

Análise de Diferentes Condições Operacionais na Operação da Caldeira de Recuperação

Analysis of Different Operational Conditions in the Recovery Boiler Operation

Autores: Andréa O. S. da Costa^{1*}, Evaristo C. Biscaia Jr.², Enrique Luis Lima²

Palavras-chave: caldeira de recuperação, modelagem, condições operacionais.

RESUMO

A modelagem matemática da caldeira de recuperação tem se mostrado uma ferramenta importante na análise da influência de diferentes condições operacionais no funcionamento deste equipamento. Usualmente, esta descrição é realizada considerando, de forma independente, os diferentes fenômenos que ocorrem durante a queima do licor negro e a geração de vapor. Ou seja, a formação de material particulado é rotineiramente descrita não considerando os aspectos relativos à geração de vapor ou à recuperação dos sais inorgânicos. As reações de queima do licor são geralmente estudadas através de observações experimentais, não sendo comumente mencionados aspectos referentes à recuperação dos sais inorgânicos. Uma abordagem híbrida para a descrição matemática da caldeira de recuperação, que descreve globalmente o processo de queima do licor, é empregada neste trabalho. Nela, as reações características da queima deste

ABSTRACT

The recovery boiler mathematical model has been an important tool in the study of this equipment. Using a model is possible to analyse the behavior of the recovery boiler when different operational conditions are used. Traditionally, the different aspects of the black liquor burning and the steam generation are described separately. Then, the influence of the particulate formation or the steam generation in the reduction efficiency is not usually described. This work presents a global hybrid approach for the mathematical description of the Kraft recovery boiler. The characteristic reactions of the black liquor burning, except the ones involved in the particulate formation, are described by a technique based on the minimization of Gibbs free energy. As the particulate formation is not known completely, an empirical methodology, based on neural networks, was chosen to model this phenomenon. To this end, industrial data observed during one year of the Kraft recovery boiler operation were collected. Using the black liquor feed industrial values it was possible to describe linearly the enthalpy of the generated steam. The resulting hybrid model describes globally the recovery boiler behavior when different operational conditions are used, especially the reduction efficiency and TRS concentration in the furnace bottom.

Keywords: Recovery Boilers, model, operational conditions.

fluido, exceto aquelas relacionadas à formação de material particulado, são descritas por meio da técnica de minimização da energia livre de Gibbs. Uma rede neuronal é empregada na descrição da formação de material

particulado no equipamento e a entalpia do vapor gerado na caldeira é descrita por meio de um modelo linear. Condições de operação diversas são testadas, sendo apresentadas as concentrações de diferentes substân-

Referência

¹ Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG, Brasil

² Programa de Engenharia Química (PEQ), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*andreaosc@unilestemg.br

cias resultantes da queima do licor negro, em especial a eficiência de redução e a concentração dos gases TRS na parte inferior da fornalha.

INTRODUÇÃO

A caldeira de recuperação Kraft possui, basicamente, duas funções dentro do processo produtivo de celulose: converter o Na_2SO_4 , presente no licor negro a Na_2S , que é um dos agentes ativos na produção de celulose pelo processo Kraft, e gerar vapor por meio da queima dos compostos orgânicos, também presentes no licor negro. Desta forma, a fornalha da caldeira de recuperação funciona como um reator químico onde se deseja maximizar a eficiência de redução, caracterizada pela razão entre a massa de enxofre na forma de Na_2S e a massa total de enxofre verificada na mistura de sais inorgânicos fundidos, resultante da queima do licor negro (smelt).

A alimentação do licor negro na fornalha é realizada na forma de spray. Ao serem alimentadas à caldeira, as partículas de licor sofrem diferentes modificações, classificadas usualmente como: secagem, pirólise, queima do carbono fixo, oxidação e redução dos sais inorgânicos (formação do smelt). Cada transformação sofrida pelo licor acontece, predominantemente, em uma região da fornalha da caldeira de recuperação (ver Figura 1). Estas transformações envolvem reações químicas e transformações físicas distintas, que podem ou não ocorrer de forma sequencial.

Durante a pirólise, a partícula de licor libera uma grande quantidade de gases. São eles: TRS (gases não oxidados de enxofre: CH_3SH , CH_3SCH_3 , $\text{CH}_3\text{S}_2\text{CH}_3$), SO_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2O . Com o fim da pirólise se inicia o processo de queima do carbono fixo. Após perder a umidade, sofrer a pirólise e queimar parte do carbono fixo, a partícula atinge a superfície do leito de carbono na parte inferior da fornalha. Nesta etapa, o Na_2S reage com o oxigênio do ar em uma reação exotérmica. Esta reação de oxidação é quimicamente

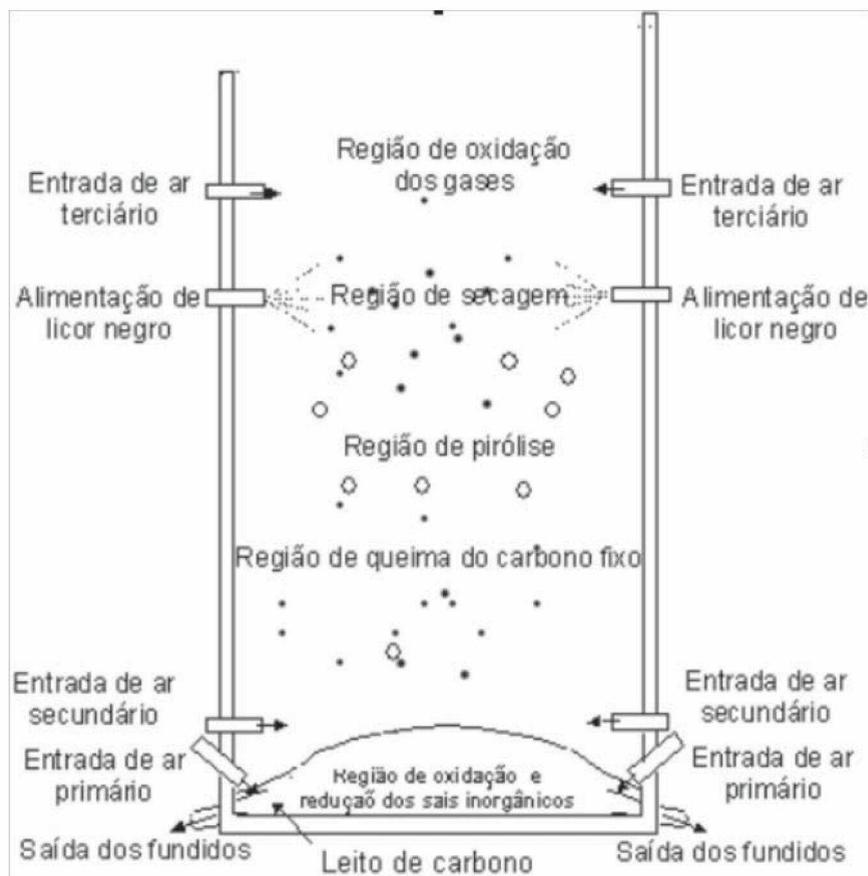


Figura 1 - Representação esquemática da queima do licor negro na fornalha da caldeira de recuperação Kraft.

indesejável, pois causa a diminuição da eficiência de redução do processo. Todavia, a oxidação do Na_2S viabiliza as reações de redução que, sendo endotérmicas, absorvem a energia liberada. Como resultado, a temperatura na superfície do leito é da ordem de 1000 a 1200°C, podendo chegar a próximo dos 760°C em sua parte mais baixa (Grace e Frederick, 1997). Grace (2001) e Macek (1999) afirmam que cerca de um terço dos sais fundidos é composto de Na_2S e dois terços de Na_2CO_3 . Ao final do processo de queima do licor, os sais fundidos são retirados do fundo da caldeira e são levados a um tanque de dissolução.

Além das reações já mencionadas, outras reações paralelas ocorrem e, como resultado, é formado material particulado através de um mecanismo de reação ainda não conhecido completamente (Jokiniemi *et al.*, 1996). Estas partículas interagem com o fluxo gasoso turbulento presente na fornalha e são arrastadas para a parte superior da caldeira, se depositando nas

superfícies de troca térmica. Como resultado, a eficiência térmica do equipamento diminui, fazendo com que sejam necessárias paradas periódicas para a limpeza do equipamento.

METODOLOGIA

As substâncias existentes no licor negro, que são os reagentes da queima deste fluido, variam de licor para licor, dependendo de sua procedência e do tipo de cozimento empregado. Além disso, essa queima envolve uma grande variedade de reações químicas, muitas vezes desconhecidas, em diferentes fases. Sendo assim, a descrição deste fenômeno por modelos cinéticos genéricos se torna inviável.

Shiang (1986) utilizou a metodologia de minimização da energia livre de Gibbs na descrição da queima do licor negro na fornalha. De acordo com um princípio termodinâmico, se um sistema fechado não estiver em equilíbrio químico, qualquer reação que ocorra deverá ser irreversível e, mantendo-se o sistema a uma temperatura e uma pressão fixas, a energia livre de

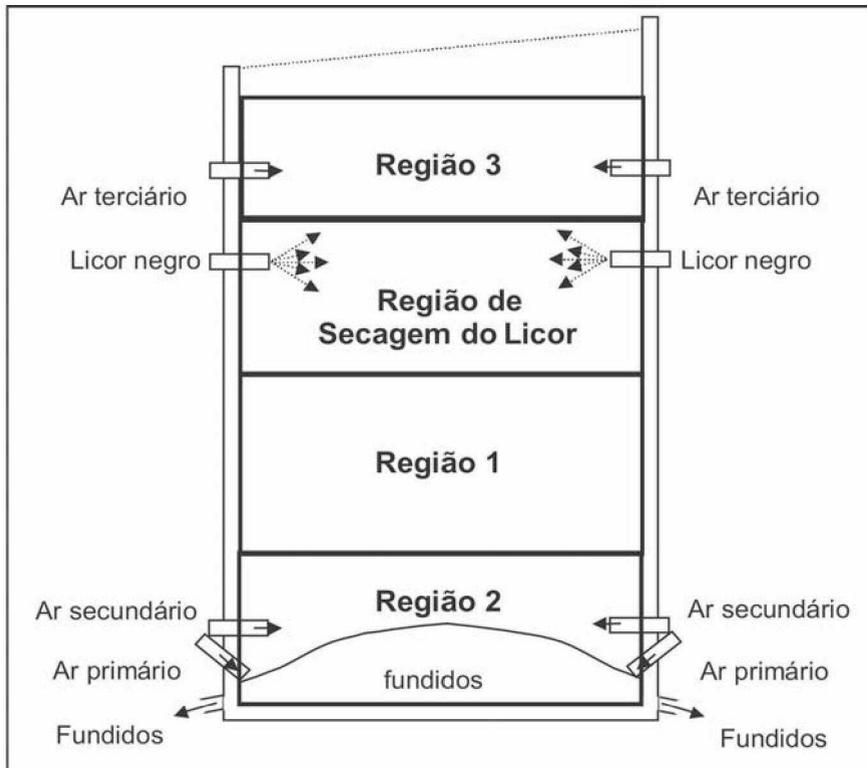


Figura 2 - Representação esquemática das regiões consideradas para a descrição da queima do licor negro.

Gibbs do meio reacional deverá diminuir (Smith e Van Ness, 1987). Sendo assim, para estes casos se pode afirmar que a energia livre de Gibbs é mínima quando o sistema atinge o estado de equilíbrio químico. A formulação detalhada do problema de otimização resultante da aplicação desta técnica é descrita por Costa *et al.* (2003a).

Neste trabalho é empregada a metodologia de minimização da energia livre de Gibbs na descrição de todas as reações que ocorrem durante a queima do licor negro, exceto aquelas responsáveis pela geração de material particulado. Os problemas de otimização resultantes do emprego desta técnica foram resolvidos através do método de Programação Quadrática Seqüencial com restrições. A fornalha foi dividida em quatro regiões, sendo proposto um problema de otimização para cada uma das regiões 1, 2 e 3 (Figura 2). Os resultados obtidos fornecem os números de moles de cada espécie, em cada fase.

Devido à grande complexidade e ao escasso conhecimento acerca do processo de formação de material particulado, é utilizada uma abor-

dagem empírica na descrição deste fenômeno. Assim, dados operacionais que descrevem um ano de operação da fábrica foram tratados de forma a eliminar informações duvidosas totalizando, ao final do tratamento, 3381 dados. Estas informações foram então empregadas na proposta de redes neurais que

descrevem o fenômeno de geração de material particulado na fornalha. Onze variáveis operacionais foram testadas como possíveis variáveis independentes para o modelo. São elas: vazão, temperatura, concentração e pressão de alimentação do licor negro; vazão, temperatura e pressão de alimentação de ar primário e secundário; vazão de alimentação de ar terciário. A variável a ser predita, denominada E_{part} , descreve o número de partículas por minuto (npp) contabilizadas em uma área específica da fornalha.

Adotando diferentes faixas operacionais, foram consideradas distribuições discretas para a variável E_{part} . Redes neurais tipo base radial (RBF) (Costa *et al.*, 2003b; Costa *et al.*, 2003c) foram testadas e a melhor rede obtida possui 18 neurônios em sua camada intermediária e 5 entradas: temperatura de alimentação do licor negro (T_{lu}); vazão ($Var1$) e pressão ($Par1$) de alimentação de ar primário; pressão de alimentação do ar secundário ($Par2$) e vazão de alimentação de ar terciário ($Var3$). Esta rede, que considera 2 classes para E_{part} , pode classificar, com cerca de 80% de percentagem de acerto, se uma dada condição operacional favorece a formação de partículas com valores acima (saí-

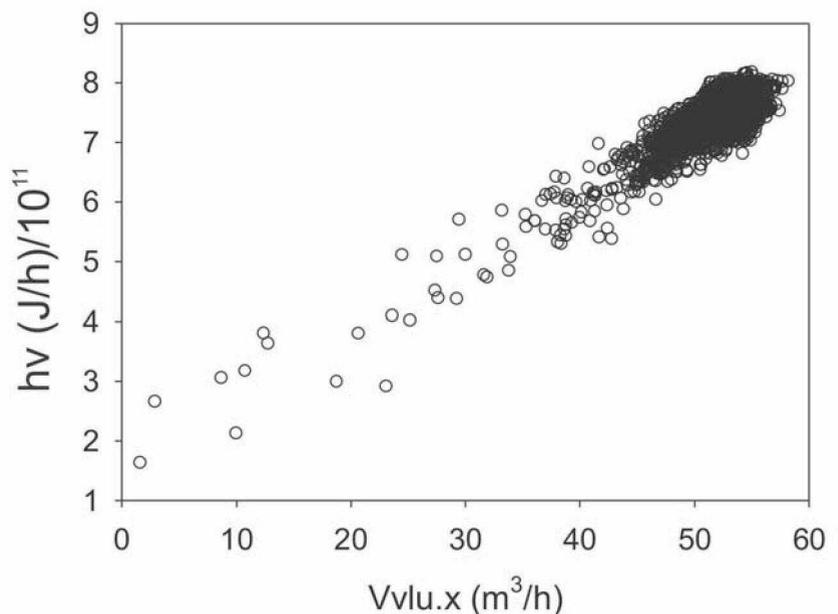


Figura 3 - Comportamento da entalpia do vapor gerado (h_v) em função da vazão de licor negro seco alimentado à caldeira ($V_{vlu.x}$).

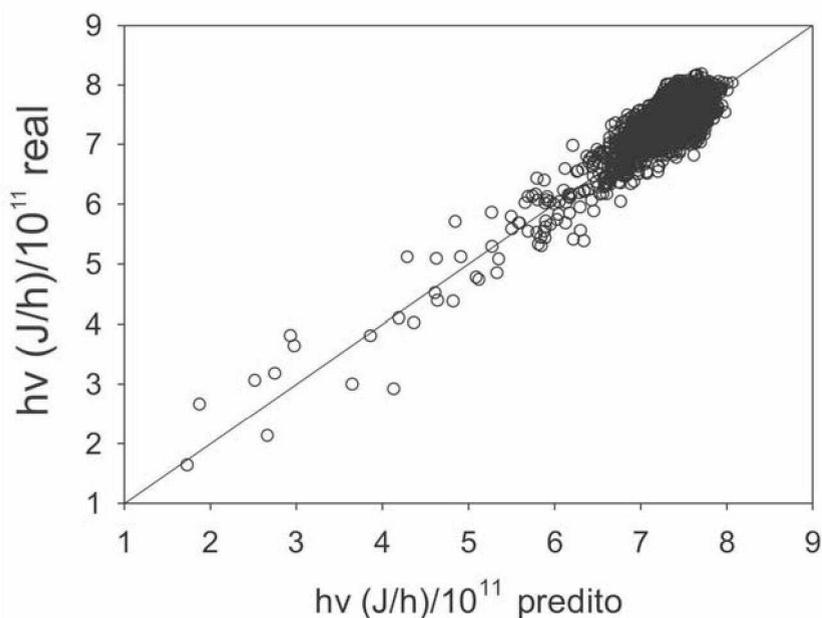


Figura 4 - Valores reais e preditos pelo modelo descrito pela Equação 4.9 para a entalpia do vapor gerado na caldeira (hv).

da da rede igual a 2) ou abaixo (saída da rede igual a 1) de 200 por minuto. Mais além, a percentagem de erro verificada neste caso (cerca de 20%) está igualmente distribuída entre as 2 faixas operacionais consideradas. Vale ressaltar que o modelo empírico obtido fornece, indiretamente, o potencial de incrustação verificado para o equipamento estudado.

Dados industriais também são empregados na descrição da entalpia do vapor superaquecido gerado na caldeira de recuperação. Neste caso, um novo pré-tratamento foi realizado, resultando em um grupo de 4316 pontos. Na etapa seguinte, as correlações existentes entre a entalpia do vapor superaquecido gerado (hv) e algumas variáveis operacionais de interesse foram

calculadas. Os resultados obtidos indicam uma correlação igual a 0,8401 entre hv e a vazão de sólidos secos (Vvlu.x) alimentados à fornalha (Figura 3). Assim, foi proposto um modelo linear para a descrição da geração de vapor na caldeira de recuperação, utilizando Vvlu.x como variável independente. Na etapa de ajuste dos parâmetros do modelo foram utilizados todos os 4316 pontos operacionais disponíveis. Costa (2004) descreve detalhadamente o procedimento realizado para a obtenção do modelo linear apresentado na Equação 1.

Neste modelo a entalpia do vapor gerado na caldeira em (J/h)/10¹¹ é descrita em função da vazão de licor negro seco alimentado (Vvlu.x) em m³/h. A Equação 1 consegue descrever 94% da variabilidade experimental dos dados operacionais. A Figura 4 mostra os valores reais e os preditos pelo modelo (Equação 1) para hv.

$$hv = 1,550 + 0,112 \cdot Vvlu \cdot x \quad (1)$$

RESULTADOS

A Tabela 1 evidencia a faixa de validade do modelo híbrido composto pela técnica minimização da energia

Variáveis	Variáveis	Unidades	Valor mínimo	Valor Máximo
Vazão de alimentação do licor negro úmido	Vvlu	m ³ /h	25,09	74,73
Concentração de sólidos no licor negro alimentado	x	%	70,71	87,39
Temperatura de alimentação do licor negro	Tlu	°C	127,15	143,46
Vazão de alimentação do ar primário	Var1	t/h	82,35	156,10
Vazão de alimentação do ar secundário	Var2	t/h	99,64	143,61
Vazão de alimentação do ar terciário	Var3	t/h	18,02	93,07
Pressão de alimentação do ar primário	Par1	mmca	12,72	247,78
Pressão de alimentação do ar secundário	Par2	mmca	123,31	510,71
Pressão do vapor superaquecido gerado.	Pv	bar	29,38	47,71
Temperatura do vapor superaquecido gerado.	Tv	°C	327,91	437,67
Vazão do vapor superaquecido gerado.	Vv	t/h	113,59	252,76
Formação de material particulado	Epart	npp	9,62	806,12
Concentração de gases TRS	C _{TRS}	ppm	0,1269	0,5836
Excesso de oxigênio na saída do precipitador eletrostático	E _{O₂}	%	0,3230	3,7447
Eficiência de redução	ε	%	80,95	97,48

Tabela 4. 1: Faixa operacional válida para o modelo híbrido.

Variáveis operacionais e seus valores reais

Vvlu = 63,78m ³ /h	Var2=129,13t/h
x = 81,46%	Var3=65,81t/h
Tlu =140,22°C	Par1=112,88mmca
Var1=122,07t/h	Par2=324,83mmca
ε =93,12%	
Temperatura média da região 2 (T ₂) = 1080°C	
Composição elementar do licor negro (%):	
C:34,0 H:3,9 O:33,0 Na:21,5 S:5,1 K:1,25 Cl:1,25	

Tabela 2 - Condição operacional empregada pela fábrica.

livre de Gibbs, a rede neuronal e o modelo linear.

Para usar a técnica de minimização da energia livre de Gibbs é necessária a definição das seguintes variáveis de operação: composição química elementar do licor negro; vazão de alimentação do licor negro úmido (Vvlu); concentração de sólidos da alimentação de licor negro (x); vazões de alimentação do ar primário, secundário e terciário (Var1, Var2 e Var3 respectivamente). A Tabela 2 mostra os valores reais médios verificados para estas variáveis em uma caldeira de recuperação em operação em uma fábrica brasileira de celulose.

Neste trabalho, para a minimização da energia livre de Gibbs das regiões 1, 2 e 3 foram realizadas as seguintes considerações:

- a região 1 possui uma temperatura média fixa igual a 400°C;
- a região 2 possui uma temperatura média fixa igual a 1080°C;
- a região 3 possui uma temperatura média fixa igual a 1000°C;
- o licor negro alimentado é composto por C, H, O, Na, S, Cl e K;
- o licor negro alimentado possui a composição química elementar fornecida na Tabela 2;
- o licor negro alimentado possui a concentração de sólidos secos (x) descrita na Tabela 2;
- a vazão de alimentação de ar secundário (Var2) é igual àquela descrita na Tabela 2;
- a fornalha da caldeira de recuperação opera a uma pressão de 1 atm;
- todas as fases são ideais;

- as partículas de licor negro chegam secas à região 2;
- a alimentação da região 3 é composta pela umidade residual das partículas de licor, pela alimentação de ar terciário e pelas espécies gasosas vindas das regiões 1 e 2;
- a região 1 é composta por 2 fases (uma sólida e uma gasosa);
- a região 3 é composta por apenas uma fase gasosa;
- o nitrogênio fornecido à fornalha pelas alimentações de ar é inerte.

Testes adicionais indicam que, para a caldeira de recuperação estudada, 70% da alimentação de ar primário e secundário segue para a re-

gião 1 sem reagir na região 2 (Costa *et al.*, 2004). Este comportamento é considerado na obtenção dos resultados apresentados neste trabalho. Além disso, assume-se que todas as reações de oxidação e redução dos sais inorgânicos ocorrem em fase sólida. Assim, uma vez estabelecido o equilíbrio químico, os sais inorgânicos se fundem formando o smelt. Como consequência, apenas 2 fases são consideradas durante a minimização da energia livre de Gibbs da região 2: uma sólida e uma gasosa.

Em um primeiro teste, cujos resultados são mostrados nas Figuras 6 e 7, foram considerados os valores de vazão de alimentação de ar primário e terciário (Var1, Var3) descritos na Tabela 2 e diferentes valores de vazão de alimentação de licor negro (Vvlu).

De acordo com o modelo híbrido utilizado neste trabalho, a formação de material particulado não é afetada por alterações na variável Vvlu, já que esta não se mostrou uma entrada significativa durante o projeto da rede empregada para a predição da variável Epart. Assim, para este primeiro teste, o modelo híbrido indica sempre uma formação de partículas inferior a 200npp (saída da rede igual a 1).

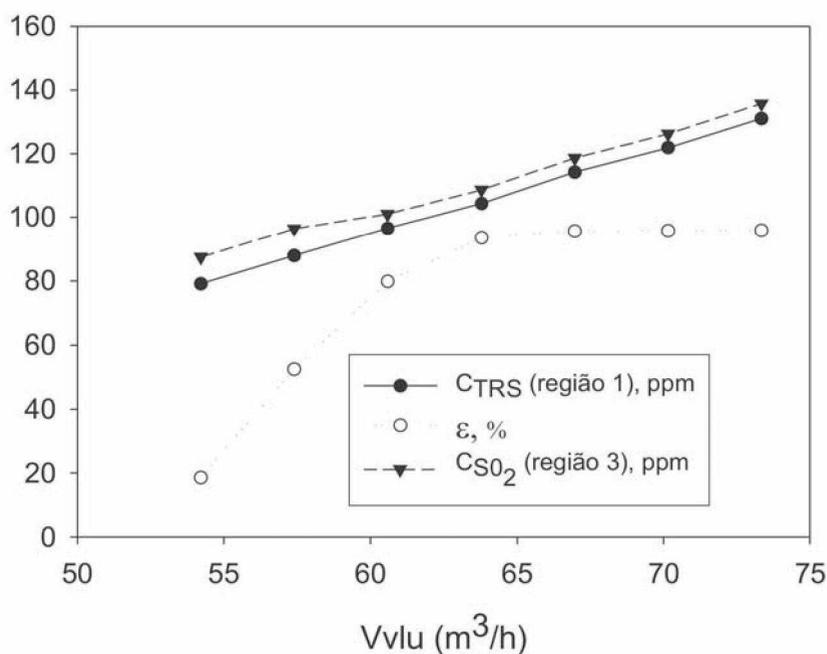


Figura 6 - Concentração de diferentes substâncias resultantes da queima do licor negro quando são considerados diferentes valores para Vvlu, Var1 = 122,07t/h e Var3 = 65,81t/h.

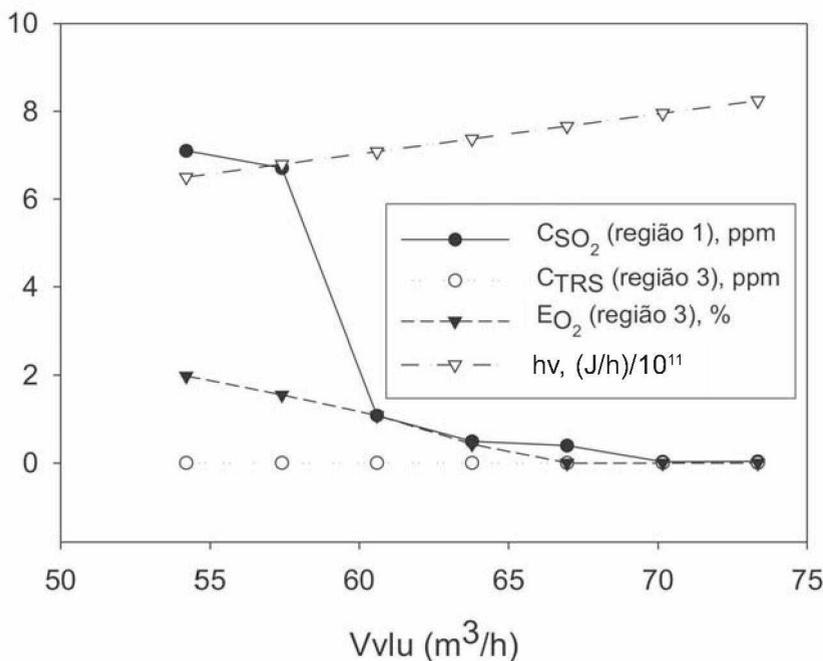


Figura 7 - Concentração de diferentes substâncias resultantes da queima do licor negro quando são considerados diferentes valores para Vvlu, Var1 = 122,07t/h e Var3 = 65,81t/h (continuação).

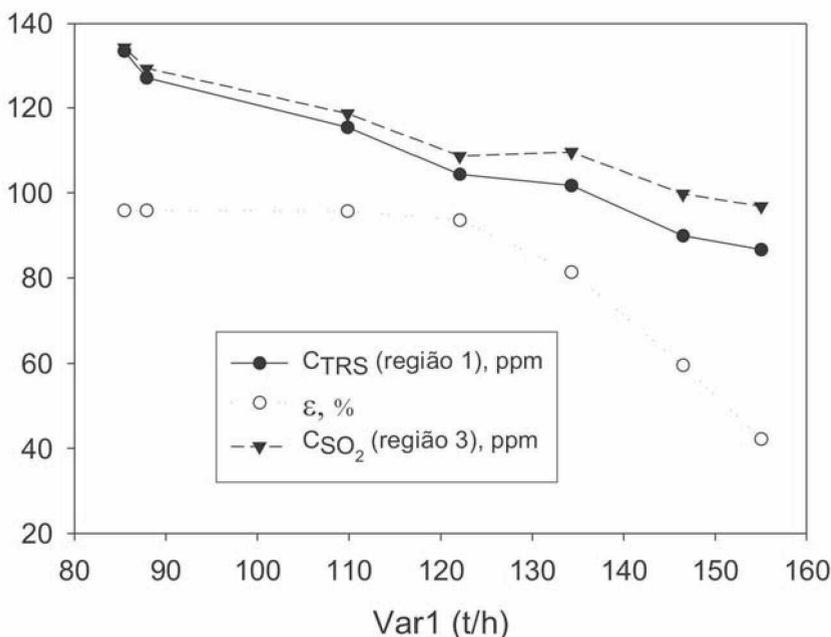


Figura 8 - Concentração de diferentes substâncias resultantes da queima do licor negro quando são considerados diferentes valores para Var1, Vvlu = 63,78m³/h e Var3 = 65,81t/h.

Com um aumento da alimentação de licor (Vvlu) há uma maior concentração de enxofre no interior da fornalha com a mesma concentração de oxigênio presente no meio. Este cenário favorece um acréscimo na concentração de gases TRS na região 1 e, con-

sequentemente, uma maior concentração de SO₂ na região 3 (Figura 6).

De acordo com Lisa (1997), a concentração de gases TRS na parte inferior da fornalha é cerca de poucas centenas de ppm. Esta característica é reproduzida pelos resul-

tados apresentados na Figura 6. Concentrações baixas de gases TRS foram obtidas na região 3 (Figura 7), o que reproduz a realidade operacional da fábrica, onde a alimentação de ar terciário, localizada neste ponto da fornalha, é empregada na oxidação destes gases. Como mencionado, há um predomínio de gases TRS na parte inferior da fornalha (Região 1), o que acarreta em uma baixa concentração de SO₂ nesta região (Figura 7).

Com o aumento de Vvlu espera-se um decréscimo no excesso de oxigênio verificado no sistema. Este comportamento é confirmado pelos resultados obtidos e apresentados na Figura 7.

Um aumento linear da entalpia do vapor gerado é descrito com o aumento de Vvlu (Figura 7), seguindo o comportamento previamente apresentado na Equação 1.

A eficiência de redução real (93%) fornecida pela fábrica quando Vvlu é igual a 63,78m³/h é reproduzida pelos resultados apresentados na Figura 6. Com o aumento de Vvlu, verifica-se um aumento na eficiência de redução para valores de Vvlu até 65m³/h. A partir deste ponto, a eficiência de redução permanece praticamente constante e em torno de 96%.

Em um segundo teste foram considerados diferentes valores de vazão de alimentação de ar primário (Var1). Os valores de vazão de alimentação de licor negro (Vvlu) e de vazão de alimentação de ar terciário (Var3) são mantidos constantes e iguais aos descritos na Tabela 2. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 8 e 9.

Durante a realização do segundo teste, a entalpia do vapor gerado foi mantida constante e igual a 7,37x10¹¹/h.

Com um aumento da alimentação de ar primário (Var1) há uma maior concentração de oxigênio no interior da fornalha, com a mesma concentração de enxofre presente no meio. Assim, é verificado um decréscimo na concentração de gases TRS na região 1 e, conseqüentemente, um decréscimo na concentração de SO₂ na região 3 (Figura 8).

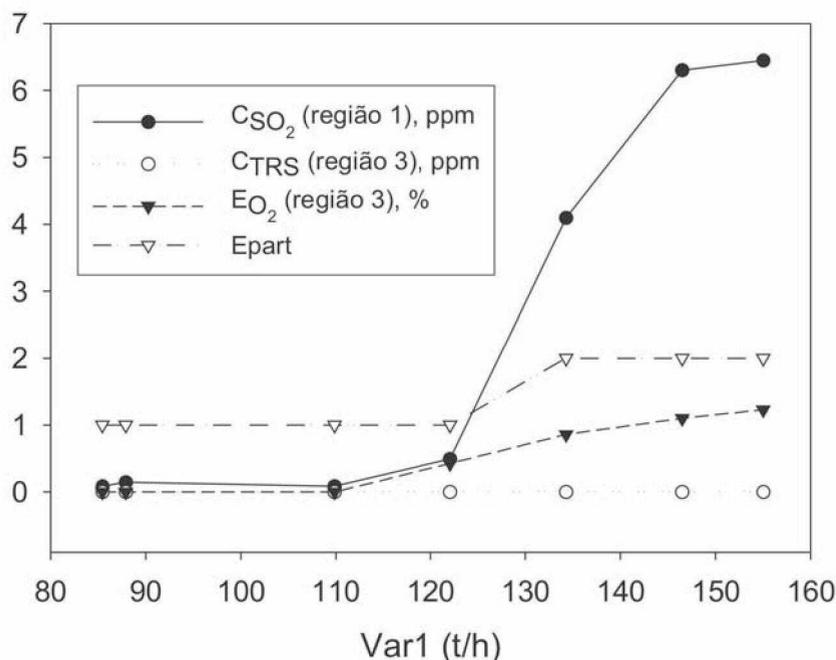


Figura 9 - Concentração de diferentes substâncias resultantes da queima do licor negro quando são considerados diferentes valores para Var1, Vvlu = 63,78m³/h e Var3 = 65,81t/h (continuação).

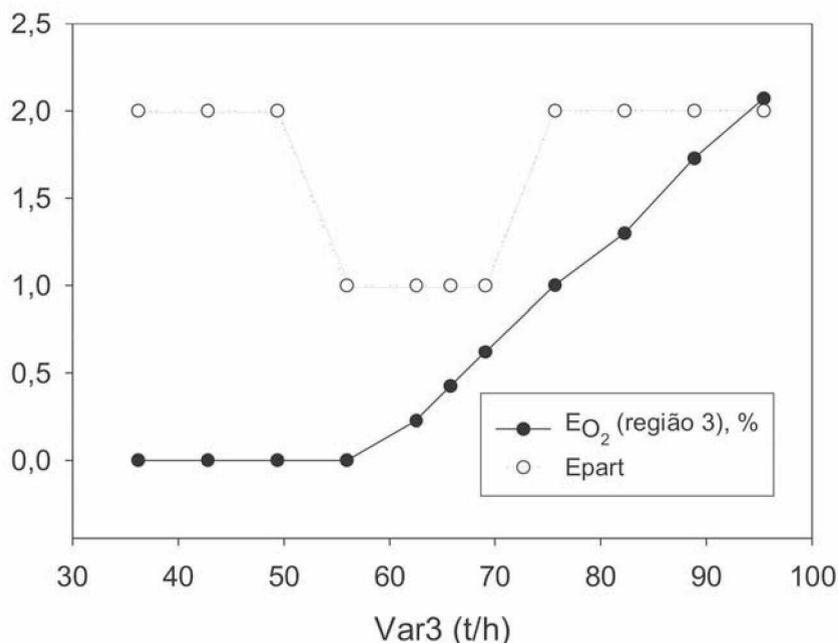


Figura 10 - Concentração das variáveis EO₂ e Epart resultantes da queima do licor negro quando são considerados diferentes valores para Var3, Var1 = 122,07t/h e Vvlu = 63,78m³/h.

Novamente as concentrações calculadas para os gases TRS na parte inferior da fornalha são de poucas centenas de ppm (Figura 8) e concentrações baixas destes gases foram obtidas na região 3 (Figura 9). Mais

uma vez os resultados obtidos reproduzem informações reportadas da literatura (Lisa, 1997) e a realidade operacional da fábrica.

Com o aumento de Var3 espera-se um acréscimo no excesso de oxigênio

no sistema, o que é reproduzido pelos resultados apresentados na Figura 9.

Verifica-se que a eficiência de redução se mantém praticamente constante para valores de Var1 inferiores a 120t/h (aproximadamente). A partir deste ponto, o acréscimo de Var1 causa a diminuição da eficiência de redução.

Uma formação de material particulado inferior a 200npp (saída da rede igual a 1) é observada para valores de Var1 inferiores a 120t/h (aproximadamente). Aumentando ainda mais o valor de Var1 verifica-se um acréscimo na formação de material particulado para acima de 200npp (saída da rede igual a 2).

Finalmente, um terceiro teste foi realizado. Neste caso, foram considerados diferentes valores de vazão de alimentação de ar terciário (Var3). Os valores de vazão de alimentação de licor negro (Vvlu) e de vazão de alimentação de ar primário (Var1) são mantidos constantes e iguais aos descritos na Tabela 2.

Alterações na variável Var3 afetam somente as reações que ocorrem na região 3 e a formação de material particulado. Para todos os valores de Var3 testados, a concentração de gases TRS nesta região permaneceu constante e igual a zero. Os resultados obtidos para as variáveis EO₂ e Epart são apresentados na Figura 10.

Como é esperado, a Figura 10 indica o acréscimo do excesso de oxigênio na região 3 com o aumento de Var3. Além disso, verifica-se uma região na qual a formação de material particulado se mantém abaixo de 200npp. Esta região está compreendida entre valores de Var3 de cerca de 63 e 69t/h. Fora deste intervalo o modelo híbrido indica uma formação de material particulado superior a 200npp.

CONCLUSÕES

O modelo híbrido (minimização da energia livre de Gibbs, rede neuronal e modelo linear) empregado neste trabalho é capaz de reproduzir informações, reportadas na literatura e fornecidas pela fábrica, que des-

crevem a queima do licor negro na caldeira de recuperação.

Empregando a metodologia descrita neste trabalho é possível verificar como alterações na condição operacional da caldeira de recuperação afetam o desempenho deste equipamento, sem a necessidade de um elevado custo computacional.

A abordagem utilizada na elaboração do modelo usado neste estudo permite sua adaptação para descrever outras caldeiras de recuperação, se um número suficiente de dados operacionais estiver disponível.

Por outro lado, é importante notar que os dados utilizados neste trabalho pertencem a um período específico e limitado de operação, não tendo sido feito nenhum tipo de planejamento experimental preliminar para sua obtenção. Na medida que mais e melhores dados forem sendo incorporados à estratégia de modelagem utilizada, a qualidade do modelo resultante crescerá de forma conseqüente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, A. O. S., Descrição Matemática da Caldeira de Recuperação Kraft, Tese de Doutorado, PEQ/CO-PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

COSTA, A. O. S., BISCAIA Jr, E.C., LIMA, E. L. Mathematical Description of The Kraft Recovery Boiler Furnace, Computers & Chemical Engineering, 28, 633-641, 2004.

COSTA, A. O. S., BISCAIA Jr, E. C., LIMA, E. L. , Stationary Mathematical Model for the Bottom Region of a Recovery Boiler Furnace, submetido ao Canadian Journal of Chemical Engineering, (a) 2003.

COSTA, A. O. S., SOUZA Jr, M. B., BISCAIA Jr, E. C., LIMA, E. L., Descrição da formação de material particulado na fornalha de uma caldeira de recuperação por meio de redes neuronais discretas - Description

of the particulate formation in the recovery boiler furnace by discreet neural networks. In: Anais do 36º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel - 36th International Pulp and Paper Congress & Exhibition - ABTCP - TAPPI, CD-ROM São Paulo, SP (b) 2003.

COSTA, A. O. S., SOUZA Jr, M. B., BISCAIA Jr, E. C., LIMA, E. L., Modelling the number of particles formed in an industrial Kraft furnace recovery boiler with radial basis function networks, submetido ao Fuel (c) 2003.

GRACE, T. M. Review of Char Bed Combustion. In: International Chemical Recovery Conference, Canadá, 65-69, 2001

GRACE, T. M., FREDERICK, W.J. Char Bed Processes. In: Adams, T. N. (ed), Kraft Recovery Boilers, 1a ed., chapter 6, Atlanta, USA, TAPPI Press, 1997.

JOKINIEMI, J. K., PYYKÖNEN, J., MIKKANEN, P., KAUPPINEN, E. I., Modeling fume formation and deposition in kraft recovery boilers, TAPPI Journal, 79, 7, 171-181, 1996.

LISA, K. Recovery Boiler Air Emissions. In: Adams, T. N. (ed), Kraft Recovery Boilers, 1a ed., chapter 8, Atlanta, USA, TAPPI Press, 1997.

MACEK, A. Research on combustion of black-liquor drops, Process in Energy and Combustion Science, 25, 275-304, 1999.

SHIANG, N. T., Mathematical Modeling and Simulation of Recovery Furnace, Ph.D. Dissertation, University of Idaho, Idaho, USA, 1996.

SMITH, J.M., VAN NESS, H.C. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 4a ed., Singapura, McGraw-Hill Book Company, 1987. ▲

Quando o resultado final é o seu produto, você precisa de parceiros que garantam a qualidade em todo o processo de produção.

A Spraying Systems oferece seus 80 anos de tradição e mais de 22.000 itens que atendem a sua necessidade.

Ligue pra gente!



Spraying Systems

Tel: (11) 2124-9500
www.spray.com.br