



Solução Numérica de um Modelo de Reator de Craqueamento Térmico de Biomassa

**Sávio Leandro Bertoli¹, Juscelino de Almeida Junior², Silvana Licodiedoff³,
Carolina Krebs de Souza⁴, Jaci Carlo Schramm Câmara Bastos⁵**

¹Departamento de Engenharia Química, FURB (savio@furb.br)

²Departamento de Engenharia Química, FURB (junior@eqx.com.br)

³Departamento de Engenharia de Alimentos, FURB (silvana.lico@yahoo.com.br)

⁴Departamento de Engenharia de Alimentos, FURB (carolinakrebs@furb.br)

⁵Departamento de Engenharia Química, FURB (jcsbastos@furb.br)

Resumo

A preocupação com os impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis tem se intensificado nas últimas décadas. Logo, processos para produção de biocombustíveis são alvo de muitas pesquisas nos últimos anos. Dentre eles, a pirólise destaca-se pela vasta gama de matérias primas que podem ser utilizadas, como por exemplo, a biomassa. Do ponto de vista energético, o processo é autossustentável, uma vez que a 'quebra' num reator de processamento de resíduos produz excedentes de energia. Este artigo apresenta um modelo matemático que descreve os fenômenos de transferência de calor e conversão química que ocorrem no reator. Estado estacionário, reator adiabático, reações de primeira ordem são hipóteses simplificadoras do modelo matemático. A discretização das equações é feita através da combinação do Método das Diferenças Finitas com o Método Analítico finito.

Palavras-chave: Reator de biomassa. Craqueamento Térmico. Método Analítico Finito e Método das Diferenças Finitas.

Área Temática: Biocombustíveis.

Numerical Solution of a Thermal Cracking Reactor for Biomass

Abstract

Concern about the environmental impacts generated by burning fossil fuels has intensified in recent decades. Therefore, processes for biofuel production are targets of several researches in recent years. Among them, the pyrolysis is distinguished by the wide range of raw materials that can be used, for example, biomass. From the energy perspective, the process is self-sustaining, since the 'break' a waste processing reactor produces energy surplus. This article behind a mathematical model describes the heat transfer and chemical phenomena that occur during the conversion reactor. Steady state, adiabatic reactor, inert particles, first order reactions are simplifying assumptions of the mathematical model. Discretization of the equations is made by combining the Method of Finite Differences with the Finite Analytic Method.

Key words: Reactor biomass. Pyrolysis. Finite Analytic Method and Method of Finite Differences.

Theme Area: Biofuels.



1 Introdução

A busca por uma nova matriz energética oriunda de fontes renováveis é objeto de muitas pesquisas nos últimos anos, como, por exemplo, Wiggers (2003 e 2007). Diferentes tipos de matérias primas, equipamentos e processos vêm sendo estudados neste período. O intuito é conciliar viabilidade econômica com o menor impacto possível no meio ambiente.

Os biocombustíveis vêm se destacando nesse cenário. Eles são de fontes renováveis (biomassa) e podem ser tranquilamente adaptados aos mesmos motores projetados para combustíveis fósseis.

Dentre os processos de obtenção de biocombustíveis, pode-se destacar a pirólise que é a transformação irreversível de substâncias ricas em carbono e hidrogênio pela ação de calor em uma atmosfera desprovida de oxigênio. A reação acontece entre 300 a 1000°C e é predominantemente endotérmica (BAUM et al., 1974; BRIDGWATER, 2003).

Lewis (1976) destaca que a pirólise é bastante vantajosa do ponto de vista energético, já que pode gerar mais energia do que o processo consome e também pode ser adaptada a diversos tipos de matéria prima ricas em carbono e hidrogênio.

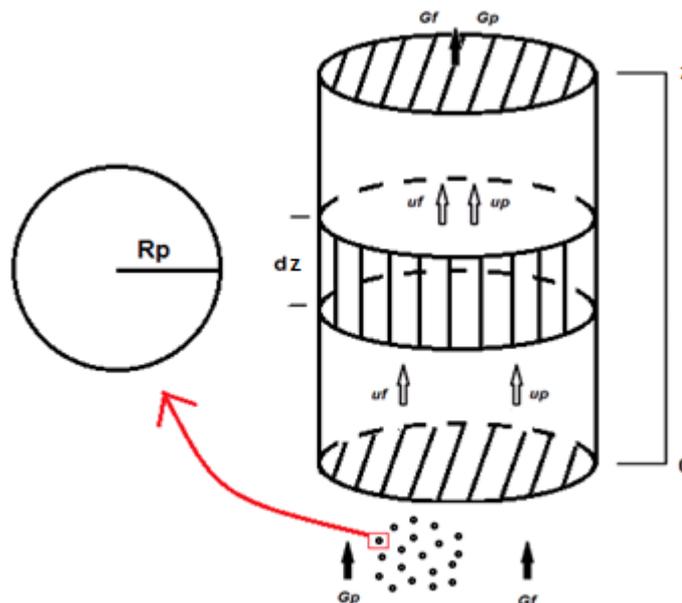
Outra vantagem da pirólise é apresentada por Diaz (2008) que comparou a pirólise a processos de incineração direta, no tratamento térmico de resíduos, resultando numa diminuição da poluição do ar.

Destacada a necessidade de utilizar matérias primas provenientes de fontes renováveis, gerando um menor impacto ambiental, cabe ressaltar que os estudos da fenomenologia dos processos envolvidos são de extrema importância para controle e ampliação de escalas.

2 Modelagem Matemática

O modelo foi construído com base nas leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento onde o limite do sistema termodinâmico tem de ser especificado em torno do sistema para ser analisado. A Figura 1 mostra um sistema de processamento térmico típico para pirólise.

Figura 1 - Reator de Leito Móvel





O modelo reacional e de transferência de calor e reacional proposto a seguir tem como base o modelo de Leung et al. (1965).

As hipóteses do modelo são as seguintes:

- Estado estacionário;
- Há gradiente de temperatura no interior da partícula;
- reator adiabático;
- leito diluído;
- reação química de primeira ordem em fase gasosa;
- escoamento desenvolvido em ambas as fases;
- propriedades físicas constantes;
- a transferência de calor pela colisão de partículas entre si ou com a parede do reator é insignificante;
- As partículas são esféricas e estão uniformemente distribuídas na seção transversal do tubo;
- a temperatura das partículas não varia com a posição radial no reator;
- a velocidade do fluido é uniforme na seção transversal do reator;
- não ocorre transferência de calor por radiação.

Desta forma, as equações do modelo podem ser escritas na forma a seguir:

Balanço de Espécie Química (BERTOLI et al., 2015)

$$\frac{dF_n}{dz} = -\alpha \cdot F_n \quad (1)$$

Balanço de Energia (BERTOLI et al., 2015 ; LEUNG et al. ,1965)

$$\frac{dT_f}{dz} = \beta_1 \cdot (T_p - T_f) + \beta F_n \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} = \frac{1}{\beta_2} \frac{\partial T_p}{\partial z} \quad (3)$$

Balanço de Quantidade de Movimento (LEUNG et al. ,1965)

$$\frac{dP}{dz} = \frac{1,635 \cdot w^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{\left(1,77 \cdot d_p \cdot \frac{w}{\mu} \cdot (1 - \varepsilon)^{0,05} - 0,81\right) \cdot g_c \cdot d_p \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_g} \quad (4)$$

Equações auxiliares (BERTOLI et al., 2015 ; LEUNG et al.,1965)

$$\alpha = \frac{\varepsilon \cdot k \cdot P_{l-1}}{(1 + \varepsilon \cdot x_{l-1}) \cdot R \cdot T_f \cdot G_f} \quad (5)$$

$$\beta_1 = \frac{A \cdot h_p}{G_f \cdot M \cdot c_f} \quad (6)$$



$$\beta = \frac{\varepsilon \cdot k \cdot P \cdot (-\Delta H_T)}{u_p \cdot \kappa \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (1 + \varepsilon \cdot x) \cdot R \cdot T_f} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \frac{\alpha \rho_s (1 - \varepsilon)}{G_p} \quad (8)$$

$$k = 10^{\left(12,450 - \frac{22100}{T_{f,t-1}}\right)} \quad (9)$$

$$u_p = \frac{G_p}{(1 - \varepsilon)} \quad (10)$$

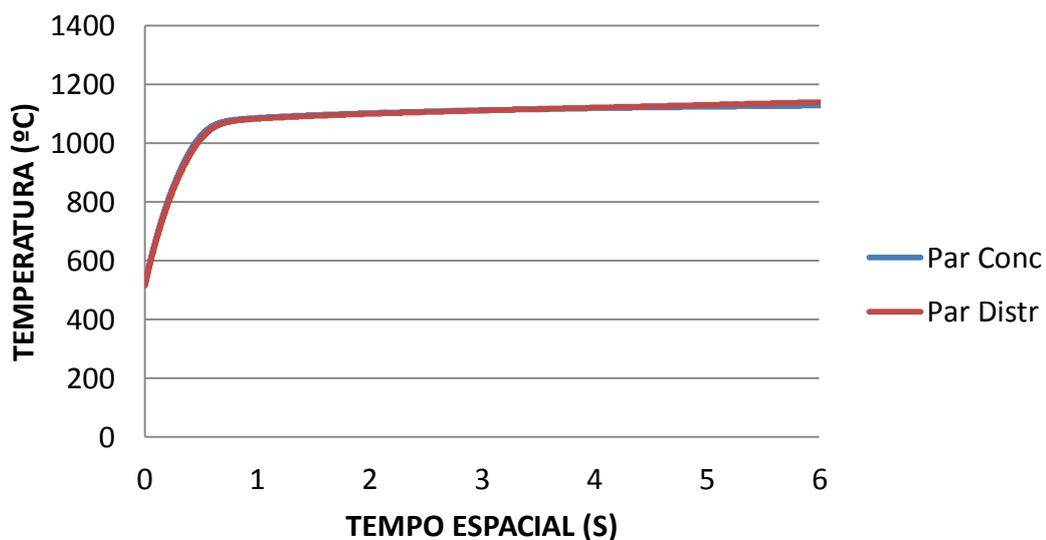
$$F_n = 1 - x \quad (11)$$

A discretização da Equação 3 é feita utilizando o Método das Diferenças Finitas. O Método Analítico Finito resolve o modelo considerando a não linearidade do sistema de equações através do seccionamento do reator em intervalos finitos. Nestes intervalos os termos são mantidos lineares e avaliados nas condições de temperatura no início do intervalo em questão.

3 Resultados

Na Figura 2 apresenta-se perfis de temperatura do fluido obtido da solução do modelo a parâmetros concentrados (BERTOLI et al., 2015) versus a solução do modelo proposto a parâmetros distribuídos (LEUNG et al., 1965).

Figura 2- Perfil de Temperatura do Fluido (Par Conc. versus Par Distr.)

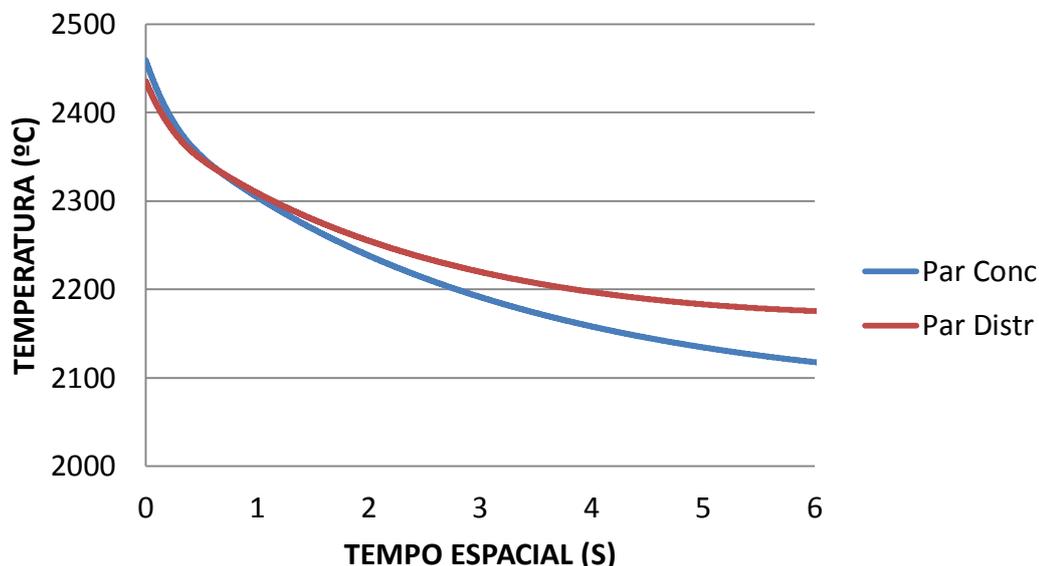


Nota-se uma pequena diferença nos perfis de temperatura nos resultados proporcionados pela modelagem aqui encontrada e no modelo encontrado em Bertoli et al. (2015). Isto deve-se a distribuição de temperatura no interior da partícula. Esse fato fica mais



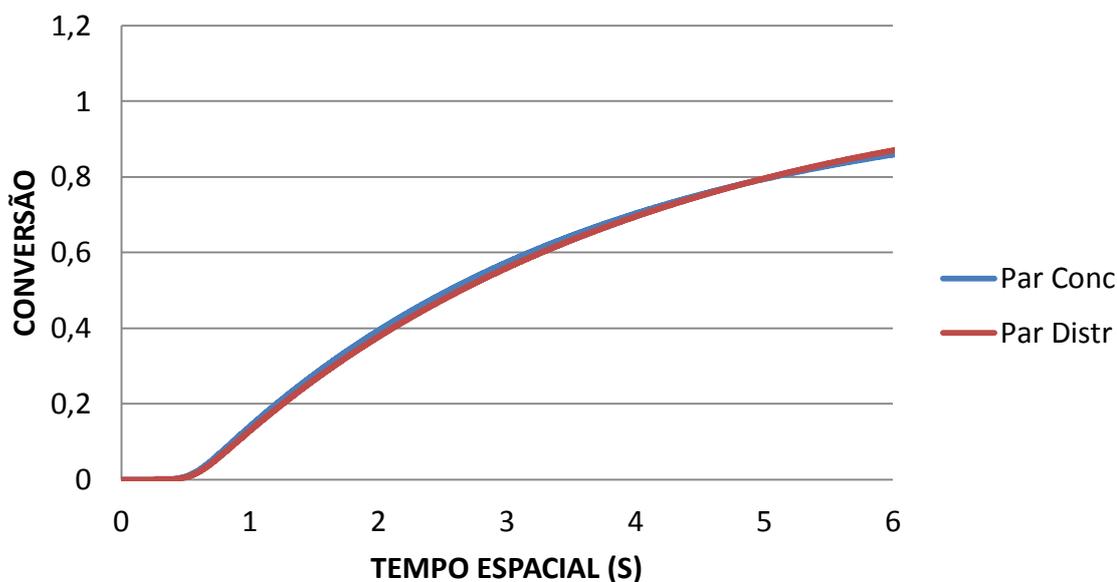
evidente quando a Figura 3 apresenta o perfil de temperatura na superfície da partícula (para parâmetros distribuídos) *versus* a temperatura a parâmetros concentrados.

Figura 3 - Perfil de Temperatura da Partícula (Par Conc. *versus* Par Distr.)



A Figura 4 apresenta o perfil da conversão dos produtos ao longo do tempo. A modelagem a parâmetros distribuídos considera um perfil de temperatura na partícula, ou seja, o sólido oferece resistência à transferência de calor do centro para a superfície.

Figura 4 - Perfil de Conversão (Par Conc. *versus* Par Distr.)



Por fim, é possível observar que as conversões obtidas de modelagens a parâmetros distribuídos ou concentrados, para este caso, são muito próximas. Esta concordância pode ser vista nas Figuras de 2 à 4.



4 Conclusões

A substituição gradual da matriz energética mundial demanda de estudo e desenvolvimento de tecnologias que sejam capazes de substituir os combustíveis fósseis, trazendo consigo a minimização dos impactos ambientais causados.

Ao modelar e solucionar problemas envolvendo reatores de pirólise vislumbra-se conhecer bem o processo e conseqüentemente o seu aprimoramento, capaz de oferecer novos horizontes na busca da sustentabilidade ambiental, com potencialidades para o uso de resíduos como fonte de energias renováveis com menor impacto ambiental.

Por fim, pode-se afirmar que este trabalho possibilita estudos de ampliação de escalas para reatores de pirólise em leito de arrasto e apresenta uma ferramenta alternativa de solução de modelos matemáticos.

Simbologia e nomenclatura

A = Área da secção de vazios ($m^2.m^{-3}$)	T = Temperatura (K)
d_p = Diâmetro da partícula (m)	u = Velocidade ($m.s^{-1}$)
G_f = Fluxo molar de gás ($moles.m^{-2}.s^{-1}$)	w = Fluxo mássico do fluido ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
G_p = Fluxo de sólidos ($m^3.m^{-2}.s^{-1}$)	x = Conversão
P = Pressão (atm)	ϵ = Porosidade do leito
t = Tempo (s)	μ = Viscosidade absoluta ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
k = Constante da taxa (s^{-1})	ρ = Massa específica ($kg.m^{-3}$)
r = raio da partícula (m^{-1})	c = Capacidade calorífica ($W.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
h_p = Coef. de transf. de calor conv. gás-sólido ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	
\bar{M} = Massa molecular média do fluido ($kg.kgmol^{-1}$)	
ϵ = Variação fracionária do volume por mol de A reagido.	
ΔH_T = Calor de reação na temperatura T ($J.kgmol^{-1}$)	
g_c = Fator de conversão=32,174 lbf.ft.lbf ⁻¹ .s ⁻²	
R = Constante dos gases ideais ($J.mol^{-1}.K^{-1}$)	

Subscritos
p = sólido
f = gás
(l - 1) = passo anterior

Referências

BAUM, B., PARKER C. H. **Solid Waste Disposal**. Reuse, Recycle and Pyrolysis Arbor Science Publishers Inc, 1974.

BERTOLI S.L., DE ALMEIDA JR, J. ; BASTOS, J. C. S. C., WIGGERS, V. R., SILVA, M. K., PACHECO, G. J. **Semi Analytical Solution of a Heat Transfer and Kinetic Models Applied in a Biomass Pyrolysis Reactor**. AIChE Annual Meeting 2015, Salt Lake City. 2015.

BRIDGWATER, A. V. **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass**. Chemical Engineering Journal, v. 91, p. 87-102. 2003.

DIAZ, F. A. M. **Desenvolvimento de Modelo Computacional para Craqueamento Térmico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campina – SP. 2008.



LEUNG, P. K., QUON D., **A Computer Model for Moving Beds – Chemical Reaction in Fluid Phase Only**, The Canadian Journal of Chemical Engineering, p. 45-48, 1965.

LEWIS, F. M., **Thermodynamic Fundamentals for the Pyrolysis of Refuse**. National Waste Process Conference, 1976.

WIGGERS V. R. **Simulação, Projeto e Construção de uma Unidade Piloto Multi-Propósito para Pirólise de Resíduos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas– SP, 2003.

WIGGERS V. R.. **Produção de biocombustíveis por craqueamento térmico de óleos e gorduras**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas– SP, 2007.