

Estratégias de Minimização de Efluentes na Síntese e Integração de Processos

Florabela Vidigueira e Eugénio C. Ferreira*

Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

Palavras-Chave: Minimização de efluentes, Síntese de Processos, Integração de Processos

Tópico: Process and product design and synthesis

Sumário

No presente estudo avaliou-se a possibilidade de métodos de optimização na resolução de problemas de minimização de águas potáveis e efluentes. Utilizaram-se para o efeito diferentes ferramentas de optimização (EXCEL, LINGO 7.0, funções de optimização do MATLAB 7.0), na avaliação de dois casos de estudo: i) Remoção de fenol em efluentes aquosos de uma instalação de reciclagem de óleo, como exemplo de um problema de linearidade da função objectivo e suas restrições; ii) Minimização de água e efluentes aquosos numa refinaria de petróleo, como exemplo de um problema de não linearidade da função objectivo e suas restrições.

Mostra-se que problemas de prevenção e controlo da poluição podem ser, de um modo eficaz, avaliados por optimização matemática.

1 Introdução

No desenvolvimento de soluções de prevenção da poluição para uma dada situação industrial, é-se confrontado com decisões de planeamento que requerem escolhas num vasto número de opções. Em muitos casos existem muitas alternativas a enumerar, tornando-se necessário desenvolver uma aproximação sistemática do problema capaz de identificar as modificações apropriadas do processo, encarando-o como um problema ambiental numa perspectiva holística. É neste contexto, que a integração de processos fornece uma ferramenta única que reconhece a unidade de todo o processo (Rossiter, 1995; El-Halwagi, 1997). Existem três componentes chave na compreensão da metodologia de integração de processos (Rossiter, 1995; El-Halwagi, 1997): i) Síntese de Processo: devido ao vasto número de alternativas do processo é importante que as técnicas de síntese sejam capazes de “extrair” a(s) solução(ões) óptima(s); ii) Análise de Processo: as características pormenorizadas do processo são prognosticadas, usando técnicas de análise que incluem modelos matemáticos, correlações empíricas e ferramentas de simulação de processo auxiliadas por computador e iii) Optimização de Processo que conduz à interacção entre síntese e análise. A integração de massa é uma metodologia sistemática que fornece um entendimento fundamental do fluxo global de massa no interior do processo de fabrico e, emprega este entendimento holístico na identificação de cenários e optimização, conduzindo as espécies através do processo (El-Halwagi, 1997). Uma das áreas de actuação dos procedimentos de integração mássica é na minimização de efluentes. Se excluir a possibilidade de se fazerem alterações fundamentais no processo para reduzir as suas exigências inerentes à água, como seja a utilização de refrigeradores em vez de torres de arrefecimento, podemos considerar três possibilidades para minimizar os efluentes e a água (Smith e Petela, 1994; Wang e Smith, 1994; Rossiter, 1995; Castro et al., 1999; Mann e Liu, 1999): i) reutilização: os efluentes podem ser reutilizados directamente noutras operações, desde que o nível de contaminante não interfira com o processo; ii) regeneração/reutilização: o efluente pode ser regenerado por tratamento parcial para remover contaminantes e depois reutilizado noutras operações (quando a água é reutilizada depois da regeneração, não reentra nos processos onde já tenha sido utilizada); iii) regeneração/reciclagem: o efluente pode ser regenerado para remover contaminantes já acumulados e depois reciclado, a água

* Corresponding author. Tel + 351 253 604 407. E-mail: ecferreira@deb.uminho.pt

pode reentrar nos processos onde já tenha sido utilizada.

A implementação de estratégias na minimização de efluentes e água passa por uma avaliação matemática do próprio processo, de modo a poder desenvolverem-se modelos capazes de o traduzir matematicamente. Esses modelos serão utilizados em aproximações de optimização matemática na obtenção das soluções óptimas. O(s) método(s) seleccionado(s) para resolução do problema de optimização dependem, em primeiro lugar, das características da função objectivo e se é explicitamente conhecida; da natureza das restrições e do número de variáveis dependentes e independentes.

2 Casos de Estudo

2.1 Exemplo 1 - Reciclagem de óleo (El-Halwagi, 1997)

Este exemplo ilustra a síntese de uma rede de transferência de massa baseada numa aproximação por programação matemática linear. Consiste numa instalação de reciclagem de óleos constituída essencialmente por 2 tipos de efluentes: gasóleo e óleo lubrificante (fig.1).

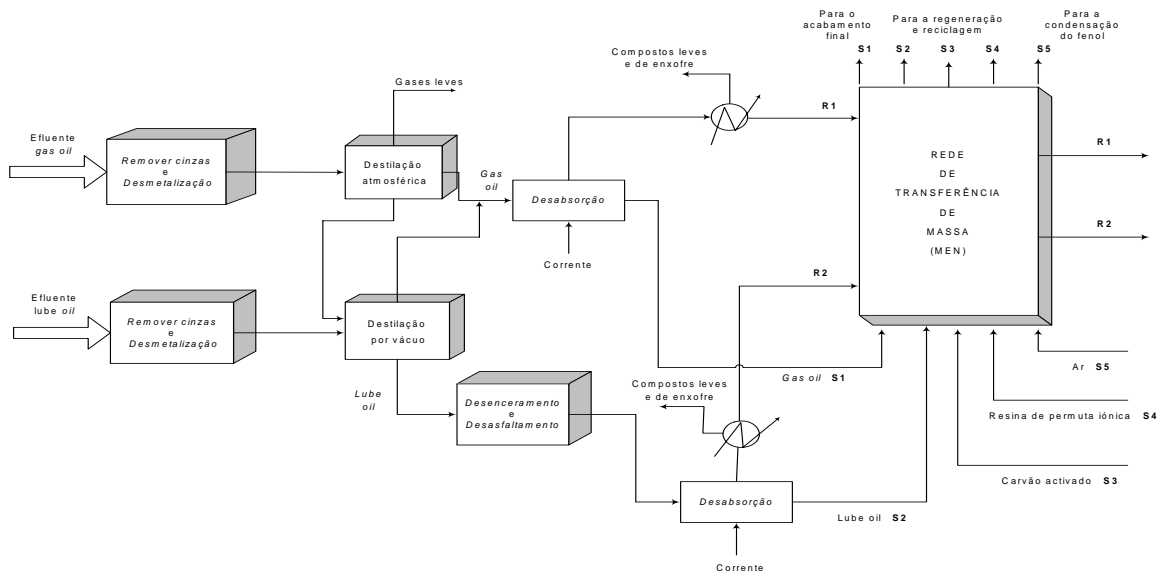


Fig. 1 Representação esquemática da instalação (adaptado de El-Halwagi, 1997)

Após uma série de procedimentos processuais, para que os óleos atingissem as propriedades desejadas, obtinha-se, vindas de desabsorção, duas correntes de condensados, R1 e R2, onde o principal poluente era o fenol. Com o objectivo de reduzir a quantidade de fenol, optou-se por rentabilizar as correntes do processo, utilizando na extracção por solvente o gasóleo, corrente S1, e o óleo lubrificante, corrente S2, como agentes de separação de massa ('MSAs') do processo. Adicionalmente, consideraram-se ainda 3 tecnologias exteriores para remoção do fenol: a adsorção com carvão activado, corrente S3, a permuta iónica com resina polimérica, corrente S4, e a desabsorção com ar, corrente S5. Considerou-se o valor de 0,001 kg de fenol/kg de 'MSA' para a diferença mínima de composição permitida (ϵ_j). Os dados para as correntes de condensados e agentes de separação de massa foram retirados de El-Halwagi (1997).

Uma análise baseada no diagrama de ponto de estrangulamento (El-Halwagi, 1997) indicou um excesso da capacidade dos 'MSAs' do processo de 0,0184 kg de fenol/s, podendo ser removidos 0,0124 kg de fenol/s usando correntes de 'MSAs' exteriores. O problema de minimização do custo operativo dos agentes de separação de massa foi formulado adoptando uma aproximação de programação linear (El-Halwagi e Manousiouthakis, 1990), sendo a função objectivo dada por:

$$\min 0.081L_3 + 0.214L_4 + 0.060L_5$$

sujeito a

$$\delta_1 = 0.0052$$

$$\begin{aligned}
& \delta_2 - \delta_1 + 0.0101L_2 = 0.0308 \\
& \delta_3 - \delta_2 + 0.0010L_1 + 0.0013L_2 = 0.0040 \\
& \delta_4 - \delta_3 + 0.0066L_1 + 0.0086L_2 = 0.0396 \\
& \delta_5 - \delta_4 + 0.0024L_1 + 0.0537L_4 = 0.0144 \\
& \delta_6 - \delta_5 + 0.0222L_4 = 0.0060 \\
& \delta_7 - \delta_6 + 0.0444L_4 = 0.0040 \\
& \delta_8 - \delta_7 + 0.0420L_4 = 0.0000 \\
& \delta_9 - \delta_8 + 0.0510L_3 + 0.0114L_4 = 0.0000 \\
& \delta_{10} - \delta_9 + 0.0555L_3 + 0.0123L_4 + 0.0277L_5 = 0.0000 \\
& \delta_{11} - \delta_{10} + 0.0025L_3 + 0.0013L_5 = 0.0000 \\
& \quad - \delta_{11} + 0.0010L_3 = 0.0000 \\
& k = 1,2, \dots, 11 \quad \delta_k \geq 0 \\
& j = 1, 2, \dots, 5 \quad L_j \geq 0 \\
& \quad \quad \quad L_1 \leq 5 \\
& \quad \quad \quad L_2 \leq 3
\end{aligned}$$

onde L_j denota o caudal mássico da corrente do ‘MSA’ j , δ_{k-1} e δ_k representam as massas residuais do contaminante chave que entra e sai do intervalo de composição k .

As primeiras 11 restrições de igualdade representam os balanços mássicos sucessivos próximos de cada intervalo de composição. A 12ª restrição ($\delta_k \geq 0$) permite às correntes com resíduos passar a massa do poluente para trás se ele não se transferir completamente com o ‘MSA’, num dado intervalo. Os 3 últimos conjuntos de restrições garantem que o caudal mássico óptimo de cada ‘MSA’ seja não negativo e menor que a quantidade total disponível de cada corrente pobre.

A minimização do número de permutadores de transferência de massa para a solução do custo operativo mínimo foi formulada como uma aproximação linear inteira mista (‘MILP’) por El-Halwagi e Manousiouthakis (1990):

$$\begin{aligned}
& \min E_{1,1,1} + E_{1,2,1} + E_{2,1,1} + E_{2,2,1} + E_{1,1,2} + E_{1,3,2} + E_{2,1,2} + E_{2,3,2} \\
& \text{sujeito a} \quad \delta_{1,1} = 0.0052 \\
& \quad \delta_{1,2} - \delta_{1,1} + W_{1,2,2} = 0.0308 \\
& \quad \delta_{1,3} - \delta_{1,2} + W_{1,1,3} + W_{1,2,3} = 0.0040 \\
& \quad \delta_{1,4} - \delta_{1,3} + W_{1,1,4} + W_{1,2,4} = 0.0264 \\
& \quad \delta_{1,5} - \delta_{1,4} + W_{1,1,5} = 0.0096 \\
& \quad \delta_{1,6} - \delta_{1,5} = 0.0040 \\
& \quad \delta_{1,7} - \delta_{1,6} = 0.0000 \\
& \quad \delta_{1,8} - \delta_{1,7} = 0.0000 \\
& \quad - \delta_{1,8} + W_{1,3,9} = 0.0000 \\
& \quad \delta_{2,4} + W_{2,1,4} + W_{2,2,4} = 0.0132 \\
& \quad \delta_{2,5} - \delta_{2,4} + W_{2,1,5} = 0.0048 \\
& \quad \delta_{2,6} - \delta_{2,5} = 0.0020 \\
& \quad \delta_{2,7} - \delta_{2,6} = 0.0040 \\
& \quad \delta_{2,8} - \delta_{2,7} = 0.0000 \\
& \quad - \delta_{2,8} + W_{2,3,9} = 0.0000 \\
& \quad W_{1,1,3} = 0.0050 \\
& \quad W_{1,1,4} + W_{2,1,4} = 0.0330 \\
& \quad W_{1,1,5} + W_{2,1,5} = 0.0120 \\
& \quad W_{1,2,2} = 0.0210 \\
& \quad W_{1,2,3} = 0.0027 \\
& \quad W_{1,2,4} + W_{2,2,4} = 0.0179 \\
& \quad W_{1,3,9} + W_{2,3,9} = 0.0124 \\
& \quad W_{1,1,3} + W_{1,1,4} \leq 0.0380E_{1,1,1} \\
& \quad W_{1,2,2} + W_{1,2,3} + W_{1,2,4} \leq 0.0416E_{1,2,1} \\
& \quad W_{2,1,4} \leq 0.0132E_{2,1,1} \\
& \quad W_{2,2,4} \leq 0.0132E_{2,2,1} \\
& \quad W_{1,1,5} \leq 0.0120E_{1,1,2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_{2,1,5} \leq 0.0108E_{2,1,2} \\
& W_{1,3,9} \leq 0.0124E_{1,3,2} \\
& W_{2,3,9} \leq 0.0108E_{2,3,2} \\
& i = 1, 2 \text{ e } j = 1, 2, 3 \\
& k = 1, 2, \dots, 9 \\
& m = 1, 2 \\
& W_{i,j,k} \geq 0.0 \\
& \delta_{i,k} \geq 0.0 \\
& E_{i,j,m} = 0/1
\end{aligned}$$

onde $E_{i,j,m}$ representa a variável inteira binária, que toma o valor nulo quando não há emparelhamento entre a corrente i ($i \in R$) e a corrente j ($j \in S$), na sub-rede m (m pode ter o valor de 1 ou 2, referindo-se a duas sub-redes da rede de transferência de massa principal, uma acima e outra a baixo do ponto de estrangulamento) e o valor de 1 quando existe parceria entre as correntes i e j (e, conseqüentemente, um permutador); $\delta_{i,k}$ e $\delta_{i,k-1}$ são as massas residuais, para a corrente rica i , do poluente chave que entra e sai do intervalo de composição k ; $W_{i,j,k}$ denota a massa transferida entre a corrente rica i e a corrente pobre j , no intervalo de composição k .

As primeiras 22 restrições referem-se a balanços mássicos sucessivos das correntes R_1, R_2, S_1, S_2 e S_3 (as S_4 e S_5 não foram incluídas por não terem sido seleccionadas como parte da solução do custo operativo mínimo) próximos de cada intervalo de composição. As oito restrições seguintes representam as possíveis correspondências entre as correntes pobres e ricas acima e abaixo do ponto de estrangulamento. As três últimas garantem a não negatividade e restrições inteiras.

Foram implementados os algoritmos de optimização do Solver Excel (Microsoft Co.), do Lingo 7.0 (Lindo Systems, Inc.) e a função de optimização 'LINPROG' do Matlab 7.0 (MathWorks, Inc.), obtendo-se um custo operativo mínimo de 288 000 dólares anuais, o carvão activado como 'MSA' exterior e um número mínimo de permutadores de transferência de massa capaz de concretizar esse custo mínimo de sete.

2.2. Exemplo 2 - Refinaria de petróleo (Rossiter, 1995)

Este exemplo aborda uma situação de minimização de efluentes aquosos, baseada numa aproximação por programação matemática não linear. Consistia na avaliação do sistema dos efluentes aquosos e respectivos caudais mássicos de uma refinaria de petróleo (fig. 2).

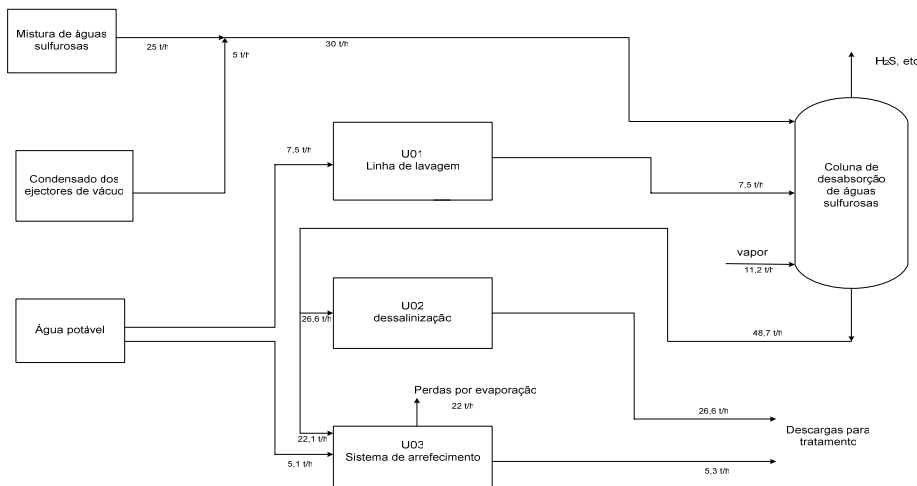


Fig. 2 Instalação do caso base (adaptado de Rossiter, 1995)

Todas as fontes de águas sulfurosas, à excepção das águas de lavagem, eram combinadas numa única corrente, correntes secundárias. Os principais poluentes eram os hidrocarbonetos, sulfureto de hidrogénio e sal. A desabsorção era o meio adoptado para remover o sulfureto de hidrogénio das águas da refinaria, tornando-as apropriadas para reutilização ou distribuição. No presente caso assumiu-se que houve uma remoção de 99% de sulfureto de hidrogénio na coluna. A coluna possuía ainda um sistema de injeção de vapor que, após entrada, condensava misturando-se com o efluente que era usado na dessalinização, o excedente era conduzido ao sistema de arrefecimento, onde, funcionando

como desabsorvedor de componentes leves, eram retirados os hidrocarbonetos e sulfureto de hidrogénio do efluente. Os dados dos efluentes da refinaria foram retirados de Rossiter (1995).

O problema de minimização de efluentes aquosos foi formulado por Rossiter (1995), adoptando uma aproximação de programação não linear. Este modelo identifica automaticamente todas as possíveis opções de reutilização e reciclagem para cada corrente de água e pode apresentar da seguinte forma:

$$\min W_1 + W_2 + W_3 + (k1_r + k2_r - 1) \times (X_{1,r} + X_{2,r} + X_{3,r})$$

sujeito a

$$W_1 C_{1,sal} + S_{s,1}(C_{1,sal} - cs_{s,sal}) + X_{2,1}(C_{1,sal} - C_{2,sal}) + X_{3,1}(C_{1,sal} - C_{3,sal}) + X_{r,1}(C_{1,sal} - C_{r,sal}) = \text{pickup}_{1,sal}$$

$$\begin{aligned} S_{s,1}cs_{s,HC} + X_{r,1}C_{r,HC} + X_{2,1}C_{2,HC} + X_{3,1}C_{3,HC} &= (S_{s,1} + W_1 + X_{2,1} + X_{3,1} + X_{r,1})B_{1,HC} \\ S_{s,1}cs_{s,H2S} + X_{r,1}C_{r,H2S} + X_{2,1}C_{2,H2S} + X_{3,1}C_{3,H2S} &= (S_{s,1} + W_1 + X_{2,1} + X_{3,1} + X_{r,1})B_{1,H2S} \\ S_{s,1}cs_{s,sal} + X_{r,1}C_{r,sal} + X_{2,1}C_{2,sal} + X_{3,1}C_{3,sal} &= (S_{s,1} + W_1 + X_{2,1} + X_{3,1} + X_{r,1})B_{1,sal} \\ S_{s,1} + W_1 + X_{2,1} + X_{3,1} + X_{r,1} &\geq X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,r} \end{aligned}$$

$$W_2 C_{2,sal} + S_{s,2}(C_{2,sal} - cs_{s,sal}) + X_{1,2}(C_{2,sal} - C_{1,sal}) + X_{3,2}(C_{2,sal} - C_{3,sal}) + X_{r,2}(C_{2,sal} - C_{r,sal}) = \text{pickup}_{2,sal}$$

$$\begin{aligned} S_{s,2}cs_{s,HC} + X_{r,2}C_{r,HC} + X_{1,2}C_{1,HC} + X_{3,2}C_{3,HC} &= (S_{s,2} + W_2 + X_{1,2} + X_{3,2} + X_{r,2})B_{2,HC} \\ S_{s,2}cs_{s,H2S} + X_{r,2}C_{r,H2S} + X_{1,2}C_{1,H2S} + X_{3,2}C_{3,H2S} &= (S_{s,2} + W_2 + X_{1,2} + X_{3,2} + X_{r,2})B_{2,H2S} \\ S_{s,2}cs_{s,sal} + X_{r,2}C_{r,sal} + X_{1,2}C_{1,sal} + X_{3,2}C_{3,sal} &= (S_{s,2} + W_2 + X_{1,2} + X_{3,2} + X_{r,2})B_{2,sal} \\ S_{s,2} + W_2 + X_{1,2} + X_{3,2} + X_{r,2} &\geq X_{2,1} + X_{2,3} + X_{2,r} \end{aligned}$$

$$W_3 C_{3,sal} + S_{s,3}(C_{3,sal} - cs_{s,sal}) + X_{1,3}(C_{3,sal} - C_{1,sal}) + X_{2,3}(C_{3,sal} - C_{2,sal}) + X_{r,3}(C_{3,sal} - C_{r,sal}) - L_3 C_{3,sal} = \text{pickup}_{3,sal}$$

$$\begin{aligned} S_{s,3}cs_{s,HC} + X_{r,3}C_{r,HC} + X_{1,3}C_{1,HC} + X_{2,3}C_{2,HC} &= (S_{s,3} + W_3 + X_{1,3} + X_{2,3} + X_{r,3})B_{3,HC} \\ S_{s,3}cs_{s,H2S} + X_{r,3}C_{r,H2S} + X_{1,3}C_{1,H2S} + X_{2,3}C_{2,H2S} &= (S_{s,3} + W_3 + X_{1,3} + X_{2,3} + X_{r,3})B_{3,H2S} \\ S_{s,3}cs_{s,sal} + X_{r,3}C_{r,sal} + X_{1,3}C_{1,sal} + X_{2,3}C_{2,sal} &= (S_{s,3} + W_3 + X_{1,3} + X_{2,3} + X_{r,3})B_{3,sal} \\ S_{s,3} + W_3 + X_{1,3} + X_{2,3} + X_{r,3} &\geq X_{3,1} + X_{3,2} + X_{3,r} \end{aligned}$$

$$(1 - \%remoção_{r,HC} / 100) \times (C_{1,HC}X_{1,r} + C_{2,HC}X_{2,r} + C_{3,HC}X_{3,r} + cs_{s,HC}S_{s,r}) = (X_{r,1} + X_{r,2} + X_{r,3})C_{r,HC}$$

$$(1 - \%remoção_{r,H2S} / 100) \times (C_{1,H2S}X_{1,r} + C_{2,H2S}X_{2,r} + C_{3,H2S}X_{3,r} + cs_{s,H2S}S_{s,r}) = (X_{r,1} + X_{r,2} + X_{r,3})C_{r,H2S}$$

$$(1 - \%remoção_{r,sal} / 100) \times (C_{1,sal}X_{1,r} + C_{2,sal}X_{2,r} + C_{3,sal}X_{3,r} + cs_{s,sal}S_{s,r}) = (X_{r,1} + X_{r,2} + X_{r,3})C_{r,sal}$$

$$X_{r,1} + X_{r,2} + X_{r,3} = k1_r(X_{1,r} + X_{2,r} + X_{3,r} + S_{s,r})$$

$$X_{r,T} = k2_r(X_{1,r} + X_{2,r} + X_{3,r} + S_{s,r})$$

$$S_{s,1} + S_{s,2} + S_{s,3} + S_{s,r} \leq \text{smax}_s$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$k = 1, 2, 3$$

$$B_{i,k} \leq \text{bmax}_{i,k}$$

$$B_{i,k} \geq 0.0$$

$$C_{i,sal} \leq \text{cmax}_{i,sal}$$

$$C_{i,k} \geq 0.0$$

$$C_{r,k} \geq 0.0$$

$$S_{s,i}, S_{s,r}, W_i, X_{j,i}, X_{i,r}, X_{r,i}, X_{r,T}, L_i \geq 0.0$$

onde $S_{s,i}$ e $S_{s,r}$ representam os caudais de água secundária para a unidade i e para o regenerador r , respectivamente; W_i é o caudal de água potável para a unidade i ; $X_{i,r}$ e $X_{j,i}$ são os caudais de água da unidade i para o regenerador r e da unidade j para a unidade i , respectivamente; $X_{r,i}$ e $X_{r,T}$ denotam os caudais de água do regenerador r para a unidade i e para o tratamento e L_i são as perdas de água por evaporação pela unidade i . As variáveis $B_{i,k}$ e $C_{i,k}$ são as concentrações do contaminante k à entrada e saída da unidade i , respectivamente. $cs_{s,k}$ e $C_{r,k}$ designam as concentrações do contaminante k na água secundária e na corrente de saída do regenerador r , respectivamente. Os valores limites superiores representam-se por $\text{bmax}_{i,k}$ e $\text{cmax}_{i,k}$ e designam as concentrações máximas de entrada e saída, respectivamente, do contaminante k na unidade i e smax_s a quantidade máxima de água secundária disponível. O $\text{pickup}_{i,k}$ representa a retenção do contaminante k na unidade i . A percentagem de remoção do contaminante k no regenerador r é designada por $\%remoção_{r,k}$. Por fim, $k1_r$ e $k2_r$ são multiplicadores para a água que retorna ao processo e que vai para tratamento, respectivamente, vindo do regenerador r . Na formulação do modelo utilizou-se o termo 'HC' para designar os hidrocarbonetos.

Existem 3 blocos iniciais de 5 restrições cada um, que se referem a balanços mássicos sucessivos, aos contaminantes, para os processos de linha de lavagem (U01), dessalinização (U02) e sistema de arrefecimento (U03), respectivamente. Segue-se outro bloco de 5 restrições referente aos balanços mássicos para o regenerador (coluna de desabsorção). As restantes garantem os limites máximos e a

não negatividade das variáveis.

Neste caso de estudo foram consideradas 2 hipóteses principais: i) a optimização ocorria sem alterações no processo assumindo-se que toda a água secundária entrava directamente na coluna de desabsorção; ii) a optimização ocorria com alterações no processo, recorrendo-se a um procedimento de revisão hierárquica. Nesta segunda hipótese foram ainda contempladas 3 situações: i) a substituição da injeção de vapor na coluna de desabsorção por um reebulidor que permitia reduzir os caudais dos efluentes aquosos do regenerador; ii) a substituição dos ejectores de vapor em vácuo por bombas de vácuo, permitia reduzir a quantidade de água sulfurosa produzida bem como a redução do uso de vapor de água; iii) foi retirada a restrição em como toda a água secundária iria unicamente para a coluna de desabsorção.

Foram implementados os algoritmos de optimização do solver Excel, Lingo 7.0 e a função de optimização 'FMINCON' do Matlab 7.0, obtendo-se como cenário mais provável, o que apresentava um caudal de água regenerada nulo para o sistema de arrefecimento, um caudal mínimo de água de 28,2 t/h e 25 t/h de água regenerada.

3 Conclusões

No exemplo 1, os optimizadores utilizados na obtenção da solução óptima global apresentaram um desempenho muito semelhante por se basearem no método simplex.

No exemplo 2, a revisão hierárquica permitiu limitar o problema, reduzindo o número de cálculos a efectuar. Verificou-se também um aumento do número de iterações efectuadas pelos programas à medida que se introduziu a revisão hierárquica, dado que se procurava a melhor solução possível. Não foi possível garantir a solução óptima global, apenas os mínimos locais. Logo, todas as soluções obtidas pelos optimizadores são possíveis e todos os cenários desenvolvidos passíveis de avaliação. No entanto, ponderou-se para escolha do futuro cenário, um aumento de água para o sistema de arrefecimento com a consequente diminuição do excesso de água regenerada. Uma vez que possibilita a eliminação dos odores (atribuídos ao fenol) junto deste sistema. As diferenças observadas nos resultados dos vários optimizadores interpretam-se por utilizarem métodos e/ou procedimentos de optimização diferentes. Assim, apesar do Lingo 7.0 e Solver Excel utilizarem ambos o gradiente reduzido generalizado, o Lingo 7.0 utiliza-o em conjunto com a programação linear sucessiva. A função 'FMINCON' faz uso do algoritmo de programação quadrática sequencial.

Os problemas de prevenção e controlo da poluição podem ser, de um modo eficaz, avaliados por optimização matemática. A optimização matemática apresenta-se como um método rápido, claro e económico na obtenção da melhor solução de problemas ambientais e encontra-se implementada em inúmeros programas disponíveis no mercado.

Referências

- Castro, P., Matos, H., Fernandes, M., Nunes, C. (1999). Improvements for mass-exchange networks design. *Chem. Eng. Sci.*, 54, 1649-1665.
- El-Halwagi, M.M. (1997). *Pollution prevention through process integration: systematic design tools*, Academic Press, San Diego.
- El-Halwagi, M.M. e Manousiouthakis, V. (1990). Automatic Synthesis of mass exchange networks with single-component targets. *Chem. Eng. Sci.*, 45 (9), 2813-2831.
- Mann, J.G., Liu, Y.A. (1999). *Industrial water reuse and wastewater minimization*, Mc Graw-Hill, New York.
- Rossiter, A.P. (1995). *Waste minimization through process design*, McGraw-Hill, New York.
- Smith, R., Petela, E. (1994). Wastewater minimisation and design of effluent Treatment systems using pinch analysis. *Envir. Protec. Bull.*, 030, 5-10.
- Wang, Y.P., Smith, R. (1994). Wastewater minimisation. *Chem. Eng. Sci.*, 49 (7), 981-1006.