e acetaldeído em motores de combustão quando este é abastecido com diferentes tipos de combustíveis.¹¹⁻¹³ Além disso, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com intuito de avaliar não só a emissão de tais compostos como também sua reatividade, níveis de concentração e efeitos toxicológicos.¹⁴ Além da formação de formaldeído e acetaldeído em uma variedade de reações fotoquímicas importantes,²⁰ há também as emissões diretas partindo de fontes biogênicas e antropogênicas (especialmente escapamentos de automóveis).¹⁵

O isótopo de carbono têm sido analisado para a identificação de fonte de formaldeído e acetaldeído, e os resultados mostraram que o método de isótopo de carbono pode ser um indicador valioso para a identificação de fontes de compostos de aldeídos na atmosfera.¹⁶

Apesar se existir na literatura um extenso volume de trabalhos sobre as emissões de formaldeído e acetaldeído e sua reatividade e

fontes de emissão, não foi possível obter estudos para processos de combustão industrial, sobre as emissões destes compostos. A discussão sobre o tema em questão recai somente em estudos sobre emissões em combustão residencial, chamas abertas e motores.²¹⁻³³

Estudos sobre a influência do OEC nas emissões de formaldeído e acetaldeído, como também sobre as emissões destes compostos em queimadores industriais, não foram encontrados na literatura. Isso indica uma lacuna de pesquisa sobre essas emissões em aplicações industriais.

Neste contexto, o objetivo principal do presente trabalho foi explorar o efeito do teor de oxigênio sobre as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído em chamas difusas confinadas de gás natural. As chamas foram produzidas em uma câmara de combustão com um fluxo anular paralelo do oxidante para aplicações industriais, tal que o escoamento do gás natural seja circundado por um fluxo de ar, ou ar enriquecido com oxigênio. Os níveis de enriquecimento aplicados foram de 23% e 25% de O_2 (2% e 4% de enriquecimento no oxidante com oxigênio) normalmente usados em aplicações de modernização de queimadores onde apenas pequenas modificações nos equipamentos existentes são necessárias.

2. Materiais e Métodos

O aparato de combustão (queimador, câmara e acessórios) utilizado neste estudo foi minuciosamente descrito em pesquisa anterior,³⁴ A Figura 1 apresenta o esquema da instalação experimental, enquanto a Figura 2 apresenta uma imagem da instalação. A chama foi produzida em uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, que consistia de um queimador com dois tubos concêntricos: um tubo central com diâmetro de 5 mm e um tubo externo com diâmetro de 100 mm em uma câmara de 1,35 m de comprimento. O gás natural escoou através do tubo interno, enquanto o ar, ou ar

enriquecido, escoam através da região anular entre o tubo e tubo concêntrico de maior diâmetro. A vazão de gás natural foi controlada por válvula- e medida por rotâmetro, mantendo para os experimentos a

vazão para o gás natural em 18 L/min. Oxigênio e ar de difusão foram pré-misturados, antes de serem injetados na câmara de combustão.

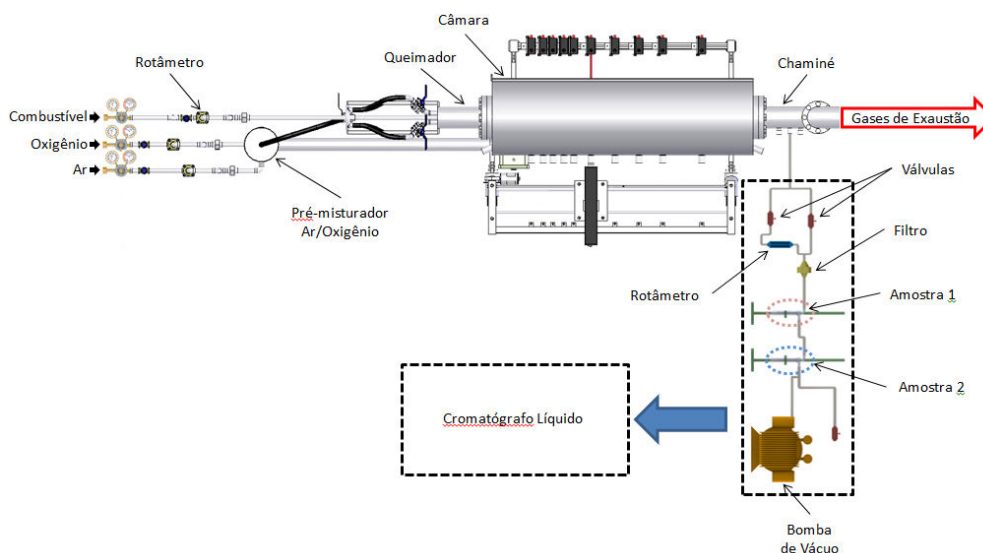


Figura 1. Esquema do dispositivo experimental



Figura 2. Vista da câmara de combustão

O sistema de amostragem indicado na Figura 3 foi usado para a amostragem de formaldeído e acetaldeído presente nos gases de exaustão na saída da câmara de

combustão. Em cada amostragem foi utilizado um filtro de celulose, antes do sistema de coleta dos aldeídos, impregnado com iodeto de potássio solução a 5% (KI) a

fim de impedir que o interferência de ozono.¹³ Após a amostragem as soluções contendo as hidrazonas dos aldeídos foram identificadas e quantificadas d utilizando um

cromatógrafo líquido acoplado a um detector na absorção ultravioleta-visível (HPLC-UV/VIS).



Figura 3. Sistema de amostragem de formaldeído e acetaldeído

O sistema de amostragem era formado por regulador de vazão do tipo rotâmetro, frascos borbulhadores do tipo impinger em série contendo a solução derivatizante de 2,4-dinitrofenilhidrazina e bomba de vácuo. Os gases provenientes da saída da câmara eram succionados pela bomba de vácuo, a uma vazão de 0,4L/min durante 5 minutos, e borbulhados na solução do reagente derivatizante 2,4-dinitrofenilhidraniza, para reação e formação das respectivas hidrazonas. Após a coleta as soluções eram transferidas para balão volumétrico, avolumadas para 10mL com acetonitrila e guardadas em refrigerador até o momento da análise.

A separação foi feita em coluna Xterra®MS C18 5µm 2.1x250mm, mediante a injeção de 0,2µL de amostra. A fase móvel era constituída por acetonitrila (A) e água (B), de acordo com a seguinte programação de gradiente: 40% de B (0 minutos) → 60% de B (8 minutos) → 60% de B (10 minutos). A

vazão utilizada foi de 0,30 mL/min. A quantificação foi feita mediante curvas analíticas por padrões externos. Injeção, amostragem e análise foram realizadas em duplicata.

Para examinar o efeito do enriquecimento de oxigênio do ar de combustão, os testes foram realizados comparando ensaios com 23% e 25% de O₂ com experimentos com ar atmosférico (21% de O₂). Nos testes, as relações de equivalência foram mantidas ao longo de um intervalo (1.3 - 0.7). A vazão de gás natural foi de 0.0003 m³/s (18 L/min), considerando a temperatura de 20 °C e à pressão atmosférica. A potência do queimador foi de 9.76kW.

A Tabela 1 resume as condições usadas nos testes. A Tabela 2 apresenta a composição do gás natural e suas características, condição típica do gás natural produzido no Brasil. O escoamento do gás natural se deu em um regime de transição (laminar para a turbulência).

Tabela 1. Condições usadas nos testes

Teor de O ₂ (%)	Taxa de equivalência
21	
23	1,3; 1,1; 1,0; 0,9 e 0,7
25	

Tabela 2. Composição do gás natural e suas características no experimento

Composição e características	Valores
Metano	88,82% vol.
Etano	8,41% vol.
Propano	0,55% vol.
N ₂	1,62% vol.
CO ₂	0,60% vol.
PCS (kJ/m ³)	39.329,60
PCI (kJ/m ³)	35.564,00

A formação de aldeídos nas condições estudadas foi avaliada a partir das taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído na saída da câmara de combustão, uma vez que esses dois compostos carbonílicos são os mais comumente formados na queima de gás natural. Foram realizados um total de quinze experimentos para avaliar o efeito do índice de oxigênio sobre as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído.

3. Resultados e Discussão

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados encontrados para as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído, respectivamente, na saída da câmara de combustão.

Através da Figura 4 é possível observar que não existe uma tendência clara da

redução das taxas de emissão de formaldeído com o aumento do índice de oxigênio na mistura. As taxas de emissão mostraram uma diminuição em relação à razão de equivalência, uma vez que correspondem a concentrações mais baixas de oxidante na mistura oxidante/combustível, reduzindo a sua composição inicial através da oxidação do combustível.

Desde que maiores razões de equivalência correspondem a menores razões comburente/combustível efetivamente utilizadas, a menor concentração de oxidante disponível na mistura tem como efeito a redução na taxa de emissão de aldeídos, formados por oxidação direta de hidrocarbonetos. O comportamento observado nas taxas de emissão de acetaldeído foi semelhante ao de formaldeído, conforme apresentado na Figura 5.

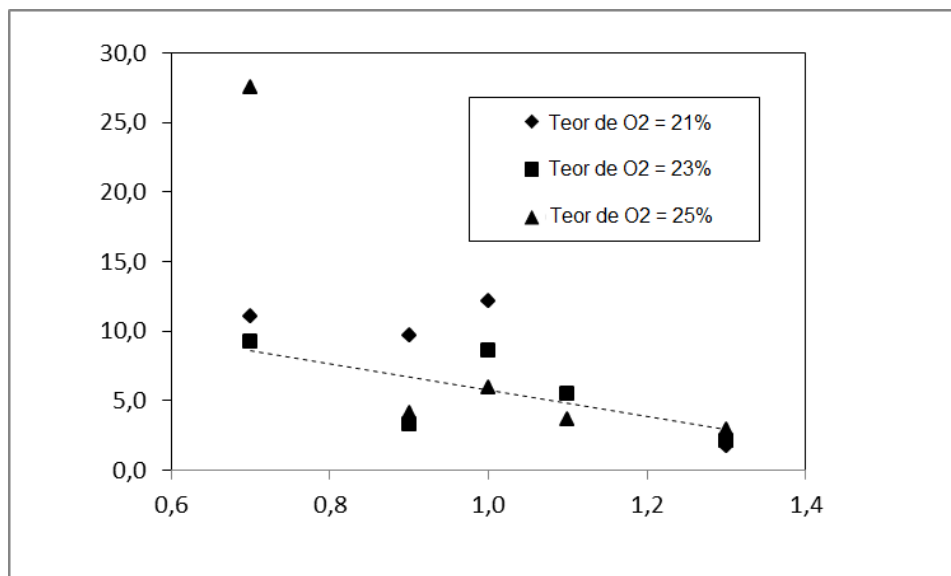


Figura 4. Taxa de emissão de formaldeído como função da taxa de equivalência e do teor de O₂ no oxidante

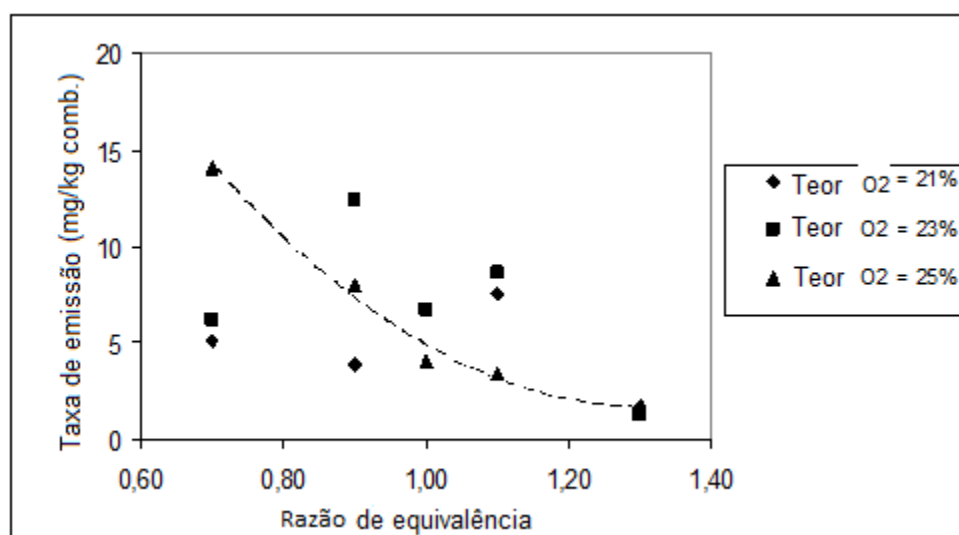


Figura 5. Taxa de emissão de acetaldeído como função da taxa de equivalência e do teor de O₂ no oxidante

As Figuras 6 e 7 apresentam os valores médios das razões formaldeído/acetaldeído em função da razão de equivalência e do teor de oxigênio, respectivamente. Os valores variam entre 0,7 a 1,5 para diferentes razões de equivalência e entre 0,9 e 1,5 para diferentes níveis de oxigênio na chama.

Os valores da razão formaldeído/acetaldeído variaram entre 1,5 e 0,69 com média de 1,07 para cinco diferentes razões de equivalência. Por outro lado,

variaram entre 1,51 e 0,87, com média de 1,16 para os diferentes teores de oxigênio na chama. Verifica-se assim que, em média, a razão foi ligeiramente maior que 1,0 para as condições testadas. Isto possivelmente decorre da natureza do combustível queimado, o gás natural, já que a maior parcela de sua composição é o metano (~ 89%), composto que, quando oxidado favorece a formação do formaldeído.

Estudos relacionados com a emissão de aldeídos em queimadores industriais não foram encontrados na literatura. No entanto, resultados para motores de combustão

interna, usando gás natural relataram uma razão formaldeído/acetaldéido cerca de três vezes maior.¹¹ A Tabela 3 apresenta os resultados desta comparação.

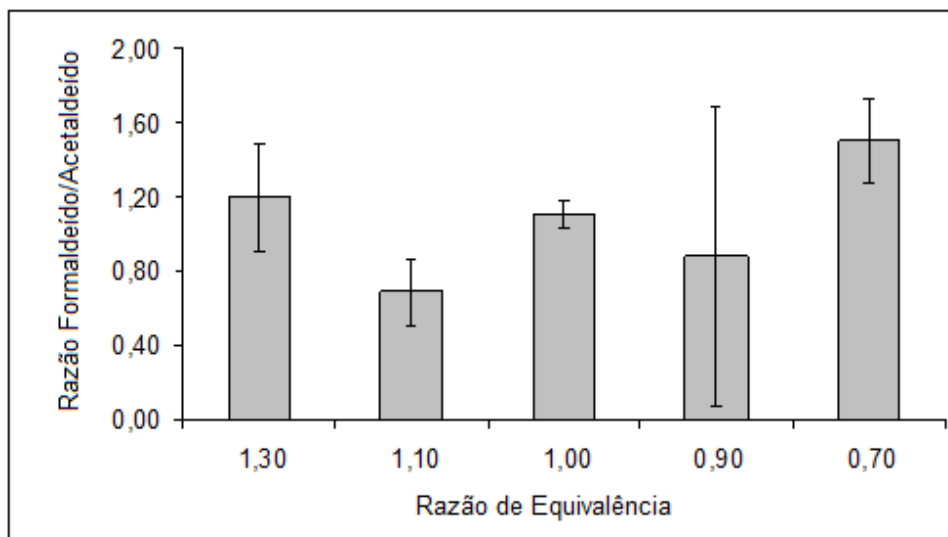


Figura 6. Taxa formaldeído/acetaldéido como função da taxa de equivalência

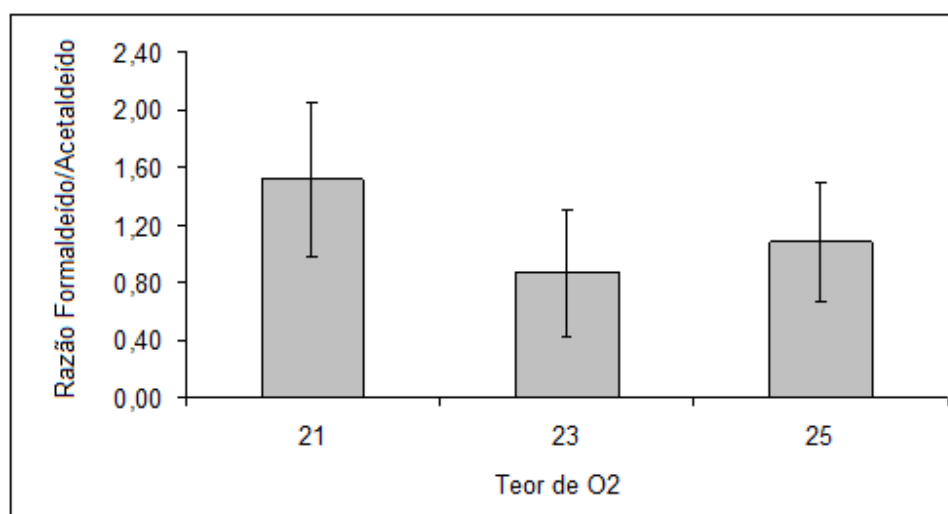


Figura 7. Taxa formaldeído/acetaldéido como função do teor de O₂ no oxidante

O gás natural é composto principalmente de metano, e conseqüentemente sua oxidação gerará formaldeído com grupo funcional carbonila. A proporção de formaldeído/acetaldéido perto de 1,0 encontrada deriva de uma provável diminuição na formação e emissão de formaldeído em condições de combustão

empregada, possivelmente derivada da diferença de tecnologia e as relações de equivalência utilizadas. Isso constitui um benefício ambiental, uma vez que este composto é altamente tóxico quando presente na atmosfera e participa da formação do ozônio e oxidantes fotoquímicos.

Tabela 3. Comparação dos resultados experimentais das emissões de formaldeído e acetaldeído com a literatura.

Condição Testada	Concentração (ppm)		Razão Formaldeído/Acetaldeído
	Formaldeído	Acetaldeído	
Teor O ₂ = 21% Gás Natural	6,94	4,56	1,51
Teor O ₂ = 23% Gás Natural	4,60	7,02	0,87
Teor O ₂ = 25% Gás Natural	3,31	4,25	1,08
Teor O ₂ = 21% Gás Natural* ¹¹	15,54	4,66	3,42

* Testes em motores de combustão interna

4. Conclusões

O presente trabalho investigou o efeito do enriquecimento com oxigênio no comburente da combustão sobre as taxas de emissão de formaldeído e acetaldeído de uma chama difusa confinada de gás natural. Os níveis de enriquecimento do ar que foram aplicados foram 2% e 4% (23 e 25% de O₂) e pode ser aplicado na modernização de queimadores onde apenas pequenas modificações no equipamento existente são necessárias.

A formação e a emissão de formaldeído e acetaldeído com OEC em chamas confinadas de gás natural são influenciadas pela relação de concentração e razão de equivalência de oxigênio na mistura oxidante/combustível. Maiores razões de equivalência reduzem essas emissões. A proporção de formaldeído/acetaldeído nas condições testadas indica uma provável redução referencial de emissões de formaldeído.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pelo Departamento Nacional do SENAI– Brasil e do SENAI CIMATEC.

Referências Bibliográficas

- ¹ Baukal Jr., C. E.; *Oxygen-Enhanced Combustion*, CRC Press: New York, 1998.
- ² Gülder, O. L. Effects of oxygen in methane, propane and n- butane diffusion flames. *Combustion and Flame* **1995**, *101*, 302. [CrossRef]
- ³ Glassman, I.; Yaccarino, P. The effect of oxygen concentration on sooting diffusion flames. *Combustion Science and Technology* **1980**, *24*, 107. [CrossRef]
- ⁴ Zelepouga, S. A.; Saveliev, A. V.; Kennedy, L. A.; Fridman, A. A. 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* **2000**, *122*, 76. [CrossRef]
- ⁵ 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* **2002**, *174*, 45. [CrossRef]
- ⁶ Goldstein Jr., L., Fassani, F. L.; Santos, A. A. B.; Ferrari, C. A. Experimental study of secondary air diffusion effects on soot concentration along a partially premixed acetylene/air flame. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2002**, *29*, 223. [CrossRef]
- ⁷ Kumfer, B. M.; Skeen, S. A.; Chen, R.; Axelbaum, R. L. Measurement and analysis of soot inception limits of oxygen-enriched

- coflow flames. *Combustion and Flame* **2006**, *147*, 233. [CrossRef]
- ⁸ Ergut, A.; Levendis, Y. A.; Richter, H.; Howard, J. B.; Carlson, J. The effect of temperature on the soot onset chemistry in one-dimensional, atmospheric-pressure premixed ethylbenzene flames. *Combustion and Flame* **2007**, *151*, 173. [CrossRef]
- ⁹ de Ferrières, S.; El Bakalia, A.; Lefort, B.; Montero, M.; Pauwels, J. F. Experimental and numerical investigation of low-pressure laminar premixed synthetic natural gas/O₂/N₂ and natural gas/H₂/O₂/N₂ flames. *Combustion and Flame* **2008**, *154*, 601. [CrossRef]
- ¹⁰ Santos, A. A. B.; Goldstein Jr., L.; Ferrari, C. A. 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* **2009**, *36*, 445. [CrossRef]
- ¹¹ Corrêa, S. M.; Arbillia, G. Formaldehyde and acetaldehyde associated with the use of natural gas as a fuel for light vehicles. *Atmospheric Environmental* **2005**, *39*, 4513. [CrossRef]
- ¹² Guarieiro, L. L. N.; Souza, A. F.; Torres, E. A.; Andrade, J. B. Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils. *Atmospheric Environmental* **2009**, *43*, 2754. [CrossRef]
- ¹³ Rodrigues, M. C.; Guarieiro, L. L. N.; Cardoso, M. P.; Carvalho, L. S.; Rocha, G. O.; Andrade, J. B. Acetaldehyde and formaldehyde concentrations from sites impacted by heavy-duty diesel vehicles and their correlation with the fuel composition: Diesel and diesel/biodiesel blends. *Fuel* **2012**, *92*, 258. [CrossRef]
- ¹⁴ de Andrade, M. V. A. S.; Pinheiro, H. L. C.; Pereira, P. A. P.; de Andrade, J. B. Compostos Carbonílicos Atmosféricos: Fontes, Reatividade, Níveis de Concentração e Efeitos Toxicológicos. *Química Nova* **2002**, *25*, 1117. [CrossRef]
- ¹⁵ Guo, S.; Wen, S.; Wang, X.; Sheng, G.; Fu, J.; Hu, P.; Yu, Y. Carbon Isotope Analysis for Source Identification of Atmospheric Formaldehyde and Acetaldehyde in Dinghushan Biosphere Reserve in South China. *Atmospheric Environmental* **2009**, *43*, 3489. [CrossRef]
- ¹⁶ Fall, R. Abundant oxygenates in the atmosphere – a biochemical perspective. *Chemical Reviews* **2003**, *103*, 4941. [CrossRef]
- ¹⁷ Grosjean, D.; Grosjean, E.; Moreira, L. F. R. Speciated ambient carbonyls in Rio de Janeiro, Environmental Science and Technology **2002**, *36*, 1389. [CrossRef]
- ¹⁸ Noisel, N.; Bouchard, M.; Carrier, G. 2007, Evaluation of the impact of lowering the formaldehyde occupational exposure limit for Quebec workers. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **2007**, *48*, 118. [CrossRef]
- ¹⁹ Rottenberger, S.; Kuhn, U.; Wolf, A.; Schebeske, G.; Oliva, S. T.; Tavares, T. M.; Kesselmeier, J. Formaldehyde and acetaldehyde exchange during leaf development of the Amazonian deciduous tree species *Hymenaea courbaril*. *Atmospheric Environmental* **2005**, *39*, 2275. [CrossRef]
- ²⁰ Den Berg, V. V.; Coeckelberghs, H.; Vankerckhoven, H. C. H.; Compennolle, F.; Vinckier, F. C. C. Study of the carbonyl products of terpene/OH radical reactions – detection of the 2,4-DNPH derivatives by HPLC-MS. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **2004**, *379*, 484. [CrossRef]
- ²¹ Cerqueira, M.; Gomes, L.; Tarelho, L.; Pio, C. Formaldehyde and acetaldehyde emissions from residential wood combustion in Portugal. *Atmospheric Environment* **2013**, *72*, 171. [CrossRef]
- ²² Gaffney, J. S.; Marley, N. A. The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond. *Atmospheric Environment* **2009**, *43*, 23. [CrossRef]
- ²³ Glarborg, P.; Alzueta, M. U.; Kjærgaard, K.; Dam-Johansen, K. Oxidation of formaldehyde and its interaction with nitric oxide in a flow reactor. *Combustion and Flame* **2003**, *132*, 629. [CrossRef]
- ²⁴ Donkerbroek, A. J.; van Vliet, A. P.; Somers, L. M. T.; Frijters, P. J. M.; Klein-Douwela, R. J. H.; Dam, N. J.; Meerts, W. L.; ter Meulen, J. J.

- Time- and space-resolved quantitative LIF measurements of formaldehyde in a heavy-duty diesel engine. *Combustion and Flame* **2010**, *157*, 155. [[CrossRef](#)]
- ²⁵ Frassoldati, A.; Cuoci, A.; Faravelli, T.; Niemann, U.; Ranzi, E.; Seiser, R.; Seshadri, K. An experimental and kinetic modeling study of n-propanol and iso-propanol combustion. *Combustion and Flame* **2010**, *157*, 2. [[CrossRef](#)]
- ²⁶ Grana, R.; Frassoldati, A.; Faravelli, T.; Niemann, U.; Ranzi, E.; Seiser, R.; Cattolica, R.; Seshadri, K. An experimental and kinetic modeling study of combustion of isomers of butanol. *Combustion and Flame* **2010**, *157*, 2137. [[CrossRef](#)]
- ²⁷ Dias, V.; Duynslaeghera, C.; Contino, F.; Vandooren, J.; Jeanmart, H. Experimental and modeling study of formaldehyde combustion in flames. *Combustion and Flame* **2012**, *159*, 1814. [[CrossRef](#)]
- ²⁸ Gray, P.; Griffiths, J. F.; Hasko, S. M.; Lignola, P. G. Novel, multiple-stage ignitions in the spontaneous combustion of acetaldehyde. *Combustion and Flame* **1981**, *43*, 175. [[CrossRef](#)]
- ²⁹ Copeland, C.; Friedman, J.; Renksizbulut, M. Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame. *Experimental Thermal and Fluid Science* **2007**, *31*, 221. [[CrossRef](#)]
- ³⁰ Coppens, F. H. V.; Ruyck, J. D.; Konnov, A. A. Effects of hydrogen enrichment on adiabatic burning velocity and NO formation in methane + air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science* **2007**, *31*, 437. [[CrossRef](#)]
- ³¹ Mancaruso, E.; Vaglieco, B. M. Optical investigation of the combustion behaviour inside the engine operating in HCCI mode and using alternative diesel fuel. *Experimental Thermal and Fluid Science* **2010**, *34*, 346. [[CrossRef](#)]
- ³² Dias, V.; Duynslaegher, C.; Contino, F.; Vandooren, J.; Jeanmart, H. Experimental and modeling study of formaldehyde combustion in flames. *Combustion and Flame* **2012**, *159*, 1814. [[CrossRef](#)]
- ³³ Weng, W.; Nilsson, E.; Ehn, A.; Zhu, J.; Zhou, Y.; Wang, Z.; Li, Z.; Aldén, M.; Cen, K. Investigation of formaldehyde enhancement by ozone addition in CH₄/air premixed flames. *Combustion and Flame* **2015**, *162*, 1284. [[CrossRef](#)]
- ³⁴ Santos, A. A. B.; Goldstein Jr., L.; Ferrari, C. A. Evaluation of the Influence of OEC on Soot Formation and Thermal Radiation in Confined Acetylene Diffusion Flames. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2012**, *39*, 1513. [[CrossRef](#)]