

# **SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE GASES PROVENIENTES DE ATERROS SANITÁRIOS.**

**Pedro Rios de Moura Teixeira**

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil,  
pdriosh@hotmail.com

**Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil,  
mspgomes@mec.puc-rio.br

*O trabalho investiga, através da simulação numérica, a queima de biogás proveniente de aterros sanitários em uma fornalha industrial. Devido à crescente preocupação quanto à preservação do meio ambiente, buscou-se quantificar a formação de poluentes a partir da combustão do biogás, e verificar possíveis métodos para o controle das emissões.*

*Utilizou-se um modelo baseado na formulação de volumes finitos, através da utilização do pacote comercial Fluent. Este incluiu modelos de turbulência, de radiação por transferência discreta, e o modelo de taxas finitas no cálculo das reações químicas para simular o processo de combustão em uma fornalha cilíndrica. Investigou-se o desempenho energético do processo de queima e a formação de espécies poluentes, entre as quais o NO, o CO e o SO<sub>2</sub>.*

**Palavras-chave:** Aterros Sanitários, Combustão, Biogás, Poluição, Simulação Numérica.

## **1.INTRODUÇÃO**

A atmosfera da Terra é fruto de processos físico-químicos e biológicos iniciados há milhões de anos. Evoluiu, a partir do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O), até o que existe nos dias atuais, tendo como gases principais o nitrogênio (N<sub>2</sub>), o oxigênio (O<sub>2</sub>), o argônio (Ar) e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

Entende-se que poluição atmosférica seja justamente a alteração indesejável nas características físicas, químicas ou biológicas da atmosfera que possa causar danos aos seres humanos, vegetais, animais e materiais.

Hoje, podemos citar como exemplo de problemas de poluição de dimensões globais: a destruição da camada de ozônio, a chuva ácida e o aquecimento global. Este último é causado pela emissão excessiva de gases que desequilibram os níveis de temperatura na superfície da terra.

Um inventário de gases de efeito estufa feito na cidade do Rio de Janeiro mostrou que 36% do metano e 0,2% de gás carbônico gerado em atividades urbanas provêm dos aterros sanitários. Vale ressaltar que o metano, quando comparado ao gás carbônico, para uma mesma quantidade de gás, tem uma influência vinte e cinco vezes maior, de acordo com Seinfeld e Pandis (1998), no fenômeno do aquecimento global da terra (GWP –Global Warming Potential). Este fato requer ações necessárias à redução ou anulação das emissões de CH<sub>4</sub> em aterros sanitários.

Aterros Sanitários são locais utilizados para deposição controlada de resíduos sólidos. Os resíduos são lançados ordenadamente, e cobertos com terra ou material similar. É essencial, em cada aterro, um controle sistemático das águas lixiviantes e dos gases produzidos, bem como um monitoramento do impacto ambiental durante o seu tempo de operação e após o seu encerramento.

Nesse sentido, o biogás produzido nos aterros pode ser aproveitado para a produção de energia através de processos de combustão, obtendo ainda, um abatimento na emissão de gases de efeito estufa.

A combustão do biogás não produz somente CO<sub>2</sub> e água. A partir de sua composição outros compostos, igualmente poluentes, como o NO<sub>x</sub> e o SO<sub>2</sub> podem ser formados. Portanto, são necessários: monitoramento, análise e controle das emissões desses gases.

Neste projeto, buscou-se a investigação da performance de um modelo baseado na simulação de volumes finitos utilizando o pacote comercial Fluent. Investigou-se também a formação de NO, CO e SO<sub>2</sub> nas chamas de gases provenientes de aterros sanitários comparando os resultados obtidos com dados reais de um aterro sanitário existente na cidade de Montreal-Canadá.

## 2. MODELAGEM NUMÉRICA

Em um escoamento turbulento as grandezas possuem rápidas flutuações em torno de valores médios e estes, quando não constantes, têm uma variação lenta. As equações de conservação utilizadas são obtidas pelo procedimento da média de Reynolds. O modelo utilizado no trabalho é o modelo k-ε de turbulência, o qual assume as tensões de Reynolds como proporcionais aos gradientes de velocidade média. Hinze, J. O. (1987).

As equações de conservação de massa e da quantidade de movimento linear utilizadas são:

$$\text{div}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu_{ef} \text{grad}(v)) + \text{div}(\mu_{ef} \text{grad}(v))^T - \text{grad}(P) \quad (2)$$

O campo de temperaturas no interior da fornalha é obtido através da solução da equação de conservação de energia.

$$\text{div}(\rho v h) = \text{div} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \text{grad}(h) \right] + v \bullet \text{grad}(p) + S_h \quad (3)$$

O termo fonte da Eq. (3) representa a fonte de entalpia devido às reações químicas e à transferência de calor por radiação.

No DTRM (Modelo de Radiação por Transferência Discreta) a intensidade radiante é obtida através de sua integração em todos os comprimentos de onda. Um sub-modelo (WSGGM) também é utilizado. Este se baseia na aproximação efetiva dos gases cinzas e utiliza o conceito de coeficiente de absorção. O processo de transferência de calor por radiação é incorporado na equação da energia através de seu termo fonte.

A equação de transporte das espécies químicas para um escoamento turbulento, assumindo regime permanente, tem a seguinte forma:

$$\text{div}(\rho v m_l) = \text{div} \left[ \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \text{grad}(m_l) \right] + R_l \quad (4)$$

A partir das expressões das taxas de Arrhenius e utilizando o conceito de dissipação de vórtices segundo Magnussem e Hjertager (1976) são calculadas as taxas de reações presentes na Eq (4) como termo fonte,  $R_l$ . Estes termos, para cada espécie  $l$ , são determinados como sendo a soma das fontes em todas as reações em que participa a espécie.

As predições da formação do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e do monóxido de carbono (CO) foram quantificadas a partir dos modelos para reações químicas.

A modelagem utilizada para a predição de NO inclui modelos de três processos cinéticos químicos distintos. O primeiro processo diz respeito à sua formação a partir do nitrogênio atmosférico (thermal), o segundo ocorre a partir da velocidade das reações na frente da chama (prompt), e o terceiro a partir do nitrogênio existente no combustível (fuel).

Segundo Seinfeld (1986), a oxidação do nitrogênio atmosférico é fortemente dependente da temperatura e o NO é formado nas regiões de pico de temperatura das chamas. Na oxidação do nitrogênio existente no combustível o principal fator é a disponibilidade de oxigênio, e, geralmente, não sofre influência da temperatura. A formação que acontece na frente da chama pode ocorrer à baixa temperatura em misturas ricas em combustível onde se tenha um tempo curto de residência.

### 3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho ocorreu em quatro etapas. A primeira delas consistiu na busca de informações sobre estudos realizados em aterros sanitários que discriminassem a composição do biogás produzido, como também a composição do gás após a combustão.

O caso escolhido foi o do Centro de Eliminação de Resíduos situado na cidade de Montreal – Canadá. CADDET - Result 393 (2000). Em posse desses dados passou-se a outra etapa que se caracterizou pela definição da geometria a ser considerada na simulação. Este se baseou na fornalha experimental de Garreton (1990) também utilizada por Isnard (2000). Nesta etapa definiu-se ainda, as condições de contorno e propriedades importantes para a simulação. Após uma fase de testes, definiu-se a malha a ser utilizada (teste de malha).

A terceira etapa foi de estudo e implementação da modelagem a ser utilizada a partir do pacote comercial Fluent. Na quarta etapa, os resultados da simulação foram apresentados e comparados com os dados conhecidos. Também verificou-se o desempenho do modelo utilizado.

Na Tabela (1) é possível encontrar a composição do biogás produzido no aterro, e a composição do gás emitido após o processo de combustão. Fonte: CADDET - Result 393 (2000).

Tabela 1. Composição do biogás produzido no aterro sanitário em Montreal e do gás emitido após o processo de combustão.

| Composição do Biogás   |                        |                            | Composição dos produtos da combustão |                         |                           |
|------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| CH <sub>4</sub> – 35 % | O <sub>2</sub> – 5 %   | H <sub>2</sub> S– 232 ppmv | CO <sub>2</sub> – 66,7 %             | N <sub>2</sub> – 17,7 % | NO <sub>x</sub> – 21 ppmv |
| N <sub>2</sub> – 20 %  | CO <sub>2</sub> – 40 % | VOC's– 743 ppmv            | H <sub>2</sub> O– 15,6 %             | CO– 24 ppmv             | SO <sub>2</sub> – 33 ppmv |

A fornalha utilizada na simulação numérica foi baseada na fornalha experimental utilizada por Garreton (1994), cuja potência é de 400kW alimentada com gás natural. Deste trabalho, também foram utilizadas temperaturas médias no contorno de importância que foram medidos experimentalmente. Vide Figura (1).

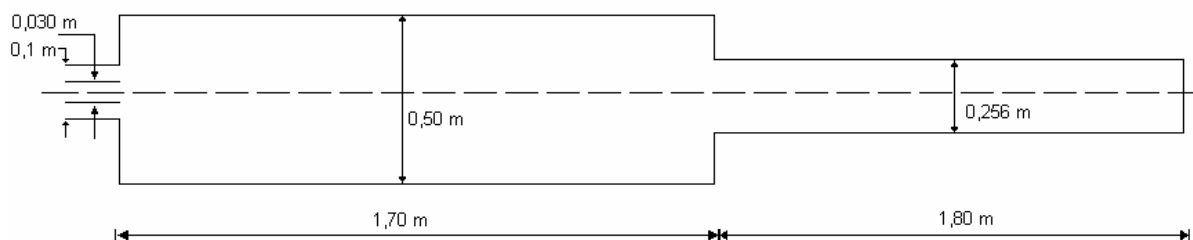


Figura 1. Geometria da fornalha cilíndrica experimental de Garreton (1994)

Na fornalha experimental de Garreton (1994), a injeção do combustível (gás natural) é feita através do tubo interno a uma temperatura de 313K, e a injeção de ar através do tubo externo a 323K. O gás natural na entrada é composto de 90% de metano e 10% de nitrogênio em massa. A câmara de combustão opera a uma pressão de 50Pa acima da pressão atmosférica como medida de prevenção contra a entrada do ar ambiente. E os fluxos de calor nas paredes do combustor são determinados através de jaquetas de resfriamento.

#### 4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E PARÂMETROS DO PROBLEMA

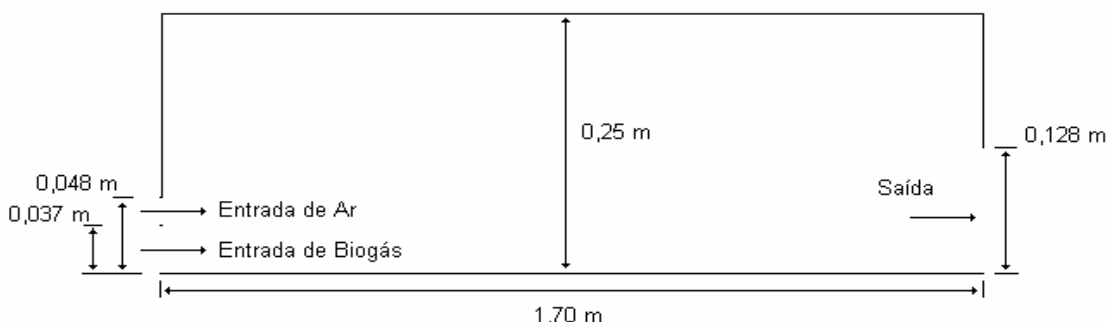


Figura 2. Geometria da câmara cilíndrica utilizada na Simulação.

Na Figura (2) é apresentada a geometria utilizada na simulação. Esta corresponde a uma fornalha cilíndrica baseada em Garreton (1994) e, a exemplo do que foi feito por Isnard (2000), em seu domínio computacional, não contempla a seção de descarga. O domínio computacional foi dividido em 217 volumes de controle na direção axial e 28 na direção radial. A malha utilizada está apresentada na Fig. (3).

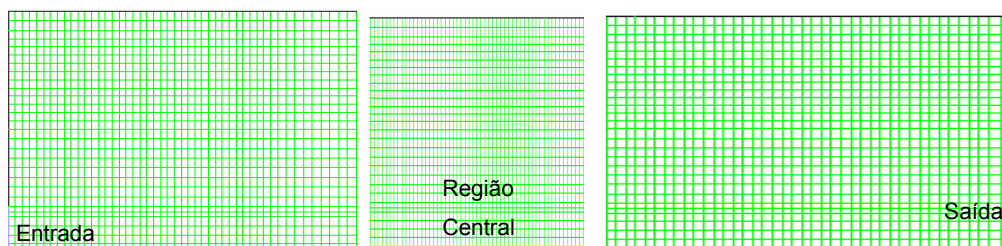


Figura 3. Regiões da Malha utilizada na Simulação (linha inferior corresponde à simetria da câmara de combustão cilíndrica).

A densidade da mistura foi calculada pela lei dos gases ideais. O seu calor específico foi definido como sendo uma função tanto da temperatura como da sua composição, cujo cálculo é feito por meio de uma média ponderada das frações mássicas dos componentes individuais.

Os valores de viscosidade, condutividade térmica e difusão de massa foram prescritos constantes tendo como espécie de referência o  $N_2$  por ser a espécie predominante no interior do combustor. São eles: Viscosidade para  $N_2$  a 763K,  $\mu = 2,95 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ ; Condutividade térmica para  $N_2$  a 700K,  $k = 4,54 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$ ; e o Coeficiente de difusão de massa para  $N_2$  a 700K e a 1 atm, em ar atmosférico,  $D_{i,m} = 2,88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Com o objetivo de simplificar o problema e otimizar o trabalho computacional, a câmara de combustão cilíndrica apresentada anteriormente, foi modelada como axisimétrica. Esta

simplificação leva em consideração a geometria do queimador e possibilita um tratamento bidimensional para o problema.

O valor da vazão de entrada de combustível foi calculado com o conhecimento dos valores do poder calorífico inferior das espécies que compõem o biogás, de acordo com Van Wylen (1986), e com a potência da fornalha, conforme Garreton (1994). Através da relação de estequiometria foi calculado o valor para a vazão do ar.

A chama considerada é difusiva turbulenta. Através de tubos concêntricos são injetados o ar e o biogás (Vide Fig. (2)) a 0,1295kg/s a 323K, e 0,0442kg/s a 313K respectivamente. A intensidade turbulenta e o comprimento de escala foram definidos para a entrada do biogás em 6% e 0,02m e para a entrada do ar em 5% e 0,01m.

As constantes utilizadas no modelo k- $\epsilon$  foram  $C1\epsilon=1,4$ ,  $C2\epsilon=1,9$  e  $C\mu=0,09$ ; os números Prandt e Schmidt turbulentos estão ajustados em 0,7. No modelo de Magnussen  $K1=4,0$  e  $K2=0,5$ .

Os fluxos de calor através da parede do combustor foram prescritos a partir de uma estimativa de perda de 20%. O valor prescrito do fluxo na parede da fornalha é 26,67 kW/m<sup>2</sup>.

A emissividade da parede da fornalha em todas as suas seções foi definida como igual a 0,6 enquanto que as da entrada e saída foram definidas como sendo iguais a 1. No que diz respeito ao modelo de radiação DTRM e sub-modelo WSGGM, utilizou-se 120 superfícies radiantes com o número de divisões em  $\theta$  e em  $\phi$  igual a 4.

Nas simulações foi estabelecido como critério de convergência que os resíduos para todas as grandezas envolvidas fosse inferior a 10<sup>-6</sup>, exceto a energia, para a qual foi requerido um valor inferior a 10<sup>-8</sup> num modelo em dupla precisão.

## 5. RESULTADOS

Os resultados descritos, a seguir, são conseqüentes das simulações feitas neste trabalho. A composição do combustível utilizado está conforme a Tab. (1). Os valores utilizados são os referentes às concentrações em massa, e, no caso dos compostos voláteis, foram arbitrados valores de suas concentrações de modo que a soma dos valores de todas as espécies resultasse em 100%.

Neste trabalho serão mostrados resultados referentes a duas modelagens: a modelagem 01 para o processo de combustão em uma única etapa (reações globais) e a modelagem 02 para o processo em duas etapas (reação de oxidação dos hidrocarbonetos formando CO e a reação de oxidação do CO).

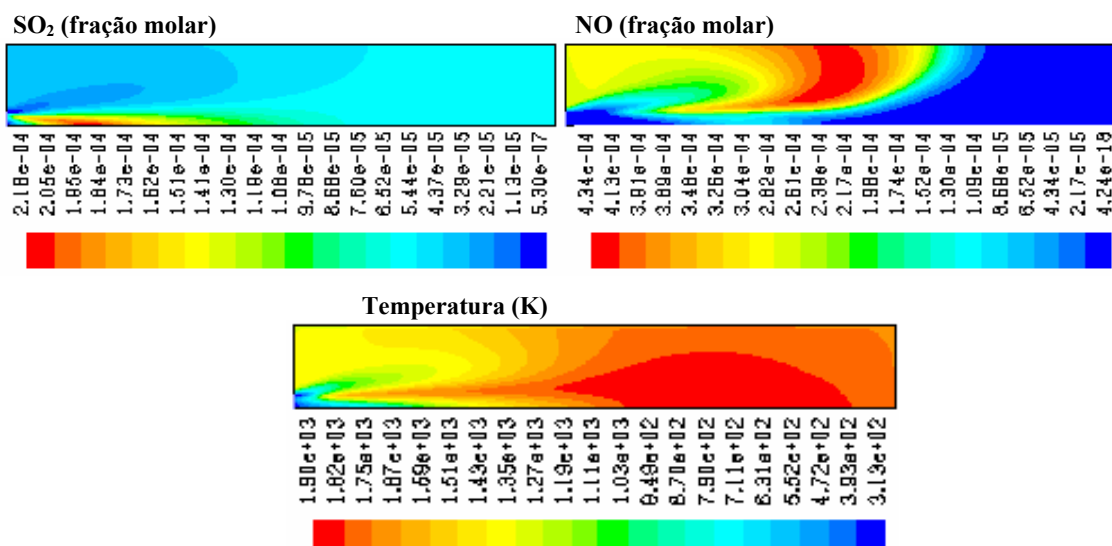


Figura 4. Gráficos da modelagem 01 no interior do domínio computacional

E na Figura (4) estão reunidos gráficos de temperatura e concentrações de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}$ , no domínio da fornalha estudada para a modelagem 01.

A Figura (5) apresenta as concentrações de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}$  ao longo do eixo de simetria da fornalha.

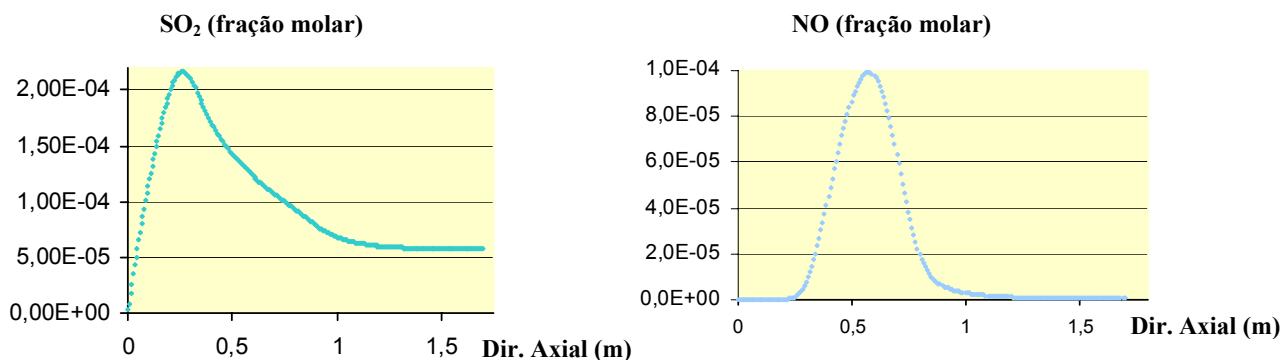


Figura 5. Concentração de  $\text{NO}$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do eixo de simetria para modelagem 1.

A modelagem 02 apresenta o processo de combustão em duas etapas para as reações dos hidrocarbonetos existentes na mistura, e são mostrados gráficos de temperatura e concentrações desta vez incluindo valores do monóxido de carbono.

Na Figura (6) estão reunidos gráficos de temperatura e concentrações de  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}$ , no domínio da fornalha estudada para a modelagem 02.

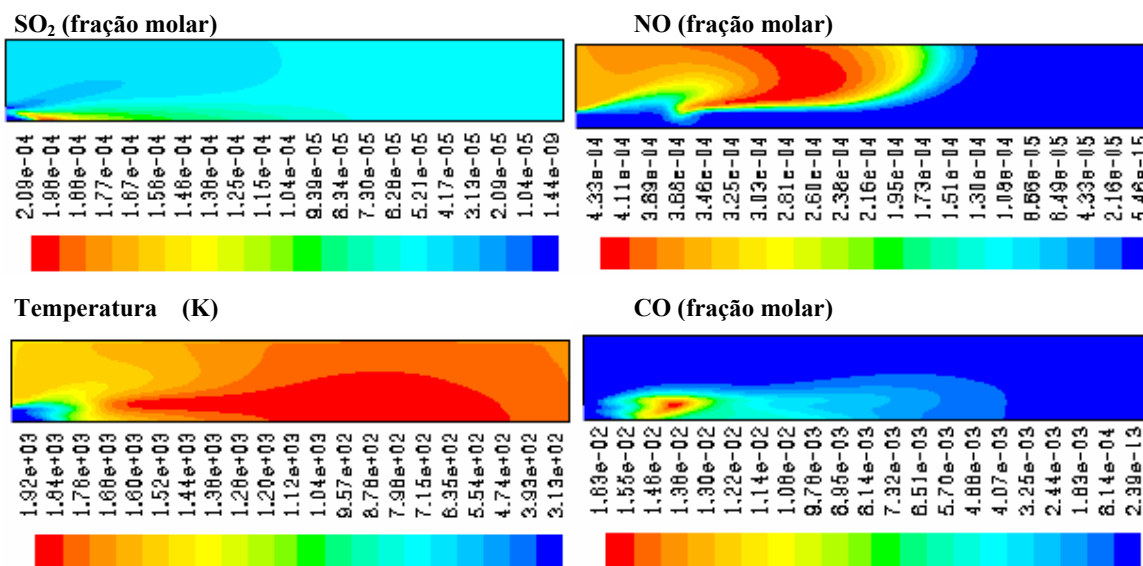


Figura 6. Gráficos da modelagem 02 no interior do domínio computacional

A Figura (7) apresenta os valores das concentrações de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$  e  $\text{CO}$  ao longo do eixo de simetria da fornalha.

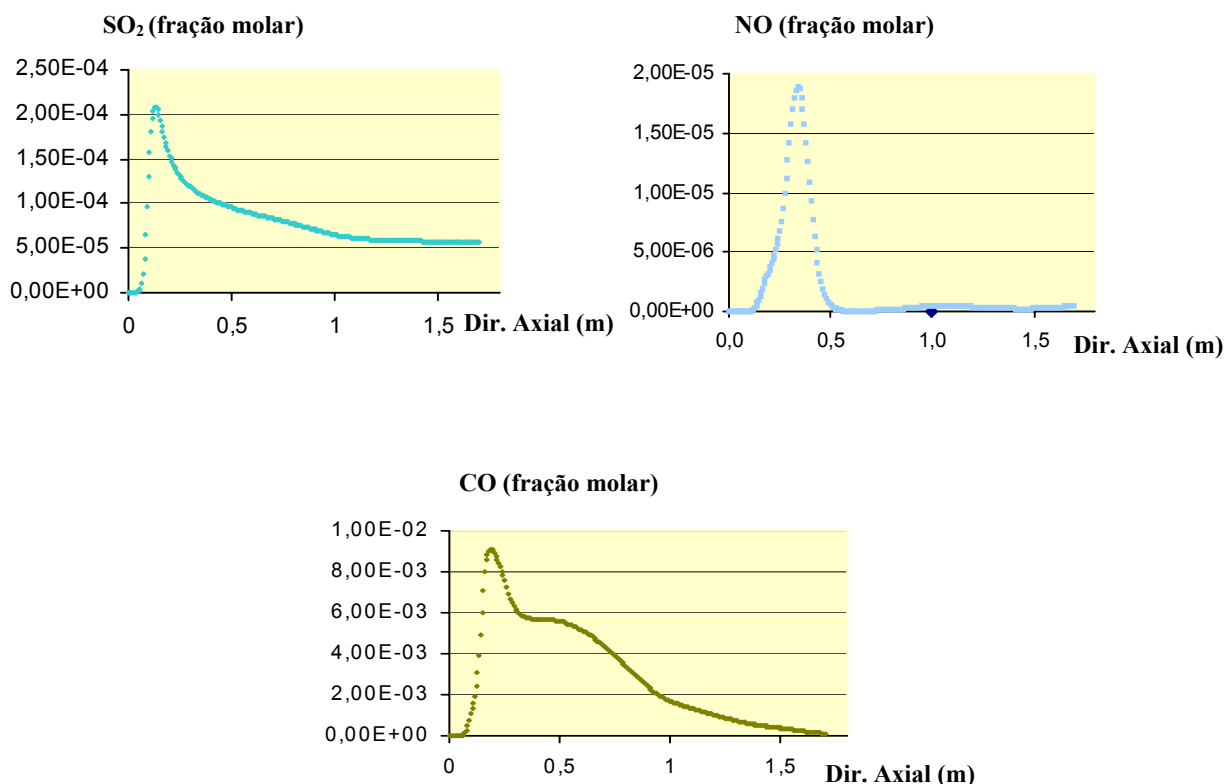


Figura 7. Concentração de NO, CO e SO<sub>2</sub> ao longo do eixo de simetria para a modelagem 02.

As considerações a respeito dos gráficos apresentados para processo de combustão em uma única etapa e para o processo em duas etapas serão feitas na seção seguinte.

Na Figura (8) é possível observar as concentrações de NO para ambas as modelagens e de CO para a modelagem 02 na saída da fornalha.

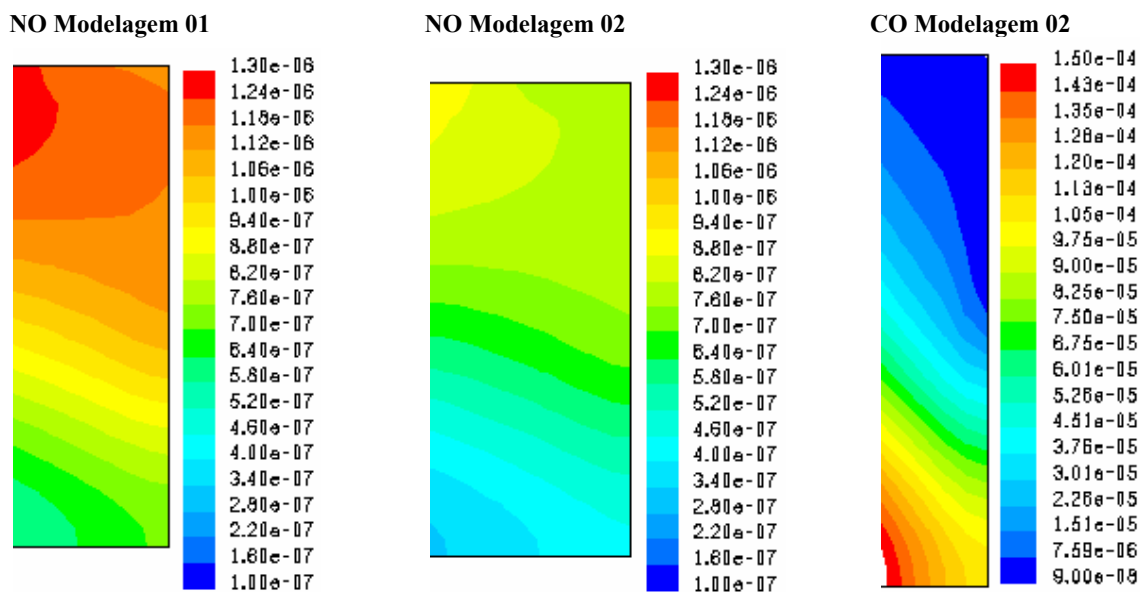


Figura 8. Concentrações, em fração molar, de NO e CO na região da saída da fornalha

De acordo com os gráficos da distribuição das temperaturas contidos nas Fig. (4) e (6), temos que o pico de temperatura para ambas as modelagens está em torno de 1900K. A Fig. (9) mostra com maiores detalhes a distribuição de temperaturas no interior da fornalha cilíndrica em uma mesma escala partindo de 1200K até 1930K. (os espaços em branco que aparecem no interior do domínio referem-se aos locais com temperaturas abaixo de 1200K).

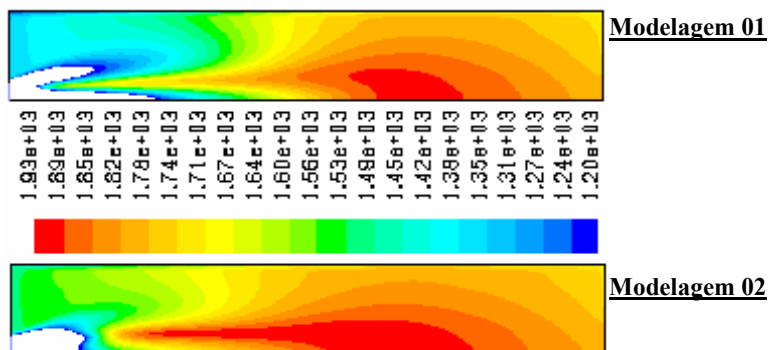


Figura 9. Distribuição de Temperaturas, em K, no interior da fornalha cilíndrica.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na Figura (9) observa-se que, para uma mesma escala (de 1200K a 1930K), a modelagem 02 apresenta temperaturas superiores em relação à modelagem 01.

A concentração de  $\text{SO}_2$  em ambas as modelagens tem o seu pico de formação no interior da fornalha em  $x < 0,5\text{m}$ . Na saída os resultados apontam para 50ppmv.

A concentração de NO tem o seu pico de formação na parte superior da fornalha em  $x < 0,5\text{m}$  para a modelagem 02 e  $x > 0,5\text{m}$  para a modelagem 01. Na saída da fornalha, as emissões de NO chegaram até 1ppmv para a modelagem 01 e 0,7 ppmv para a modelagem 02. Vide Figura (8).

A modelagem 02, que apresentou níveis de temperatura superiores (vide Fig. (9)), também apresentou menores concentrações de NO (vide Fig. (8)) na saída da fornalha cilíndrica. Isto nos dá uma indicação de o processo determinante de formação do NO não é o thermal.

O pico de formação do CO, segundo gráfico contido na Fig. (7), acontece em  $x < 0,5$ . Na saída a sua concentração chega até 100ppmv.

Dentre as três espécies estudadas foram verificados, segundo o modelo, níveis elevados nas concentrações de  $\text{SO}_2$  e CO, o que tornariam necessárias medidas de controle em suas emissões. No caso do NO, teríamos níveis aceitáveis em suas emissões.

Com relação à predição de CO acredita-se que está superestimada pelo modelo.

Não foi possível comparar os resultados encontrados nas simulações com os dados apresentados pelo aterro localizado em Montreal. Isto deveu-se ao fato de que, através de um balanço de massa, constatou-se a não correspondência entre as emissões e a composição apresentadas na Tab. (1). Não estão disponíveis informações referentes a qualquer beneficiamento do gás efetuado antes do processo de combustão no referido aterro.

Devido as grandes variações de temperatura e concentrações, seria interessante não atribuir propriedades constantes no interior da fornalha. Isso deverá ser contemplado em estudos posteriores.

Em futuros estudos recomenda-se também a modelagem do processo de combustão, utilizando-se outros modelos existentes, para efeito de comparação com estes resultados.

## 7. REFERÊNCIAS

Fluent User's Guide, version 6.1. Fluent Incorporated,

- GARRETON, D. SIMONIN. **First Workshop on Aerodynamics of Steady State Combustion Chambers and Furnaces: Final Results**, Chatou, France, 1994.
- GOMES, M. S. P.; NIECKELE, A. O.; NACCACHE, M. F.; KOAYASHI, W. T.. “**Numerical Investigation of the Oxygen Enriched Combustion Process in a Cylindrical Furnace**”, Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisboa, Portugal, 1997.
- HINZE, J. O.. **Turbulence**, Mc Graw Hill, 2<sup>nd</sup> ed., 1987.
- ISNARD, ANDRÉ. **Simulação Numérica da Combustão e Formação de Poluentes em Chamas de Gás Natural**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2000.
- ISNARD, ANDRÉ; GOMES, M. S.P.. “**Numerical Investigations on the NO<sub>x</sub> Formation in Natural Gas Combustion**”, 7<sup>th</sup> Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- KNACKE, K. H.. **Thermochemical Properties of Inorganic Substances**, 2<sup>nd</sup> ed., 1991.
- MAGNUSSEN, B. F.. **On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow**, Nineteenth AIAA Meeting, St. Louis, 1981.
- MAGNUSSEN, B.F. AND B. H. HJERTAGER. **On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion**, In *16th Symp. (Int'l.) on Combustion*. The Combustion Institute, 1976.
- Production of 25 MW of electricity using landfill gas**, CADDET, Result 393, 2000.
- SEINFELD, J. H.. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.. **Fundamentals of Classical Thermodynamics**, John Wiley & Sons, New York, 1986.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## SIMULATION OF LANDFILL GAS COMBUSTION PROCESS.

### **Pedro Rios de Moura Teixeira**

Mechanical Engineering Department, Pontific Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil,  
pdriosh@hotmail.com

### **Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Mechanical Engineering Department, Pontific Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil,  
mspgomes@mec.puc-rio.br

*This work investigates, with numerical simulation, the burning of landfill gas in an industrial furnace. Owing to the importance of environment preservation, it aims at getting results about pollutants formation, concentrations, and emission control methods for the biogas combustion.*

*The model is based in the finite volume formulation using the commercial code Fluent. It includes turbulence models, the discrete transfer radiation model, and, the generalized finite rate model for simulating the combustion process in a cylindrical furnace. It investigates the energy efficiency of the burning process and the formation of pollutants such as NO, CO and SO<sub>2</sub>.*

**Keywords:** landfill, Combustion, Biogas, Pollution, Numerical Simulation.