



SIMULAÇÃO DE UM REATOR EM LEITO FIXO PARA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA COUREIRO-CALÇADISTA

Rodolfo Rodrigues¹, Argimiro Resende Secchi¹, Nilson Romeu Marcílio², Marcelo Godinho²

¹Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)

²Laboratório de Processamento de Resíduos (LPR)

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,

E-MAIL: {rodolfo, arge, nilson, godinho}@enq.ufrgs.br

Palavras Chaves: Reator de leito fixo, Resíduos de couro, Simulação.

Resumo: A indústria coureiro-calçadista gera uma significativa quantidade de resíduos. Uma alternativa eficaz para um destino destes resíduos é sua incineração, o que reduz substancialmente o volume final e estabilizar componentes considerados perigosos. Tudo isto, vai ao encontro dos novos desafios na busca de fontes de energias alternativas e do fato de que a combustão destes resíduos é bastante atraente em função do seu alto poder calorífico. O presente estudo está consolidado na análise de uma planta piloto para processamento de resíduos de couro. Esta foi concebida a partir de uma parceria entre órgãos de pesquisa e empresas privadas. O trabalho está fundamentado na apresentação de um modelo rigoroso e outro simplificado, de um sistema composto por um reator de gaseificação e um reator de oxidação, que representará a planta piloto. O modelo rigoroso considera toda a cinética química envolvida e fenômenos de transferência de calor e massa, já o modelo simplificado limita-se a um modelo termodinâmico do sistema em que se considera que este atinja o equilíbrio químico e termodinâmico a uma determinada temperatura. Em torno disto, prosseguir-se-á com a simulação das condições de operação da planta, e num passo seguinte, seguir-se-á com a maximização da eficiência da planta piloto em função de parâmetros de operação da mesma.

1 INTRODUÇÃO

A indústria coureiro-calçadista gera uma significativa quantidade de resíduos de couro (biomassa). Estes resíduos gerados são considerados perigosos devido à presença de cromo, oriundo do sal utilizado no curtimento das peles.

Uma alternativa eficaz para o destino destes resíduos é sua incineração o que reduz substancialmente o seu volume final e estabiliza a fração de cromo nociva ao meio ambiente. Concomitantemente, tudo vai ao encontro dos

novos desafios na busca de fontes de energias alternativas e do fato de que a combustão destes resíduos ser bastante atraente em função do seu alto poder calorífico.

1.1 Biomassa como fonte de energia

O termo biomassa abrange uma vasta extensão de materiais que se oferecem como combustíveis ou matérias-primas, para fins diversos. São derivados recentes de organismos vivos de modo que excluem claramente, nesta definição, os tradicionais combustíveis fósseis. Visto que, embora estes últimos também sejam



V-OKTOBER FÓRUM – PPGEQ

17, 18 E 19 DE OUTUBRO DE 2006

derivados da vida vegetal (carvão) ou animal (petróleo e gás natural), são resultados de milhões de anos de atividade até a conversão a sua forma corrente (Higman e van der Burgt, 2003).

A biomassa é a fonte de energia mais antiga e seu uso dominou quase totalmente até meados do século XIX. Desde então, a participação da biomassa tem diminuído no suprimento de energia no mundo todo, como decorrência do crescente aumento na demanda total de energia a partir de combustíveis fósseis e energia nuclear.

De acordo com Gómez (1996), são quatro as razões fundamentais que tornam atrativa a utilização da biomassa para fins energéticos:

1. Constitui uma riqueza natural própria e renovável, com elevada disponibilidade e relativa facilidade de uso;
2. Representa uma fonte renovável e segura de energia não sujeita às variações de preços e suprimento do mercado externo;
3. O seu uso permite aos países em desenvolvimento diminuir sua dependência externa de petróleo;
4. Do ponto de vista energético, é um combustível substancialmente limpo quando comparado com os combustíveis fósseis.

1.2 Teoria da gaseificação de biomassa

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica para produzir, a partir de combustíveis carbonosos, um produto gasoso com um valor calórico útil que pode ser empregado como gás combustível ou gás de síntese para posterior utilização. Esta definição exclui a combustão, já que nesta o produto gasoso final não tem valor calórico residual algum. No processo podem ser usados diferentes tipos de agentes de gaseificação, entre eles ar, O₂ e vapor de água (Marcílio et al., 2006).

A conversão termoquímica modifica a estrutura química da biomassa por meio da alta temperatura. O agente de gaseificação permite a corrente de alimentação ser rapidamente convertida a gás por meio de diferentes reações heterogêneas. O gás assim produzido contém CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O, traços de hidrocarbonetos elevados, gases inertes presentes no agente de gaseificação, vários contaminantes tais como pequenas partículas de material carbonoso, cinzas e alcatrões (Belgiorno et al., 2003).

O gás combustível produzido pode ser usado para a produção de energia, em turbinas a gás, motores, ou ainda em caldeiras, enquanto o gás de síntese pode ser utilizado para a produção de diversos produtos, entre eles, amônia e metanol (Godinho, 2006).

As razões práticas para se decidir pela gaseificação de biomassa são numerosas e dependentes das condições locais. Além da atratividade da biomassa como fonte de energia, sobressaem-se as vantagens que os combustíveis gasosos apresentam, em geral, sobre os sólidos: facilidade de distribuição, alta eficiência da combustão pelo fato de poder ser controlada, baixa emissão de poluentes e possibilidade da utilização em motores e turbinas para produzir trabalho mecânico e energia elétrica (Gómez, 1994).

1.3 Tecnologias empregadas na gaseificação

Segundo Godinho (2006), há atualmente dois tipos fundamentais de gaseificadores: de leito fluidizado e de leito fixo.

Os reatores de leito fluidizado podem ser classificados, de maneira geral, em reatores de leito fluidizado borbulhante e reatores de leito fluidizado circulante (ou rápido). Os reatores de leito borbulhante operam com velocidades moderadas de fluidização, apresentando elutrição de finos causando baixo tempo de residência das partículas. Os reatores de leito circulante operam com velocidades mais elevadas e recirculação de sólidos, abatidos em um ciclone localizado no seu topo.

Já, dentre os gaseificadores de leito fixo, destacam-se dois tipos: contracorrente (*updraft gasifier*) e co-corrente (*downdraft gasifier*). No gaseificador contracorrente a alimentação é realizada no topo e o agente de gaseificação é inserido na sua base. No gaseificador co-corrente a alimentação é realizada a partir do topo, enquanto o agente de gaseificação é inserido pela lateral.

O objetivo deste trabalho é a análise do processo de gaseificação e combustão de resíduos de couro em uma planta piloto com capacidade nominal de processar 100 kg/h de resíduos e potência térmica de 350 kW, a qual se encontra instalada na Preservar Tratamento e Reciclagem de Resíduos Ltda., no município de Dois Irmãos (RS). Nisto resultará na modelagem deste sistema em dois níveis de abordagem: um modelo rigoroso e um modelo simplificado. Simulações das condições



reais de operação serão feitas e numa etapa seguinte, buscar-se-á a maximização da eficiência do processo em função dos parâmetros de operação da planta piloto.

2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A planta piloto constitui-se de um sistema que engloba um reator de gaseificação (gaseificador) ligado em série com um reator de oxidação (combustão). Na saída deste último temos um aparato constituído por um sistema de controle de poluição do ar (SCPA).

O gaseificador é de leito fixo do tipo co-corrente (*downdraft gasifier*), ou seja, o resíduo é alimentado a partir do topo e o agente gaseificante é introduzido na parte lateral do reator. Neste se verifica ainda a presença de quatro zonas distintas que são distribuídas verticalmente do topo ao fundo da grelha (Belgiorno et al., 2003):

1. Zona de secagem: na região superior, onde ocorre a perda da umidade;
2. Zona de pirólise: onde ocorre a liberação do material volátil presente no resíduo;
3. Zona de reação: onde ocorre a injeção do agente gaseificante;
4. Zona de redução: acima da grelha, onde ocorrem as reações para formação do gás combustível.

O reator de oxidação recebe as injeções de ar primário, secundário e terciário para a oxidação do gás combustível produzido no gaseificador. Verifica-se a presença de quatro zonas distintas (Godinho, 2006):

1. Zona de combustão primária: localizada abaixo da grelha, onde há uma expansão e o início da combustão dos gases combustíveis provenientes da zona de redução;
2. Zona de combustão secundária: há injeção de ar secundário pré-aquecido pela passagem através da grelha. Ocorre um aumento da turbulência dos gases provenientes do gaseificador objetivando o aumento da eficiência da combustão;
3. Zona de combustão terciária: há injeção de ar terciário a fim de garantir a combustão completa dos gases combustíveis formados no gaseificador;
4. Zona de combustão quaternária: destinada à etapa final da combustão.

O SCPA é constituído por um ciclone, um resfriador gás-ar, um lavador venturi, uma torre recheada e um segundo lavador venturi.

3 MODELAGEM DO PROCESSO

Este trabalho limitar-se-á a modelagem do sistema de incineração, o qual engloba a etapa de gaseificação (reator de gaseificação) e a etapa de combustão (reator de oxidação).

O sistema será tratado por duas abordagens diferentes, caracterizando dois modelos com níveis de complexidade e detalhamento diferentes: um modelo dito simplificado e outro dito rigoroso.

O modelo simplificado limita-se a um modelo termodinâmico do processo. Neste, considera-se que o sistema global atinja o equilíbrio químico e termodinâmico a uma determinada temperatura. O modelo rigoroso considera toda a cinética química envolvida e fenômenos de transferência de calor e massa.

3.1 Modelo simplificado

A modelagem simplificada será abordada de acordo com a proposta por Godinho (2006) que está baseada no trabalho de Zainal et al. (2001).

O seu trabalho considera os balanços globais de massa e energia do sistema de incineração e as constantes de equilíbrio das reações envolvidas para relacioná-los. A partir de dados da composição inicial e temperatura para o equilíbrio químico e termodinâmico é estimada a composição final e a temperatura adiabática de chama do gás efluente. Nesta abordagem, dados da geometria dos reatores e etapas intermediárias do processo não são considerados.

O modelo pode ser equacionado, de modo conciso, na forma abaixo:

Balanço material global:

$$\sum_{reag} n_{i,k} x_i = \sum_{prod} n_{i,k} x_i \quad (1)$$

onde $n_{i,k}$ é o número de elementos (átomo) k de um componente (molécula) i , e x_i ; a quantidade de mol de um componente i .

Constante de equilíbrio:

$$K_j = \prod_i P_i^{v_{i,j}} \quad (2)$$

onde j é o número de reações químicas envolvidas e K_j são dados por expressões conhecidas que relacionam a temperatura.



V-OKTOBER FÓRUM – PPGEQ

17, 18 E 19 DE OUTUBRO DE 2006

Balanco de energia global:

$$\sum_{\text{reag}} x_i \left[H_{f_i}^0 + \int_T c_{p_i} dT \right] = \sum_{\text{prod}} x_i \left[H_{f_i}^0 + \int_T c_{p_i} dT \right] \quad (3)$$

3.2 Modelo rigoroso

Para a modelagem rigorosa, a abordagem de Di Blasi (2000) será empregada.

O seu trabalho está baseado nos balanços de massa e energia das fases sólida e gasosa, descritos para um sistema unidimensional e não-estacionário.

São consideradas as seguintes espécies envolvidas: B (biomassa), M (umidade), C (*char*), para a fase sólida e T (alcatrão), O₂, CO₂, H₂, H₂O (vapor), CH₄, CO e N₂, para a fase gasosa.

O modelo leva em conta os seguintes processos: evaporação da umidade, pirólise da biomassa, combustão e gaseificação do material carbonoso, combustão dos gases e craqueamento térmico do alcatrão. De modo que são consideradas as seguintes reações envolvidas: pirólises primária (*p*₁) e secundária (*p*₂); combustões do alcatrão (*c*₁), metano (*c*₂), monóxido de carbono (*c*₃) e hidrogênio (*c*₄); reação de deslocamento gás-água (*wg*); gaseificações do dióxido de carbono (*g*₁), hidrogênio (*g*₂) e vapor de água (*g*₃); e combustão do *char* (*c*₅).

Este pode ser descrito pelo equacionamento básico abaixo:

Balanco material para a biomassa (B):

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_B U_s)}{\partial z} = -R_j \quad (4)$$

onde *j* = *p*₁.

Balanco material para a umidade (M):

$$\frac{\partial \rho_M}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_M U_s)}{\partial z} = -m_M \quad (5)$$

onde *m*_M é a taxa de evaporação da umidade.

Balanco material para a fase gasosa:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i U_g)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_i \rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) + M_i \sum_j V_{i,j} R_j + \omega_{p,i} \quad (6)$$

onde *i* = O₂, H₂, CO, CO₂, CH₄, *j* = *c*₁-*c*₄, *g*₁-*g*₃, *wg*, e $\omega_{p,i}$ é a taxa de espécies *i* produzidas na fase sólida.

Balanco material para o vapor:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_{H_2O}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{H_2O} U_g)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_{H_2O} \rho_g \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial z} \right) + M_{H_2O} \sum_j V_{H_2O,j} R_j + m_M + \omega_{p,H_2O} \quad (7)$$

onde *j* = *c*₁-*c*₄, *g*₁-*g*₃, *wg*.

Balanco material para o alcatrão:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_T}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_T U_g)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_T \rho_g \frac{\partial Y_T}{\partial z} \right) + \sum_j V_{T,j} R_j \quad (8)$$

onde *j* = *p*₁, *p*₂.

Balanco material para o nitrogênio:

$$\rho_{N_2} = \rho_g - \sum_{i \neq N_2} \rho_i \quad (9)$$

onde *g* é o total de voláteis.

Balanco material para total de voláteis:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g U_g)}{\partial z} = \sum_i \sum_j V_{i,j} M_i R_j + m_M + (1 - v_C) R_{p_1} \quad (10)$$

onde *i* = N₂, O₂, H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O e *j* = *c*₁-*c*₄, *g*₁-*g*₃, *wg*.

Balanco de energia para a fase sólida:

$$\frac{d(\sum \rho_i H_i)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \frac{d(U_s \sum \rho_i H_i)}{dz} - \sum_j R_j \Delta H_j - Q_{sg} + Q_{sw} - m_M \Lambda \quad (11)$$

onde *i* = B, C, M; *j* = *c*₅, *g*₁-*g*₃, *p*₁; *Q*_{sg} é o calor trocado entre as fases sólida e gasosa e *Q*_{sw}, entre a fase sólida e a parede; e Λ é a entalpia de evaporação da umidade.

Balanco de energia para a fase gasosa:

$$\varepsilon \frac{d(\sum \rho_i H_i)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) - \frac{d(U_g \sum \rho_i H_i)}{dz} - \sum_j R_j \Delta H_j + Q_{sg} + Q_{gw} \quad (12)$$

onde *i* = N₂, O₂, H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O, T; *j* = *c*₁-*c*₄, *wg*, *p*₂; e *Q*_{gw} é o calor trocado entre a fase gasosa e a parede.

Queda de pressão (lei de Darcy modificada):

$$\frac{B_g}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} = U_s - U_g \quad (13)$$

onde *B*_g é a permeabilidade para a fase gás e *P* dado pela expressão de gás ideal ($P = \rho_g R T_g / M_g$).

Neste modelo, assumem-se as propriedades físicas envolvidas variáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos são implementados diretamente no simulador genérico de processos dinâmicos EMSO (Soares e Secchi, 2003).

Quanto à caracterização matemática dos problemas pode-se observar que a modelagem simplificada representa um sistema de equações algébricas não-lineares (NLA) e a modelagem rigorosa, um sistema de equações diferenciais parciais (PDE).



V-OKTOBER FÓRUM – PPGEQ

17, 18 E 19 DE OUTUBRO DE 2006

Os modelos serão simulados para as condições de operação e para fins de análise, com a variação de alguns parâmetros de operação: razão de equivalência (quantidade de oxigênio fornecido na etapa de gaseificação em relação à quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa), umidade inicial do resíduo alimentado, dentre outros. A maximização da eficiência do processo em função destes parâmetros também está como atividade prevista.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho está na fase de implementação dos dois modelos no simulador. O primeiro caso, é de implementação direta e no segundo caso, faz-se uso da discretização do problema por diferenças finitas em relação ao comprimento, gerando assim, um sistema de equações algébrico-diferenciais (DAE) que é desta forma suportado pelo simulador. Espera-se, com os resultados encontrados, a realização de um estudo comparativo entre ambas as abordagens de modelagem, demonstrando os pontos favoráveis e contrários de cada uma, assim como as respectivas aplicabilidades.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento a pesquisa: FAPERGS, CNPq e FINEP; e as empresas: Luftech e Preservar.

REFERÊNCIAS

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, v.23, p. 1-15, 2003.

DI BLASI, C. Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. *Chem. Eng. Science*. v. 55, p. 2931-2944, 2000.

GODINHO, M. *Gaseificação e combustão combinadas de resíduos sólidos da indústria coureiro-calçadista*. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MARCÍLIO, N. R. et al. Parâmetros operacionais de um gaseificador para resíduos de couro. In COBEQ, 16., 2006, Santos. *Anais eletrônicos*, 2006, p. 627-634.

GÓMEZ, E. O. *Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. *Gasification*. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2003.

SOARES, R. P.; SECCHI, A. R. Emso: A new environment for modelling, simulation and optimization. In ESCAPE, 13., 2003. *Elsevier Science Publishers*, 2003, p. 947-952.

ZAINAL, Z. A. et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management*. v. 42, p. 1499-1515, 2001.