
Enfoque Econômico do Controle de Poluição: o Uso de Modelos Econômicos

Eng.º AMARÍLIO PEREIRA DE SOUZA (*)

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das ciências exatas neste século forneceu aos engenheiros o apoio teórico para criar complexos sistemas industriais e sistemas urbanos.

Nesses sistemas, até os nossos dias, o meio ambiente natural entrou como fonte aparentemente inesgotável de recursos e como um depósito final dos despejos. Graças a isto, durante muito tempo, a tecnologia expandiu-se em uma fase de crescimento exponencial.

O uso indiscriminado do meio ambiente começou em nossos dias a encontrar suas fronteiras. Crescendo o uso pelo desenvolvimento tecnológico e pelo aumento assombroso de população, rapidamente tomamos consciência de que a água e o ar atingem estágios de degradação que põem em risco a vida humana e a vida selvagem.

A água foi, até bem pouco tempo, em várias regiões da terra, um recurso ilimitado. Hoje, surpresos, verifi-

camos, por exemplo, que todo o oxigênio dos rios, nas regiões mais populosas dos Estados Unidos, no ano de 1985, estará consumido pelos efluentes secundários das estações depuradoras.

Aos técnicos e administradores sempre pareceu que, se suficientes recursos fossem alocados e se organização adequada fosse mobilizada, o problema geral da poluição e da modificação desordenada do meio ambiente seria controlado. Para nossa surpresa vemos que, quanto ao potencial humano de controle, aqui também atingimos uma fronteira. Se reunidos hoje todos os recursos técnico-científicos existentes e todos os recursos econômicos e financeiros, ainda assim seria tarefa difícil impedir a degradação completa e final dos corpos de água das regiões mais populosas do mundo.

Há, pois, que começar uma mudança nos métodos de ataque aos problemas e uma mudança de filosofia, no sentido de não passar para o meio ambiente, como externalidade, o custo de nossos sistemas de engenharia. Há felizmente alentados indícios de que os métodos estão mudando e rapidamente.

Esses métodos de trabalho, como a análise de sistemas e o emprego generalizado da computação eletrônica, ainda se encontram na sua infância e considerável esforço deve ser feito se quisermos dispor a tempo de ferramentas adequadas de análise que permitam encontrar soluções compatíveis com a urgência do problema.

O objetivo destas notas é tratar de alguns aspectos da economia dos sistemas de controle de poluição.

2. GENERALIDADES

Sistemas de Engenharia são aqueles concebidos e montados pelo homem para produzir bens e serviços. Entre esses interessam particularmente ao campo de estudo de controle de poluição os **sistemas industriais** e os **sistemas urbanos**.

Entre os sistemas industriais e urbanos existem os que têm por objetivo reduzir os efeitos da poluição sobre o meio ambiente. São os **sistemas de controle de poluição**.

Com pequenas discrepâncias, os técnicos concordam que a análise de sistemas aplicada ao controle de

(*) Engenheiro da Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, Rio de Janeiro.

poluição pode ser dividida nas seguintes etapas de trabalho:

2.1 Formulação clara do problema a resolver

No caso de se pretender controlar a poluição em um vale, como o mostrado na figura 2.1, essa formulação poderia ser uma das seguintes:

a) Coletar e tratar todos os esgotos de uma determinada cidade.

Evidentemente a qualidade de água nos rios não depende unicamente dessa cidade escolhida. Como melhor opção, outra formulação seria:

b) Coletar e tratar todos os esgotos das cidades do vale.

Embora haja formulações mais completas para o estudo de controle de poluição, como estudar todos os usos da água ou estudar um modelo ecológico global para o vale, cremos que, no atual estágio de conhecimentos, a formulação de um modelo capaz de atender o objetivo b) é um avanço apreciável, constituindo o que se chama "Sistema Regional de Tratamento de Águas Residuárias".

2.2 Construção de um modelo que descreva as variáveis mais importantes do problema

Um conjunto de funções capazes de descrever as variáveis significativas do modelo seria, por exemplo:

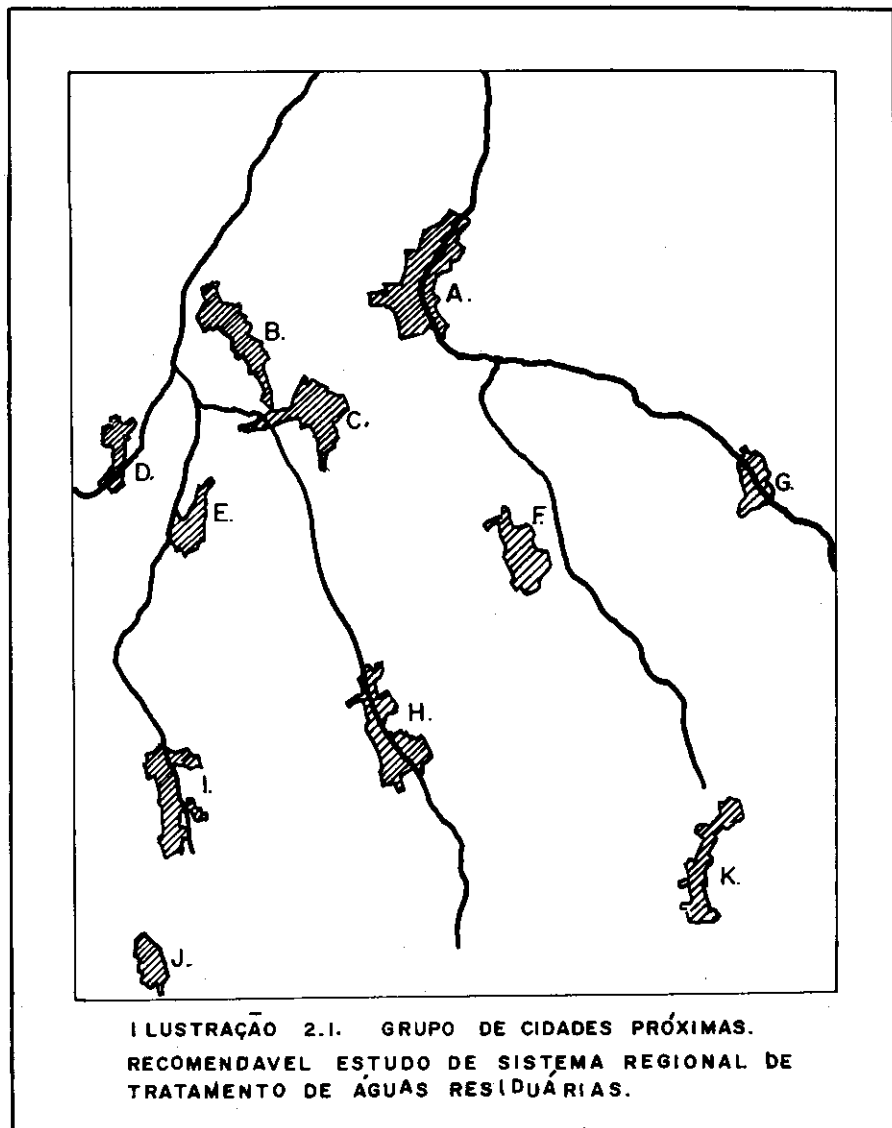
a) Funções descrevendo as transformações de qualidade no que diz respeito à matéria orgânica (D.B.O. e O.D.). Uma formulação comum dessas funções está indicada no quadro 2.1.

b) Funções descrevendo o escoamento hidráulico. Um exemplo, dos muitos que se poderia dar, dessas funções está mostrado no quadro 2.2.

c) Funções de custo. As funções de custo são empregadas para otimizar a solução do problema. A importância em se desenvolverem estudos dessas funções pode ser rapidamente percebida. Serão tratadas no item 3 deste trabalho.

2.3 Definição de uma função de critério ou função objetiva

A tarefa consiste em definir para o sistema uma função que deverá ser maximizada ou minimizada, sujeita às condições limites para todas as variáveis do problema. Evidentemente, nos modelos onde se deseja apenas minimizar os custos, a função objetiva é a que define os custos totais das instalações. Se considerarmos



também os benefícios quantificáveis, a função objetiva deverá ser a que exprime a diferença benefícios menos custos, ou seja, benefícios líquidos.

No caso considerado a função objetiva é aquela que exprime os custos totais de coleta, transporte e tratamento dos esgotos do vale.

2.4 Coletar dados que permitam estimar os parâmetros das funções que aparecem no modelo

Evidentemente esses parâmetros variam com múltiplos fatores. Num primeiro estudo é sempre possível estimar valores de acordo com a experiência geral no campo.

E finalmente:

2.5 Encontrar uma solução ótima através de algoritmos formais de cálculo

Alguns desses algoritmos que interessam mais de perto os modelos aplicados aos sistemas de controle

de poluição podem ser aqui enumerados.

- Programação linear
- Programação inteira
- Programação mista
- Técnicas de pesquisa operacional. A mais comum empregada é a "Branch-and-bound".

Quadro 2.1: Funções descrevendo as transformações de qualidade de água dos rios.

$$d(T - T_c) / dt = -k_1 (T - T_c)$$

$$db / dt = -k_2 B$$

$$k_1 = k_1 \cdot \theta_1^{T-20}$$

$$dD / dt = k_1 B - k_2 D$$

$$K_2 = \frac{m}{\theta_2} \theta_2^{T-20}$$

$$D_c = a + bT + cT^2 + dT^3$$

onde:

T = temperatura da água

t = tempo

B = Demanda Bioquímica de Oxigênio

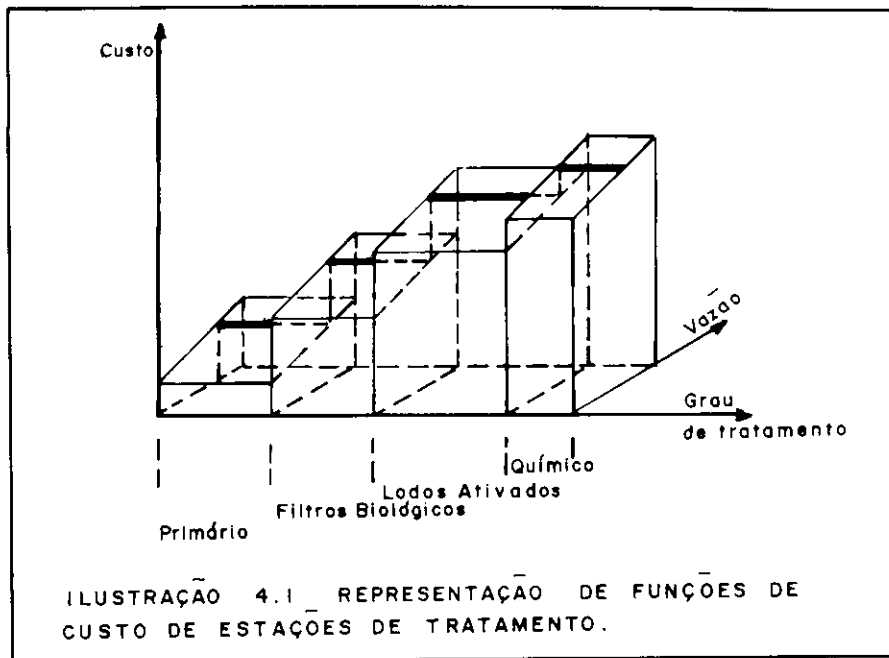


ILUSTRAÇÃO 4.1 REPRESENTAÇÃO DE FUNÇÕES DE CUSTO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO.

Q = vazão

D_s = Oxigênio dissolvido na saturação

K₁, k₂, k₃, θ₁, θ₂, θ, m, a, b, c, d são parâmetros.

As funções desse grupo quando aplicadas isoladamente constituem os modelos de DBO-OD, uma classe dos modelos de qualidade.

Quadro 2.2: Funções descrevendo o escoamento hidráulico.

$$\frac{au}{at} + u \frac{au}{ax} - g \frac{ah}{ax} + k u \cdot u = 0$$

continuidade:

$$\frac{ah}{at} - \frac{aq}{ax} = 0$$

onde:

u = velocidade média em uma seção de escoamento

h = profundidade

x = comprimento na direção do escoamento

t = tempo

q = vazão

As funções desse grupo, quando aplicadas isoladamente, constituem os modelos de escoamento, parte dos modelos de quantidade.

3. MODELOS ECONÔMICOS ESTUDADOS EM CONTROLE DE POLUIÇÃO

Presentemente há um grande número de estudos em andamento cobrindo todo o campo de controle de poluição. Tais estudos estão muito

longe de chegar a conclusões plenamente satisfatórias. Abaixo indicamos os assuntos mais comumente encontrados na literatura técnica.

3.1 Modelos de otimização de redes de esgotos

Projetar redes de esgotos é uma das artes mais antigas da engenharia. Recentemente, com o crescimento desmedido das cidades, o custo das redes passou a ser um pesado ônus nos planos de controle. A técnica tradicional tornou-se insuficiente para assegurar a economia dos projetos. Infelizmente as tentativas para otimizar projetos de redes de esgotos revelaram dificuldades importantes. Dois são os problemas que estão sendo atacados: a otimização dos traçados e a otimização dos perfis das linhas. Os programas até agora desenvolvidos envolvem grande tempo de computação e grandes espaços de memória nos computadores.

3.2 Modelos de simulação de chuva, escoamento superficial, escoamento dentro das tubulações de água pluvial e emprego de reservatórios de cheias, para minimizar os custos das redes

3.3 Modelos de otimização de estações de tratamento de esgotos

Para desenvolver estes modelos tem sido necessário estudar funções de custo das unidades que compõem uma estação. Assunto pouco desenvolvido entre nós.

3.4 Modelos de sistemas regionais de transporte e tratamento de esgotos.

Voltaremos a esse assunto adiante.

3.5 Modelos de coleta e transporte de despejos sólidos

Considerável trabalho tem sido desenvolvido nesse campo usando a técnica da pesquisa operacional a fim de se reduzirem os custos de coleta e transporte do lixo das cidades.

3.6 Modelos globais de controle de poluição

A queima de lodos das estações de tratamento de esgotos, por exemplo, contribui para a criação de problemas de qualidade do ar. A disposição desses lodos sobre o terreno traz outros inconvenientes aos corpos de água.

Recentemente tem havido algumas tentativas de analisar os problemas em conjunto em alguns modelos globais.

A seguir trataremos de alguns problemas básicos ligados aos modelos econômicos de controle de poluição, normalmente encontrados em todos os trabalhos.

4. FUNÇÕES DE CUSTO E PROBLEMAS DE EXPANSÃO DE CAPACIDADE

Os estudos de otimização de sistemas de controle de poluição exigem que se possa definir custos de instalações e de sua operação, manutenção e reparos em função de algumas variáveis importantes no processo, em geral em função da própria capacidade da instalação.

4.1 Funções de custo das Estações de Tratamento

Os custos de tratamento dependem:

- a) do processo empregado
- b) do grau de tratamento
- c) da quantidade de água servida tratada.

Uma representação gráfica das funções de custo das Estações de Tratamento está mostrada na ilustração 4.1.

Se tomarmos por exemplo o processo de lodos ativados, um recente estudo americano mostrou que o custo de capital, ou custo de cons-

trução desse tipo de estação para operação convencional, pode ser expresso por

$$C = 64,23 Q^{0,78} \quad (\text{Custo em milhões de cruzeiros, } Q \text{ em } m^3/s \text{ como vazão de dimensionamento ou capacidade}) \quad (4.1.1)$$

O expoente menor que 1 afetando a capacidade indica existir economia de escala.

Os custos de operação, manutenção e reparos podem ou não ser incorporados à mesma função de custo. Como esses custos são exercidos ao longo do tempo, para que se possam somar a investimentos realizados na implantação da obra é necessário reduzi-los à data de implantação, multiplicando os custos exercidos em cada ano j pelo fator de valor presente.

$$F_j = (1 + h)^{-j}$$

onde:

h é a taxa anual de remuneração de capital.

Em alguns estudos admite-se que se reduzam os custos ao valor presente tomando o período de tempo em que se admite o capital como fixo como tendendo a zero, isto é, admite-se a redução ao valor presente como contínua. Supondo ainda a taxa de remuneração de capital com o seu valor anual h , obteremos para valor do fator de valor presente:

$$F_j = e^{-jh} \quad (4.1.3)$$

As funções de custo das estações de tratamento podem ser melhor compreendidas postas sob a forma:

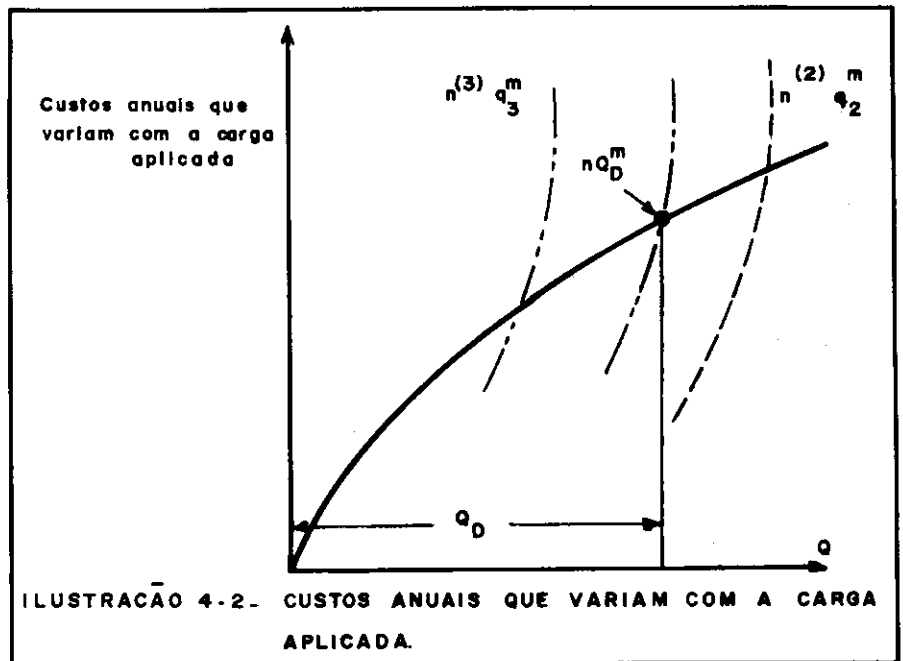
$$C = a + bQ^c + \int_0^T \frac{m}{nq} e^{-ht} dt \quad (4.1.4)$$

Ver ilustração 4.2.

O primeiro termo do 2.º membro encerra os custos que são relativamente insensíveis à capacidade da estação.

Uma estrada de acesso, o laboratório de controle do processo são dois bons exemplos desses custos.

O segundo termo encerra os custos que dependem essencialmente de uma grandeza chamada vazão de dimensionamento ou capacidade nominal da Estação. É a capacidade para a qual as diversas unidades podem funcionar em seu rendimento ótimo. Exemplo: os custos de implantação das unidades de decantação, aeração, etc.



O terceiro termo encerra a soma dos custos que variam com a capacidade realmente aplicada à estação. Sabemos que os fluxos que atingem a instalação são variáveis no tempo.

Ao aplicarmos uma vazão q a uma unidade qualquer cujo valor $q < Q$,

por exemplo, o custo de capital não mudará, mas o custo de energia para realizar o mesmo grau de tratamento certamente se reduzirá. O terceiro termo contém ainda o fator de redução ao valor presente,

$$F_j = e^{-ht}$$

Custos Totais =

$$a + bQ^c + \int_0^T \frac{m}{nq} e^{-ht} dt$$

4.2 Funções de custo de transporte

Os sistemas regionais de transporte e tratamento utilizam como função de custo de transporte expressões analíticas que podem ser elaboradas de duas maneiras básicas.

Mais comumente se separam os custos das elevatórias dos custos das linhas de recalque, quando se trata de um sistema de pressão.

Outro modo mais sintético consiste em reunir todos os custos de transporte, incluindo elevatórias e as linhas de recalque em uma única função.

Seja por exemplo um sistema de recalque praticamente sem altura estática de elevação, caso mais simples. Supondo a vazão a recalcar variável ao longo do tempo, uma forma da função de custo apropriada seria:

$$C = a + bD^c + f \int_0^T Q(t) H(t) e^{-ht} dt \quad (4.2.1)$$

Onde:

D é o diâmetro, $Q(t)$ é a vazão e $H(t)$ é a altura manométrica.

Os valores de $Q(t)$ e $H(t)$ podem ser relacionados pela fórmula de Darcy-Weisbach, obtendo-se:

$$C = a + bD^c + \frac{f'}{D^5} \int_0^T Q^3(t) e^{-ht} dt \quad (4.2.2)$$

Ver quadro 4.1

Quadro 4.1

Funções de custo de transporte

$$C = a + bD^c + f \int_0^T Q(t) H(t) e^{-ht} dt$$

$$C = a + bD^c + \frac{f'}{D^5} \int_0^T Q^3(t) e^{-ht} dt$$

para Q constante, fazendo $\frac{aC}{aD} = 0$

obtemos o diâmetro que produz menor custo:

$$D^* = \left[\frac{5f'}{cb} \int_0^T Q^3 e^{-ht} dt \right]^{1/(5+c)}$$

e o menor custo é:

$$C^* = a + \left[\frac{b(5+c)}{5} \right]^{5/(5+c)} \times \left[\frac{f' \int_0^T Q^3 e^{-ht} dt}{c} \right]^{c/(5+c)}$$

No caso especial em que se admite uma duração infinita para a linha:

$$D^* = \left(\frac{5f'}{bch} \right)^{1/(5+c)} Q^{3/(5+c)}$$

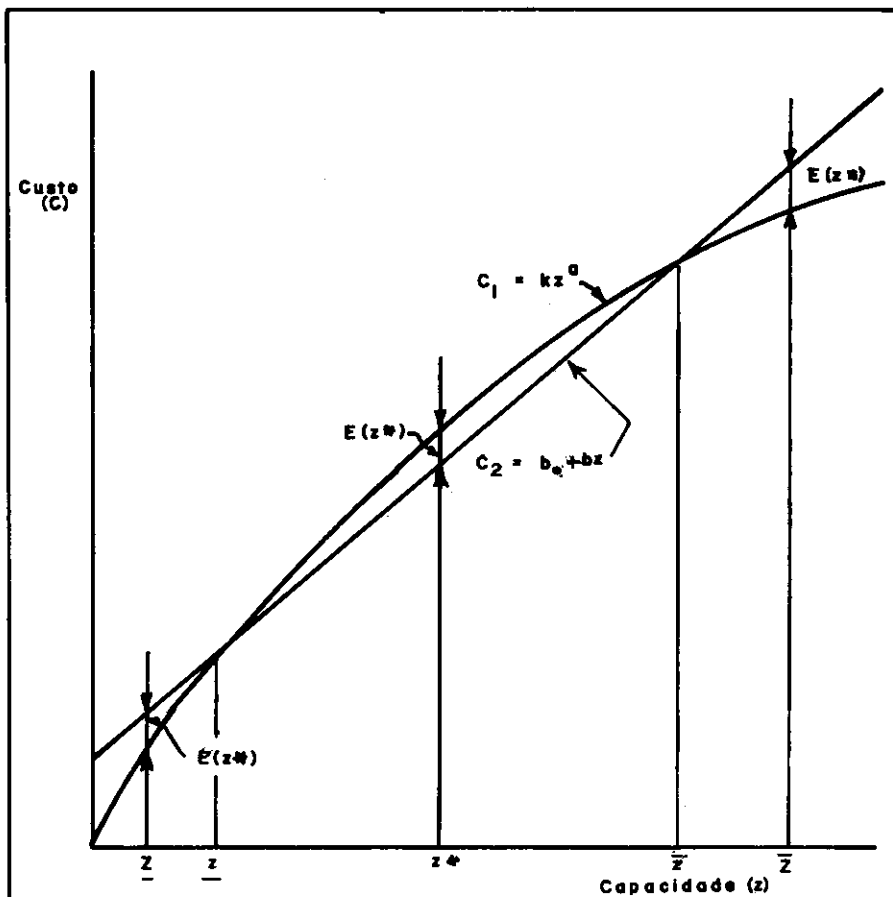


ILUSTRAÇÃO 4.3. LINEARIZAÇÃO DE FUNÇÃO DE CUSTO EM UM ÚNICO SEGMENTO.

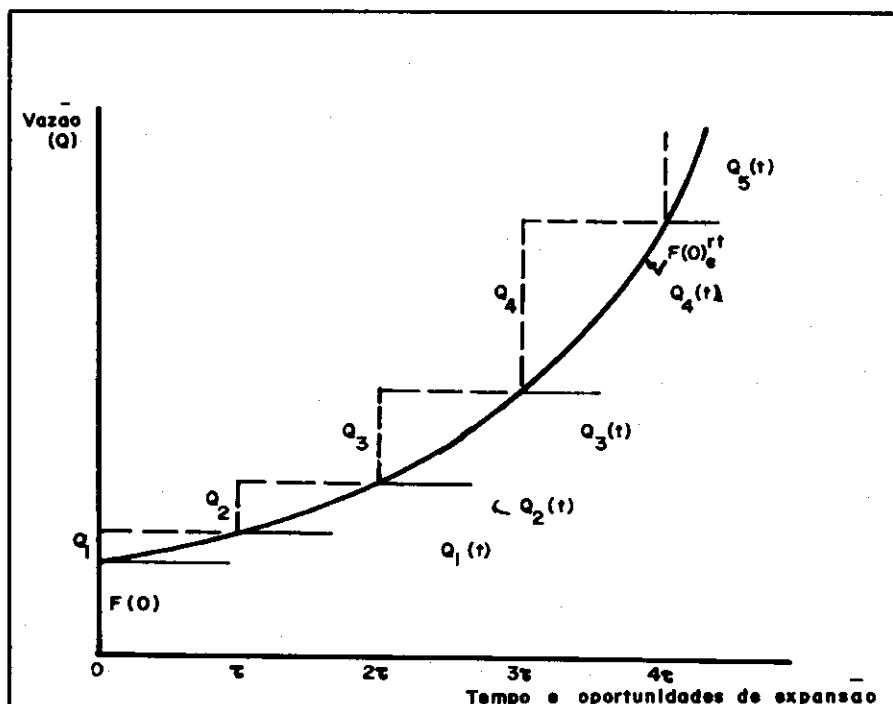


ILUSTRAÇÃO 4.4. CRESCIMENTO DE VAZÕES E OPORTUNIDADES DE EXPANSÃO.

$$c^* = a + \left[\left(\frac{5}{c} \right)^{c/(5+c)} + \left(\frac{c}{5} \right)^{5/(5+c)} \right]^{1/(5+c)} \times \left(\frac{f'}{h} \right)^{c/(5+c)} \times Q^{3c/(5+c)}$$

Lembramos que a determinação dos parâmetros que aparecem nessas fórmulas de custos de transporte envolve considerável trabalho de avaliação, no que não vamos entrar por não ser o objetivo deste trabalho. Queremos frisar que a expressão (4.2.1) possui no 2.º membro:

a —: parâmetro que exprime os custos insensíveis à dimensão da linha, por exemplo, o valor do terreno da faixa, terreno para elevatória etc.

bD^c —: expressão dos custos que dependem do diâmetro da linha; por exemplo os custos da tubulação posta na vala e pronta para ser usada, os custos fixos de energia, proporcionais à potência instalada. O parâmetro b depende do comprimento da linha.

A expressão pode incluir também os custos dos equipamentos de bombeamento e da própria estação elevatória, pois os custos das elevatórias são indiretamente dependentes do diâmetro da linha através de disposições de normas técnicas.

O terceiro termo do 2.º membro encerra os custos que dependem da vazão efetivamente bombeada ao longo do tempo e reduzidas ao valor presente.

f' é um fator que depende entre outras coisas do custo da energia expresso em kW-hora, dependendo ainda do fator de utilização da linha.

Observe-se que a expressão que exprime os custos das Estações de Tratamento tem a mesma forma da expressão que indica os custos dos sistemas de bombeamento.

Grande quantidade de trabalho é exigida para determinar os parâmetros que influem nessas funções de custo.

4.3 Linearização de funções de custo

As funções de custo em geral não são lineares. São funções exponenciais côncavas ou convexas.

A maioria das técnicas de otimização de sistemas usa programação linear como uma de suas etapas.

A ilustração 4.3 mostra uma função de custo de tratamento linearizada em um único segmento. Evidentemente poder-se-ia obter melhores resultados de aproximação usando múltiplos segmentos. Deve ser lembrado que isto nem sempre é necessário.

Normalmente se conhece o campo de variação onde a função será aplicada. Nesse intervalo há pois que de finir uma reta que tenha, em 3 pontos, um erro máximo, de aproximação da função, aceitável.

Esse tipo de linearização de um único segmento, com um valor fixo inicial na origem é da forma:

$$C = a + bz$$

pode ser usado com resultado satisfatório em modelos de otimização de tratamento regional de águas servidas.

4.4 Problemas de expansão de capacidade

O crescimento das zonas urbanas e o crescimento populacional tornam comum a necessidade de se prever a instalação, em sucessivas etapas, das unidades dos sistemas de controle de poluição.

A ilustração 4.4 mostra um exemplo de crescimento de vazões para bombeamento de águas servidas.

Vemos que se impusermos a ampliação em períodos iguais de tempo vamos obter capacidades crescentes para as etapas. Sendo evidente que a expansão de capacidade deve acompanhar de maneira mais próxima possível o crescimento das vazões é contudo necessário prever-se que o número de expansões não seja excessivo.

Na prática é admissível que a expansão de capacidade se dê entre 3 e 5 vezes durante o período de vida do projeto. Na linguagem técnica as ocasiões em que as expansões devem ocorrer chamam-se "oportunidades para expansão".

Modelos existem que consideram essas oportunidades como variáveis do problema de otimização, procurando definir dentro do modelo quando essas expansões devem ter lugar.

As funções de custo devem, nesse caso, levar em conta o problema de expansão de capacidade.

5. MODELOS REGIONAIS DE TRANSPORTE E TRATAMENTO DE ÁGUAS SERVIDAS

Dois tipos de modelos são hoje normalmente estudados para esse fim:

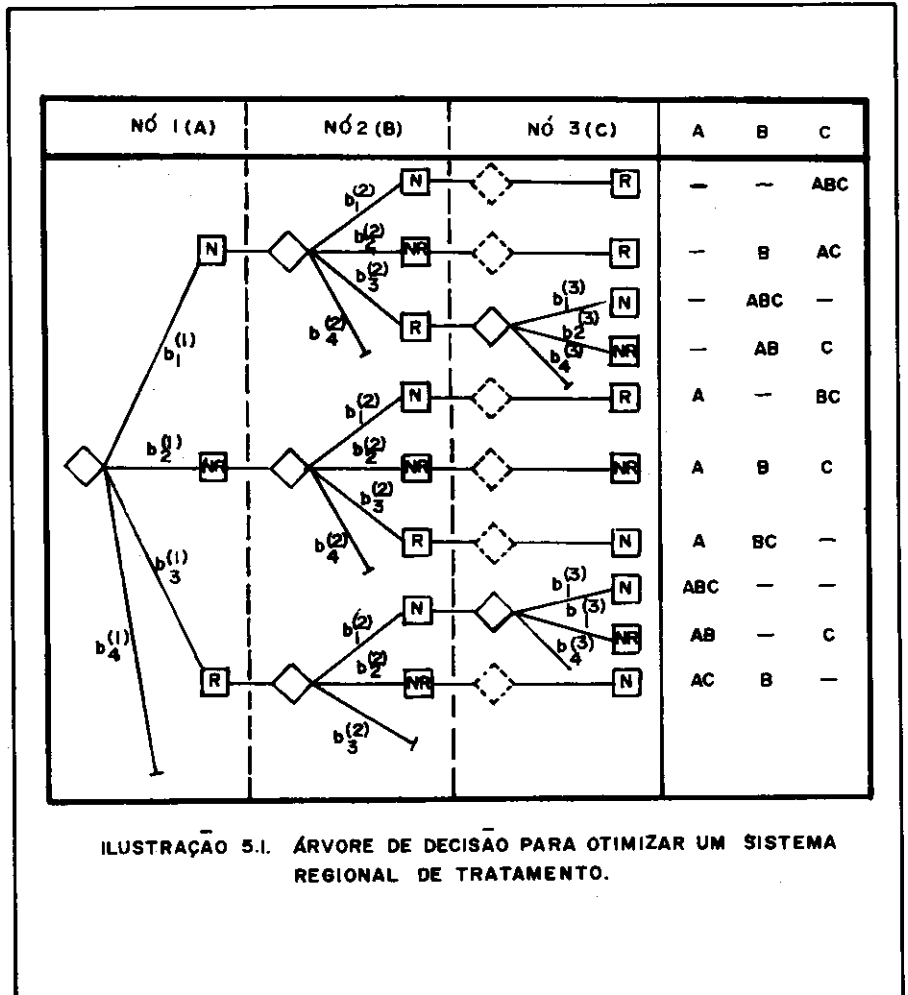


ILUSTRAÇÃO 5.1. ÁRVORE DE DECISÃO PARA OTIMIZAR UM SISTEMA REGIONAL DE TRATAMENTO.

5.1 O modelo mais simples não leva em conta as oportunidades de expansão de capacidade

Sua formulação matemática é simples:

Tomando-se (Quadro 5.1)

$f_{ij}(x_{ij})$ = custo de transporte de i para j

x_{ij} = vazões transportadas de i para j

Y_j = vazões em j

u = conjunto de todos os meios de transporte

T = conjunto de todos os pontos onde o tratamento é possível

S = conjunto de todas as fontes de águas servidas

$g_j(Y_j)$ = custos de tratamento em j

D_j = quantidade de águas servidas em j

Temos:

Função objetiva a minimizar:

$$C = \sum_{i,j \in u} \sum_i f_{ij}(x_{ij}) + \sum_{j \in T} g_j(Y_j)$$

Sujeita às seguintes condições:

$$-\sum_i x_{ij} + \sum_{j,i \in u} x_{ji} + Y_j = D_j \quad i,j \in u; j,i \in u; j \in T; j \in S$$

5.2 Método para solução

O modelo proposto pode ser otimizado por programação mista. Neste tipo de programação, algumas variáveis podem assumir apenas dois valores, 0 ou 1.

Suponhamos o custo de tratamento definido por

$$g_j(Y_j) = A_j a_j + b_j v_j$$

a variável A_j é uma variável tal que:

$$A_j = 0 \text{ se } Y_j = 0$$

isto é, se não se vai tratar esgotos em j e

$$A_j = 1 \text{ se } Y_j > 0$$

isto é, se se vai tratar esgotos em j .

Suponhamos que em uma determinada região foram escolhidas áreas onde se podem construir instalações de tratamento.

Em cada uma dessas áreas três alternativas são possíveis:

a) NÃO TRATAR (N) — Transportando-se os efluentes para outra área.

b) EXECUTAR TRATAMENTO LOCAL, isto é, NÃO REGIONAL (NR)

— Significa tratar apenas os esgotos da cidade ou região.

c) TRATAR DE EFLUENTES LOCAIS E DE OUTRAS ÁREAS, isto é, EFETUAR TRATAMENTO REGIONAL (R).

A figura 5.1 mostra a árvore de decisões do problema, aplicável à técnica de "branch-and-bound" para otimização.

Suponhamos que existam 3 áreas — ou nós — indicadas como locais para tratamento.

É necessário investigar os custos das opções possíveis no nó 1. Esses custos estando entre si, por exemplo, na relação:

$$C_2^{(1)} < C_1^{(1)} < C_3^{(1)}$$

isto é, o custo de um tratamento não regional é o custo mínimo.

Passando para o nó 2 os valores dos custos permitem escrever:

$$C_2^{(2)} < C_1^{(2)} < C_3^{(2)}$$

indicando que a solução regional é a

mais econômica, tratando-se no (2) os esgotos de (3) e (2) de vez que os esgotos de (1) já sofrerão tratamento não regional.

Evidentemente este método de pesquisa pode ser efetuado manualmente apenas para um número de nós não superior a 3. Para o número de nós igual a 5 o número de opções a estudar crescerá para 200.

Evidentemente grande número de opções pode sempre ser eliminado pelo uso de experiência de engenharia e por solução do problema em sub-regiões.

5.3 Modelo de otimização levando em conta as oportunidades de expansão

Seja uma região com diversos locais aceitáveis para implantar estações de tratamento. Suponhamos que em cada local já foi decidido, para a gama de vazões que se pode esperar, qual o grau de tratamento a adotar, se uma instalação for construída nesse local.

Admitamos que os custos de tratamento podem ser representados na ilustração 5.2.

Sejam s_{ij} custo por unidade de capacidade no local i , no ano j .

S_{ij} custo fixo mínimo da ETE que se propõe construir no local i no ano j .

s_{ij} é o custo marginal S_{ij} é o custo de capital inicial mínimo, o ano j é o ano propício à instalação ou o ano da oportunidade de construção.

Seja z_{ij} a capacidade variável admitida como continua para a ETE proposta e Z_{ij} a variável de decisão binária.

$Z_{ij} = 1$ significa que a ETE deve ser construída no local i , no ano j . Neste caso $z_{ij} > 0$, isto é, uma certa capacidade deve ser admitida para a ETE. Se não se deve construir a instalação tanto Z_{ij} como z_{ij} são iguais a zero. Sendo F_j o fator de redução ao valor presente, o total do valor presente de todas as ETE a construir no sistema será:

$$C = \sum_i \sum_j F_j (S_{ij} Z_{ij} + s_{ij} z_{ij})$$

De maneira semelhante podem ser calculados o valor total do custo de linhas de transporte de uma certa vazão x_{ij}^k transportado do nó i para o nó k , no ano j .

$$C = \sum_i \sum_k \sum_j F_j (\mu_{ij}^k X_{ij}^k + \mu_{ij}^k x_{ij}^k)$$

onde

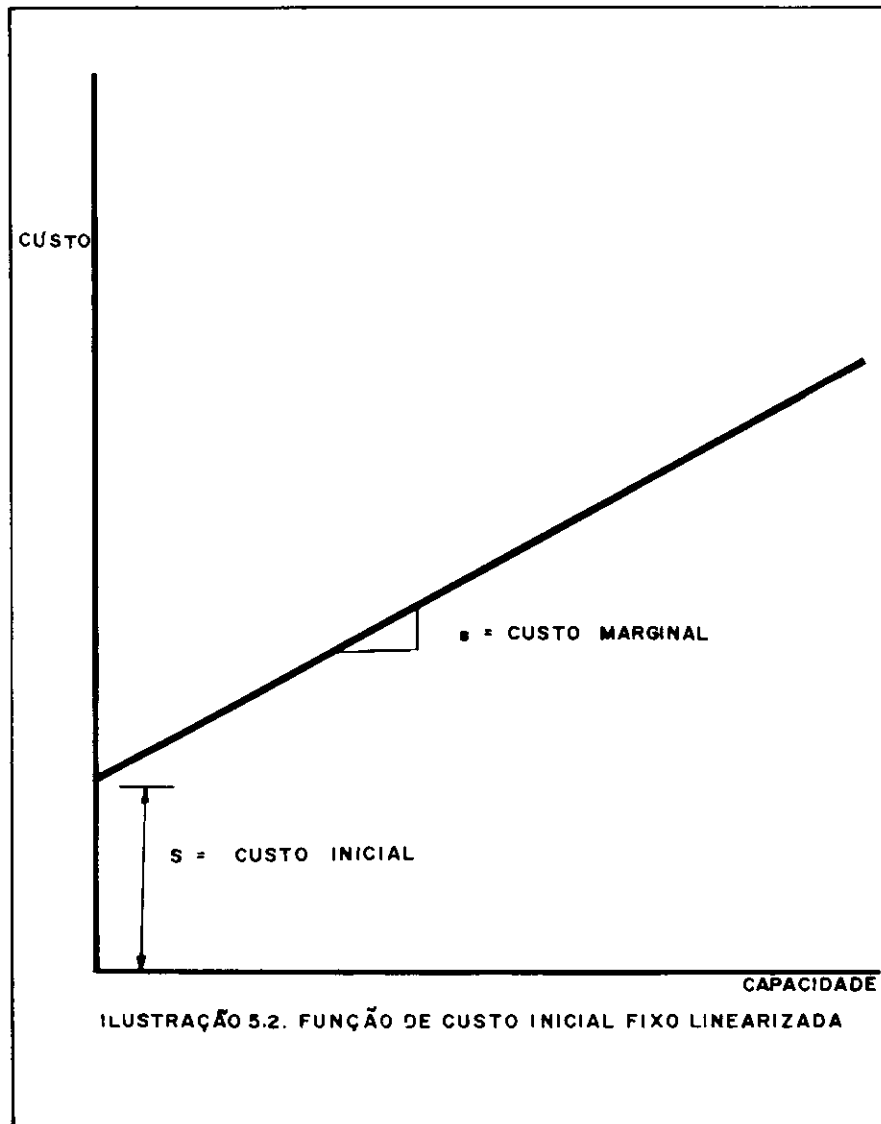
μ_{ij}^k e μ_{ij}^k são o custo fixo mínimo e o custo marginal do transporte.

X_{ij}^k a variável binária de decisão e x_{ij}^k o valor da vazão a transportar.

Se escrevermos equações semelhantes para o custo de estações elevatórias e para os custos de operação, manutenção e reparos das ETE e das elevatórias teremos para função objetiva o valor indicado no quadro 5.2.

É necessário completar o sistema a resolver com as funções de condição.

Por exemplo, a continuidade requer que em cada período a vazão tratada em cada nó iguale a vazão que chega diretamente ao nó mais as vazões de outros nós que são recebidas menos a vazão enviada para qualquer outro nós. Matematicamente a condição seria expressa por



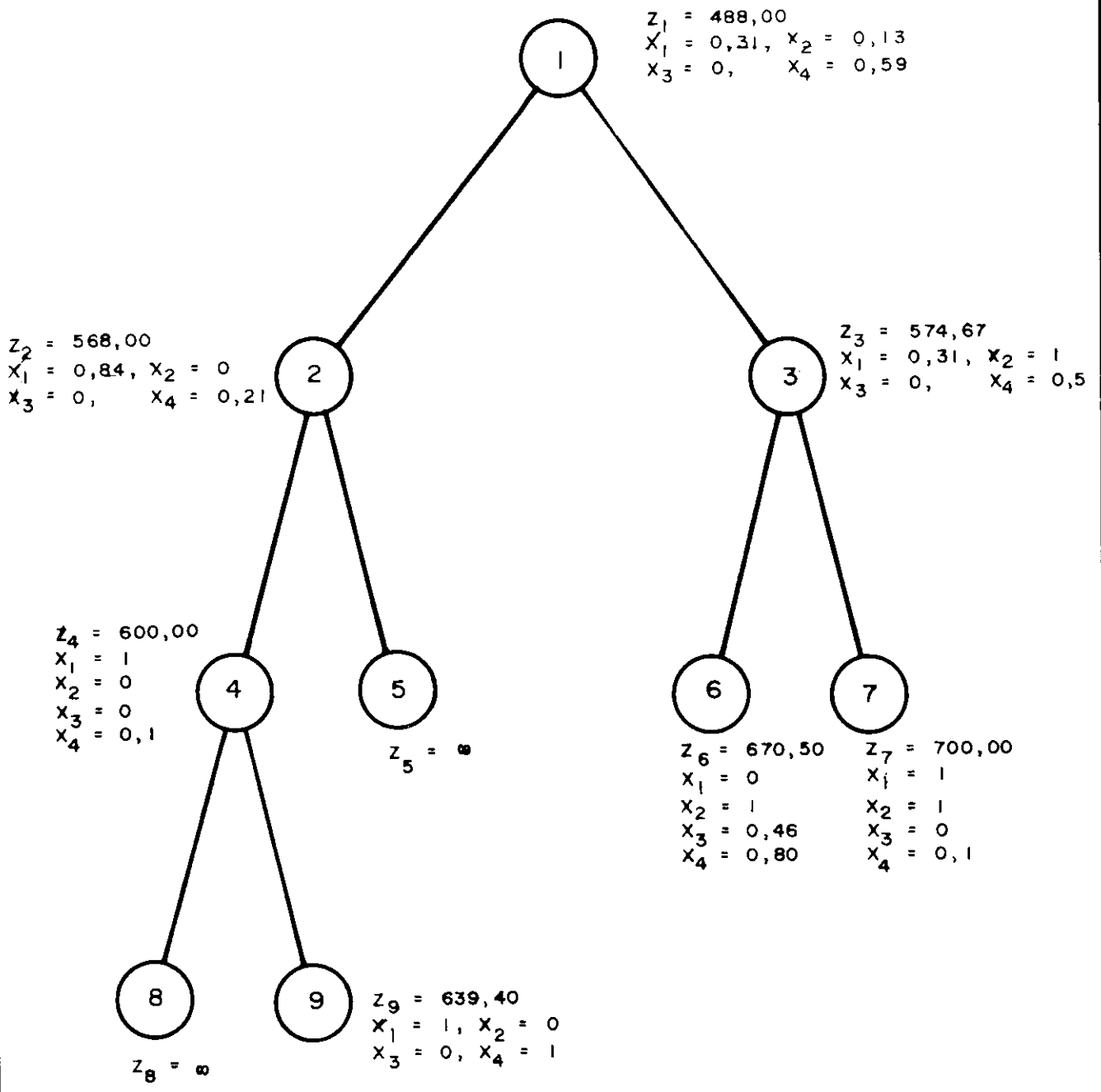


ILUSTRAÇÃO 5.3. SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA POR PROGRAMAÇÃO MISTA

$$y_{it} = q_{it} + \sum_k^i z_{it} - \sum_k^k z_{it}$$

A capacidade das estações de tratamento requer que em cada local a capacidade existente mais a soma das expansões de capacidade iguale ou exceda a maior vazão que deva ser tratada no ano $j+1$, ano da próxima oportunidade de expansão. Supondo as vazões monotonamente crescentes, a condição se expressa por:

$$z_{io} + \sum_{n=1}^j z_{in} \geq y_{i,j+1}$$

onde z_{in} é a capacidade existente na estação no local i no início do horizonte de planejamento. No caso da última oportunidade de expansão, $j=J$, o termo do lado direito da desigualdade é $y_{i,T}$, a vazão a tratar no último período do horizonte de planejamento.

As condições a serem impostas às linhas de transporte e às elevatórias podem escrever-se semelhantemente:

$$x_{io}^k + \sum_{n=1}^j x_{in}^k \geq \omega_{i,j+1}^k$$

$$v_{io}^k + \sum_{n=1}^j v_{in}^k \geq \omega_{i,j+1}^k$$

onde

x_{io}^k e v_{io}^k são as capacidades existentes da linha e da Estação elevatória no começo do período de planejamento.

5.4 Estratégia para Solução

A técnica de "Branch-and-bound" não tem regras fixas. No problema de otimização de sistema regional considerando a oportunidade de expansão de capacidade, o método empregado é essencialmente a Programação mista, em uma de suas variedades.

O primeiro passo é relaxar todas as variáveis, isto é, supor que todas possam ser contínuas e procurar, através de programação linear, qual a solução ótima. Isto pode ser obtido, mesmo para sistemas muito grandes, em apenas alguns segundos de computação.

O problema então é tomar uma variável binária de cada vez com o valor 0 ou 1 gerando-se então dois novos problemas de programação li-

near. Escolhe-se a melhor função objetiva resultante e passa-se a uma nova variável binária repetindo o processo.

O processo é esquematizado na ilustração 5.2 com um exemplo numérico.

Quadro 5.2

minimizar:

$$\sum_i \sum_j F_i (S_{ij} Z_{ij} + s_{ij} z_{ij}) + \dots \text{ (ETE s)}$$

$$\sum_i \sum_k \sum_l F_i (\nu_{ik} X_{ik} + \mu_{il} x_{il}) + \dots$$

(linhas de recalque e ou gravidade)

$$\sum_i \sum_k \sum_l F_i (M_{ik} V_{ik} + m_{il} v_{il}) + \dots$$

(elevatórias)

$$\sum_i \sum_t F_i (P_{it} Y_{it} + P_{it} d_t y_{it}) + \dots$$

(OMR das ETES)

$$\sum_i \sum_k \sum_l F_i (G_{it} W_{it} + g_{it} d_t w_{it}) + \dots$$

(OMR das Elevatórias)

sujeita à:

$$y_{it} = q_{it} + \sum_k^i \omega_{kt} - \sum_k^k \omega_{it}$$

(continuidade)

$$z_{io} + \sum_{n=1}^j z_{in} \geq y_{i,j+1}$$

(Capacidade das ETE em cada período)

$$x_{io}^k + \sum_{n=1}^j x_{in}^k \geq \omega_{i,j+1}^k$$

(Capacidade de transmissão das linhas)

$$v_{io}^k + \sum_{n=1}^j v_{in}^k \geq \omega_{i,j+1}^k$$

(Capacidade das Estações de bombeamento)

outras condições são necessárias para fixar o valor das variáveis binárias e fixar limites para a capacidade de cada unidade em cada local.

6. CONCLUSÕES

O presente relato é um resumo de grande número de pesquisa e trabalhos em andamento no meio técnico.

A aceitação da análise de sistemas como principal ferramenta de

trabalho para o planejamento tem encontrado dificuldade que deriva da natural resistência em adotar métodos que revolucionam estruturas tradicionais de pensamento e por exigir ferramentas de trabalho que só recentemente estão se tornando acessíveis à maioria dos técnicos.

A confiabilidade desses métodos crescerá na medida em que se estabeleçam modelos regionais para cada área e se realizem os trabalhos de base necessários, que em nossa opinião seriam:

a) Estudo dos modelos de qualidade e quantidade dos principais corpos de água a proteger.

b) Estudos das opções disponíveis para transporte e tratamento.

c) Estudo das funções de custo das instalações para a região e para a gama de vazões do sistema.

A quantidade de trabalho envolvida é de grande magnitude e exige um planejamento de estudos que infelizmente está entregue apenas ao entusiasmo dos poucos técnicos que se dedicam ao setor.

É preciso declarar ainda que a análise de sistemas oferecerá uma nova e imensa oportunidade de valorização para o trabalho do engenheiro.

Por outro lado, à medida que nossos conhecimentos crescerem, os modelos simples irão se modificando, incorporando novas ligações com os modelos de outros sistemas afins, levando em conta variáveis aleatórias que agora não podem ser admitidas nos modelos a não ser em alguns estudos de vanguarda.

Não se deverá admitir no futuro que as regiões, como as das nossas grandes cidades, não possuam um grupo de vanguarda para esses estudos e não possuam uma formulação desses modelos em contínuo aperfeiçoamento, para dar respostas adequadas às necessidades de controle e de economia global.

7. BIBLIOGRAFIA

1. R. A. DEININGER, S. Y. SU. Modeling Regional Waste Water Treatment Systems in water Research — Pergamon Press 1973, vol. 7.
2. R. A. DEININGER. Models for Environmental Pollution Control Ann Arbor Science publishers Inc. 1974.
3. R. Dorfman, H.D. Jacoby, H.A. Thomas Jr. Model for Managing Regional Water Quality.
4. Lauria, D.T. Regional Sewerage Planning by mixed integer programming National Science Foundation. April 1973, March 1975.