

SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE CARVÃO EM POLPA (CIP) E CARVÃO EM LIXIVIAÇÃO (CIL) PARA RECUPERAÇÃO DE OURO

L.R.P. de Andrade Lima¹, M. Gonçalves¹, T. Benevides¹

¹Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novos, 2, Federação, Salvador, BA, CEP 40210-630
E-mail: lelo@ufba.br

RESUMO

Com o desenvolvimento de modelos cinéticos confiáveis para a lixiviação e a adsorção de ouro e a descrição matemática detalhada das operações encontradas nas usinas de extração de ouro, diversas oportunidades para a otimização sistemática destes processos passaram a ser vislumbradas. A otimização de processos vem tendo larga aplicação nas indústrias química e petroquímica há vários anos e para estas áreas diversos simuladores comerciais já incluem módulos específicos para permitir o cálculo das condições mais favoráveis de operação assim como para a definição das melhores configurações dos circuitos. A otimização de processos hidrometalúrgicos, por outro lado, tem ocorrido de forma limitada e relativamente confinada à área acadêmica. Este trabalho apresenta uma descrição sumária de uma das técnicas de otimização baseada em modelos matemáticos e simulação de processos e ilustra sua aplicação na hidrometalurgia do ouro enfocando o caso dinâmico, sobre o qual é discutida a estratégia de transferência de carvão ativado na seção de adsorção de uma usina. Este exemplo ilustra a aplicabilidade das técnicas de otimização e de análise nos processos de extração de ouro e pode ser analogamente aplicado a outros processos hidrometalúrgicos.

PALAVRAS-CHAVE: adsorção em carvão ativado; simulação; ouro; cianeto.

INTRODUÇÃO

Adsorção em carvão ativado seguida por eletro-recuperação tem sido o processo dominante para recuperação de ouro após a lixiviação com cianeto em meio alcalino (Habashi, 1987; Marsden and House, 1992). Os processos contínuos de adsorção em carvão ativado em tanques agitados, denominados carvão em polpa (CIP) e carvão em lixiviação (CIL), têm sido muito utilizados desde a década de 1970, e devido à importância econômica destes processos suas simulações têm recebido atenção há mais de vinte anos, especialmente na África do Sul, Austrália e Canadá (Schubert et al., 1993; de Andrade Lima, 2007).

Os processos de CIP e CIL utilizam carvão ativado granulado que é misturado com a polpa. Após ser carregado com o íon aurocianeto o carvão ativado enriquecido é bombeado para a saída do circuito de adsorção e enviado para o processo de eluição. A principal diferença entre os processos CIP e CIL é que no último, a adsorção e a lixiviação ocorrem simultaneamente, enquanto no primeiro, a dissolução do ouro já está terminada quando a adsorção tem início (Marsden and House, 1992).

Os processos CIP e CIL são lentos e ocorrem continuamente em uma cascata de tanques agitados. A Figura 1 mostra o esquema do circuito CIP ou CIL com três reatores. Note que a polpa flui por gravidade de um tanque para o próximo tanque por transbordamento. O carvão ativado novo é adicionado no último tanque e o mesmo é transferido intermitentemente em contra-corrente com a polpa para o circuito de eluição. Devido ao fato que as partículas de carvão ativado são maiores que as partículas do minério, elas podem ser facilmente separadas por peneiramento. Nota- na Figura 1 que existem telas entre os tanques (PI) que confinam o carvão até que esteja carregado em ouro. Os tanques usados para o processo CIP podem também ser utilizados para executar o processo CIL.

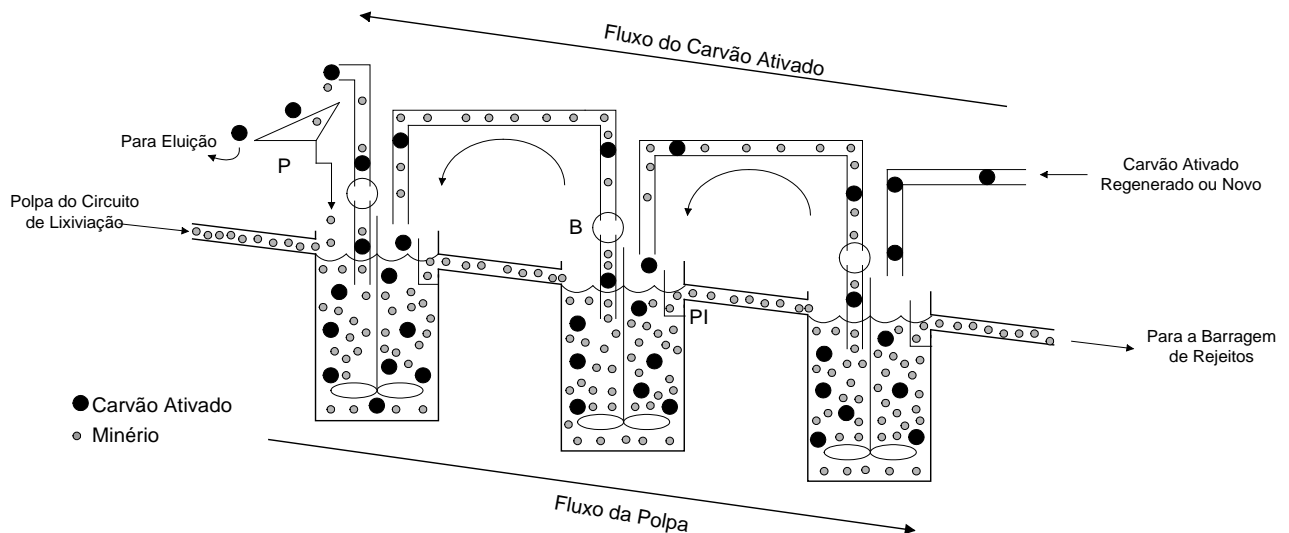


Figura 1: Esquema de um circuito com três tanques de lixiviação ou adsorção.

A simulação dinâmica dos processos de CIP e CIL têm recebido certa atenção desde a década de 1980, e atualmente, alguns modelos úteis estão disponíveis para realizar estudos específicos de otimização de processos (de Andrade Lima, 2007). Os modelos mais detalhados disponíveis levam em conta a adsorção competitiva, adsorção no carvão por compostos orgânicos e partículas finas, distribuição da carga de carvão, perdas por atrito, lixiviação e adsorção de ciano-complexos (“preg-robbing”), e controle da cinética por difusão nos macro e

microporos. Entretanto a maioria destes modelos assumem reatores perfeitamente agitados sem segregação, transferência instantânea de carvão, sólidos e líquidos.

Este artigo apresenta uma aplicação de otimização de processos na hidrometalurgia do ouro. A primeira parte aborda os modelos usados para descrever tanto a lixiviação quanto à adsorção em carvão ativado e define os índices de desempenho do processo usados na otimização. A segunda parte ilustra a otimização dos circuitos de lixiviação e de adsorção.

Neste estudo embora os tanques de lixiviação e de adsorção sejam assumidos como reatores perfeitamente agitados, um modelo detalhado dos reatores que leva em conta as variações dinâmicas das massas retidas de minério e de líquido é considerado. As cinéticas da lixiviação de minérios auríferos e da adsorção de ouro sobre carvão ativado são feitas usando equações empíricas, mas que respeitam a fenomenologia do processo. O estudo apresentado neste artigo usa modelos pseudo-homogêneos para descrever a cinética de lixiviação e do consumo de cianeto enquanto para a adsorção em carvão ativado é descrita através de um modelo com isoterma linear (de Andrade Lima, 2007).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO CIL

A lixiviação de minérios auríferos e a adsorção de ouro em carvão ativado ocorrem em tanques agitados nos quais o escoamento e mistura da polpa tem um comportamento próximo ao de misturadores perfeitos. A Figura 2 mostra esquematicamente os diversos fluxos em um reator genérico de um circuito no qual ocorre tanto lixiviação quanto adsorção. As variáveis Q_c , Q_s e Q_l são as vazões de carvão ativado, minério e líquido, enquanto C_s , C_l , C_c são as concentrações de ouro no minério, no líquido e no carvão ativado, C_{cn} e C_o são as concentrações de cianeto livre e oxigênio no líquido. As variáveis M_l , M_s e M_c são as massas retidas de líquido, minério e carvão ativado, V_t é o volume do tanque, RAu , RCb , RCN , Ro e Ao são as taxas de lixiviação, adsorção no carvão ativado, consumo do cianeto, consumo de oxigênio e aporte de oxigênio. Q é a capacidade das bombas de transferência de carvão ativado.

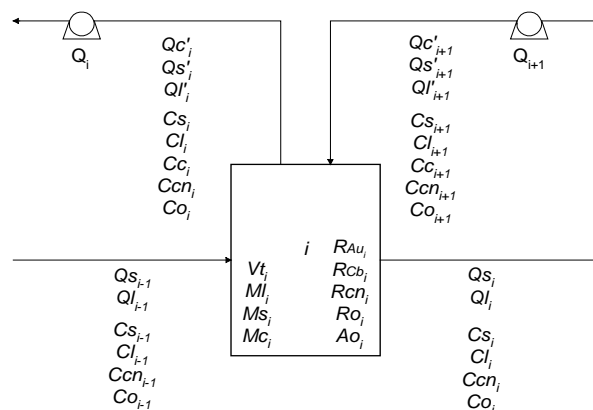


Figura 2. Esquema do reator genérico no qual ocorre simultaneamente lixiviação e adsorção.

O modelo dinâmico para a lixiviação e a adsorção de ouro é composto por equações que descrevem a conservação da massa do minério, do líquido e do carbono, assim como ouro no minério, no líquido e no carbono e cianeto no líquido (de Andrade Lima et al., 2002; de Andrade Lima, 2007):

$$\frac{dMs_i}{dt} = Qs_{i-1} - Qs_i + Qs'_{i+1} - Qs'_i \quad (1)$$

$$\frac{dMl_i}{dt} = Ql_{i-1} - Ql_i + Ql'_{i+1} - Ql'_i \quad (2)$$

$$\frac{dMc_i}{dt} = Qc'_{i+1} - Qc'_i \quad (3)$$

$$\frac{d[Ms_i Cs_i]}{dt} = Qs_{i-1} Cs_{i-1} - Qs_i Cs_i + Qs'_{i+1} Cs_{i+1} - Qs'_i Cs_i - Ms_i RAu_i \quad (4)$$

$$\frac{d[Ml_i Cl_i]}{dt} = Ql_{i-1} Cl_{i-1} - Ql_i Cl_i + Ql'_{i+1} Cl_{i+1} - Ql'_i Cl_i + Ms_i RAu_i - Mc_i Rcb_i \quad (5)$$

$$\frac{d[Mc_i Cc_i]}{dt} = Qc'_{i+1} Cc_{i+1} - Qc'_i Cc_i + Mc_i Rcb_i \quad (6)$$

$$\frac{d[Ml_i Ccn_i]}{dt} = Ql_{i-1} Ccn_{i-1} - Ql_i Ccn_i + Ql'_{i+1} Ccn_{i+1} - Ql'_i Ccn_i + Qcn_i - Ml_i RCN_i \quad (7)$$

Os índices “i-1”, “i”, e “i+1” referem-se às variáveis na entrada do reator, no interior ou na saída do reator e no reator seguinte do circuito. Qcn é a vazão de cianeto adicionada no reator. As variáveis com o símbolo “ ’ ” referem-se a estas que são transferidas com o carvão ativado. Devido à hipótese de mistura perfeita e de volume de polpa constante, as seguintes relações também devem ser usadas para descrever o reator:

$$\frac{Ms_i}{\rho s} + \frac{Ml_i}{\rho l} + \frac{Mc_i}{\rho c} = V_i \quad (8)$$

$$\frac{Qs'_i}{\rho s} + \frac{Ql'_i}{\rho l} + \frac{Qc'_i}{\rho c} = Q_i \quad (9)$$

$$\frac{Ms_i}{Ms_i + Ml_i} = \frac{Qs_i}{Qs_i + Ql_i} = \frac{Qs'_i}{Qs'_i + Ql'_i} = Cw_i \quad (10)$$

$$\frac{Mc_i}{Ms_i + Ml_i + Mc_i} = \frac{Qc'_i}{Qs'_i + Ql'_i + Qc'_i} = Ccb_i \left[\frac{Cw_i}{\rho s} + \frac{(1 - Cw_i)}{\rho l} \right] \quad (11)$$

V é o volume do tanque, ps, pl e pc são as densidades do minério, do líquido, e do carvão ativado, Cw é a concentração de sólidos na polpa, Ccb é a concentração do carvão ativado na polpa e Q é a capacidade das bombas de transferência de carvão ativado.

A cinética das reações que ocorrem em três fases, como é o caso da lixiviação de ouro, pode ser bastante complexa, entretanto em vários casos estas reações podem ser assumidas como pseudo-homogêneas, sobretudo se as partículas do minério são suficientemente pequenas, o que facilita a transferência de massa, fazendo com que a cinética global do processo seja idêntica à cinética intrínseca da reação (de Andrade Lima et al, 2002; de Andrade Lima, 2007). Para a lixiviação de ouro o modelo cinético foi calibrado com dados de uma usina para a qual o efeito da concentração de ouro no minério (Cs) e de cianeto livre na solução (Ccn) são levados em consideração:

$$RAu = 5,50 \times 10^{-3} Ccn (Cs - Cs_\infty)^{2,15} \quad (\text{g/t h}) \quad (12)$$

$$Cs_\infty = 0,14 \quad (\text{g/t}) \quad (13)$$

Analogamente, a cinética de consumo do cianeto é descrita por modelos empíricos. Neste caso o modelo cinético foi calibrado com dados de uma usina para a qual apenas o efeito da concentração de cianeto livre na solução (Ccn) é levado em consideração:

$$R_{CN} = 3,43 + 1,47 \times 10^{-2} C_{cn} \quad (\text{g/t h}) \quad (14)$$

A cinética de adsorção do ouro em carvão ativado pode ser descrita usando a equação que assume que os processos de adsorção e desorção são reversíveis e lineares. Este modelo cinético foi calibrado com dados de uma usina para a qual o efeito da concentração de ouro dissolvido na solução (C_l) e adsorvido no carvão ativado (C_c) foi levado em consideração (de Andrade Lima et al., 2002):

$$R_{Cb} = 9,10 \times 10^{-2} C_l (1,439 \times 10^4 - C_c) - 6,27 \times 10^{-23} C_c \quad (\text{g/t h}) \quad (15)$$

As equações 1 a 14 podem ser resolvidas numericamente e descrevem um reator genérico no qual a lixiviação ocorre ao mesmo tempo em que a adsorção, entretanto este modelo pode ser facilmente simplificado para descrever os processos nos quais apenas lixiviação ou adsorção ocorre.

Para a avaliação das estratégias de transferência de carvão ativado o modelo dinâmico foi usado e a perda total de ouro no efluente do processo, a quantidade total de cianeto perdido nos efluentes da usina, a quantidade de ouro total recuperada no carvão e a perda total de ouro nos efluentes da usina, foram calculadas entre dois tempos, quando a simulação já se encontrava em estado estacionário cíclico:

$$J_{AuLS} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} C_{S_N}(t) Q_{S_N}(t) dt \quad (16)$$

$$J_{CNLL} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} C_{cn_N}(t) Q_{l_N}(t) dt \quad (17)$$

$$J_{AuRC} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} C_{c_1}(t) Q_{ct_1}(t) dt \quad (18)$$

$$J_{AuLL} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} C_{l_N}(t) Q_{l_N}(t) dt \quad (19)$$

O estudo da estratégia de transferência de carvão ativado no processo de adsorção de ouro é um problema de interesse prático tanto para o projeto quanto para a operação de usinas. No presente caso as equações cinéticas 12 e 13, 14 e 15 e o modelo do reator descrito nas equações 1 à 11 são aplicados a uma usina com sete tanques de adsorção, que é simulada dinamicamente por 5000 horas assumindo que $V_i = 1350 \text{ m}^3$, $Q_v = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e as variáveis de entrada têm valores constantes ($Q_p = 868,6 \text{ t/h}$, $C_w = 44,75\%$, $C_{s_0} = 0,3886 \text{ mg/L}$, $C_{l_0} = 2.659 \text{ mg/L}$, $C_{cn_0} = 374,5 \text{ mg/L}$). Os índices de desempenho do processo (equações 16 à 19) são em seguida calculados. Foram feitas análises de sensibilidade do modelo e simuladas 20 estratégias de transferência de carvão ativado. Os índices de desempenho foram em seguida calculados e analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise de sensibilidade do modelo para o processo CIL

A Figura 3 mostra a simulação dinâmica do processo CIL por cinco mil horas com a evolução das concentrações de ouro no líquido, no sólido e no carvão ativado e da concentração de cianeto. Observa-se a evolução desde a condição inicial até um ponto no qual os ciclos são repetidos. Note que o cálculo das funções custo (Eq. 16 a 19) será feito apenas a partir do momento que a simulação atinge o estado estacionário cíclico.

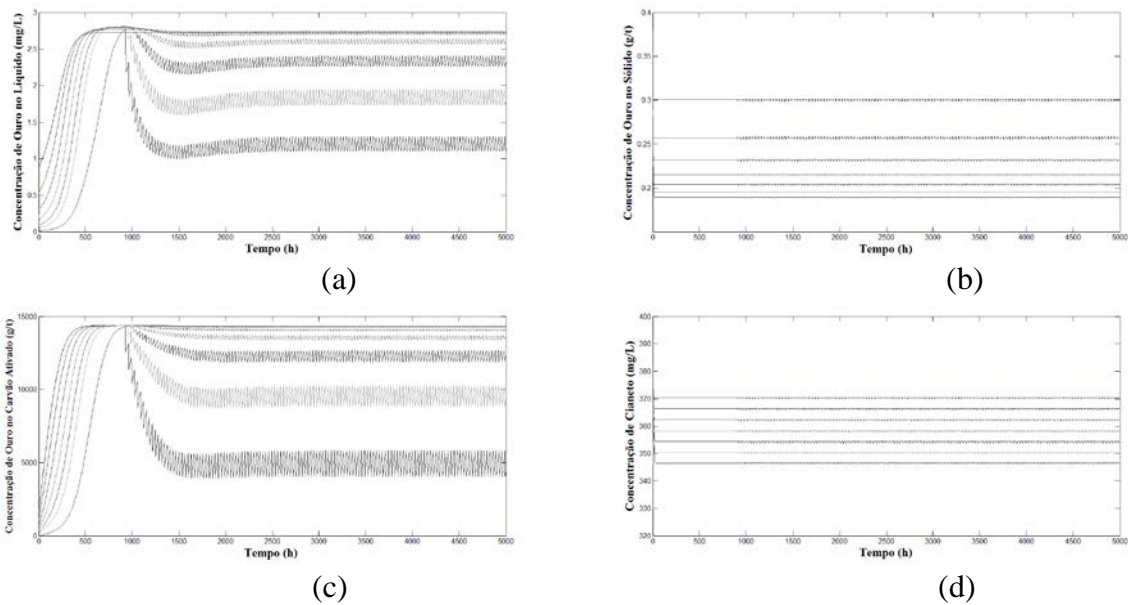


Figura 3. Simulação dinâmica das concentrações de: a) ouro no líquido, b) ouro no sólido, c) ouro no carvão ativado, d) cianeto no líquido.

A Figura 4 mostra o efeito do aumento e da redução do valor dos parâmetros do modelo sobre as funções custo. Nota-se que os parâmetros que exercem maior influência sobre o modelo são: i) a carga máxima do carvão (Cmax), ii) a capacidade das bombas (Qv), iii) a concentração inicial de ouro no líquido (Cl0) e iv) o volume dos tanques (V). O efeito dos outros parâmetros sobre os resultados do modelo foi analisado, mas não apresentaram influência significativa.

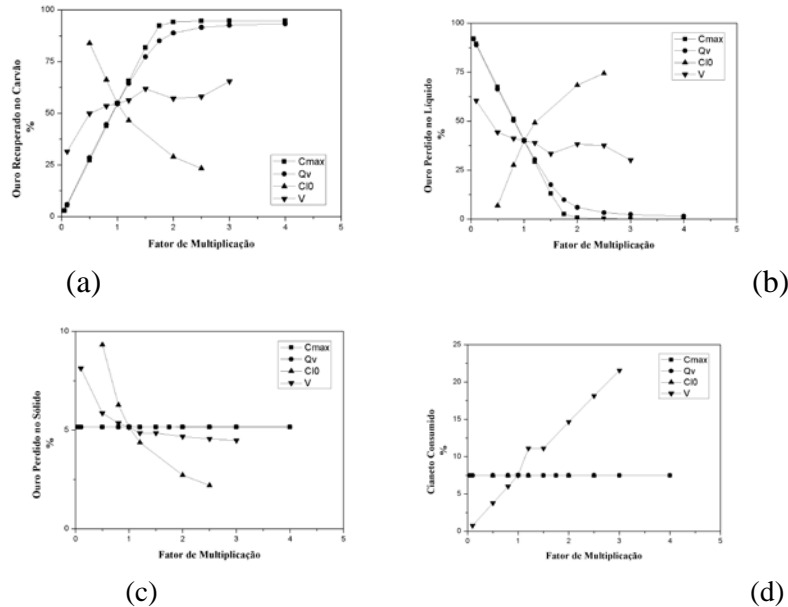


Figura 4. Análise de sensibilidade do modelo: a) Recuperação do ouro no carvão ativado, b) Perda de ouro da fase líquida, c) Perda de ouro no minério e d) Consumo de cianeto.

3.2 Otimização da seqüência de transferência de carvão ativado

Os resultados dos índices de desempenho do processo para cada estratégia de transferência são apresentados nas Tabelas I a IV onde a percentagem de ouro recuperado no carvão ativado e de ouro perdido com o líquido, assim como o consumo de cianeto e o ouro perdido no sólido, são mostradas. As estratégias com seqüência de bombeamento entre parênteses indicam que as bombas estão sincronizadas.

Tabela I: Efeito da seqüência de transferência de carvão sobre os índices de desempenho

Estratégia	1	2	3	4	5
	0←1	7←8	5←6	4←5	3←4
	1←2	6←7	6←7	5←6	4←5
	2←3	5←6	7←8	6←7	5←6
Seqüência de Transferência	3←4	4←5	4←5	7←8	6←7
	4←5	3←4	3←4	3←4	7←8
	5←6	2←3	2←3	2←3	2←3
	6←7	1←2	1←2	1←2	1←2
	7←8	0←1	0←1	0←1	0←1
Ouro perdido na fase Líquida (%)	40,13	33,06	38,75	39,80	40,10
Ouro Perdido no sólido (%)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15
Ouro Recuperado no Carvão (%)	54,72	61,79	56,10	55,05	54,75
Consumo de Cianeto (%)	7,50	7,48	7,48	7,48	7,48

XXIV ENTMME - 2011 - Salvador/Bahia

Tabela II: Efeito da sincronização de duas bombas sobre os índices de desempenho

Estratégia	15	14	12	13
Seqüência de Transferência	7←8	7←8	7←8	7←8
	6←7	6←7	6←7	(6←7)
	5←6	5←6	5←6	(5←6)
	4←5	4←5	4←5	4←5
	3←4	3←4	3←4	3←4
	2←3	(2←3)	2←3	2←3
	(1←2)	(1←2)	1←2	1←2
	(0←1)	0←1	0←1	0←1
Ouro perdido na fase Líquida(%)	32,96	33,04	33,38	33,92
Ouro Perdido no sólido (%)	5,15	5,15	5,15	5,15
Ouro Recuperado no Carvão (%)	61,89	61,81	61,47	60,93
Consumo de Cianeto (%)	7,48	7,48	7,48	7,48

Tabela III: Efeito da sincronização das bombas sobre os índices de desempenho

Estratégia	2	12	11	10	9	8	7	6
Seqüência de Transferência	7←8	7←8	7←8	7←8	7←8	(7←8)	7←8	(7←8)
	6←7	6←7	6←7	6←7	(6←7)	(6←7)	6←7	(6←7)
	5←6	5←6	5←6	(5←6)	(5←6)	(5←6)	5←6	(5←6)
	4←5	(4←5)	4←5	(4←5)	(4←5)	(4←5)	4←5	(4←5)
	3←4	(3←4)	3←4	(3←4)	(3←4)	(3←4)	3←4	(3←4)
	2←3	2←3	2←3	(2←3)	(2←3)	(2←3)	2←3	(2←3)
	1←2	1←2	1←2	1←2	1←2	1←2	1←2	(1←2)
	0←1	0←1	0←1	0←1	0←1	0←1	0←1	(0←1)
Ouro perdido na fase Líquida (%)	33,06	33,38	34,03	34,16	35,08	36,22	36,21	36,16
Ouro Perdido no sólido (%)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15
Ouro Recuperado no Carvão (%)	61,79	61,47	60,81	60,69	59,76	58,63	58,64	58,69
Consumo de Cianeto (%)	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48

Tabela IV: Efeito da sincronização das bombas de transferência de carvão sobre os Índices de desempenho

Estratégia	2	15	16	17	18	19	20	6
Seqüência de Transferência	7←8	7←8	7←8	7←8	7←8	7←8	7←8	(7←8)
	6←7	6←7	6←7	6←7	6←7	6←7	(6←7)	(6←7)
	5←6	5←6	5←6	5←6	5←6	(5←6)	(5←6)	(5←6)
	4←5	4←5	4←5	4←5	(4←5)	(4←5)	(4←5)	(4←5)
	3←4	3←4	3←4	(3←4)	(3←4)	(3←4)	(3←4)	(3←4)
	2←3	2←3	(2←3)	(2←3)	(2←3)	(2←3)	(2←3)	(2←3)
	1←2	(1←2)	(1←2)	(1←2)	(1←2)	(1←2)	(1←2)	(1←2)
	0←1	(0←1)	(0←1)	(0←1)	(0←1)	(0←1)	(0←1)	(0←1)
Ouro perdido na fase Líquida(%)	33,06	32,96	32,94	33,07	33,43	34,09	35,02	36,16
Ouro Perdido no sólido (%)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15
Ouro Recuperado no Carvão (%)	61,79	61,89	61,91	61,78	61,41	60,76	59,83	58,69
Consumo de Cianeto (%)	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48

As Tabelas I a IV e a Figura 5 mostram o efeito da seqüência de transferência de carvão ativado e da sincronização das bombas sobre os índices de desempenho do processo.

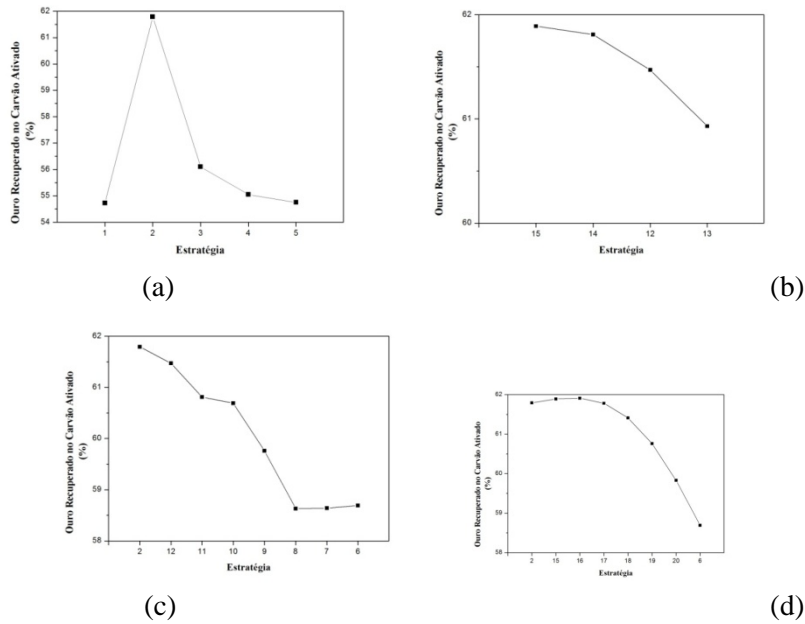


Figura 5. Efeito da seqüência de transferência de carvão e da sincronização das bombas de transferência de carvão sobre os índices de desempenho do processo de carvão em polpa.

A Figura 5a mostra o efeito da mudança das seqüências de transferência de carvão ativado, apresentadas na Tabela I. Pode-se observar que há um aumento na recuperação de ouro quando a seqüência é iniciada no último tanque e a recuperação atinge um valor mínimo quando a seqüência é iniciada no primeiro tanque. A Figura 5b mostra o efeito da sincronização de duas bombas de transferência de carvão ativado quando as seqüências são iniciadas no último tanque, como pode ser visto na Tabela II. A recuperação de ouro no carvão ativado apresenta um valor máximo quando sincronizamos as duas últimas bombas de transferência e decresce à medida em que a sincronização se aproxima do início do circuito. A Figura 5c mostra o efeito da sincronização de um número crescente de bombas de transferência de carvão ativado no meio do circuito quando as seqüências são iniciadas no último tanque, como pode ser visto na Tabela III. Pode-se observar que, com o aumento do número de bombas sincronizadas há uma diminuição na recuperação de ouro no carvão ativado, porém, podemos notar um pequeno aumento na recuperação quando sincronizamos sete e oito bombas de transferência. A Figura 5d mostra o efeito da sincronização de um número crescente de bombas de transferência de carvão ativado quando as seqüências são iniciadas no último tanque. As diferentes estratégias de transferência são mostradas na Tabela IV. Pode-se observar que a recuperação de ouro no carvão ativado aumenta com a sincronização das duas últimas bombas de transferência, atinge um valor máximo com a sincronização das três últimas bombas e decresce com o aumento do número de bombas sincronizadas.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma avaliação sistemática do processo CIL, baseada em modelos matemáticos fenomenológicos, calibrados com dados experimentais, assim como índices de desempenho metalúrgico. Os resultados deste estudo mostram que as variáveis que mais afetam o desempenho do processo estão relacionadas com a capacidade de adsorção do carvão ativado, ao volume do tanque e a capacidade de transferência de carvão da bomba. Além disso, os resultados mostram que as estratégias de transferência de carvão iniciando no final da cascata e com poucas bombas de transferência de carvão sincronizadas no início da cascata são mais eficazes. Os casos focalizados neste estudo estão relacionados com a seção de adsorção em carvão ativado, entretanto, uma abordagem similar pode ser usada tanto para o estudo das operações de extração de outros metais, quanto para a otimização ou avaliação de operações e processos usando diferentes minérios auríferos.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio do CNPq e da FAPESB através de bolsas de iniciação científica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

de Andrade Lima, L.R.P., Hodouin, D. e Bax, A. Comparison of empirical and phenomenological approaches to the analysis of gold cyanidation plant performance, In: Proceedings of the International Symposium on Gold Recovery, Ed. A. Laplante, CIM Special Volume, n. 51, p.45-55, 2002.

de Andrade Lima, L.R.P. Dynamic simulation of the carbon-in-pulp and carbon-in-leach processes. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24 (4), 623-635, 2007.

Habashi, F. One hundred years of cyanidation, *CIM Bulletin*, 80, p.108-114, 1987.

Marsden, J. and House, I., *The Chemistry of Gold Extraction*, Ellis Horwood, 1992.

Schubert, J.H., Barker, I.J., and Swartz, C.L.E., (1993). Performance evaluation of a carbon-in-pulp plant by dynamic simulation, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 93(11/12), 293-299.