

A teoria do quase-ótimo aplicada ao controle da poluição industrial(*)

Luis C. Porto Miglino (1)
Joseph J. Harrington (2)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é discutir a aplicação da teoria do quase-ótimo (near-optimal analysis) ao problema do controle da poluição industrial. Após uma breve exposição da teoria é feita uma aplicação prática do conceito através de um exemplo semi-hipotético.

No exemplo citado são discutidas as opções de uma indústria no que diz respeito à redução de sua carga poluidora, tendo em vista os custos decorrentes do pagamento de tarifas e os de medidas internas de controle. De acordo com o exposto, é evidente que a idéia de que existe sempre uma solução de mínimo custo claramente superior às demais, é por demais otimista. Com efeito, na maioria dos casos, a forma da curva de custos totais nas imediações do ponto ótimo é achatada, o que implica a existência de várias soluções quase-ótimas que se por um lado apresentam custos totais praticamente idênticos ao da solução ótima, por outro lado podem apresentar implicações de natureza técnica e econômica completamente diferentes para as diversas partes envolvidas no problema. Isto sugere que na análise da viabilidade técnico-econômica de projetos de controle da poluição industrial, menos ênfase deve ser dada à procura exaustiva de uma solução de mínimo custo (ótima) e mais a negociação entre as partes envolvidas visando encontrar uma solução que embora seja levemente mais onerosa, seja a mais aceitável às partes envolvidas.

INTRODUÇÃO

De acordo com Harrington (1) a análise de sistemas desde a sua concepção tem sido geralmente aplicada com o único objetivo de encontrar uma solução ótima para um determinado problema. Dado que é extremamente difícil, se especificar uma função-objetivo que englobe todos os aspectos rele-

vantes do problema, a chamada "solução ótima" deve, portanto, ser vista somente como uma aproximação imperfeita da solução ótima real. De fato, os objetivos ou indicadores de mérito convencionais são deficientes no papel de substitutos para as verdadeiras metas das partes interessadas e não devem ser considerados como verdades inquestionáveis. Ademais, deve ser entendido que modelos matemáticos são tão-somente indicadores para o desenvolvimento de planos de ação; eles não podem e não devem ser usados para eliminar a apreciação crítica de profissionais qualificados. Isto pode parecer óbvio, mas, com a disponibilidade crescente de computadores eletrônicos de grande capacidade, tem havido uma tendência no sentido de se acreditar que com a solução de sistemas de equações com um enorme número de variáveis, a solução do problema dispensaria o uso de critérios subjetivos. Com efeito, há inúmeras outras considerações além das tradicionais, ou seja, maximizar benefícios ou minimizar custos, que devem ser levadas em conta. Dentre outras, podemos mencionar as seguintes: restrições de fluxo de caixa, efeitos de subsídios, implicações no balanço de pagamentos, efeitos no nível de emprego, proteção às firmas locais contra a competição estrangeira, equidade etc... Ademais, tem sido notado que a função objetivo, em projetos de uma certa magnitude, nas vizinhanças da solução ótima é bastante achatada ao invés de pontiaguda como em geral se imagina. Kühner e Harrington (2, 3) Muhich (4), Ortolano (5), Gupta e Rosenhead (6), dentre outros discutiram o fato e suas implicações.

Considerando-se que a função-objetivo é em geral uma representação incompleta das verdadeiras metas, é possível que soluções quase-ótimas possam ser consideradas por algumas das partes interessadas como mais desejáveis que a solução ótima teórica.

Na referência (7) é proposta a seguinte metodologia para a busca de soluções quase-ótimas. Num primeiro passo, a função-objetivo seria a minimização dos custos totais, sujeita a

um conjunto de restrições. A segunda etapa seria a exploração da região factível nas proximidades da solução ótima, (por exemplo, dentro do limite de 5%) usando para isto a função-objetivo inicial como uma restrição. Então, seriam usadas várias funções-objetivo aleatórias (no caso de programação linear, hiperplanos aleatórios), para explorar a "nova" região factível, na qual cada ponto é quase-ótimo com relação à função-objetivo original. Para se explorar esta região de soluções quase-ótimas, vários destes hiperplanos seriam então sucessivamente maximizados e minimizados. Deste modo, seriam geradas soluções alternativas que podem ser bem diferentes em termos das variáveis decisórias. Um terceiro passo seria a avaliação dos efeitos que são somente parcialmente, se é que o são, incorporados ao modelo matemático: restrições de fluxo de caixa, impacto no balanço de pagamentos etc... Na última etapa, as partes interessadas conhecendo todas as implicações das diferentes alternativas, escolheriam de comum acordo uma solução que talvez fosse preferível à considerada ótima.

Aplicação da Teoria a um caso Semi-Hipotético

Uma vez feita esta breve exposição da teoria, vamos nos servir de um exemplo para ilustrar a aplicabilidade dos conceitos discutidos. Deve ser notado, que em benefício da clareza, reduzimos a complexidade do tratamento matemático ao mínimo indispensável. O exemplo em questão refere-se a uma indústria de produtos alimentícios existente na Região Metropolitana de São Paulo, para a qual foi possível a obtenção de diversos dados relativos aos custos de redução da poluição hídrica gerada. Tendo em vista o fato de que nem todos os dados essenciais puderam ser obtidos da indústria foi necessária a utilização de dados hipotéticos, fruto de experiência adquirida durante as visitas a várias indústrias durante a preparação do trabalho mencionado na referência (7). Nas páginas seguintes, são detalhadas as principais premissas

(*) Trabalho a ser apresentado no 13.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental — Maceió — 18 a 23 de agosto de 1985

(1) Ph.D. em Engenharia, Sabesp-Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - São Paulo - SP.

(2) Professor titular, Escola de Saúde Pública da Universidade de Harvard, Cambridge, Massachusetts — EUA.

sas assumidas no desenvolvimento deste trabalho.

Imaginemos que em uma cidade de médio porte exista uma fábrica de alimentos que produza uma gama variada de produtos alimentares. Atualmente, a firma descarrega seus efluentes sem qualquer tipo de tratamento num córrego nas proximidades. Imaginemos também que a cidade disponha de um sistema de coleta e tratamento de esgotos com capacidade suficiente para receber os efluentes da indústria citada. Finalmente, vamos assumir que o sistema de coleta e tratamento foi adequadamente dimensionado e que a entidade municipal cobra das indústrias uma tarifa de esgotos baseada unicamente no volume de efluentes efetivamente descarregados na rede. Esta tarifa, além de cobrir os custos decorrentes dos serviços prestados, cobre também os custos decorrentes do subsídio aos consumidores de baixa renda da localidade.

É assumido que antes da firma ser forçada a se ligar à rede pública de esgotos (e a pagar as tarifas correspondentes) a vazão de efluentes brutos seja igual a 272 l/s.

É assumido também, que a indústria esteja trabalhando com um nível de produção constante o qual não será afetado pelos custos decorrentes do controle da poluição. Considera-se também que devido a uma lei estadual, a descarga de efluentes, mesmo tratados, no córrego vizinho seja impossível. Assim, podemos reduzir as opções disponíveis ao gerenciamento da firma às duas a seguir expostas. A primeira, seria a descarga de todo o efluente na rede coletora e o pagamento das tarifas correspondentes; a segunda, a de se adotar mudanças no processo produtivo de forma a reduzir a geração de efluentes e a descarga da parte remanescente na rede coletora. Uma outra opção seria a eliminação total dos efluentes da indústria através de mudanças de processo (descarga zero). Conforme veremos adiante esta opção não é economicamente viável.

Para tomar a decisão correta sobre qual combinação de mudanças de processo produtivo e pagamento de tarifas que resultará na solução de custo mínimo para a empresa, o gerente determinou a seus subordinados que elaborassem um gráfico mostrando os custos totais (valores presentes) de cada alternativa de controle da poluição.

Para se calcular os custos decorrentes do pagamento de tarifas foi usado o valor da tarifa básica da Sabesp-Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, para consu-

midores industriais, a qual em outubro de 1983 era igual a Cr\$ 263/m³. Os custos pertinentes foram calculados variando-se a vazão de efluentes gerada de zero até 272 l/s (vazão atual). Estes valores foram então transformados em valores presentes, considerando-se um horizonte de projeto de 20 anos e uma taxa de juros real de 10% ao ano.

O cálculo dos custos das mudanças de processo produtivo como uma função da vazão de efluentes da indústria é bem mais complexo. Foram usadas neste caso informações coletadas em várias indústrias que adotaram mudanças de processo, em conjunção com dados reais sobre a influência do preço de tarifa nos seus coeficientes unitários de poluição. A partir destes dados foi construída a curva de custos das mudanças de processo que será utilizada em nosso exemplo. Assim, a evidência coletada sugere que, no caso de mudanças de processo iniciais, a vazão de efluentes pode ser reduzida sem nenhum custo (em alguns casos com custos negativos, devido à recuperação de matérias-primas). Após um determinado patamar os custos começam a crescer moderadamente devido ao vulto das modificações necessárias

para reduzir o fluxo de poluentes. Entretanto, à medida que a indústria se aproxima do nível de descarga zero, os custos começam a crescer muito rapidamente. Baseado nestas constatações, resolvemos adotar uma curva de custos de mudanças de processo da forma $y = az^b$, sendo $y = 0$ na faixa de valores para os quais as mudanças podem ser feitas a custos negligíveis. A figura 1 mostra o formato da curva proposta. O ponto Δq_{10} indica o fim das chamadas mudanças de processo de custo zero. O valor de Δq_{10} foi calculado assumindo-se que estas medidas iniciais de custo zero podem reduzir a vazão de efluentes em 20%.

Para se determinar os parâmetros a e b , pelo menos dois outros pontos na curva de custo devem ser conhecidos. Uma vez que controles internos e mudanças de processo podem envolver custos de difícil determinação, e em vários casos podem requerer substancial aporte de capital, além do uso de novas tecnologias que podem não ser facilmente disponíveis, pareceu-nos lógico que a firma não escolheria uma linha de ação diferente do "status quo", a menos que a mesma tivesse o potencial de resultar em significantes vantagens eco-

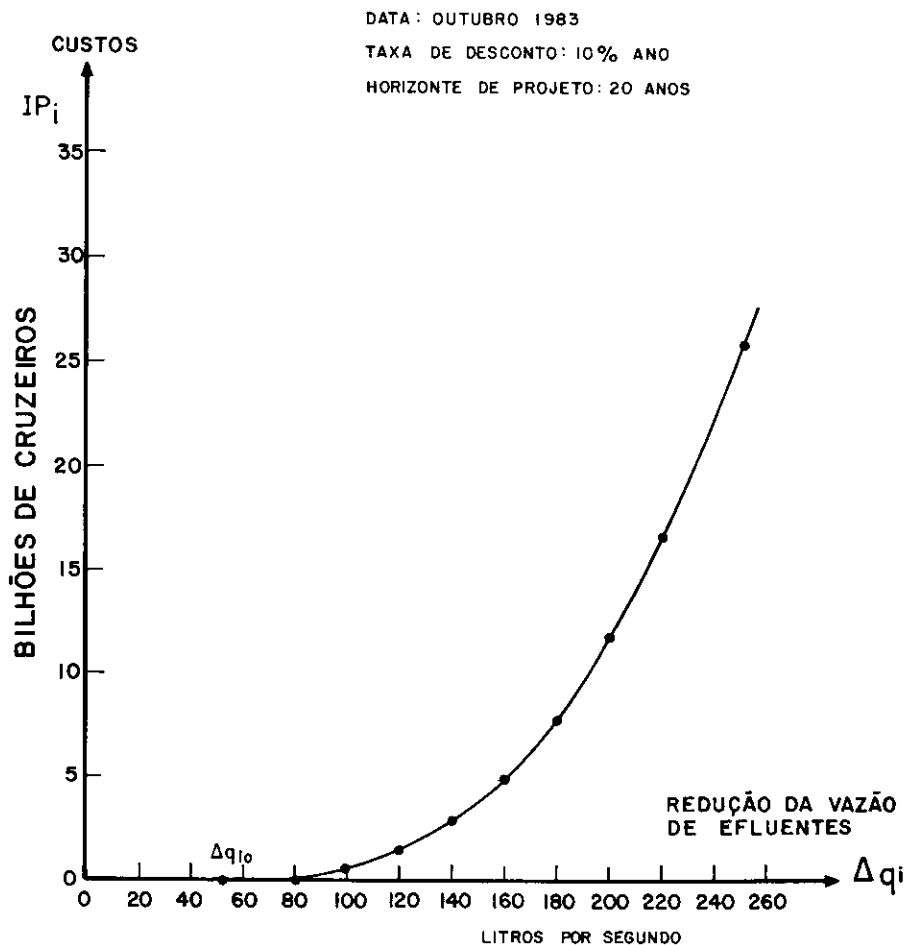


Figura 1 — Custos relativos às mudanças de processo (valor presente), para uma indústria alimentícia semi-hipotética.

nômicas. A partir deste raciocínio, foi assumido que os custos de uma redução de 70% na vazão de efluentes (a partir do valor inicial antes da tarifa) implicaria em custos 30% menores que o valor presente das despesas decorrentes do pagamento de tarifas caso as mudanças de processo não fossem realizadas.

De acordo com nossos cálculos, para que se reduza a vazão de efluentes de 188 l/s, através de mudanças de processo, a firma teria um custo de cerca de Cr\$ 9,3 bilhões (valor presente).

O último ponto na curva foi escolhido nas proximidades do ponto de descarga zero da planta. De acordo com os gerentes de várias indústrias, à medida que as reduções de vazão tornam-se mais e mais substanciais, os custos resultantes também crescem rapidamente. Neste caso assumimos que para se obter uma redução de vazão de cerca de 90% a firma teria que gastar uma importância equivalente a cerca de 140% dos custos decorrentes do pagamento de tarifas caso as mudanças não fossem executadas (em termos de valor presente). Mais especificamente, para reduzir a vazão de despejos de 245 l/s, a indústria gastaria cerca de Cr\$ 24,2 bilhões.

Conhecidos os dois pontos da curva, pode-se facilmente determinar o valor dos parâmetros **a** e **b** e por conseguinte se conhecer a curva de custos das mudanças de processo, como uma função das reduções na vazão de efluentes (Δq_i). A equação a seguir mostra o resultado dos cálculos:

$$IPI = 2.173 (\Delta q_i - 0,052)^{2,734} \quad (I)$$

para $\Delta q_i > 0,052 \text{ m}^3/\text{s}$

sendo $IPI = 0$ para $\Delta q_i \leq 0,052 \text{ m}^3/\text{s}$

Δq_i em m^3/s , $\{IPI$ em bilhões de cruzeiros)

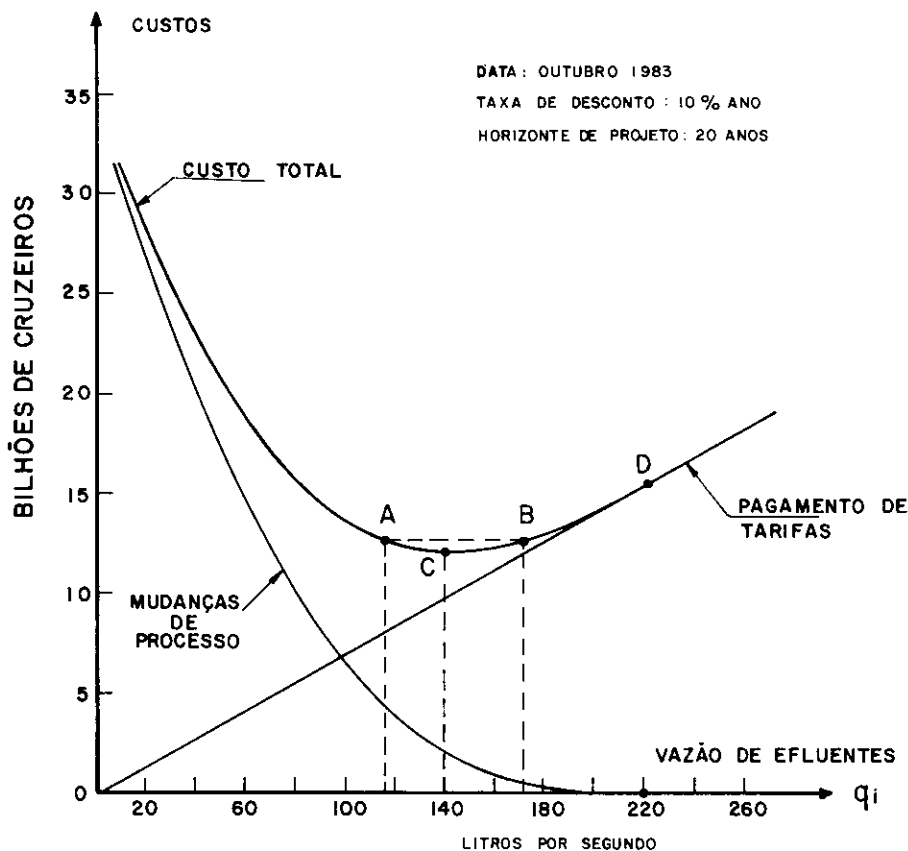


Figura 2 — Valor presente dos custos relativos a mudanças de processo e pagamento de tarifas para uma indústria alimentícia semi-hipotética.

A curva de custo correspondente está ilustrada na Figura 1.

A equação (I) pode ser transformada com o objetivo de se obter o custo como função da vazão total de efluentes da fábrica (q_i) ao invés de em função da redução de vazão (Δq_i). Assim,

$$IPI = 2.173 (0,220 - q_i)^{2,734} \quad (II)$$

para $q_i \leq 0,220 \text{ m}^3/\text{s}$

sendo q_i dado em m^3/s .

Por outro lado, o valor presente dos custos relativos ao pagamento de tarifas (UC_i), expresso como função das vazões de efluentes, é dado pela seguinte equação:

$$UC_i = 70,582 q_i$$

sendo q_i dado em m^3/s (III).

A Figura 2 mostra as curvas de custo referentes a mudanças de processo (IPI), e ao pagamento de tarifas (UC_i), e também a curva de custo total, obtida através da soma das duas anteriores. As curvas são dadas em valores presentes, assumindo-se uma taxa de desconto de 10% ao ano e um horizonte de projeto de 20 anos. O ponto C na curva de custo total indica a solução de mínimo custo (ótima) para a firma. Conforme o mostrado no quadro 1, neste ponto,

Quadro 1 — Comparação de custos entre soluções alternativas de controle de poluição em uma indústria alimentícia hipotética. (Data: Out/83)

ALTERNATIVAS \ CUSTOS	SOLUÇÃO A	SOLUÇÃO ÓTIMA	SOLUÇÃO B	PONTO D
1. Pagamento de tarifas (*)	8.24	9.90	12.16	15.53
2. Mudanças de Processo (*)	4.46	2.20	0.54	-
3. Custo total (*)	12.70	12.10	12.70	15.23
4. Vazão de efluentes (**)	116	140	172	220

(*) bilhões de cruzeiros (valor presente)

(**) litros por segundo.

o custo total é de cerca de Cr\$ 12,10 bilhões, sendo que a fração correspondente aos custos decorrentes do pagamento de tarifas importa em Cr\$ 9,90 bilhões enquanto os Cr\$ 2,20 bilhões restantes são devidos às mudanças de processo. Esta seria a combinação de medidas de controle que seria considerada economicamente a mais atraente, do ponto de vista da firma.

Tendo em vista que a estimativa de custos é sempre sujeita a uma margem de erro, vamos examinar as implicações de soluções alternativas que envolvam custos que são 5% maiores que a solução-ótima vista anteriormente. Os pontos A e B na curva de custo total da Figura 2 indicam tais soluções que chamaremos de quase-ótimas. Como pode ser visto no Quadro 1, ambas apresentam custos totais de Cr\$ 12,70 bilhões. Entretanto, os componentes do custo total são bem diferentes nos dois casos. A solução A, por exemplo, implica o pagamento de tarifas no valor de Cr\$ 8,2 bilhões enquanto na solução B estes custos seriam de Cr\$ 12,20 bilhões (um acréscimo de 48%). Por outro lado, os custos relativos a mudanças de processo na alternativa A são de Cr\$ 4,5 bilhões enquanto na alternativa B eles são reduzidos para Cr\$ 0,5 bilhão.

A diferença na geração de efluentes entre as alternativas A e B é também significativa: 116 l/s para a alternativa A e 172 l/s para a alternativa B (um acréscimo de 48%).

Vamos agora examinar as consequências de eventuais aumentos reais nas tarifas (acima da inflação). O objetivo deste acréscimo pode ser o de subsidiar os consumidores de baixa renda na cidade, de acordo com uma política

tarifária classificada como "social" pelas autoridades competentes. Na Figura 3 é mostrado que um aumento de 20% na tarifa resulta em um deslocamento para a esquerda da solução de mínimo custo (vide ponto C'). Conforme pode ser visto no Quadro 2 o novo custo total da solução ótima passa a ser Cr\$ 14 bilhões. É interessante notar que, a despeito do acréscimo de 20% na tarifa, a entidade de saneamento deve esperar um aumento mais modesto em suas receitas (cerca de 11%). O custo total de Cr\$ 14 bilhões divide-se nas seguintes parcelas: pagamento de tarifas Cr\$ 11 bilhões, mudanças de processo, Cr\$ 3 bilhões.

De acordo com o visto, se a empresa necessita aumentar em 20% suas receitas, ela deve aumentar a tarifa de um percentual maior que 20%. Segundo nossos cálculos, será necessário um acréscimo de cerca de 30% na tarifa para se obter um aumento de receita de 20%.

As decisões da firma serão significativamente influenciadas por sua habilidade em prever eventuais mudanças na política tarifária em vigor. Assim, se o gerente suspeita de aumentos futuros nas tarifas (acima da inflação), ele recomendará a adoção da solução A ao invés da solução B. Por outro lado, se o gerente está convencido de que a empresa de saneamento não mudará as regras do jogo frequentemente, e se a firma tiver dificuldades de caixa que tornem difícil a implementação de mudanças de processo, ele se sentirá inclinado a recomendar a solução B.

Examinemos agora as consequências das possíveis decisões da firma em termos de penalidades (custos decorrentes da não adoção da melhor deci-

são). Suponhamos que o gerente tenha recomendado a solução A e logo após a Companhia de Saneamento aumente suas tarifas em 20%. O custo total da alternativa A era antes do aumento, de Cr\$ 12,7 bilhões. Com o acréscimo de 20%, o novo custo total associado a esta alternativa será de Cr\$ 14,30 bilhões (ponto E na Figura 3). Uma vez que a nova solução ótima teria um custo total de Cr\$ 14 bilhões, a penalidade seria de Cr\$ 0,30 bilhão. Similarmente, se a decisão adotada fosse a B a penalidade seria de Cr\$ 1,2 bilhão, enquanto para a alternativa C a mesma seria de Cr\$ 0,10 bilhão. É evidente que a alternativa A é a segunda melhor alternativa para a firma.

Até agora, analisamos as consequências das decisões do gerente sob a ótica dos interesses da firma. É evidente, entretanto, que o impacto das decisões da firma na empresa de saneamento será bem diferente do impacto na firma. De acordo com o Quadro 1 se a solução adotada pela firma foi a A, isto significará que a empresa de saneamento receberá uma vazão de efluentes de cerca de 116 l/s em sua rede coletora (ou 10.022 m³/dia). Se a decisão for a B o volume diário de efluentes entregues passará para 14.860 m³/dia. Esta diferença de vazão, quase que certamente, terá um impacto significativo na taxa de utilização do sistema de tratamento da concessionária com o natural reflexo nos custos unitários de tratamento na ETE. Caso a empresa de saneamento não leve em conta as opções disponíveis ao gerenciamento da firma em termos de redução de poluentes ela certamente correrá o risco de operar com unidades de tratamento subutilizadas e, por conseguinte, com custos superiores à receita.

Quadro 2 — Efeitos nos custos das alternativas devido a um acréscimo de 20% nas tarifas de efluentes. (Data: Out/83)

ALTERNATIVAS \ CUSTOS	SOLUÇÃO A'	SOLUÇÃO ÓTIMA	SOLUÇÃO B'	PONTO D'
1. Pagamento de tarifas(*)	8.80	11.00	13.90	18.63
2. Mudanças de Processo(*)	6.10	3.00	1.00	-
3. Custo total (*)	14.90	14.00	14.90	18.63
4. Vazão de efluentes (**)	104	130	164	220

(*) bilhões de cruzeiros (valor presente)

(**) litros por segundo.

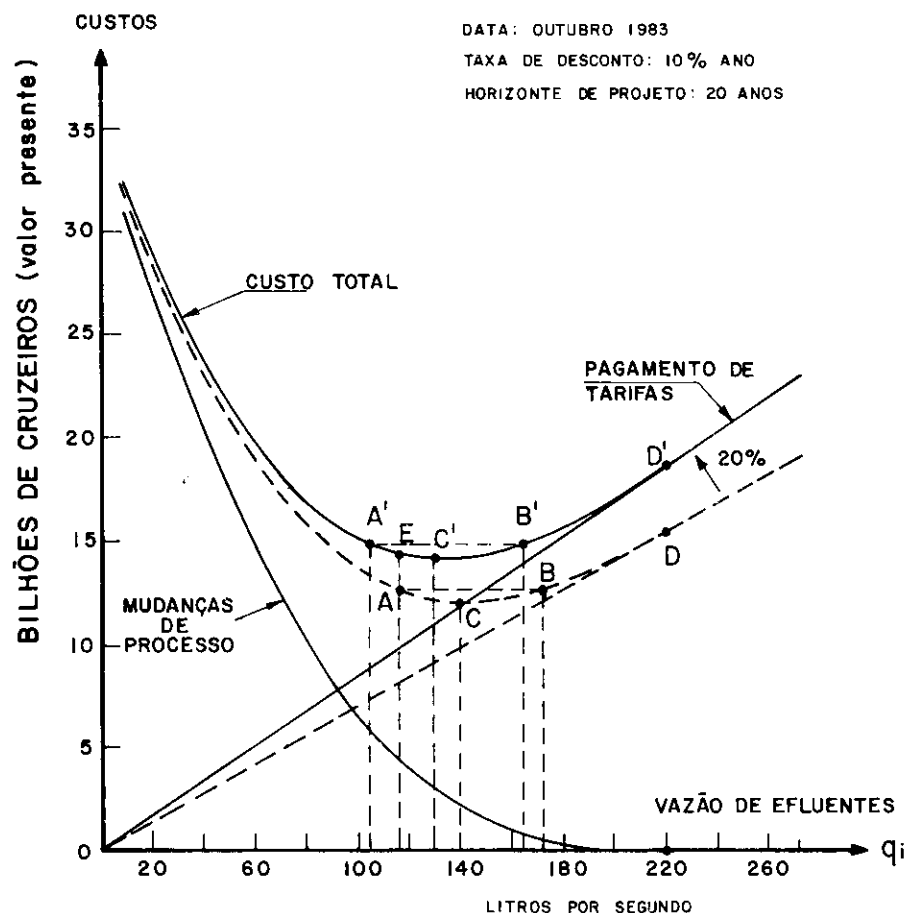


Figura 3 — Efeitos nos custos totais devidos a um acréscimo de 20% nas tarifas de efluentes cobradas pela empresa de Saneamento.

As decisões da firma terão certamente um impacto no balanço de pagamentos do país, uma vez que a implementação de mudanças de processo produtivo de maior vulto (como no caso A), envolvem geralmente o uso de novas tecnologias e requerem a importação de know-how e bens de capital de custo elevado. A adoção destas tecnologias, que, via de regra, são capital intensivas provocará inevitavelmente modificações no nível de demanda de emprego na região.

Por outro lado, é interessante notar que há casos em que uma legislação rigorosa de controle de poluição pode ser do interesse das empresas multinacionais uma vez que contrariamente às firmas locais, elas usualmente já dispõem em suas matrizes da tecnologia necessária ao atendimento dos padrões impostos pelas autoridades e também, porque os substanciais investimentos exigidos não só servem de barreira à entrada de novos competidores locais, como também forçam alguns atuais a se retirarem do mercado.

Conforme vemos, a escolha da decisão sobre que combinação de medidas de controle (mudanças de processo e entrega de efluentes) é a mais adequada, é assunto que extrapola de muito os territórios de competência da firma e da empresa de saneamento local.

CONCLUSÕES

Conforme o visto no exemplo apresentado, a metodologia exposta permite um tratamento mais abrangente de problemas complexos como o do controle da poluição industrial. Ao invés da busca de uma solução única é estimulada a exploração de um elenco de soluções que, embora diferindo muito pouco em termos de custos totais da considerada ótima, podem apresentar componentes de custos muito diferentes entre si. Em decorrência, os impactos destas soluções alternativas em aspectos de difícil quantificação em modelos matemáticos (mas de grande importância social) podem apresentar grandes variações. Deste modo, é importante que se tenha em mente que o uso de técnicas de otimização matemáticas na solução de problemas complexos deve vir sempre acompanhada da análise crítica proporcionada por um grupo multiprofissional de avaliação.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — HARRINGTON, Joseph J. and So, Lin-Ke. 'Near-Optimality in Capital Investment Planning for Water Resources 'in' Standards, Optimality and

Resilience in Water Resource Management' by Fiering, Myron B., Harrington, Joseph J. and Rogers, Peter P., unpublished report, Harvard University, Division of Applied Sciences, December 1979.

- 2 — KÜHNER, J. and Harrington, J. J., **Mathematical Models for Developing Regional Solid Waste Management Policies**, Journal of Engineering Opt. 1, 1975, pp. 237-256.
- 3 — KÜHNER, J. and Harrington, J. J., **Discussion of Capital Cost Minimization of Drainage Networks**, by Dajani, J. S., and Hasit, Y., Journal of Environmental Engineering Division Asce, 101 (EE-2) 1975, pp. 270-271.
- 4 — MUHICH, A., **Capacity Expansion of Public Works**, Harvard University, Division of Engineering and Applied Physics, Cambridge, Mass. EUA, 1966.
- 5 — ORTOLANO, L., **Artificial Aeration and the Capacity Expansion of Wastewater Treatment Facilities**, Unpublished Ph. D. Thesis, Harvard University, Division of Engineering and Applied Physics, Cambridge — Mass. EUA, 1969.
- 6 — GUPTA, S. K., and Rosenhead, J., **Robustness in Sequential Investment Decisions**, Man. Sci., 15 (2), 1968, pp. B18 — B29.
- 7 — MIGLINO, Luis C. P., **Industrial Wastewater Management in Metropolitan São Paulo**, tese de Ph. D., Harvard University, Division of Applied Sciences, Cambridge, Mass. EUA, 1984.