

PRODUÇÃO DE GÁS CO E H₂ DA ZONA DE REDUÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE EM REGIME ESTACIONÁRIO

Otávio José dos Santos, s.otavio@gmail.com¹

Jornandes Dias da Silva, jornandesdias@yahoo.com.br¹

¹Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife/PE - CEP: 50.750-470 - Fone: 55-81-3184-7500

Resumo: *Visando-se a obtenção de CO e H₂, a gaseificação da biomassa em gaseificador de leito fluidizado mostra-se como uma forma viável e alternativa às convencionais. Na região de redução do gaseificador são gerados os gases combustíveis para se formar o gás síntese (CO e H₂). Neste trabalho o estudo delimitou-se em analisar o comportamento dos componentes CO e H₂ na região de redução de um gaseificador de leito fluidizado e para isso desenvolveu-se um modelo matemático fenomenológico. A simulação deste modelo promove um desacoplamento das espécies que caracterizam esses fenômenos, assim, pode-se usar modelos estatísticos para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. O trabalho teve como objetivo validar o resultado do código computacional, desenvolvido para o modelo proposto, com resultados da literatura e analisar os perfis dos componentes CO e H₂. Além disso, uma análise de sensibilidade também foi realizada para verificar o efeito da vazão de entrada da fase gasosa sob o efeito reacional.*

Palavras-chave: *biomassa, gaseificador, computacional, redução*

1. INTRODUÇÃO

No processo de gaseificação da biomassa, o gaseificador é o principal equipamento responsável pela produção do gás síntese (uma combinação de CO e H₂) para a geração de calor e potência. Assim, tendo-se o objetivo a geração deste gás através do bagaço da cana-de-açúcar, pode-se utilizar um gaseificador de leito fluidizado.

Um leito fluido é uma massa de material de granulometria fina, que é mantido em suspensão por uma corrente gasosa ascendente. Os leitos fluidos são usados na indústria química e aproveitados para promover aquecimento e mistura rápida de fluidos, resultando em reações bem controladas e normalmente rápidas. O material do leito pode ser um dos reagentes, um catalisador ou um material inerte, tal como areia (Neiva, 1987). As partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas, alumina etc.), fluidizadas pelo fluxo de ar. A biomassa é alimentada em dimensões reduzidas para permitir a fluidização (Heitor e Whitelaw, 1986; Kerinin e Shifrin, 1993).

Neste trabalho, foram consideradas apenas três reações químicas que descrevem de forma simplificada os processos que ocorrem no interior do gaseificador de leito fluidizado. São elas:



O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos componentes CO e H₂ a partir das Reações 01, 02 e 03, utilizando como combustível sólido o bagaço da cana-de-açúcar. O processo de gaseificação é muito complexo. Contudo, a análise dos componentes da região de redução envolve equações de balanço para as espécies CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ e C formando um sistema de equações diferenciais parciais (EDP's) acopladas. Este sistema de equações pode ser resolvido de várias maneiras e para isso utiliza-se métodos para discretizar tais equações.

A simulação dos componentes por modelo matemático promove um desacoplamento dos componentes que caracterizam o fenômeno de transferência de massa.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática desenvolvida neste trabalho foi feita para a transferência de massa na região de redução de um gaseificador de leito fluidizado, analisando com maior ênfase os componentes CO e H₂. As equações de balanço de massa foram simplificadas através das seguintes hipóteses para o fenômeno em regime estacionário: (i) modelo unidimensional para o balanço de massa; (ii) sistema isotérmico de gaseificação; (iii) balanço de massa dos componentes modelados observando-se o efeito de dispersão axial. As equações de balanço de massa que caracterizam o comportamento do sistema em regime estacionário são as equações diferenciais ordinárias seguintes:

- Balanço de massa e condições de contorno para o CO:

$$D_{CO,eff} \epsilon_g \frac{d^2 C_{CO}}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \epsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_{CO}}{dz} + R_{CO} = 0 \quad (4)$$

$$D_{CO,eff} \epsilon_g \frac{dC_{CO}}{dz} \Big|_{z=0^+} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CO} \Big|_{z=0^+} - C_{CO,C}] \quad (5)$$

$$D_{CO,eff} \epsilon_g \frac{dC_{CO}}{dz} \Big|_{z=L} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CO} \Big|_{z=L} - C_{CO,F}] \quad (6)$$

- Balanço de massa e condições de contorno para o CO₂:

$$D_{CO_2,eff} \epsilon_g \frac{d^2 C_{CO_2}}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \epsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_{CO_2}}{dz} + R_{CO_2} = 0 \quad (7)$$

$$D_{CO_2,eff} \epsilon_g \frac{dC_{CO_2}}{dz} \Big|_{z=0^+} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CO_2} \Big|_{z=0^+} - C_{CO_2,C}] \quad (8)$$

$$D_{CO_2,eff} \epsilon_g \frac{dC_{CO_2}}{dz} \Big|_{z=L} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CO_2} \Big|_{z=L} - C_{CO_2,F}] \quad (9)$$

- Balanço de massa e condições de contorno para H₂O:

$$D_{H_2O,eff} \epsilon_g \frac{d^2 C_{H_2O}}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \epsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_{H_2O}}{dz} + R_{H_2O} = 0 \quad (10)$$

$$D_{H_2O,eff} \epsilon_g \frac{dC_{H_2O}}{dz} \Big|_{z=0^+} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{H_2O} \Big|_{z=0^+} - C_{H_2O,C}] \quad (11)$$

$$D_{CO_2,eff} \epsilon_g \frac{dC_{CO_2}}{dz} \Big|_{z=L} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CO_2} \Big|_{z=L} - C_{CO_2,F}] \quad (12)$$

- Balanço de massa e condições de contorno para H₂:

$$D_{H_2,eff} \epsilon_g \frac{d^2 C_{H_2}}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \epsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_{H_2}}{dz} + R_{H_2} = 0 \quad (13)$$

$$D_{H_2,eff} \epsilon_g \frac{dC_{H_2}}{dz} \Big|_{z=0^+} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{H_2} \Big|_{z=0^+} - C_{H_2,C}] \quad (14)$$

$$D_{H_2,eff} \varepsilon_g \left. \frac{dC_{H_2}}{dz} \right|_{z=L} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{H_2}|_{z=L} - C_{H_2,F}] \quad (15)$$

- Balanço de massa e condições de contorno para CH₄:

$$D_{CH_4,eff} \varepsilon_g \frac{d^2 C_{CH_4}}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \varepsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_{CH_4}}{dz} + R_{CH_4} = 0 \quad (16)$$

$$D_{CH_4,eff} \varepsilon_g \left. \frac{dC_{CH_4}}{dz} \right|_{z=0^+} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CH_4}|_{z=0^+} - C_{CH_4,C}] \quad (17)$$

$$D_{CH_4,eff} \varepsilon_g \left. \frac{dC_{CH_4}}{dz} \right|_{z=L} = -4 \frac{Q_g}{\pi d^2} [C_{CH_4}|_{z=L} - C_{CH_4,F}] \quad (18)$$

- Balanço de massa e condições de contorno para C:

$$D_{C,eff} \varepsilon_g \frac{d^2 C_C}{dz^2} + 4 \frac{Q_g \varepsilon_g}{\pi d^2} \frac{dC_C}{dz} + R_C = 0 \quad (19)$$

$$D_{C,eff} \varepsilon_g \left. \frac{dC_C}{dz} \right|_{z=0^+} = -4 \frac{G_{t,s}}{\pi d^2} [C_C|_{z=0^+} - C_{C,C}] \quad (20)$$

$$D_{C,eff} \varepsilon_g \left. \frac{dC_C}{dz} \right|_{z=L} = -4 \frac{G_{t,s}}{\pi d^2} [C_C|_{z=L} - C_{C,F}] \quad (21)$$

As Equações de 04 a 21 foram adimensionalizadas gerando os parâmetros adimensionais, $\alpha_i^{(k)}$, em que i representa um componente e k é um índice para diferenciação dos parâmetros. Tais parâmetros são apresentados nas Tabelas A2 a A7 no Apêndice A.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

As reações de formação dos componentes gasosos da zona de redução (01, 02, 03) envolvem reações homogêneas e heterogêneas. As reações 01 e 02 são heterogêneas e a reação 03 é homogênea. As taxas de reações para as reações 01, 02 e 03 são mostradas a seguir.

$$R_I = k_1 C_{CO_2} \quad (22)$$

$$R_{II} = 2k_2 C_{H_2O} \quad (23)$$

$$R_{III} = 0,1k_3 C_{CH_4} \quad (24)$$

A taxa total de formação e consumo, r_i , para cada componente foi obtida utilizando a seguinte equação (Xiu *et al.*, 2002)

$$r_i = \sum_{j=1}^3 \nu_{ij} R_j \quad (25)$$

em que V_{ij} é o coeficiente estequiométrico do componente i na reação j . Se V_{ij} é um reagente, V_{ij} assume um sinal negativo, senão, se V_{ij} é um produto, um sinal positivo. Utilizando esta técnica, as taxas globais de reação para cada componente são:

$$R_C = -(R_I + R_{II}) \quad (26)$$

$$R_{CO_2} = -R_I \quad (27)$$

$$R_{CO} = 2R_I + R_{II} + R_{III} \quad (28)$$

$$R_{H_2O} = -(R_{II} + R_{III}) \quad (29)$$

$$R_{H_2} = R_{II} + 3R_{III} \quad (30)$$

$$R_{CH_4} = -R_{III} \quad (31)$$

Enfatiza-se que neste estudo as taxas das reações devem ser lineares e são dadas pelas seguintes expressões:

$$R_I = k_1 C_{CO_2} \quad (32)$$

$$R_{II} = 2k_2 C_{H_2O} \quad (33)$$

$$R_{III} = 0,1k_3 C_{CH_4} \quad (34)$$

Através das taxas de reações para cada componente e as taxas para as reações químicas citadas (I, II e III), obtém-se as taxas de reações dos componentes em função das constantes k_1 , k_2 e k_3 e das concentrações de cada componente, resultando nas seguintes equações:

$$R_{CO} = 2k_1 C_{CO_2} + 2k_2 C_{H_2O} + 0,1k_3 C_{CH_4} \quad (35)$$

$$R_{CO_2} = -k_1 C_{CO_2} \quad (36)$$

$$R_{H_2O} = 2k_2 C_{H_2O} - 0,1k_3 C_{CH_4} \quad (37)$$

$$R_{H_2} = 2k_2 C_{H_2O} - 0,3k_3 C_{CH_4} \quad (38)$$

$$R_{CH_4} = -0,1k_3 C_{CH_4} \quad (39)$$

$$R_C = -k_1 C_{CO_2} - 2k_2 C_{H_2O} \quad (40)$$

Utilizando-se as taxas de reações 35 a 40 e as equações adimensionalizadas, desenvolveu-se o sistema de equações representativo da zona de redução do gaseificador de leito fluidizado, tratado através de uma metodologia numérica implementada em uma linguagem de programação.

4. METODOLOGIA NUMÉRICA

As equações do modelo e as taxas de reações constituem um sistema diferencial de equações não-lineares do segundo grau que caracteriza um problema de valor inicial. Para a linearização e discretização das equações usou-se o método das diferenças finitas. Pela complexidade da resolução dessas equações por meios analíticos, foi empregado o método numérico de Gauss-Seidel junto à técnica de sobre-relaxação.

Quando um método é usado para tratar numericamente uma equação diferencial parcial, a solução diferencial é aproximada por alguma função discreta. Cada derivada que aparece na equação diferencial parcial tem que ser substituída por uma diferença dividida apropriada dos valores da função nos pontos escolhidos. Tais aproximações das derivadas por fórmulas de diferença podem ser geradas de várias maneiras, por exemplo, por uma expansão em série de Taylor (Grossmann, 2007), como foi feito neste trabalho.

O método de Gauss-Seidel é o método iterativo comumente utilizado para resolver equações algébricas lineares (Chapra, 2004), é uma modificação do método de Jacobi. Aplicando o método de Gauss-Seidel nas equações discretizadas obtidas por diferenças finitas encontra-se o resultado do comportamento dos gases gerados e consumidos na região de redução do gaseificador de leito fluidizado.

A seguir tem-se as equações constitutivas do sistema representativo da zona de redução do gaseificador de leito fluidizado referentes ao efeito de transferência de massa, expressas em função dos parâmetros a e b , encontrados nas Tabelas A2 e A8 no Apêndice A, ressalta-se que essas equações estão sob a forma adimensionalizada:

$$a_{11}(\psi_{CO})_j + a_{12}(\psi_{CO_2})_j + a_{13}(\psi_{H_2O})_j + a_{14}(\psi_{H_2})_j + a_{15}(\psi_{CH_4})_j + a_{16}(\psi_C)_j = b_1 \quad (41)$$

$$a_{21}(\psi_{CO})_j + a_{22}(\psi_{CO_2})_j + a_{23}(\psi_{H_2O})_j + a_{24}(\psi_{H_2})_j + a_{25}(\psi_{CH_4})_j + a_{26}(\psi_C)_j = b_2 \quad (42)$$

$$a_{31}(\psi_{CO})_j + a_{32}(\psi_{CO_2})_j + a_{33}(\psi_{H_2O})_j + a_{34}(\psi_{H_2})_j + a_{35}(\psi_{CH_4})_j + a_{36}(\psi_C)_j = b_3 \quad (43)$$

$$a_{41}(\psi_{CO})_j + a_{42}(\psi_{CO_2})_j + a_{43}(\psi_{H_2O})_j + a_{44}(\psi_{H_2})_j + a_{45}(\psi_{CH_4})_j + a_{46}(\psi_C)_j = b_4 \quad (44)$$

$$a_{51}(\psi_{CO})_j + a_{52}(\psi_{CO_2})_j + a_{53}(\psi_{H_2O})_j + a_{54}(\psi_{H_2})_j + a_{55}(\psi_{CH_4})_j + a_{56}(\psi_C)_j = b_5 \quad (45)$$

$$a_{61}(\psi_{CO})_j + a_{62}(\psi_{CO_2})_j + a_{63}(\psi_{H_2O})_j + a_{64}(\psi_{H_2})_j + a_{65}(\psi_{CH_4})_j + a_{66}(\psi_C)_j = b_6 \quad (46)$$

Tabela 1. Parâmetros de entrada para o programa

$C_{CO,C} = 0,06$	$G_{t,s} = 0,03056$	$D_{CO,eff} = 1,1 \times 10^{-5}$	$\epsilon_g = 0,48$
$C_{CO_2,C} = 0,3$	$Q_g = 0,00361$	$D_{CO_2,eff} = 8 \times 10^{-6}$	$\epsilon_s = 0,68$
$C_{H_2O,C} = 2,8 \times 10^{-5}$	$T_p = 875$	$D_{H_2O,eff} = 1,3 \times 10^{-5}$	$\rho_p = 2530$
$C_{H_2,C} = 0,15$	$T_g = 750$	$D_{H_2,eff} = 4 \times 10^{-5}$	$\rho_g = 24$
$C_{CH_4,C} = 0,03$	$R_{ga} = 0,082$	$D_{CH_4,eff} = 1,4 \times 10^{-5}$	$M_p = 1,4 \times 10^{-4}$
$C_{C,C} = 0,45$	$D_p = 1,48 \times 10^{-4}$	$D_{C,eff} = 1,7 \times 10^{-5}$	

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através da simulação computacional do modelo matemático. A partir desta, obteve-se os perfis referentes ao comportamento dos componentes CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ e C na zona de redução do gaseificador de leito fluidizado. As equações do modelo proposto foram tratadas com a técnica de sobre-relaxação. Para tanto foi implementado um código computacional em linguagem Scilab para a resolução das equações e obtenção das concentrações dos componentes. O programa teve como dados de entrada parâmetros de experimentos independentes, mostrados na Tabela 1.

Nas Figuras 1 e 2 mostram-se uma comparação dos resultados obtidos por meio do modelo desenvolvido e de um resultado experimental em relação a produção de CO e CO₂. Como se pode notar, o perfil descrito pela simulação do modelo se aproxima satisfatoriamente do perfil do experimento independente, confirmando assim a validade do modelo desenvolvido.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados para o comportamento dos componentes CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ e C ao longo de parte da zona de redução. Nesta figura pode-se observar que a produção de CO se estabiliza em torno de ±0,32 e a de H₂ em torno de ±0,28, enquanto os componentes consumidos apresentam uma baixa concentração, da ordem de 10⁻³ ou menor, ao fim da zona analisada.

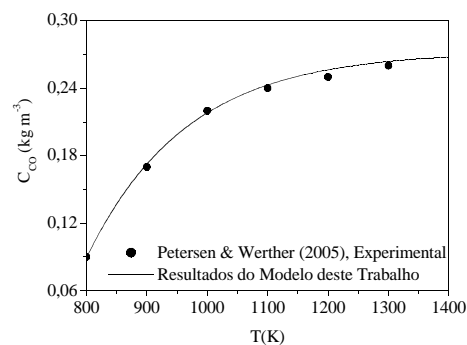


Figura 1. Perfil do componente CO como uma função da temperatura no centro da zona de redução
 ($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

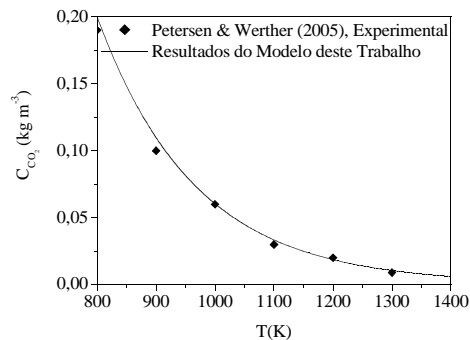


Figura 2. Perfil do componente CO₂ como uma função da temperatura no centro da zona de redução
 ($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

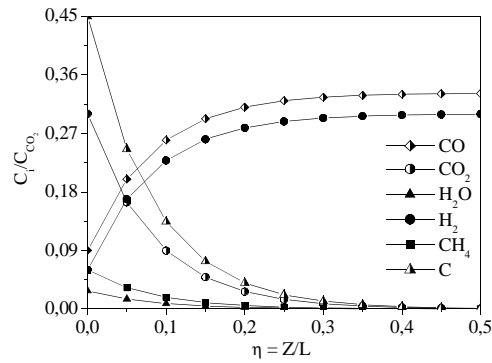


Figura 3. Perfil dos componentes CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ e C como uma função da posição no centro da zona de redução ($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

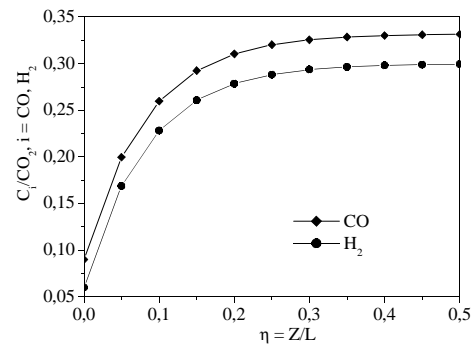


Figura 4. Perfil dos componentes CO e H₂ como uma função da posição no centro da zona de redução ($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

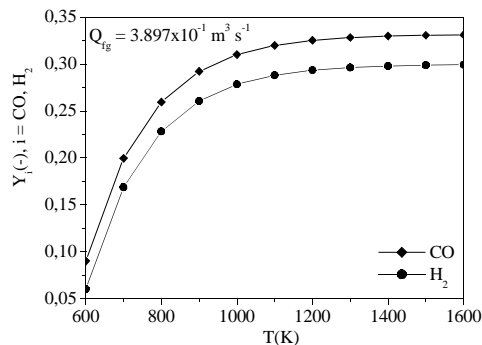


Figura 5. Perfil dos componentes CO e H₂ como uma função da posição no centro da zona de redução ($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

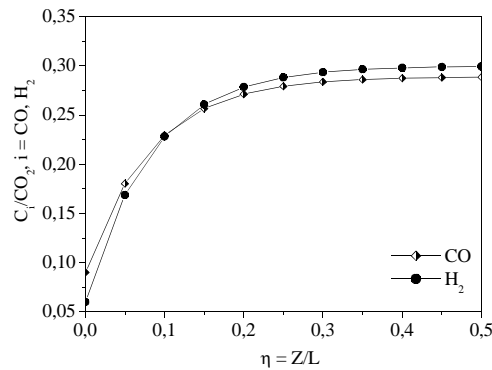


Figura 6. Perfil dos componentes CO e H_2 como uma função da posição no centro da zona de redução
($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

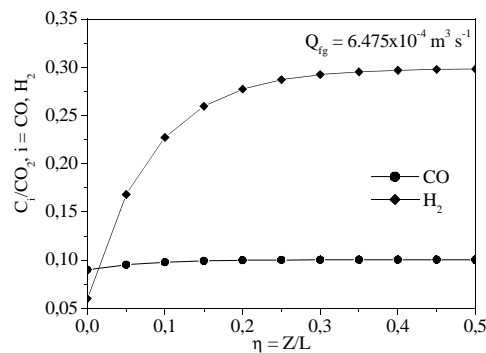


Figura 7. Perfil dos componentes CO e H_2 como uma função da posição no centro da zona de redução
($Q_{fg}=1,567 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $T_{fg,0}=800\text{K}$, $G_{t,s}=3,056 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$, $T_{s,0}=850\text{K}$)

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam-se os perfis de concentração dos componentes CO e H_2 ao longo da região de redução do gaseificador de leito fluidizado. Nelas verifica-se que a concentração de CO é proporcional ao aumento da vazão de entrada do gás (Q_{fg}), enquanto a concentração de H_2 é inversamente proporcional a esta vazão. Isso acontece por conta da agitação molecular causada pela velocidade do gás de entrada que favorece a reação de formação do CO.

7. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo propiciou a análise do comportamento dos componentes CO, CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 e C quanto ao efeito de transferência de massa na zona de redução do gaseificador de leito fluidizado. Além disso, a análise de sensibilidade realizada permitiu verificar o efeito da variação da vazão de entrada sobre o sistema. Assim, apresentam-se as seguintes conclusões:

- A produção de CO se estabiliza em $\pm 0,32$;
- A produção de H_2 se estabiliza em $\pm 0,28$;
- A concentração de CO aumenta com o aumento da vazão de entrada do gás (Q_{fg});
- A concentração de H_2 aumenta com a diminuição da vazão de entrada do gás (Q_{fg});

- Com vazões de menor ordem, a concentração de CO tende a se manter baixa logo no início da zona de redução e se estabilizar.

8. NOMENCLATURA

C_i	Concentração do componente, $i = \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ e C; kg/m^3 .
d	Diâmetro da região de redução; m.
$D_{i,eff}$	Difusividade efetiva do componente i , $i = \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ e C; m^2/s .
D_p	Diâmetro da partícula; m.
G_{ts}	Vazão do sólido; kg/s .
L	Comprimento da região de redução; m.
M_p	Massa da partícula; kg.
P	Pressão; atm.
Q_g	Vazão do gás; m^3/s .
R_{ga}	Constante universal dos gases; $\text{m}^3 \text{atm K}^{-1} \text{mol}^{-1}$.
R_i	Taxa de reação com relação ao componente i , $i = \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ e C.
T_g	Temperatura do gás; K.
T_p	Temperatura do sólido; K.
z	Variável espacial; m.

9. LETRAS GREGAS

ϵ_g	Fração de vazio da fase gasosa.
ϵ_s	Fração de vazio da fase sólida.
ρ_g	Densidade do gás; kg/m^3 .
ρ_p	Densidade da partícula; kg/m^3 .
ψ_i	Concentração adimensionalizada do componente i , $i = \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ e C; C_i/C_{CO} .

2

10. AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem ao CNPq(Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro dado. (Processo 48354/2007/Projeto/Título: Modelagem e Simulação Computacional para o Desenvolvimento de uma Planta de Gaseificação em Ciclo Combinado para Geração de Energia Elétrica./Edital CNPq 15/2007 – Universal).

11. REFERÊNCIAS

- Neiva, J. (1987), Fontes Alternativas de Energia: conservação de energia, gás natural, biomassa – carvão vegetal, álcool etílico – e xisto, Editora Maity.
- Heitor, M.V., Whitelaw, J.H. (1986), Velocity temperature and species characteristics of the on in a gas turbine combustor, Combust. Flame.
- Kerinin, E.V.; Shifrin, E.I. (1993), Mathematical Model of Coal Combustion and Gasification in a Passage of an Underground Gas Generator, Combustion, explosion and Shock Waves, Academy of Sciences.
- Xiu, G.-h, Li, P., Rodrigues, A.E. (2002), Sorption-enhanced reaction process with reactive regeneration. Chemical Engineering Science.
- Grossmann, C., Roos, H.G., Stynes, M. (2007), Numerical Treatment of Partial Differential Equations, Editora Springer.
- Chapra, S.C. (2004), Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists, Editora McGraw-Hill Professional.

12. APÊNDICE A

Tabela A1. Parâmetros a do sistema de equações

$a_{11} = \alpha_{CO}^{(12)}$	$a_{21} = 0$
$a_{12} = \alpha_{CO}^{(2)}$	$a_{22} = \alpha_{CO_2}^{(10)}$
$a_{13} = \alpha_{CO}^{(3)}$	$a_{23} = 0$
$a_{14} = 0$	$a_{24} = 0$
$a_{15} = \alpha_{CO}^{(4)}$	$a_{25} = 0$
$a_{16} = 0$	$a_{26} = 0$
$a_{31} = 0$	$a_{41} = 0$
$a_{32} = 0$	$a_{42} = 0$
$a_{33} = \alpha_{H_2O}^{(12)}$	$a_{43} = 0$
$a_{34} = 0$	$a_{44} = \alpha_{H_2}^{(12)}$
$a_{35} = \alpha_{H_2O}^{(3)}$	$a_{45} = \alpha_{H_2}^{(3)}$
$a_{36} = 0$	$a_{46} = 0$
$a_{51} = 0$	$a_{61} = 0$
$a_{52} = 0$	$a_{62} = -\alpha_C^{(2)}$
$a_{53} = 0$	$a_{63} = -\alpha_C^{(3)}$
$a_{54} = 0$	$a_{64} = 0$
$a_{55} = \alpha_{CH_4}^{(11)}$	$a_{65} = 0$
$a_{56} = 0$	$a_{66} = \alpha_C^{(12)}$

Tabela A2. Parâmetros α_{CO} do sistema de equações

$\alpha_{CO}^{(1)} = 4 \frac{Q_g}{\pi d^2} \frac{L}{D_{CO,eff}}$	$\alpha_{CO}^{(2)} = 2 \frac{k_1 L^2}{D_{CO,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{CO}^{(3)} = 2 \frac{k_2 L^2}{D_{CO,eff} \epsilon_g}$	$\alpha_{CO}^{(4)} = 0,1 \frac{k_3 L^2}{D_{CO,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{CO}^{(5)} = \frac{4 Q_g L}{\pi d^2 D_{CO,eff}}$	$\alpha_{CO}^{(6)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} + \frac{\alpha_{CO}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO}^{(7)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{CO}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CO}^{(8)} = \left[\frac{2 - \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO}^{(9)} = \left[\frac{2\alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta \psi_{CO,C}}{2 + \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CO}^{(10)} = \left[\frac{2 + \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta}{2 - \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta} \right]$

$\alpha_{CO}^{(11)} = \left[\frac{2\alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta \psi_{CO,C}}{2 - \alpha_{CO}^{(5)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO}^{(12)} = \left[\alpha_{CO}^{(6)} \alpha_{CO}^{(8)} - \frac{2}{(\Delta\eta)^2} + \alpha_{CO}^{(7)} \alpha_{CO}^{(10)} \right]$
$\alpha_{CO}^{(13)} = \left[-\alpha_{CO}^{(6)} \alpha_{CO}^{(9)} - \alpha_{CO}^{(7)} \alpha_{CO}^{(11)} \right]$

Tabela A3. Parâmetros α_{CO_2} do sistema de equações

$\alpha_{CO_2}^{(1)} = 4 \frac{Q_g}{\pi d^2} \frac{L}{D_{CO_2,eff}}$	$\alpha_{CO_2}^{(2)} = 2 \frac{k_1 L^2}{D_{CO_2,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{CO_2}^{(3)} = \frac{4 Q_g L}{\pi d^2 D_{CO_2,eff}}$	$\alpha_{CO_2}^{(4)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{CO_2}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO_2}^{(5)} = \left[\frac{2}{(\Delta\eta)^2} - \alpha_{CO_2}^{(2)} \right]$	$\alpha_{CO_2}^{(6)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{CO_2}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO_2}^{(7)} = \left[\frac{2 - \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CO_2}^{(8)} = \left[\frac{2\Delta\eta \psi_{CO_2,C}}{2 + \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO_2}^{(9)} = \left[\frac{2 + \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta}{2 - \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CO_2}^{(10)} = \left[\frac{2\Delta\eta \psi_{CO_2,C}}{2 - \alpha_{CO_2}^{(3)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CO_2}^{(11)} = \left[\alpha_{CO_2}^{(4)} \alpha_{CO_2}^{(7)} - \alpha_{CO_2}^{(5)} + \alpha_{CO_2}^{(6)} \alpha_{CO_2}^{(9)} \right]$	
$\alpha_{CO_2}^{(12)} = \left[\alpha_{CO_2}^{(4)} \alpha_{CO_2}^{(8)} + \alpha_{CO_2}^{(6)} \alpha_{CO_2}^{(10)} \right]$	

Tabela A4. Parâmetros α_{H_2O} do sistema de equações

$\alpha_{H_2O}^{(1)} = 4 \frac{Q_g}{\pi d^2} \frac{L}{D_{CO,eff}}$	$\alpha_{H_2O}^{(2)} = 2 \frac{k_2 L^2}{D_{H_2O,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{H_2O}^{(3)} = 0,1 \frac{k_3 L^2}{D_{H_2O,eff} \epsilon_g}$	$\alpha_{H_2O}^{(4)} = \frac{4 Q_g L}{\pi d^2 D_{H_2O,eff}}$
$\alpha_{H_2O}^{(5)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{H_2O}^{(1)}}{\Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2O}^{(6)} = \left[\frac{2}{(\Delta\eta)^2} - \alpha_{H_2O}^{(2)} \right]$
$\alpha_{H_2O}^{(7)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{H_2O}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2O}^{(8)} = \left[\frac{2 - \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{H_2O}^{(9)} = \left[\frac{2\alpha_{H_2O}^{(4)} \psi_{H_2O,C}}{2 + \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2O}^{(10)} = \left[\frac{2 - \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta} \right]$

$$\alpha_{H_2O}^{(11)} = \left[\frac{2\alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta \psi_{H_2O,C}}{2 + \alpha_{H_2O}^{(4)} \Delta\eta} \right]$$

$$\alpha_{H_2O}^{(12)} = [\alpha_{H_2O}^{(5)} \alpha_{H_2O}^{(8)} - \alpha_{H_2O}^{(6)} + \alpha_{H_2O}^{(7)} \alpha_{H_2O}^{(10)}]$$

Tabela A5. Parâmetros α_{H_2} os do sistema de equações

$\alpha_{H_2}^{(1)} = 4 \frac{Q_g}{\pi d^2} \frac{L}{D_{H_2,eff}}$	$\alpha_{H_2}^{(2)} = 2 \frac{k_2 L^2}{D_{H_2,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{H_2}^{(3)} = 0,3 \frac{k_3 L^2}{D_{H_2,eff} \epsilon_g}$	$\alpha_{H_2}^{(4)} = \frac{4 Q_g L}{\pi d^2 D_{H_2,eff}}$
$\alpha_{H_2}^{(5)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{H_2O}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2}^{(6)} = \left[\alpha_{H_2}^{(2)} - \frac{2}{(\Delta\eta)^2} \right]$
$\alpha_{H_2}^{(7)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{H_2O}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2}^{(8)} = \left[\frac{2 - \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{H_2}^{(9)} = \left[\frac{2\alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta \psi_{H_2,C}}{2 + \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{H_2}^{(10)} = \left[\frac{2 + \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta}{2 - \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{H_2}^{(11)} = \left[\frac{2\alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta \psi_{H_2,C}}{2 - \alpha_{H_2}^{(4)} \Delta\eta} \right]$	
$\alpha_{H_2}^{(12)} = [\alpha_{H_2}^{(5)} \alpha_{H_2}^{(8)} + \alpha_{H_2}^{(6)} + \alpha_{H_2}^{(7)} \alpha_{H_2}^{(10)}]$	
$\alpha_{H_2}^{(13)} = [\alpha_{H_2}^{(7)} \alpha_{H_2}^{(11)} + \alpha_{H_2}^{(5)} \alpha_{H_2}^{(9)}]$	

Tabela A6. Parâmetros α_{CH_4} do sistema de equações

$\alpha_{CH_4}^{(1)} = 4 \frac{Q_g}{\pi d^2} \frac{L}{D_{CH_4,eff}}$	$\alpha_{CH_4}^{(2)} = 0,1 \frac{k_3 L^2}{D_{CH_4,eff} \epsilon_g}$
$\alpha_{CH_4}^{(3)} = \frac{4 Q_g L}{\pi d^2 D_{CH_4,eff}}$	$\alpha_{CH_4}^{(4)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} + \frac{\alpha_{CH_4}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CH_4}^{(5)} = \left[-\frac{2}{(\Delta\eta)^2} - \alpha_{CH_4}^{(2)} \right]$	$\alpha_{CH_4}^{(6)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_{CH_4}^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$

13. DIREITOS AUTORAIS

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

$\alpha_{CH_4}^{(7)} = \left[\frac{2 - \alpha_{CH_4}^{(4)} \Delta\eta}{2 + \alpha_{CH_4}^{(4)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CH_4}^{(8)} = \left[\frac{2\alpha_{CH_4}^{(4)} \Delta\eta \psi_{CH_4,C}}{2 + \alpha_{CH_4}^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CH_4}^{(9)} = \left[\frac{2 + \alpha_{CH_4}^{(3)} \Delta\eta}{2 - \alpha_{CH_4}^{(3)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_{CH_4}^{(10)} = \left[\frac{2\alpha_{CH_4}^{(3)} \Delta\eta \psi_{CH_4,C}}{2 - \alpha_{CH_4}^{(3)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_{CH_4}^{(11)} = [\alpha_{CH_4}^{(4)} \alpha_{CH_4}^{(7)} + \alpha_{CH_4}^{(5)} + \alpha_{CH_4}^{(6)} \alpha_{CH_4}^{(9)}]$	
$\alpha_{CH_4}^{(12)} = [\alpha_{CH_4}^{(6)} \alpha_{CH_4}^{(10)} - \alpha_{CH_4}^{(4)} \alpha_{CH_4}^{(8)}]$	

Tabela A7. Parâmetros α_C do sistema de equações

$\alpha_C^{(1)} = 4 \frac{G_{t,s}}{\pi d^2} \frac{L}{D_{C,eff}}$	$\alpha_C^{(2)} = \frac{k_1 L^2}{D_{CH_4,eff} \epsilon_s}$
$\alpha_C^{(3)} = 2 \frac{k_2 L^2}{D_{C,eff} \epsilon_s}$	$\alpha_C^{(4)} = \frac{4 G_{t,s} L}{\pi d^2 D_{C,eff}}$
$\alpha_C^{(5)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} + \frac{\alpha_C^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$	$\alpha_C^{(6)} = \left[\frac{1}{(\Delta\eta)^2} - \frac{\alpha_C^{(1)}}{2\Delta\eta} \right]$
$\alpha_C^{(7)} = \left[\frac{2 - \alpha_C^{(4)} \Delta\eta}{2 + \alpha_C^{(4)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_C^{(8)} = \left[\frac{2\alpha_C^{(4)} \Delta\eta \psi_{C,C}}{2 + \alpha_C^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_C^{(9)} = \left[\frac{2 + \alpha_C^{(4)} \Delta\eta}{2 - \alpha_C^{(4)} \Delta\eta} \right]$	$\alpha_C^{(10)} = \left[\frac{2\alpha_C^{(4)} \Delta\eta \psi_{C,C}}{2 - \alpha_C^{(4)} \Delta\eta} \right]$
$\alpha_C^{(11)} = \left[\alpha_C^{(5)} \alpha_C^{(7)} - \frac{2}{(\Delta\eta)^2} + \alpha_C^{(6)} \alpha_C^{(9)} \right]$	
$\alpha_C^{(12)} = [\alpha_C^{(6)} \alpha_C^{(10)} - \alpha_C^{(5)} \alpha_C^{(8)}]$	

Tabela A8. Parâmetros b do sistema de equações

$b_1 = \alpha_{CO}^{(13)}$	$b_2 = \alpha_{CO_2}^{(12)}$
$b_3 = \alpha_{H_2O}^{(13)}$	$b_4 = \alpha_{H_2}^{(13)}$
$b_5 = \alpha_{CH_4}^{(12)}$	$b_6 = \alpha_C^{(12)}$

CO AND H₂ GAS PRODUCTION IN THE REDUCTION ZONE OF A BUBBLING FLUIDIZED-BED GASIFIER IN STATIONARY REGIME

Otávio José dos Santos, s.otavio@gmail.com¹

Jornandes Dias da Silva, jornandesdias@yahoo.com.br¹

¹Universidade de Pernambuco, Benfica Street, 455, Madalena, Recife/PE, CEP: 50.750-470 - Phone: 55 81 3184-7500

Abstract: *Foreseeing the CO and H₂ production, the biomass gasification in fluidized-bed gasifier is . In the reduction zone of the gasifier the fuel gases are generated the fuel gases so that the formation of the synthesis gas occurs (CO and H₂). In the present work, the study was delimited to analyze the behavior of the components CO and H₂ in the reduction region of a fluidized-bed gasifier so it was developed a mathematical model. The simulation of this mathematical model leads the species that characterize these phenomena, therefore, can be used statistical models to assure trustful resulted of the species. Thus, the work in study had as objective to validate the result of the computational code developed for the considered model with result of literature, to analyze profiles of the CO and H₂ components. Moreover, one sensitivity analyze also were carried to verify the effect of the entrance outflow of the gaseous phase and the entrance temperature under the effect the reaction.*

Keywords: *biomass, gasifier, computational, reduction*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.