

IFUSP/P 612

IF - USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÕES

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 - SÃO PAULO - SP
BRASIL

IFUSP/P-612

MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO PARA UM
GASEIFICADOR ELETROTÉRMICO - REGIÃO DE
PIRÓLISE



C.P.C. Prado, J.R. Moreira

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Novembro/1986

MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO PARA UM
GASEIFICADOR ELETROTÉRMICO - REGIÃO DE PIRÓLISE

C.P.C. Prado, J.R. Moreira

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
C.P. 20516, 01498 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Com o objetivo de estudar a pirólise da madeira num gaseificador eletrotérmico de leito móvel, é desenvolvido um modelo matemático de simulação que permite calcular o perfil de temperatura ao longo do leito do gaseificador, bem como a região deste onde a pirólise ocorre. Um estudo paramétrico mostra a dependência tanto do perfil de temperatura quanto da região de pirólise com: (a) a velocidade e o tamanho dos pedaços de madeira; (b) a temperatura dos eletrodos; (c) a altura do leito reservado à pirólise. Os dados experimentais utilizados foram obtidos pela CESP nos gaseificadores eletrotérmicos construídos em Corumbataí.

I. INTRODUÇÃO

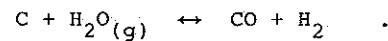
As crescentes necessidades de energia geradas pela sociedade industrial moderna têm impulsionado, em todo o mundo um intenso programa de pesquisas que, - além de buscar desenvolver tecnologias que permitam a utilização de novas fontes de energia (como é o caso da energia nuclear ou do Hidrogênio) - têm se voltado para descobrir e aperfeiçoar tecnologias capazes de adequar fontes de energia já há muito utilizadas pelo homem (como a madeira ou a força dos ventos) às características de consumo do mundo contemporâneo.

Dentro desta perspectiva é que a gaseificação da biomassa vêm adquirindo importância. Além da madeira e do carvão vegetal, a possibilidade de gaseificar bagaço de cana, casca de arroz, casca de côco e fibras diversas vêm sendo pesquisada em diversos países^(1,2,3,4,5). A tecnologia necessária à gaseificação da biomassa vem sendo desenvolvida em analogia à tecnologia utilizada na gaseificação do carvão mineral. Porém as diferenças existentes tanto na composição química quanto nas características físicas destes materiais (como a forma, a densidade, a condutividade térmica, etc.) fazem com que a substituição do carvão vegetal pela biomassa não seja trivial. Em particular a etapa de pirólise tende a assumir uma importância bem maior no caso da biomassa.

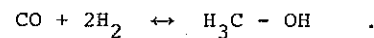
Pode-se notar na literatura⁽²⁰⁾ que a ciência dos combustíveis fósseis e a gaseificação do carvão mineral têm recebido considerável atenção ultimamente, mas a gaseificação da biomassa "in natura" tem tido menor prioridade na comunidade internacional. Uma possível e provável explicação é que são os paí-

ses em desenvolvimento que tem interesse prioritário na utilização da biomassa, enquanto que são os países industrializados que detêm as melhores condições para o desenvolvimento da pesquisa básica. O papel dos países em desenvolvimento nesta pesquisa é, pois, decisivo.

A gaseificação do carvão é um processo complexo, no qual, em última análise, pretende-se que o carbono reaja com o vapor d'água formando uma mistura de monóxido de carbono e Hidrogênio conhecida como gás de síntese



A CESP (Companhia Energética de São Paulo) desenvolveu e construiu em Corumbataí um gaseificador eletrotérmico de madeira (ver Fig. 1) visando inicialmente a produção de metanol que, por sua vez, é obtido do gás de síntese, por meio da reação



Dois aspectos diferenciam o gaseificador construído pela CESP da quase totalidade dos gaseificadores que vêm sendo construídos, pesquisados e modelados em todo o mundo:

- o fato da alimentação deste ser feita com madeira (e não com carvão mineral ou vegetal);
- o fato de ser eletrotérmico e funcionar em regime co-corrente.

Em particular dois aspectos até então pouco relevantes (e portanto pouco estudados) se evidenciam: o maior conhecimento (e controle) dos fenômenos elétricos que ocorrem na região de gaseificação (6,7,8,9,10) e o maior conhecimento da região do leito reservada à pirólise. É com este último aspecto que este

trabalho vai se preocupar.

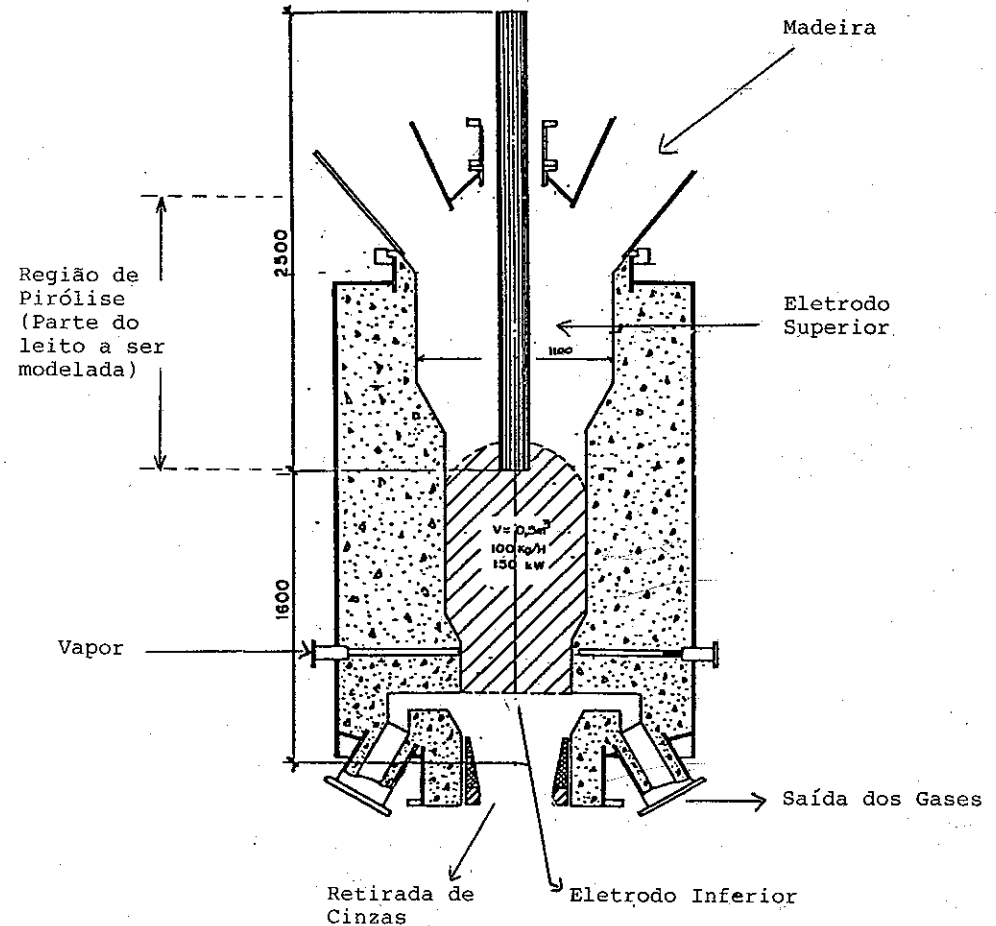


FIGURA 1 - Gaseificador eletrotérmico, construído pela CESP em Corumbataí.

Nos gaseificadores usuais de carvão vegetal ou madeira este aspecto é irrelevante. Nos gaseificadores contra-corrente a passagem dos gases quentes pela região de pirólise garante que esta ocorra. Por outro lado, nos gaseificadores autotérmicos

o alargamento ou estreitamento da zona de gaseificação é irrelevante. Isto porém não ocorre no gaseificador eletrotérmico co-corrente. Neste, a zona de gaseificação é bem determinada pelos eletrodos e a chegada de madeira (que não conduz eletricidade) nesta região interromperia a passagem de corrente elétrica (o que chegou a ocorrer experimentalmente). Por outro lado a existência de uma pilha de carvão numa região muito acima dos eletrodos poderia causar o desvio de corrente para esta região, onde não existe vapor d'água suficiente para a gaseificação e para um controle eficiente da temperatura do leito (o que também chegou a ser verificado experimentalmente). A região de pirólise, por sua vez, é aquecida principalmente pelo movimento de convecção natural dos gases, de descrição bastante mais complexa e de eficiência bem menor que a circulação forçada de gases existente nos outros tipos de gaseificadores (contra-corrente ou leito fluidizado).

Apresentamos neste artigo um modelo matemático capaz de simular a zona de pirólise do leito de um gaseificador eletrotérmico co-corrente. O modelo aqui apresentado permite prever o perfil de temperatura ao longo do leito e a região deste onde a pirólise ocorre em função dos parâmetros:

- velocidade da madeira
- tamanho dos pedaços de madeira
- temperatura na região de gaseificação
- altura do leito.

Os dados experimentais utilizados foram obtidos pela CESP nos gaseificadores construídos por ela em Corumbataí.

II. O MODELO MATEMÁTICO

Um conjunto de hipóteses simplificadoras foram necessárias à elaboração deste modelo.

- a) As trocas de calor por convecção e radiação no leito podem ser descritas por meio de uma condutividade térmica efetiva (K_{ef}) deste. Esta abordagem é usual na literatura e utilizamos os dados experimentais disponíveis para estimar K_{ef} . O valor encontrado foi de $3,2 \times 10^{-2}$ cal/cm.s.K.. Uma comparação entre os dados experimentais e o perfil de temperatura calculado com este modelo encontra-se na figura 2.

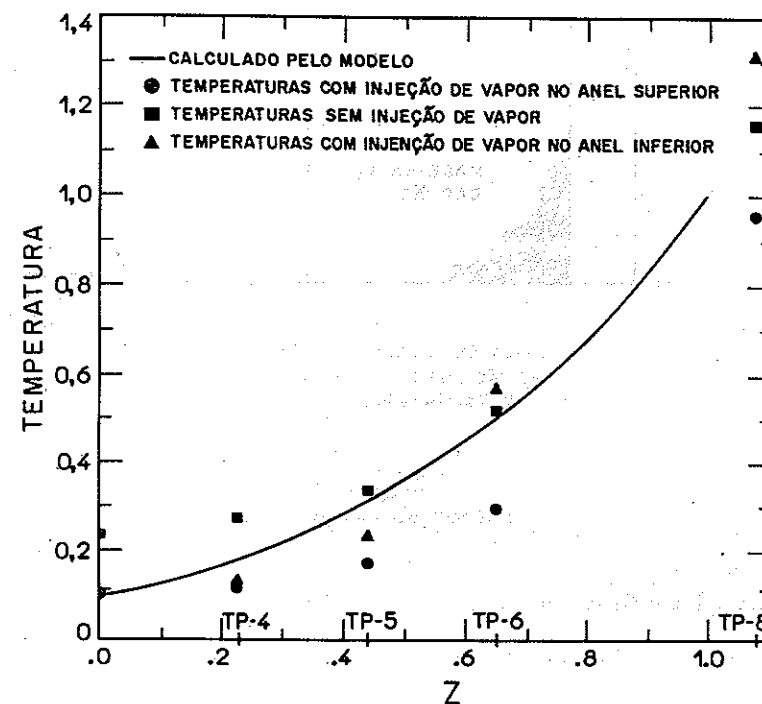


FIGURA 2 - Comparação entre os dados experimentais disponíveis e os resultados calculados pelo modelo com $K_{ef} = 3,2 \times 10^{-2}$ cal/cm.s.K..

b) Os perfis de temperatura são achatados e o leito pode ser descrito por um modelo unidimensional. Uma visão esquemática do leito modelado encontra-se na figura 3.

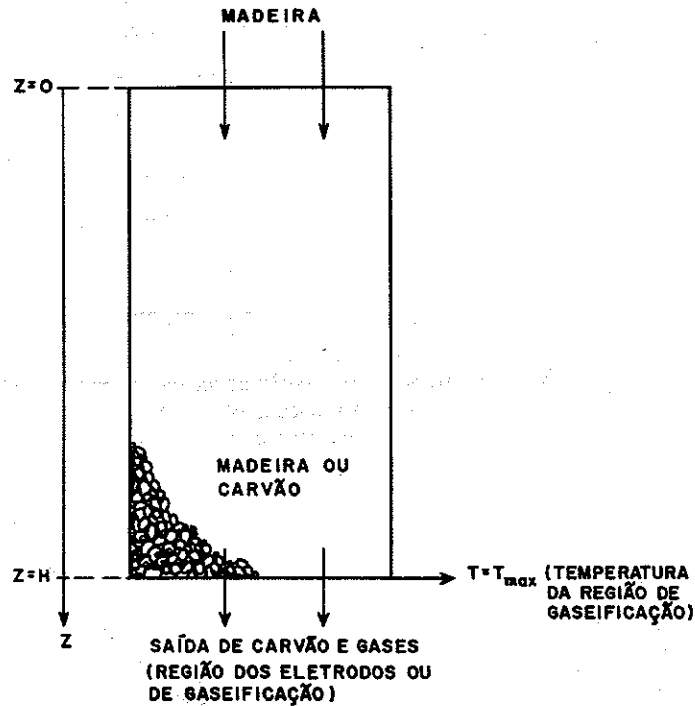
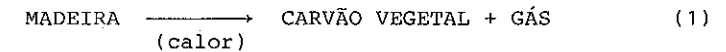


FIGURA 3 - Esquema do leito a ser modelado.

- c) Não há perda de calor pelas paredes.
- d) Os pedaços de madeira são esféricos com raio R_p e os seus volumes são constantes.
- e) Na direção axial o gradiente de temperatura no leito, para uma distância equivalente a um diâmetro do pedaço de madeira, é desprezível.

- f) Para efeito do balanço de energia entre a fase sólida e a fase gasosa, no leito do gaseificador, os pedaços de madeira são considerados isotérmicos e encontram-se a uma temperatura média T_s . Porém a existência de um gradiente interno de temperatura é considerado na cinética da pirólise por meio de um modelo do tipo núcleo-não-reagido, que exatamente leva em conta a condução térmica no interior do bloco de madeira.
- g) A cinética da pirólise pode ser descrita por uma expressão do tipo Arrhenius de primeira ordem⁽¹¹⁾



e, nas condições de operação do gaseificador (pedaços grandes de madeira, baixas taxas de aquecimento e pressão atmosférica) é uma reação exotérmica⁽¹²⁾.

A partir destas hipóteses, o leito pode ser descrito pelas seguintes equações:

- a) continuidade da fase sólida

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = -\frac{A}{V_s} [\rho(z) - \rho_c] \exp\left[-E/RT_c(z)\right] \quad (2)$$

- b) continuidade da fase gasosa

$$\frac{dM_g(z)}{dz} = \frac{A(1-\epsilon)}{\epsilon} [\rho(z) - \rho_c] \exp\left[-E/RT_c(z)\right] \quad (3)$$

- c) balanço de energia da fase sólida

$$\rho(z) \frac{dT_s(z)}{dz} = \frac{hS[T_g(z) - T_s(z)]}{(1-\epsilon)V_s C_{p_s}} + \frac{\Delta H'}{C_{p_s}} \frac{d\rho(z)}{dz} \quad (4)$$

d) balanço de energia da fase gasosa

$$M_g(z) \frac{dT_g(z)}{dz} = \frac{hS[T_s(z) - T_g(z)]}{\epsilon C_{p_g}} + \frac{K_{ef}}{\epsilon C_{p_g}} \frac{d^2T_g(z)}{dz^2} + \frac{(1-\epsilon)V_s}{\epsilon} [T_g(z) - T_s(z)] \frac{d\rho(z)}{dz} \quad (5)$$

onde os símbolos tem o significado abaixo:

- ρ = densidade da madeira
- ρ_c = densidade final da madeira (carvão vegetal)
- V_s = velocidade da fase sólida
- A = fator pré-exponencial
- E = energia de ativação
- R = constante universal dos gases
- T_s = temperatura média da fase sólida
- T_c = temperatura na frente de pirólise
- T_g = temperatura da fase gasosa
- M_g = fluxo mássico dos gases ($M_g = \rho_g V_g$)
- ϵ = porosidade do leito
- S = área de madeira em contato com o gás por unidade de volume do leito ($S = \frac{3(1-\epsilon)}{R_p}$)
- h = coeficiente de troca de calor por convecção
- z = altura do leito (ver figura 3)
- C_{p_s} = calor específico da fase sólida
- C_{p_g} = calor específico da fase gasosa
- $\Delta H'$ = calor de reação efetivo
- K_{ef} = condutividade térmica efetiva do leito

A partir deste ponto, e sempre que possível, será omitida a dependência de T_s , T_g , T_c , ρ e M_g com a variável z , pe-

lo bem da simplicidade.

Temos ainda as seguintes condições de contorno:

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \rho_m \\ T_s = T_0 \\ M_g = 0 \end{array} \right\} \text{ para } z = 0 \quad (6)$$

$$T_g = T_{max} \quad \text{para } z = H \quad (7)$$

onde T_0 é a temperatura inicial da madeira, T_{max} a temperatura da região de gaseificação (região dos eletrodos) e H a altura total do leito na região de pirólise, ou seja, $0 \leq z \leq H$.

III. CÁLCULO DA TEMPERATURA CORRIGIDA T_c

A temperaturas elevadas, como as que ocorrem no leito de um gaseificador, a pirólise é uma reação química relativamente rápida, seguramente bem mais rápida que a difusão de calor por condução térmica na madeira. Podemos pensar portanto num pedaço grande de madeira que se pirolisa como sendo formado por um núcleo de madeira ainda não pirolizada; uma camada de madeira em pirólise e uma casca exterior de carvão vegetal (madeira já pirolizada), conforme a figura 4a. Se o gradiente interno de temperatura na madeira for acentuado (como o verificado no interior dos pedaços de madeira que descem o leito deste gaseificador⁽¹³⁾) podemos considerar a pirólise como ocorrendo em uma superfície que separa uma camada de carvão vegetal de um núcleo de madeira não pirolizada (ver figura 4b). Nestas condições, a taxa de pi-

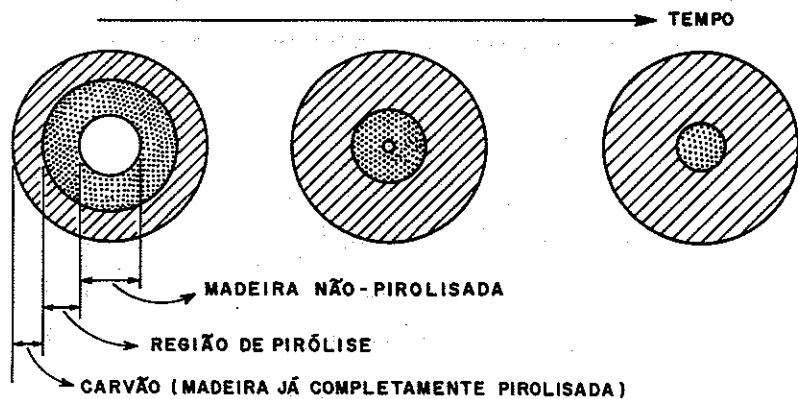


FIGURA 4(a) - Modelo de núcleo-não-reagido para a pirólise.

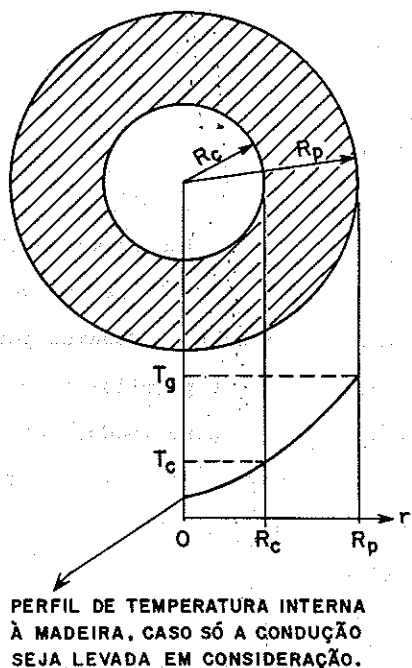


FIGURA 4(b) - A temperatura corrigida T_c .

rólise está então associada à velocidade com que esta superfície, caracterizada pelo raio R_c , caminha para dentro do bloco de madeira. Numa determinada altura z do leito para a qual a densidade é ρ temos:

$$\rho = \frac{\rho_m R_c^3 + \rho_c (R_p^3 - R_c^3)}{R_p^3} \quad (8)$$

e portanto

$$R_c = \frac{R_p (\rho - \rho_c)^{1/3}}{(\rho_m - \rho_c)} \quad (9)$$

onde ρ_m é a densidade inicial da madeira. O perfil de temperatura no interior da madeira é calculado considerando-se que a propagação do calor se dá apenas por condução térmica. A temperatura T_i num ponto r qualquer no interior do pedaço de madeira, para uma determinada altura z do leito é determinada então por:

$$\frac{\partial T_i(r, z)}{\partial z} = \frac{\alpha}{V_s} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_i(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i(r, z)}{\partial r^2} \right] + \Delta H' \frac{\partial \rho}{\partial z} \delta(r - R_c) \quad (10)$$

onde α é a difusividade térmica da madeira e $\delta(r - R_c)$ a função delta de Dirac. O calor liberado na reação de pirólise, $\Delta H'$, é acrescentado na frente de pirólise (local onde a reação está ocorrendo) e eventualmente se espalha, também por condução, pelo pedaço de madeira. A temperatura na superfície do bloco de madeira é suposta igual a T_g , a temperatura do gás calculada pela equação (5):

$$T_g(R_p, z) = T_g(z) \quad (11)$$

Sabemos que a pirólise é uma reação volumétrica, não obedecendo, em pedaços pequenos de madeira uma cinética compatível com o modelo de núcleo-não-reagido. No entanto, num pedaço grande de madeira, é a velocidade de difusão do calor dentro deste que tende a limitar a velocidade da pirólise, e portanto a determinar a cinética desta reação^(13,14,15), justificando assim o uso do modelo por nós adotado.

IV. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

Definindo novas variáveis:

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_m} \quad T' = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0} \quad R = \frac{R_c}{R_p}$$

$$z' = \frac{z}{H} \quad M' = \frac{M_g}{V_s \rho_m} \quad r' = \frac{r}{R_p}$$

e ainda

$$y' = \frac{dT'_g}{dz'}$$

podemos reescrever as equações (2), (3), (4) e (5) e as condições de contorno (6) e (7) na forma adimensional

$$\frac{d\rho'}{dz'} = -\xi_1 (\rho' - \rho_0) \exp\left[-\bar{E}/(T'_c + T'_r)\right] \quad (12a)$$

$$\frac{dM'}{dz'} = \xi_1 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} (\rho' - \rho_0) \exp\left[-\bar{E}/(T'_c + T'_r)\right] \quad (12b)$$

$$\rho' \frac{dT'_s}{dz'} = \frac{\xi_2}{(1-\epsilon)} (T'_g - T'_s) + \Delta\bar{H} \frac{d\rho'}{dz'} \quad (12c)$$

$$\frac{dT'_g}{dz'} = y' \quad (12d)$$

$$\frac{dy'}{dz'} = \frac{\epsilon}{K_g} M' y' - \frac{\xi_2}{K_g C_p} (T'_s - T'_g) + \frac{(1-\epsilon)}{K_g} \frac{d\rho'}{dz'} (T'_s - T'_g) \quad (12e)$$

$$\frac{\partial T'_i}{\partial z'} = \xi_3 \left(\frac{2}{r'} \frac{\partial T'_i}{\partial r'} + \frac{\partial^2 T'_i}{\partial r'^2} \right) \quad (13)$$

onde

$$\xi_1 = \frac{A \cdot H}{V_s} \quad \xi_2 = \frac{S \cdot h \cdot H}{V_s C_p \rho_m} \quad \xi_3 = \frac{\alpha \cdot H}{V_s R_p^2}$$

$$\bar{E} = \frac{E}{R(T_{\max} - T_0)} \quad T'_r = \frac{T_0}{T_{\max} - T_0}$$

$$C_p = \frac{C_{p_g}}{C_{p_s}} \quad \rho_0 = \frac{\rho_c}{\rho_m}$$

$$\Delta\bar{H} = \frac{\Delta H}{C_{p_s}(T_{\max} - T_0)} \quad K_g = \frac{K_{ef}}{\rho_m V_s C_{p_g} H}$$

Temos ainda as condições de contorno

$$\left. \begin{array}{l} \rho' = 1 \\ M' = 0 \\ T'_s = 0 \end{array} \right\} \text{ para } z' = 0 \quad (14)$$

$$T'_g = 1 \quad \text{para } z' = 1 \quad (15)$$

$$T'_i = T'_g \quad \text{para } r' = 1, z \text{ qualquer} \quad (16)$$

Ao examinarmos mais atentamente o conjunto de equações (12) juntamente com as condições de contorno (14,15), vemos

que quatro das equações que caracterizam nosso modelo constituem -se problemas de condição inicial, com este valor definido para $z' = 0$. Apenas uma das equações pode ser caracterizada como um problema de "condição final", ou seja, tem sua condição inicial definida para $z' = 1$. Resolvemos então numericamente estas equações como se fossem um sistema de equações diferenciais ordinárias com condição inicial, por meio de uma rotina do tipo preditor-corretor baseada no algoritmo de Haming⁽¹⁶⁾. Era suposto um valor para T'_g em $z' = 0$ e o sistema era então integrado ao longo do leito. Quando $z' = 1$ o valor calculado para T'_g era então comparado com o valor previsto nas condições de contorno. Um novo valor para a temperatura inicial do gás era então estimado através de uma interpolação linear. O cálculo então era reiniciado em $z' = 0$ com o novo valor inicial para T'_g e este processo iterativo se repetia até que uma precisão de 1% no valor de T'_g em $z' = 1$ fosse obtida.

A equação (13) que calcula a temperatura corrigida T'_c é uma equação com derivadas parciais. A discretização em r' foi resolvida pelo método das diferenças finitas, e esta equação foi, então, integrada na variável z' junto com as demais equações.

O calor específico da fase sólida foi considerado proporcional às massas de carvão vegetal e madeira existentes naquele ponto

$$Cp_s = \frac{(\rho' - \rho_o)}{(1 - \rho_o)} Cp_m + \frac{(1 - \rho')}{(1 - \rho_o)} Cp_c \quad (17)$$

Os valores utilizados para o cálculo dos diversos parâmetros adimensionais necessários ao modelo estão na tabela I.

TABELA I - Parâmetros necessários ao modelo.

Parâmetro	Valor	Referência
E (Kcal/mol)	30	(11)
A (s^{-1})	7×10^7	(11)
ΔH (cal/g)	-80	(12)
Cp_m (cal/g.K)	0,6	(17)
Cp_c (cal/g.K)	0,2	(17)
Cp_g (cal/g.K)	0,5	(18)
h (cal/cm ² s.K)	$2,4 \times 10^{-4}$	(15)
ρ_c (cal/g)	0,2	(17)
T_o (K)	298	-
T_{max} (K)	1042	-
ϵ	0,4	(19)

Existe razoável controvérsia na literatura com relação aos valores apresentados nesta tabela. Além disto, nem sempre foi possível precisar se estes valores foram obtidos em condições experimentais próximas às verificadas nos gaseificadores eletrotérmicos de Corumbataí. Estas ressalvas devem ser consideradas na análise dos resultados quantitativos apresentados a seguir.

V. CONCLUSÕES

A sensibilidade do modelo a diferentes valores da cinética da pirólise (A, E), do calor de reação (ΔH) e da condutividade efetiva do leito (K_{ef}) foi avaliada. Podemos concluir que uma variação cerca de 10% em K_{ef} praticamente não altera os resultados calculados. O modelo é porém, muito sensível aos valores adotados para a cinética da pirólise (figura 5). O valor do calor de reação ΔH tem também razoável influência no perfil de temperatura da madeira sendo responsável pelo aquecimento de boa parte desta. A figura 6 compara os resultados obtidos para diferentes valores de ΔH (K_{ef} foi mantido constante).

O modelo também permite avaliar, qualitativamente, a influência da

- velocidade da madeira
- tamanho do pedaço de madeira
- temperatura na região dos eletrodos
- altura do leito

no perfil de temperatura e na localização e largura da região de pirólise no leito (figuras 7 a 9).

A primeira conclusão que podemos tirar é que o perfil de temperatura do leito é pouco sensível à região onde ocorre a pirólise, sendo fundamentalmente determinado pela razão entre os produtos "capacidade térmica x velocidade" das fases sólida e gasosa, como ocorre nos trocadores de calor. Assim, a velocidade da madeira parece ser o fator determinante no perfil de temperatura do leito, como pode ser observado na figura 7.

A segunda conclusão é que variações no tamanho do pedaço de madeira, na faixa de tamanhos utilizada em Corumbataí são

bastante importantes no sentido de garantir (ou não) a pirólise completa da madeira antes que esta atinja a região dos eletrodos. As pequenas diferenças observadas nos perfis de temperatura do leito devem-se ao fato de que o calor absorvido pela madeira é proporcional à área superficial desta, e a relação entre área/volume cai com $1/R_p$, resultando numa maior diferença entre as temperaturas das fases sólida e gasosa.

A faixa do leito onde a pirólise ocorre também aumenta com R_p , mas podemos observar que esta ocorre num espaço do leito que corresponde a 2 ou 3 diâmetros do pedaço de madeira.

O modelo ainda se mostrou bastante sensível à temperatura estabelecida para a região dos eletrodos, como pode ser verificado na figura 9.

Podemos ainda concluir que, nas condições de operação dos gaseificadores eletrotérmicos, existe um limite para a velocidade descendente da madeira em torno de 1 m/h, caso se deseje a pirólise completa da madeira antes que esta atinja a região dos eletrodos. Ficou também estabelecido que leitos mais curtos tendem a ter um perfil de temperatura mais homogêneo, e isto contribui um pouco para aumentar a velocidade da pirólise, uma vez que a troca de calor entre as fases sólida e gasosa é proporcional a diferença de temperatura entre estas. Para velocidades da madeira da ordem de 90 cm/h, a um metro acima da região dos eletrodos já temos uma temperatura quase igual à temperatura ambiente, e a região acima desta fica reduzida a função de um mero depósito de madeira.

Queremos ainda ressaltar que, além da incerteza no valor de alguns parâmetros apresentados na tabela I, constituem limitações deste modelo a não inclusão da etapa de secagem da madei

ra e o tratamento simplista dado à cinética de pirólise (equação 1), incapaz de, por exemplo, prever o resíduo final de carvão vegetal ou a quantidade de alcatrão formada.

Queremos finalmente agradecer à Companhia Energética de São Paulo (CESP) pelo apoio, inclusive financeiro, ao desenvolvimento deste programa.

REFERÊNCIAS

- (1) Moody, D.R., "Advances in utilizing wood residue and bark as fuel for a gas turbine", Forest Products Journal, Vol. 26, 9 (1976).
- (2) Agency for International Development (1977), "Pyrolytic conversion of agricultural and forestry wastes to alternate energy sources in Indonesia - a feasibility study".
- (3) Solar Energy Research Institute - SERI, "A survey of biomass gasification", SERI-TR 33-239 vols. 1, 2, 3 (1979).
- (4) Antal, M.J.; Edwards, W.E.; Friedman, H.L.; Rogers, F.E., "A study of the steam gasification of organic wastes", D.M. A.E. Princeton University (1980).
- (5) Yo Kaichiya, N.S.; Souza Santos, M.; Jen, I.C., "Aproveitamento de resíduos vegetais para fins energéticos - gaseificação", IPT, Rel. nº 16.223 (1982).
- (6) Gambirasio, G.; Bennaton, J., "Considerações sobre o cálculo da configuração do campo elétrico em meios dependentes da temperatura", Seminário sobre Cálculos de Campos Elétricos com Métodos Numéricos - Pirelli S.A. - PUC/RJ, São Paulo (1985).
- (7) Bennaton, J.; Uehara, O.; Gambirasio, G., "Configuração do campo elétrico obtida pelo método das diferenças finitas, em meios dependentes da temperatura", Seminário sobre Cálculo de Campos Elétricos com Métodos Numéricos - Pirelli S.A. - PUC/RJ, São Paulo (1985).
- (8) Gambirasio, G.; Nascimento, C.A.O.; Bennaton, J.; Prado, C. P.C., "Considerações sobre o modelamento de gaseificadores eletrotérmicos", Congresso Latino Americano de Automática, Buenos Aires, Argentina (1986).

- (9) Gambirasio, G.; Nascimento, C.A.O.; Bennaton, J.; Uehara, O., "Resolução numérica de equações tipo "difusão-convecção-reação" utilizadas no modelamento de gaseificadores eletrotérmicos", Congresso Latino Americano de Automática, Buenos Aires, Argentina (1986).
- (10) Bennaton, J.; Gambirasio, G.; Uehara, O., "Pontos de equilíbrio de sistemas não-lineares de equações diferenciais e derivadas parciais, descritivas do comportamento de reatores eletrotérmicos", Congresso Latino Americano de Automática, Buenos Aires, Argentina (1986).
- (11) Roberts, A.F., "Combustion and flame", 14 (1970).
- (12) Mok, W.S.; Antal, M.J., *Thermochim. Acta* 68 (1983).
- (13) Prado, C.P.C., "Pirólise de madeira em gaseificadores eletrotérmicos", Tese de Doutorado apresentada no Instituto de Física da USP (1985).
- (14) Havens, J.A.; Hashemi, H.T.; Brown, L.E., Welker, J.R., "A mathematical model of the thermal decomposition of wood", *Combustion Science and Technology* 5 (1972).
- (15) Chan, W.C.R.; Kelbon, M.; Krieger, B.B., "Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle", a ser publicado em FUEL.
- (16) Carnahan, B.; Luther, H.A.; Wilkes, J.O., John Wiley & Sons (1969).
- (17) Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw-Hill (8^a ed.).
- (18) Prado, C.P.C.; Urban, D.; Moreira, J.R., Relatório final do Convênio CESP-IFUSP (1982).

- (19) Relatório interno da CESP sobre campanha do gaseificador G-5 (1984).
- (20) Larson, E.D., "Producer gas, economic development and the role of research", Center of Energy and Environmental Studies Engineering Quadrangle, Princeton University, PU/CEES Report nº 187 (1985).

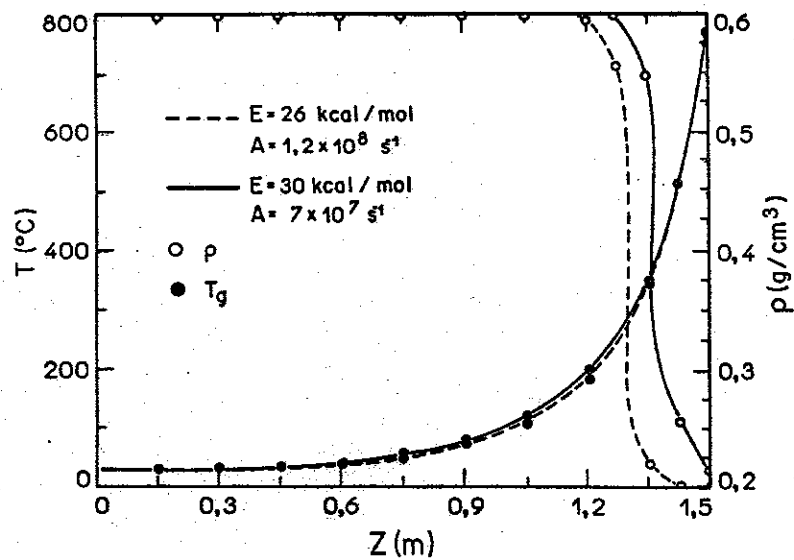


FIGURA 5 - Perfil de temperatura e região de pirólise no leito para diferentes valores de E e A ($V_s = 50 \text{ cm/h}$, $T_{\text{max}} = 769^\circ\text{C}$, $H = 1,5 \text{ m}$, $R_p = 5,0 \text{ cm}$).

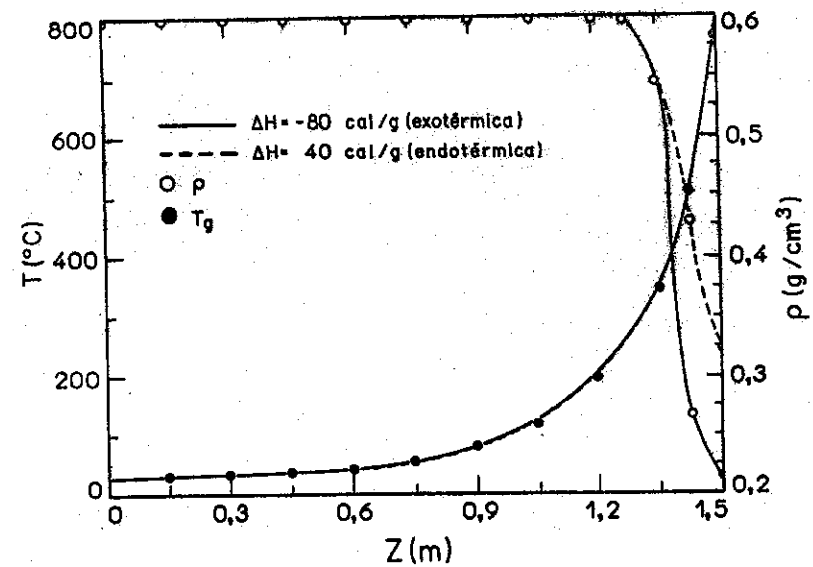


FIGURA 6 - Perfil de temperatura do leito e região de pirólise para diferentes valores do calor de reação ($V_s = 50 \text{ cm/h}$, $T_{\text{max}} = 769^\circ\text{C}$, $H = 1,5 \text{ m}$, $R_p = 5,0 \text{ cm}$).

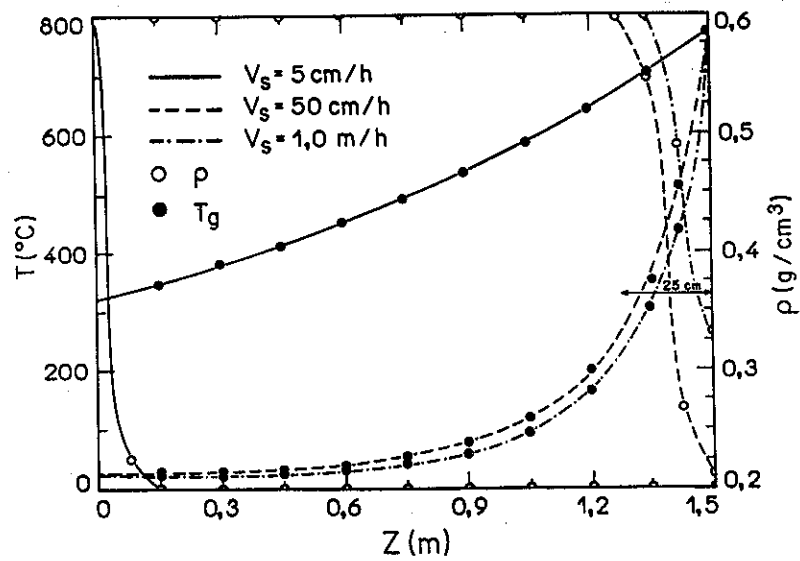


FIGURA 7 - Perfil de temperatura e região de pirólise para diferentes velocidades descendentes da madeira ($T_{\max} = 769^{\circ}\text{C}$, $H = 1,5\text{ m}$, $R_p = 5,0\text{ cm}$).

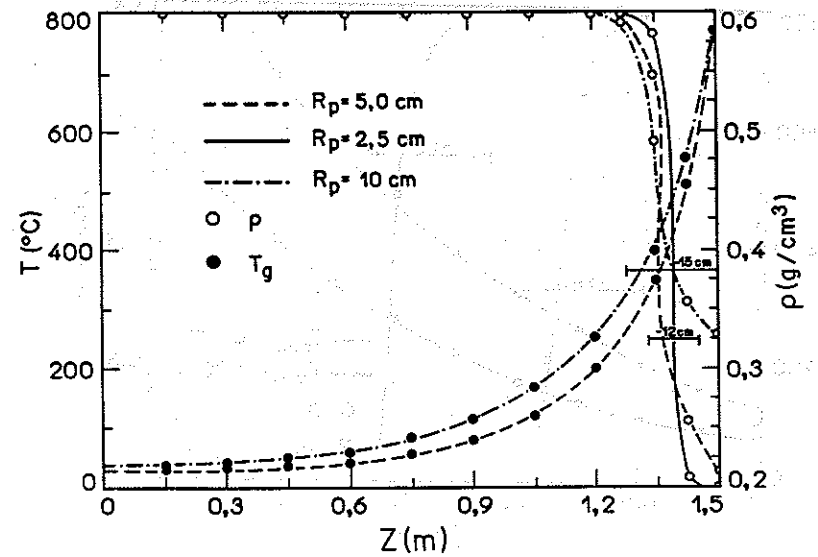


FIGURA 8 - Perfil de temperatura e região de pirólise no leito para diferentes tamanhos de madeira ($V_s = 50\text{ cm/h}$, $T_{\max} = 769^{\circ}\text{C}$, $H = 1,5\text{ m}$).

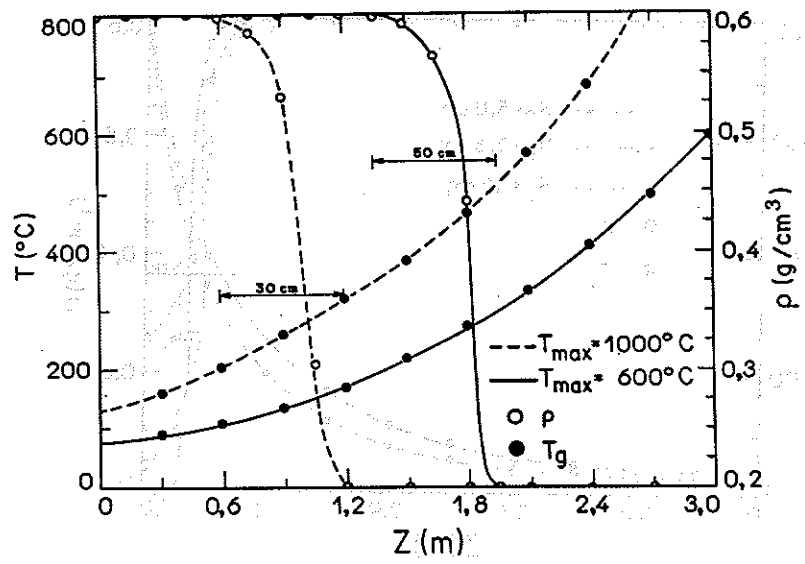


FIGURA 9 - Perfil de temperatura e região de pirólise no leito para diferentes temperaturas na região dos eletrodos ($V_s = 5 \text{ cm/h}$, $H = 3,0 \text{ m}$, $R_p = 5,0 \text{ cm}$).