



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ESTUDO DE REDES DE ÁGUA ATRAVÉS DE MODELOS DE UNIDADES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DE VAZÕES VARIÁVEIS

D. C. Faria¹, S. M. A. Guelli U. Souza², A. A. U. Souza³

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário, 476 – CEP: 88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil

Telefone: (0-xx-48)331-9448 – Fax: (0-xx-48)331-9687

dfaria@enq.ufsc.br, selene@enq.ufsc.br, augusto@enq.ufsc.br

Resumo – Atualmente, surgem fortes tendências por metodologias de controle que visam minimizar a produção de resíduos e o uso de recursos naturais em cada etapa dos processos produtivos. O uso destas metodologias para redes de água diminui a quantidade de água utilizada e implica em menores custos de captação e tratamento. Os segmentos mais importantes do setor industrial, como por exemplo os ligados as indústrias de petróleo e gás, estão constantemente preocupado com esta problemática e buscam alternativas para controlá-la. Uma alternativa é o reuso e/ou reciclo de correntes atualmente enviadas para a estação de tratamento de efluentes já existente. Para que estas implementações sejam projetadas de forma a garantir o melhor reaproveitamento e alocação dos recursos e os menores custos, tecnologias de otimização podem ser utilizadas. Desta forma, o presente trabalho apresenta um modelo matemático para minimizar parâmetros importantes na otimização de uma rede de água. O modelo proposto tratou as operações envolvidas como unidades de transferência de massa com vazão variável, dependente das características da rede otimizada. Além disso, discutiu-se a importância de estabelecer objetivos principais sem deixar de levar em consideração objetivos secundários. Para isso, o modelo foi aplicado a um caso clássico da literatura.

Palavras-Chave: Reuso; Redes de água; Otimização

Abstract – Currently, strong tendencies by control methodologies that aim to minimize the waste generation and the natural resources use in each part of the productive processes are appearing. The use of these methodologies or water networks decreases the amount of water used what involve lowers collection and treatment costs. The most important segments of industrial sector, such as the industries relate to petroleum and gas, are constantly worried with this problem and look for alternatives to control it. One alternative is the reuse and/or recycle of wastewater that currently are sent to existent treatment. So that these implementations are projected to guarantee the best use and allocation these resources, besides to generate the lowest costs, optimizations technologies can be used. In this way, this paper presents a mathematical model that minimizes important parameters in a water network optimization. The proposed model broached the involved operations as units of mass transfer with changeable flowrate, depending of the characteristics of optimized network. Besides, the importance in establish main objectives without forget to consider the secondary objectives was discussed. For that, the model was used in a classic case from the literature.

Keywords: Reuse, Water Networks, Optimization

1. Introdução

Segundo Fontana et al. (2002), os processos na indústria química e petroquímica fazem intensivo uso de água. Como resultado, são geradas correntes de efluente líquido contendo poluentes e devido a restrições impostas por legislações ambientais e razões econômicas, existe um grande interesse em reduzir este consumo de água, assegurando que o nível de contaminação do efluente a ser descartado não ultrapasse o determinado pelas legislações vigentes.

Para se obter resultados mais rápidos e precisos, além de ter a opção de analisar um maior número de operações paralelamente, utilizam-se técnicas de otimização, muitas vezes em conjunto com recursos computacionais, com o objetivo de estabelecer as interligações das possíveis rotas e encontrar as melhores condições de reuso, considerando-se os aspectos técnicos e/ou econômicos.

As principais opções para a otimização de sistemas de água são: procedimentos baseados em tecnologia *Pinch*, otimização via programação matemática e conhecimentos de engenharia (Mann, 2003).

De acordo Smith (2000), o uso de otimização via programação matemática, juntamente com pontos de vista conceituais, é uma das grandes tendências no desenvolvimento da tecnologia de integração de processos.

Desta maneira, o objetivo do presente trabalho é apresentar um modelo matemático que trata as operações como unidades de transferência de massa de vazão variável e visa reduzir a captação de água bruta, geração de efluentes e custos envolvidos com as redes de água de uma refinaria de petróleo, através do reuso e/ou reciclo de correntes de efluentes aquosos.

2. Modelo Matemático

O modelo matemático foi desenvolvido usando conceitos de otimização via programação matemática e implementado usando técnicas de programação linear e programação não linear. Visando à otimização do consumo de água, desenvolveu-se um modelo para otimizar o reuso das correntes efluentes das diversas etapas dos processos como afluentes de outro processo na própria planta. O modelo é composto pelos seguintes conjuntos de componentes:

Correntes de reuso (CR's) – correntes aquosas que atualmente são enviadas para um tratamento final. Neste conjunto estão disponíveis dados de vazão descartada e composição do efluente;

Unidades de envio (UE's) – unidades de processo que requerem água. Estão disponíveis a vazão requerida e os critérios de qualidade exigidos para a entrada de água nas unidades;

Fontes de água (AG's) – caracterizadas pela disponibilidade de água e composição;

Regeneradores (RG's) – definidos pelos critérios de entrada (de vazão e composição), e pela eficiência na remoção dos contaminantes;

Correntes regeneradas (CRG's) – definidas pela vazão disponível e composição da corrente regenerada. É sempre correspondente a um regenerador;

Misturadores das unidades (M's) – caracterizados pela vazão e composição combinada que chegam às unidades;

Misturadores dos regeneradores (MR's) – caracterizados pela vazão e composição combinada que chegam aos regeneradores;

Carga mássica (Δm) – define a quantidade de contaminante transferida nas operações (combinação de corrente de reuso e unidade de envio).

Neste trabalho tratou-se as operações como unidades de transferência de massa, sem fixar a vazão requerida pela unidade de envio. Ou seja, a vazão usada na operação pode ser diferente da máxima e irá depender da concentração no misturador da unidade, da carga mássica e da máxima concentração permitida na saída da operação (corrente de reuso).

Restrições:

Limite de água nas correntes de reuso:

$$\sum_{k=1}^n QRD_{i,k} + \sum_{z=1}^r QER_{i,z} \leq PCR_{i,m}^*, \forall i = 1, \dots, n \quad \text{onde } PCR_{i,m}^* = PM_{k,m} \quad \forall i = k \quad (1)$$

Limite de água nas fontes de água

$$\sum_{f=1}^a QAG_{f,k} \leq PAG_{f,m}, \forall f = 1, \dots, a \quad (2)$$

Balanco de água nos misturadores das unidades:

$$\sum_{i=1}^n QRD_{i,k} + \sum_{f=1}^a QAG_{f,k} + \sum_{z=1}^r QSR_{g,k} = PM_{k,m} \quad \forall k = 1, \dots, p \quad (3)$$

Balanco de água nos misturadores dos processos regenerativos:

$$\sum_{g=1}^r QTR_{g,z} + \sum_{i=1}^n QER_{i,z} = PMR_{z,m}, \forall z = 1, \dots, r \quad (4)$$

Correção dos parâmetros das correntes de reuso:

$$PCR_{i,j}^* = \left(\frac{\Delta m_{k,j} \cdot 1000}{PM_{k,m}} \right) + PM_{k,j}, \text{ se } i = k, \forall j = 1, \dots, m-1 \quad (5)$$

Balanço dos contaminantes nos misturadores das unidades:

$$\sum_{i=1}^n (PCR_{i,j}^* \cdot QRD_{i,k}) + \sum_{f=1}^a (PAG_{f,j} \cdot QAG_{f,k}) + \sum_{g=1}^r (PCRG_{g,j} \cdot QSR_{g,k}) = PM_{k,j} \cdot PM_{k,m} \forall k = 1, \dots, p, \forall j = 1, \dots, m-1 \quad (6)$$

Balanço dos contaminantes nos misturadores dos processos regenerativos:

$$\sum_{i=1}^n (PCR_{i,j}^* \cdot QER_{i,z}) + \sum_{g=1}^r (PCRG_{g,j} \cdot QTR_{g,z}) = PMR_{z,j} \cdot PMR_{z,m}, \forall z = 1, \dots, r, \forall j = 1, \dots, m-1 \quad (7)$$

Limite dos contaminantes nas unidades:

$$PM_{k,j} \leq FRU_{k,j}, \forall k = 1..p, \forall j = 1, \dots, m-1 \quad (8)$$

Limite dos processos regenerativos:

$$PMR_{z,j} \leq FRRG_{z,j}, \forall z = 1, \dots, r, \forall j = 1, \dots, m \quad (9)$$

Disponibilidade das correntes regeneradas:

$$\sum_{z=1}^r QTR_{g,z} + \sum_{k=1}^p QSR_{g,k} \leq PCRG_{g,m}, \forall g = 1, \dots, r \quad (10)$$

Parâmetros das correntes regeneradas:

$$PCRG_{g,j} = PMR_{z,j} \cdot (1 - RGL_{z,j}), \forall j = 1, \dots, m, \forall g / g = z \quad (11)$$

Limite das concentrações de saída (parâmetros das correntes):

$$PCR_{i,j}^* \leq PCR_{i,j}, \forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, \dots, m-1 \quad (12)$$

Funções objetivo: foram utilizadas três funções objetivo no modelo proposto.

Minimização do consumo de água

$$\text{Min} \sum_{f=1}^a \sum_{k=1}^p QAG_{f,k} \quad (13)$$

Minimização do custo operacional

$$\text{Min} \left(\sum_{f=1}^a \sum_{k=1}^p (QAG_{f,k} \cdot (CTF + CAG_f)) + \sum_{z=1}^r (PMR_{z,m} \cdot CRG_z) \right) \quad (14)$$

Minimização do custo total

$$\text{Min} \left(\left(\sum_{f=1}^a \sum_{k=1}^p (QAG_{f,k} \cdot (CTF + CAG_f)) + \sum_{z=1}^r (PMR_{z,m} \cdot CRG_z) \right) \cdot HOA + \left(\sum_{z=1}^r (PMR_{z,m}^{0.7} \cdot CIRG_z) \right) \cdot DA \right) \quad (15)$$

3. Resultados

Aplicou-se o modelo proposto à rede de água de uma refinaria de petróleo estudado por Wang e Smith (1994). Esta rede é composta por três operações (1 - Destilação a vapor, 2 - HDS, 3 - Dessalinização) e estão presentes três contaminantes (hidrocarbonetos, H_2S e sais). A Tabela 1 mostra os dados das operações envolvidas nesta rede de água.

Tabela 1. Dados das operações da rede de água.

Operação	Vazão (t/h)	Contaminante	$C_{j, \max, \text{entrada}}$ (ppm)	$C_{j, \max, \text{saída}}$ (ppm)	Δm_j (Kg/h)
1	45	(A) HC	0	15	0,675
		(B) H_2S	0	400	18
		(C) Sais	0	35	1,575
2	34	(A) HC	20	120	3,4
		(B) H_2S	300	12500	414,8
		(C) Sais	45	180	4,59
3	56	(A) HC	120	220	5,6
		(B) H_2S	20	45	1,4
		(C) Sais	200	9500	520,8

Além das operações envolvidas, existe a possibilidade de usar um processo regenerativo (*stripper*) que remove 99,9% de H_2S e não apresenta remoção para os demais contaminantes. Os custos envolvidos com a rede e com o processo regenerativo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados econômicos

Custo do tratamento final da rede	1,0067 f (US\$/h)
Investimento do tratamento final da rede	34200 f ^{0,7} (US\$)
Operação anual da rede	8600 h/ano
Depreciação anual	0,1
Investimento com <i>Stripper</i>	16800 fr ^{0,7} (US\$)
Custo operacional do <i>Stripper</i>	1 fr (US\$/h)
onde f é a vazão do tratamento final e fr é a vazão tratada pelo regenerador, ambas em t/h	

Estudou-se diferentes caso:

CASO 1: Rede sem regenerador e uma fonte de água de isenta de contaminantes. Minimizou-se o consumo de água;

CASO 2: Rede sem regenerador e duas fontes de água conforme proposto por Gomes (2002): uma de concentração nula, custando US\$0,3/t; e outra com concentração de 25ppm para todos os contaminantes, custando US\$0,03/t. Este caso minimizou o custo de água das fontes, já que a minimização do consumo favoreceria a fonte isenta de contaminantes.

CASO 3: Idem ao CASO 2, porém minimizando o custo total;

CASO 4: Rede com regenerador, uma fonte de água isenta de contaminantes e minimizando o consumo de água;

CASO 5: Idem ao CASO 4, porém minimizando o custo operacional;

CASO 6: Idem ao CASO 4, porém minimizando o custo total;

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para cada caso estudo através do modelo apresentado, sendo que os valores em negrito representam o parâmetro que foi minimizado no caso em questão.

Tabela 3. Quadro comparativo das soluções obtidas

Caso	Vazão (t/h)	Custo com água (\$/ano)	Custo operacional (\$/ano)	Investimento (\$/ano)	Custo total (\$/ano)	Média das reduções
Atual	133,000	343.140,00	1.494.603,46	104.887,14	1.599.490,60	-
1	105,662	272.607,96	1.187.389,40	89.283,10	1.276.672,51	19,34%
2	110,076	158.896,01	1.111.892,19	91.877,88	1.203.770,06	26,74%
3	109,001	160.599,32	1.104.288,56	91.248,86	1.195.537,42	27,12%
4	55,470	143.112,60	1.111.417,98	85.253,32	1.196.671,30	37,23%
5	55,470	143.112,60	1.069.174,78	83.510,34	1.152.685,12	38,67%
6	55,470	143.112,60	1.069.174,78	83.510,34	1.152.685,12	38,67%

A escolha da melhor rede depende de diversos fatores que devem ser analisados seguindo critérios pré-definidos para cada problema individualmente (diminuir a captação de água e/ou geração de efluentes, a busca por menores custos operacionais, o mínimo custo total através do equilíbrio entre o custo operacional e o investimento, etc).

A minimização de somente um dos critérios leva a uma solução que pode, ou não, ser extremamente ineficaz em outro critério. Como podem existir diversas configurações (diferentes variáveis da base) para uma mesma solução, pode-se contornar esta situação através de estratégias que levem ao melhor resultado dentro do objetivo principal.

Uma delas é simplesmente resolver o problema minimizando o objetivo principal e, a partir da solução, resolver o problema aplicando os objetivos secundários e impondo uma restrição que fixe a solução obtida pelo objetivo principal.

Como no presente trabalho não se definiu um objetivo específico, optou-se por resolver alguns critérios chave, e analisá-los paralelamente. Uma das estratégias desta opção é estabelecer uma função que considere todos os parâmetros importantes para o problema, podendo ser acrescentados diferentes “pesos” a cada parâmetro. Neste caso, usou-se pesos iguais para todos os parâmetros, através do cálculo da média aritmética das reduções dos parâmetros considerados importantes, conforme apresentado na Tabela 3. Os valores em vermelho mostram o mínimo valor obtido para aquele parâmetro considerando todas os casos estudados.

A Figura 1 apresenta a configuração que representa a melhor solução, segundo os critérios de Média das Reduções apresentados anteriormente.

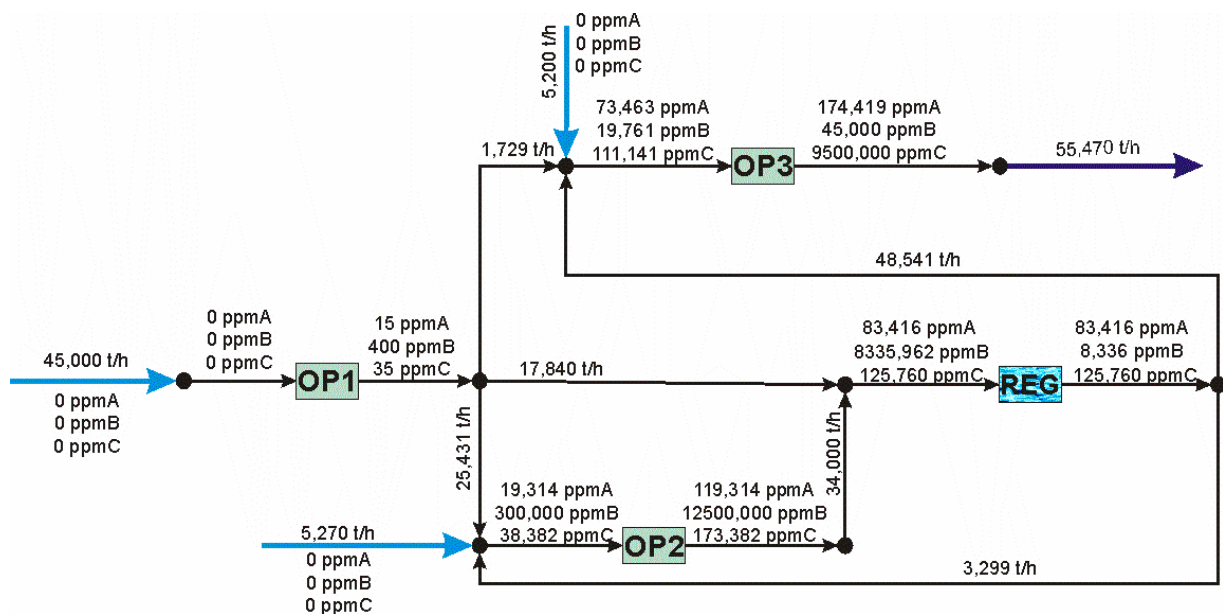


Figura 1. Esquema da solução proposta

Pelos resultados apresentados é possível perceber que, na maioria dos parâmetros, o mínimo encontra-se em um ou mais casos onde ele foi minimizado. No caso do custo com água isto não ocorre pois a redução obtida pelo processo regenerativo supre os gastos com o adicional de água (custo da água e do tratamento final), mesmo que esta seja da fonte 2.

Como já mencionado, os casos objetivando a mínima vazão podem ou não gerar os menores custos. Isto pode ser claramente percebido pelos resultados, pois mesmo apresentando a mesma vazão nos casos 4, 5 e 6, solução obtida minimizando o consumo de água (caso 4) apresentou uma configuração que não favoreceu aos custos mínimos.

4. Conclusões

A otimização de redes de água usando técnicas de otimização via programação matemática mostrou-se eficiente e adequada para obter propostas de reuso.

O modelo proposto gerou boas soluções e evidenciou a necessidade de também otimizar o custo, já que a solução obtida para o mínimo consumo não garante ter atingido o menor custo para a respectiva vazão. Apesar disso, existe uma grande necessidade de formular equações que melhor descrevam os custos envolvidos com as redes de água.

A importância de se definir os reais objetivos da otimização de uma rede pôde ser percebida através da estratégia utilizada para definir a melhor rede, mesmo sendo esta feita de maneira arbitrária, visando melhor exemplificar a proposta do trabalho.

Contudo, cabe ressaltar que, apesar de termos apresentado uma análise inicial de estudos de redes de água, é extremamente necessário conhecer bem todas as necessidades e objetivos do problema, para que então se possa

formular critérios eficientes e realistas. Após isso, para a implementação, deve-se ainda elaborar um projeto detalhado, avaliando custo de implementação das “linhas”, análise de risco, *lay out* e operabilidade da rede. Estas avaliações também podem continuar sendo realizadas em conjunto com otimização via programação matemática através de adequações do modelo proposto e/ou elaboração de modelos específicos.

5. Nomenclatura

PCR – Parâmetros das correntes de reuso
 PCR* – Parâmetros corrigidos das correntes de reuso
 FRU – Fatores restritivos das unidades
 PAG – Parâmetros das fontes de água
 QRD – Vazões das correntes de reuso direto
 QAG – Vazões das fontes de água para as unidades
 CAG – Custo das fontes de água
 CTF – Custo de tratamento do efluente final
 Δm - Cargas mássicas dos contaminantes nas unidades
 PM – Parâmetros das correntes que saem dos misturadores das unidades
 FRRG – Fatores restritivos dos processos regenerativos
 RG – Parâmetros relativos aos processos regenerativos
 QER – Vazões das correntes de reuso que vão para os processos regenerativos
 QSR – Vazões das correntes regeneradas que vão para as unidades
 QTR – Vazões de transferência entre os processos regenerativos
 PMR – Parâmetros das correntes que saem dos misturadores dos processos regenerativos
 PCRG - Parâmetros das correntes regeneradas
 CRG – Custos das regenerações
 CIRG – Custos de investimento dos processos regenerativos
 HOA – Horas de operação anual
 DA – Depreciação anual do custo de capital

Sub-índices

i – Contador das correntes de reuso
 n – Quantidade de correntes de reuso
 k – Contador das unidades de envio
 p – Quantidade de unidades de envio
 f – Contador das fontes de água
 a – Quantidade de fontes de água
 z – Contador dos processos regenerativos referente à entrada dos regeneradores
 g – Contador dos processos regenerativos referente à saída dos regeneradores
 r – Quantidade de processos regenerativos
 j – Referência dos parâmetros das correntes
 m – Quantidade de parâmetros analisados, sendo $j=m$ o parâmetro referente a vazão

6. Agradecimento

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural – PRH09-ANP/MME/MCT.

(1)

7. Referências

- FONTANA, D., SECCHI, A. R., TRIERWEILER, J. O., THÖMING, J., Recuperação de água de processos: formulação de um problema padrão. *XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2002.
- GOMES, J. F. Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos. Rio de Janeiro, 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MANN, J. G. Cultural changes and water-asset realignment to support water-reuse projects. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 37, p. 175 -180, 2003.
- SMITH, R. State of the art in process integration. *Ap. Ther. Eng.*, v. 20, p.1337-1345, 2000.
- WANG, Y. P, SMITH, R. Wastewater Minimization, *Chem. Eng. Sci.*, v. 49, p. 981-1006, 1994.