



OTIMIZAÇÃO PARA A MINIMIZAÇÃO SIMULTÂNEA DA GERAÇÃO DE EFLUENTES E DA CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM INDÚSTRIAS MANUFATUREIRAS

SOUZA, Daniel Maia de; RIZZO, Haroldo dos Santos; TÔRRES, Elaine Ferreira;
TÔRRES, Alexandre Rodrigues

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Química e Ambiental,
Rodovia Presidente Dutra, km 298, Distrito Industrial, Resende, Rio de Janeiro, Brasil, CEP 27500-000,

e-mail: artorres@fat.uerj.br

Received 13 August 2007; received in revised form 12 November 2007; accepted 23 November 2007.

RESUMO

O presente trabalho está inserido num tema que vem se desenvolvendo muito nos últimos anos, sendo foco de vários estudos ao redor do mundo. Trata-se do reuso de água, que visa a diminuir a quantidade de água captada, bem como reduzir os efluentes descartados, contribuindo, dessa forma, para um desenvolvimento sustentável através do equilíbrio hídrico, garantindo a preservação desse recurso natural para as futuras gerações. Para tal, apresentam-se ferramentas matemáticas desenvolvidas pelos autores através do software MathCad[®] e do suplemento Solver do Excel da Microsoft[®]. Essas ferramentas objetivam o cálculo da quantidade mínima de água limpa necessária para um processo qualquer, bem como o cálculo das correntes que serão reutilizadas para cada uma das operações constituintes desse processo. Para exemplificar, são feitos três estudos de caso, dois baseados na literatura e um proposto pelos autores, a fim de analisar a eficiência dos modelos matemáticos desenvolvidos. A abordagem utilizada obteve sucesso em todos os casos estudados.

Palavras-chave: *reuso de água, minimização de efluentes, captação de água, programação linear*

ABSTRACT

The main issue of this work is water reuse. The methodology was tested with the aim of reduce simultaneously the water demand and the generated effluent. This work intends supply a tool to the sustainable development related to the water use management. MathCAD[®] and EXCEL[®] were used like computational resource to necessary mathematical calculations. The supplement SOLVER[®] of the EXCEL[®] was able to find the optimal configuration to the tested system and scenario, such as a linear programming problem. A simple algorithm used to find the pinch point of the system was programmed in MathCAD[®]. Moreover, the worksheet supplies the distribution of reused water along the system, too. The results of three cases were showed: two based on cited articles and one proposed by the authors. The used approach was successful in all studied cases.

Keywords: *water reuse, effluent minimization, water demand, linear programming*

1. Introdução

Até a alguns anos, o reuso era considerado como opção exótica, mas com o tempo passou a ser alternativa que não pode ser descartada, mostrando-se cada vez mais uma distinção com relação às técnicas de tratamento de águas e tratamento de esgotos.

A reutilização, reuso de água, ou ainda, em outra forma de expressão, o uso de água residuárias, consiste, basicamente em aproveitar parte da água previamente utilizada, uma ou mais vezes, em atividades humanas, atendendo outras necessidades ou até mesmo a original, podendo ser realizada com ou sem tratamento prévio. Já o reciclo é um caso particular, no qual parte da corrente de água é aproveitada para a mesma operação em que foi anteriormente utilizada.

No caso de reutilização das águas residuais, dependendo do nível de poluição presente nessa e da exigência feita para a sua futura aplicação, a falta de critérios nestas decisões pode trazer diversos impactos negativos à saúde humana. Dessa forma, de uma maneira geral, é recomendado recolher todas as águas residuais produzidas e transportá-las até a Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Depois de recolhidas nos coletores, a partir dos diversos processos, as águas residuais são conduzidas até esta estação, onde se processa o seu tratamento físico e biológico. O tratamento deverá atender à legislação [**Resolução do CONAMA nº 357/2005**] que define a qualidade de águas em função do uso que está sujeita, designadamente: Classe Especial; Classe I; Classe II; Classe III. Esta última norma não faz menção ao reuso ou a reciclagem de águas industriais.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) classifica três tipos de reuso [**UNIAGUA, 2005**]. O *reuso indireto*, quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente de forma diluída, o que pode ser intencional quando decorrente de descargas planejadas a montante de um rio ou com recargas planejadas em aquíferos subterrâneos. O *reuso direto*, é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos, obtenção de água potável. A *reciclagem interna* é o reuso de água no interior das instalações industriais, para economizar água e controlar a

poluição.

No conceito de **Lavrador Filho (1987)**, reuso planejado é o resultado de uma ação consciente do homem, ante a descarga de efluentes, que atende aos padrões de qualidade para um novo conceito de utilização da água. Pode ser definido também como “Reuso Intencional da Água”. Segundo definição de **Bem Filho (2004) apud IETEC (2005)** o reuso da água é classificado em dois grandes grupos simplificados, o potável e o não-potável. O reuso potável é utilizado para sistema de água potável e o reuso não potável para fins industriais, agrícolas, domésticos, recreacionais, entre outros. No setor industrial, o reuso pode ser visualizado de diversas maneiras, conforme as possibilidades existentes no contexto interno ou externo às indústrias. Segundo **Leite (2003)** pode ser adotada a seguinte classificação: *reuso macroexterno*, *reuso macrointerno* e *reuso interno específico*. Neste trabalho será utilizado o conceito de reuso interno específico que consiste na reciclagem de efluentes de determinado processo industrial em outro que se desenvolve em seqüência ou em paralelo e que suporta qualidade compatível com o efluente em questão.

O termo *Tecnologia de Pinch* foi introduzido por **Linnhoff & Hindmarsh (1983)** representando um novo ponto baseado nos métodos termodinâmicos, com a finalidade de garantir níveis mínimos de energia em sistemas de rede de troca de calor. A tecnologia de *Pinch* foi aplicada extensivamente analisando os projetos e instalações existentes, identificando oportunidades de economia de energia dentro de sistemas de redes de trocadores. Muitas pesquisas foram feitas utilizando modelos matemáticos e métodos de otimização. **Alva-Argáez et al. (1999)** utilizou uma formulação baseada em Programação Linear (PL), **Wang & Smith (1994)** e depois **Kuo & Smith (1997)** e **Kuo & Smith (1998)** introduziram métodos baseados na técnica de *Pinch* para soluções dentro de sistemas de rede. Neste contexto, **Tan & Cruz (2004)** introduziram um modelo matemático para minimização da utilização da água.

Durante as últimas duas décadas foram grandes os desenvolvimentos para conservação de energia desde as etapas iniciais do projeto de processos. Dentre estes estudos [**Ulmer et al., 2005**], muitos foram os casos nos quais a técnica de *Pinch* foi aplicada, principalmente em processos industriais. Com isso, foi possível o

desenvolvimento de ferramentas poderosas como *Pinch Express*TM, *SuperTarger*TM, *Aspen Pinch*TM. Programas que têm se mostrado rápidos e eficientes para análise de processos industriais complexos.

O modelo, para ser resolvido como um problema de PL, desenvolvido por **Tan & Cruz (2004)**, tem como objetivo desenvolver técnicas para minimização do consumo de água e geração de efluentes em plantas de processos através da implementação do conceito reuso e reciclo. Nesse artigo os autores descrevem um procedimento para síntese de redes com reuso de água, utilizando um método de programação linear simétrica “desfocada” (*Symmetric Fuzzy Linear Programming*). Primeiramente, **Yang et al. (2000)** descreveu um modelo não-linear baseado em um sistema de unidade de transferência de massa de múltiplos contaminantes. A partir disso, **Tan & Cruz (2004)** introduziram um conceito mais simples, reduzindo esse modelo para um problema com apenas um contaminante.

A formulação desse modelo se baseia em torno do conjunto de equações a seguir, descrito na forma tradicional de um problema de otimização, a partir da função objetivo descrita na Equação 1.

$$\text{FunObj} = \max \{ \alpha \} \quad (1)$$

$$\sum_i f_i \leq F_{\max} - \alpha (F_{\max} - F_{\text{target}}) \quad (2)$$

$$w_i (C_{\text{out},i} - C_{\text{in},i}) \geq M_i + \alpha (\Delta M_i), \quad \forall i \quad (3)$$

$$w_i = f_i + \sum_j r_{ij} \quad i \neq j, \forall i \quad (4)$$

$$C_{\text{in}} \cdot w_i = \sum_j r_{ij} \cdot C_{\text{out},j} \quad i \neq j, \forall i \quad (5)$$

$$w_i = e_i + \sum_j r_{ij} \quad i \neq j, \forall i \quad (6)$$

$$\alpha \leq 1 \quad (7)$$

$$\alpha, f_i, w_i, r_{ij}, e_i \geq 0 \quad (8)$$

Parâmetros:

F_{\max} = demanda total de água limpa em m³/h para o sistema, assumindo-o sem reuso;

F_{target} = demanda mínima de água limpa em m³/h para o sistema;

$C_{\text{out},i}$ = concentração limite de saída do processo i em kg/m³;

$C_{\text{in},i}$ = concentração limite de entrada do processo i em kg/m³;

M_i = carga de massa transferida no processo i em kg/h;

ΔM_i = margem de tolerância da carga de massa transferida no processo i em kg/h;

Variáveis de Decisão:

f_i = demanda de água limpa para o processo i em m³/h;

w_i = vazão de água através do processo i em m³/h;

r_{ij} = corrente reciclada do processo j para processo i em m³/h;

e_i = efluente rejeitado do sistema pelo processo i em m³/h;

α = grau de satisfação global.

A função objetivo (Equação 1) é usada para encontrar uma relação entre a necessidade de minimizar a demanda de água limpa (Equação 2) e de atender a necessidade de água disponível para absorver a carga de massa de poluente em cada processo (Equação 3). Outras restrições descrevem a mistura de correntes que entram em cada uma das unidades de transferência de massa (Equações 4 e 5) e a decomposição de cada uma das correntes que saem de cada processo (Equação 6). Assume-se que a água que deixa um determinado processo não pode ser reusada nesse mesmo processo.

2. Metodologia

O problema de minimização da quantidade de água utilizada e da minimização dos efluentes gerados foi abordado de forma simultânea. O problema foi escrito na forma de um problema de PL. O limite inferior da quantidade de água limpa necessária ao conjunto de operações industriais do processo estudado, demanda mínima F_{target} , será estabelecido pelo método de estrangulamento (*Pinch*), adaptado dos procedimentos de minimização da utilização de recursos energéticos [**Mann & Liu, 1999**], desenvolvendo para esta etapa um algoritmo no MathCad[®]. A solução do problema de PL será obtida com a utilização de um algoritmo tipo *gradiente reduzido generalizado* (GRG), disponível no suplemento SOLVER do EXCEL[®] da Microsoft[®]. As soluções obtidas serão avaliadas segundo duas ópticas: o atendimento às restrições

operacionais e a robustez das ferramentas utilizadas.

O problema estudado tem variáveis reais e não linearidades nas inequações de restrição, fato que dificulta muito a sua solução se a ferramenta adequada não for utilizada. O estudo ora realizado limitou-se apenas a um fator de qualidade para a água ($C_{in,i}$) e para os efluentes ($C_{out,i}$) com seus limites sendo considerados de forma absoluta (não relacionados aos demais parâmetros). A formulação do problema foi incrementada a partir de outras apresentadas na literatura [Tan & Cruz, 2004] presumindo a possibilidade de futuras implementações onde mais de um fator de qualidade poderá ser utilizado como restrição do problema. Neste trabalho foram analisados dois problemas teste constantes da literatura, além de um novo proposto por estes autores.

3. Desenvolvimento

Representação do Processo Industrial

Os processos industriais a serem estudados serão representados por uma estrutura de módulos e correntes (fluxos de água de um processo para outro) de forma que estes correspondam à formulação matemática adotada. Esta estrutura está representada na Figura 1 para um processo com n operações.

Implementação do algoritmo de Ponto de Pinch

Para que o cálculo do ponto de *Pinch* fosse possível, as informações de todas as correntes, incluindo vazões e cargas (concentração de poluentes) foram introduzidas na forma de matrizes. Os cálculos, realizados segundo fluxograma da Figura 2, forneciam o valor da vazão mínima de água limpa que corresponde ao ponto de *Pinch*.

Solução do Problema de PL no Excel

O suplemento Solver do Excel utiliza os dados inseridos em uma planilha ativa de forma que algumas células são designadas como variáveis independentes e outras associadas como restrições. A função objetivo é introduzida na planilha de forma a ser dependente das variáveis e seu resultado está também representado em uma célula. As equações foram introduzidas na planilha também em função das variáveis do problema. Uma tela da planilha pode ser visualizada na Figura 3. As restrições do problema estão na tela da Figura

4, correspondendo às Equações de 2 até 7. A Equação 8 corresponde às restrições de domínio para as variáveis do problema que estão com fundo amarelo na Figura 3.

Problemas Resolvidos

O primeiro exemplo, Problema 1, é baseado no exercício 2.1 do livro de Mann & Liu (1999). Nele, um sistema industrial é composto por três operações, nos quais se utiliza água para retirar matéria orgânica da matéria prima a fim de produzir um produto semi-acabado. A água utilizada nos processos é captada de um rio, e a descarga dos efluentes é feita em outro ponto do rio, abaixo do ponto de captação. As concentrações limites de matéria orgânica na água e a transferência de massa realizada nas operações são apresentadas na Tabela 1. Utilizando a Equação 9 pode-se determinar a demanda total de água limpa, F_{max} , que para este problema corresponde à $68 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

$$\sum f_i = \sum_i \frac{M_i}{C_{out,i}} \quad (9)$$

O segundo exemplo de processo, Problema 2, foi proposto por Tan & Cruz (2004), composto de quatro operações cujos parâmetros estão na Tabela 2. Para este Problema 2 a demanda de água limpa, sem reuso, foi de $186 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

O terceiro exemplo, Problema 3, foi criado na tentativa de verificar o desempenho das ferramentas quanto ao número de operações, aumentando para 7 e depois 8 o número delas. Este problema foi utilizado em duas variações: uma com 7 operações e depois outra, acrescentado a oitava operação que corresponde a um processo de eliminação do poluente em questão. A adição desta operação, de purificação da água, foi feita admitindo uma carga negativa de poluente naquela operação. Neste caso a demanda de água limpa sem reuso e sem purificador foi de $38,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

4. Resultados e Discussões

Para o Problema 1 exemplifica-se o gráfico, mostrado na Figura 5, onde se visualiza o conceito de ponto de estrangulamento – *pinch* – da reta tangente no ponto mínimo da curva de carga acumulada. O valor encontrado para o ponto de *pinch* para o processo do Problema 1 corresponde a uma vazão de $56,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Este valor foi então alimentado como valor de

demanda mínima, $F_{t\ arg et}$, na planilha do Excel e, a partir desta informação, foi resolvido o problema de PL. Os resultados para o Problema 1 foram um $\alpha = 0,99$ indicando uma vazão de captação de $56,6\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, ou seja, é possível operar praticamente no ponto de *pinch*. A matriz r , de água reusada, corresponde a um retorno de $13,33\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ do efluente da operação 1 para ser misturado a água limpa e alimentar a operação 2; para alimentar a operação 3 seriam utilizados $36,67\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ do efluente da operação 1 misturado nas mesmas condições. A economia de água para a condição operacional sem reciclo é de 16,7 %.

Seguiu-se a mesma seqüência para todos os problemas estudados. Um resumo de todos os resultados pode ser observado na Tabela 4. Cabe ressaltar que para o problema 3 com o purificador não foi definido um novo valor do ponto de *pinch*. O tamanho do problema não afetou sensivelmente o desempenho computacional, em termos de tempo. As ferramentas foram robustas e sempre apresentaram resultados sem atribuições perceptíveis causadas pelo valor de aproximação inicial. A qualidade do resultado piorou em relação ao parâmetro \square com o aumento do tamanho do problema, entretanto foi possível encontrar uma solução melhor que a inicial, permitindo assim a economia de água.

5. Conclusão

As ferramentas matemáticas desenvolvidas neste trabalho, para o cálculo da quantidade de água limpa necessária, em sistemas onde ocorre o reuso de água, foram aplicadas com êxito em diferentes exemplos da literatura, assim como no estudo de caso desenvolvido com este propósito, apresentando-se rápidas, robustas e fáceis de serem operacionalizadas.

Vale ressaltar que o trabalho foi desenvolvido considerando apenas um parâmetro de qualidade. Entretanto, novas ferramentas podem ser desenvolvidas, de forma análoga à proposta pelos autores, acrescentando parâmetros múltiplos de qualidade. No entanto, esse trabalho de forma alguma encerra o assunto em questão, que possui um campo de estudo muito amplo, e poderá ser aprofundado posteriormente em estudos sobre o tema.

6. Referências

1. Alva-Argaez, A., Vallianatos, A., Kokossis, A., **A multicontaminant transshipment model for mass exchange networks and wastewater minimisation problems**, Computers and Chemical Engineering 23 (1999)1439–1453;
2. CONAMA; BRASIL. *Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA*. Resolução n o 357, de 17/03/2005. Disponível em:<www.crq4.org.br/downloads/resolucao357.pdf> Acessado em 30 de maio de 2006;
3. IETEC; Disponível em: http://www.ietec.com.br/ietec/techoje/techoje/meioambiente/2005/12/05/2005_12_05_0001.2xt/-template_interna> Acessado em 30 de maio de 2006;
4. Kuo,W.C., Smith,R., **Effluent Treatment System Design**, Chem. Eng. Sci. 52 (1997) 4273-4290;
5. Kuo,W.C., Smith,R, **Designing for the interactions between water-use and effluent treatment**, Trans. Inst. Chem. Eng. A, 76 (1998) 287-301;
6. Lavrador Filho, J.. **Contribuição para o entendimento do reuso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil**. 1987. 198p. (Mestrado) - ESCOLA POLITECNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo;
7. Leite, A. M. F., **Reuso de Água na Gestão Integrada de Recursos Hídricos** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, (2003);
8. Linnhoff, B., Hindmarsh, E., **The Pinch Design Method For Heat-Exchanger Networks**, Chemical Engineering Science 38: 5 (1983), 745-763;
9. Mann, J., LIU, A.Y., **Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization**, McGraw Hill, New York, (1999);
10. Tan, R. R. & Cruz, D. E.; **Synthesis of robust water networks for single-component retro problems using symmetric fuzzy linear programming**. Computer & Chemical Engineering, 28:12 (2004), 2547-2551;
11. Ullmer, C., Kunde,N., Lassahn,A., Gruhn,G.; Schulz,K., **WADOtm: water design optimization – methodology and software for the synthesis of process water systems**. Journal of Cleaner Production, 13:5, (2005) 485-494;
12. UNIAGUA (2005); Disponível em: <www.uniagua.org.br/website/default.asp?tp=3&pag=reuso.htm> Acessado em 30 de maio

de 2006;

13. Wang, Y. P., Smith, R., **Wastewater Minimization**, Chem. Eng. Sci. 49 (1994) 981 ;

14. Yang, Y. H., Lou, H. H., Huang, Y. L., **Synthesis of an optimal wastewater reuse network**, Waste Management 20 (2000) 311–319.

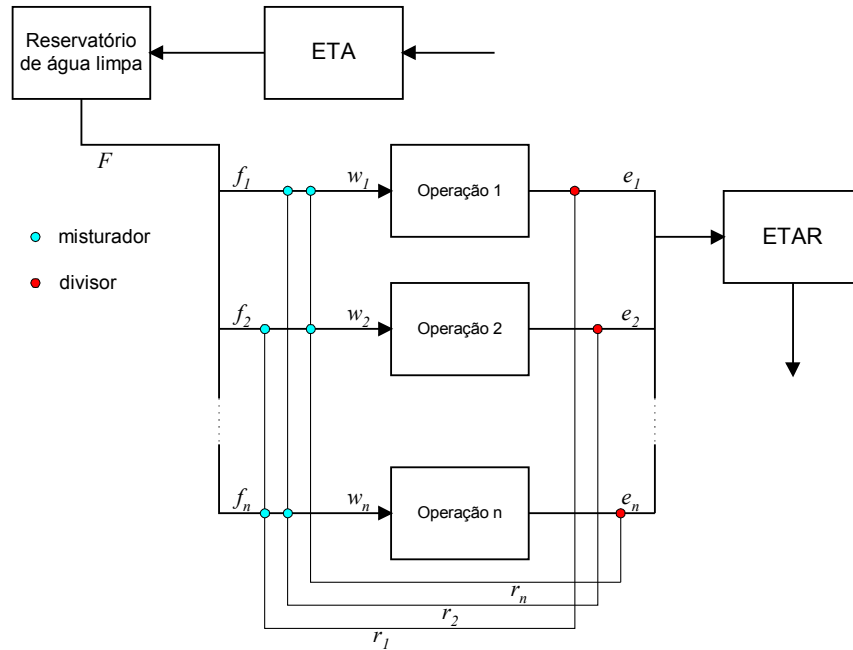


Figura 1 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do ponto de *Pinch*.

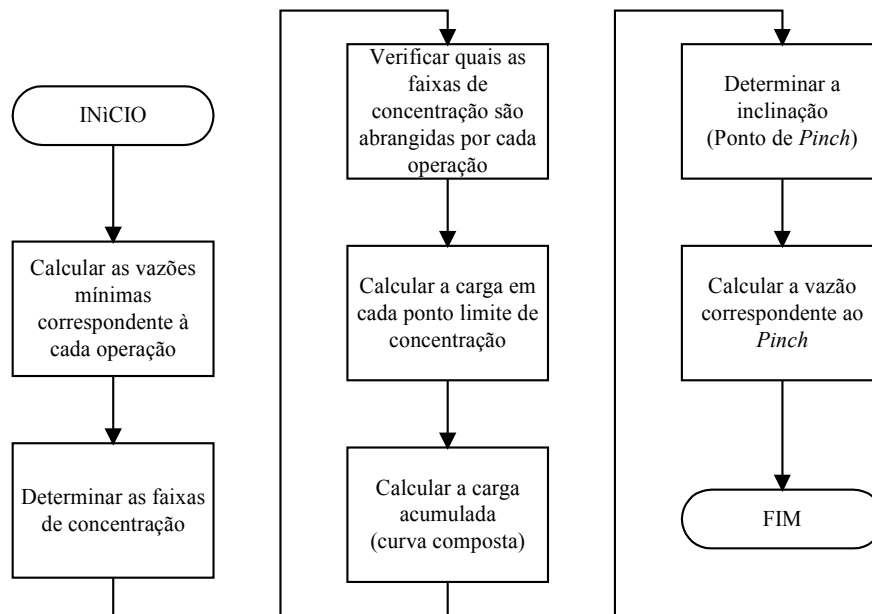


Figura 2 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do ponto de *Pinch*.

fi	wi	r	1	2	3	Cin	Cout	M	Delta_M	ei
50	50	1	0	0	0	0	75	3750	0	6.67E-07
6.67	20	2	13.33	0	0	50	100	1000	0	20
0.0E+00	36.67	3	36.67	0.0E+00	0	75	125	1000	0	36.67

$\sum_i f_i$ 56.7
Fmax 68.0
Fmin 56.6
alpha 0.99 FunObj

Figura 3 – Tela do Excel para resolução dos problemas de PL com o Solver – Problema 1.

	T. Esq.		T. Dir.	
Equações	2	56.66667	<=	56.66667
	3	3750	>=	3750
		1000	>=	1000
		1833.333	>=	1000
	4	50	=	50
		20	=	20
		36.66667	=	36.66667
	5	0	=	0
		1000	=	1000
		2750	=	2750
	6	50	=	50
		20	=	20
		36.66667	=	36.66667
	7	0.994152	<=	1

Figura 4 – Tela do Excel para as restrições dos problemas de PL – Problema 1

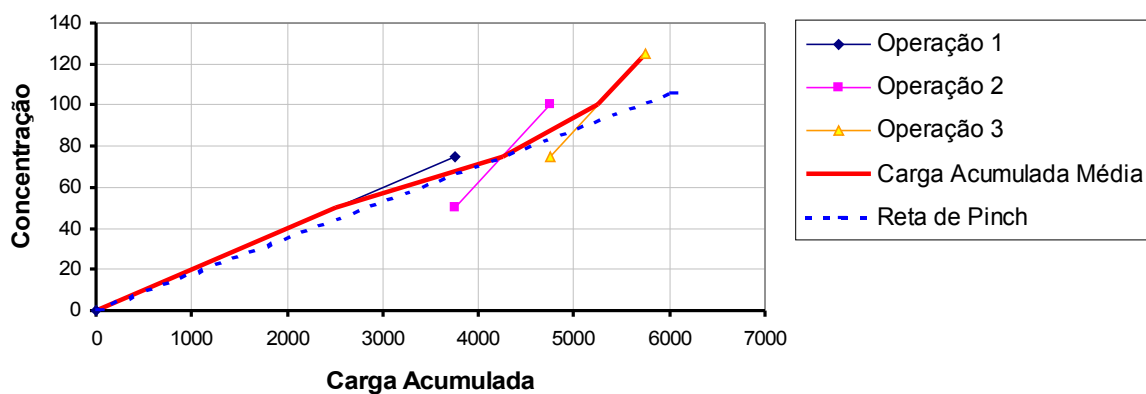


Figura 5 – Gráfico de Carga Acumulada para visualização do Ponto de Pinch – Problema 1.

Tabela 1 – Dados do Problema 1.

Operação i	M _i (kg/h)	C _{in,i} (g/m ³)	C _{out,i} (g/m ³)
1	3,75	0	75
2	1,00	50	100
3	1,00	75	125

Tabela 2 – Dados do Problema 2

Operação i	M _i (kg/h)	C _{in,i} (g/m ³)	C _{out,i} (g/m ³)
1	7,00	0	200
2	22,40	100	500
3	62,55	200	650
4	2,00	0	200

Tabela 3 – Dados do Problema 3.

Operação i	M _i (kg/h)	C _{in,i} (g/m ³)	C _{out,i} (g/m ³)
1	4,0	0	500
2	0,5	200	700
3	0,2	100	110
4	1,0	50	350
5	1,4	0	150
6	4,3	400	520
7	1,5	100	200
8	-1,2	500	50

Tabela 4 – Resumo dos resultados do trabalho.

Problema	Purificador	Número	Número	Número	Demanda sem reuso	Vazão no Ponto de Pinch	Demanda com reuso	Economia %	α
		de Operações	de Equações	de Variáveis					
1	não	3	31	16	68	56.6	56.7	16.6	0.998
2	não	4	44	25	186	146.2	146.2	21.4	1.000
3	não	7	95	64	38.5	26	32.1	16.6	0.508
3	sim	8	116	81	38.5	-	26	32.5	1.000

m³·h⁻¹