



**17º  
congresso  
brasileiro  
de engenharia  
sanitária  
e ambiental**

*Natal / RN  
19 a 23/09/93*

V.2  
TRABALHOS TÉCNICOS  
TOMO I



TURMA CENTRAL  
Saneamento Ambiental  
Ação de Saúde Pública

ANAIS DO 17º CONGRESSO  
BRASILEIRO DE ENGENHARIA  
SANITÁRIA E AMBIENTAL

Natal - RN, 19 a 23 de setembro de 1993

Vol. 2 - Trabalhos Técnicos - Tomo I

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte  
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

C759a  
Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Am-  
biental (17. : 1993 : Natal, RN)  
Anais / do 17. Congresso Brasileiro de Engenha-  
ria Sanitária e Ambiental, Vol. 2, tomo I ; promo-  
ção ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sani-  
tória e Ambiental ; realização ABES Seção Rio Gran-  
de do Norte. — Rio de Janeiro : ABES, 1993

Conteúdo: v.2 t.I. Trabalhos técnicos  
ISBN 85-7022-109-6

1. Engenharia ambiental - Brasil - Congressos.
2. Engenharia sanitária - Brasil - Congressos. I.  
Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Am-  
biental. II. Título.

93-0804

CDD - 628.06081  
CDU - 628:061.3(81)

OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA PARA PROJETOS  
DE FILTROS BIOLÓGICOS AERÓBIOS

Raphael Tobias Vasconcelos Barros        (\*)  
Fazal Hussain Chaudhry                        (\*\*)

## CURRÍCULO

- (\*) Engenharia Civil - EEUFG, 1982. Engenharia Sanitária EEUFG, 1983. Mestrado em Hidráulica/Saneamento-EESC/USP, 1990. Estudos sobre Desenvolvimento-IUED (Genebra) 1992. Projeto Nacional de Saneamento Rural (PNSR), Brasília, 1986/1989. Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Sanitária-UFMT, 1989/1990.
- (\*\*) Doutor (Colorado State University). Professor Titular da EESC/USP. Planejamento de Recursos Hídricos; otimização de sistemas.

## RESUMO

Foi realizado um estudo de otimização de projetos de filtros biológicos de tipo "acelco" (com recirculação do efluente, sem passar por sedimentação), visando ao tratamento de águas residuárias, a partir de inúmeras condições de entrada (capacidades e eficiências das estações). Foram consideradas diversas condições, quais sejam, diferentes tipos de despejos, diferentes cargas e temperaturas.

A partir do estudo de comportamento específico das variáveis e dos parâmetros intervenientes, e baseado em combinações oriundas dos valores otimizados de cada variável, puderam ser obtidas informações para a concepção de projetos, bem como considerações relativas à execução, operação e manutenção.

Baseados em levantamento de preços e em metodologia própria, refletindo situações concretas, foram avaliados projetos ótimos através de programação não-linear, onde a função objetivo era representada pelos custos de investimento e operação do sistema.

Os resultados obtidos permitiram que fossem tiradas conclusões acerca do dimensionamento dos sistemas e dos custos envolvidos. Ratificaram também a necessidade de estudos-piloto que permitam caracterizar, por meio de modelos matemáticos, os parâmetros relativo ao resíduo a ser tratado.

ENDERECO: (\*) Rua Goitacases, 201-aptº 1002  
30190-050 Belo Horizonte-MG

0853408

658

SYSNO	0853408
PROD	000692
ACERVO EESC	

## "OTIMIZAÇÃO ECONOMICA PARA PROJETOS DE FILTROS BIOLOGICOS AEROBIOS "

### INTRODUÇÃO

O presente estudo é um resumo da dissertação de mesmo nome, apresentada em junho de 1990 na EESC/USP, em S. Carlos, SP, para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

O trabalho original utiliza dois dos modelos de funcionamento (função tecnológica) dos filtros biológicos aeróbios (FBA) (a saber, o de Eckenfelder e o de Galler-Gotaas), com a mesma função objetivo e mesmas condições de entrada. Além de estudar cada modelo, faz uma comparação entre elas quanto a esgotos domésticos e industriais, em termos das variáveis de decisão, e de seus custos para eficiências de 70% e 90%, medidas em termos de remoção de DBO.

Por razões de espaço, aqui foi suprimida esta comparação, ficando somente a parte referente ao estudo do modelo de Eckenfelder, julgado mais completo, mas que permite uma avaliação do alcance e da validade da otimização para este tipo de sistema de tratamento. Quaisquer outras referências - inclusive sobre outros estudos de otimização de FBA - devem ser buscadas na dissertação original, obviamente mais completa e detalhada.

### 1 - DEFINIÇÕES

Os FBA são utilizados no tratamento secundário de despejos domésticos e industriais, têm grande flexibilidade e habilidade de recuperação de choques, propiciam altas remoções de DBO e de sólidos suspensos com baixos custos. As perdas de carga, as grandes áreas requeridas e a necessidade de remoção de sólidos sedimentáveis aparecem como desvantagens.

Mesmo parecendo simples, há um grande número de variáveis que afetam seu desempenho (comunidade biológica, a composição e as características dos despejos - sua tratabilidade -, a existência de pré ou pós-tratamento, as cargas orgânica e hidráulica, recirculação, ventilação, o teor de oxigênio dissolvido, temperatura, o meio de suporte, profundidade, perdas de carga, a produção de lodo, o tempo de contato, os requisitos de clarificação).

Os filtros biológicos aeróbios (ou percoladores) foram originados dos filtros intermitentes de areia, cujo mecanismo de ação era biológico (microrganismos podem metabolizar o substrato - matéria orgânica - presente nos despejos, com produção de energia para crescimento e manutenção da população existente). O termo 'filtro' é impróprio, uma vez que o leito (fixo, de material grosso e inerte, altamente permeável) serve de fato como suporte ao microrganismos - na maior parte facultativos - e os processos que ocorrem são de coagulação, flocação e/ou biodegradação da matéria orgânica.

Normalmente têm seção circular, e os despejos são lançados através de distribuidores rotativos ou de dosadores, continua ou intermitentemente. Um sistema de drenagem no fundo coleta o líquido tratado e sólidos que se desprendem do leito, e permite a circulação de ar. Parte do efluente final é recirculado, diluindo os despejos e mantendo taxas de aplicação. Há várias combinações para o processo, que funciona sempre com decantadores.

Seus principais componentes são suas estruturas (parede, laje, fundações), o distribuidor rotativo, os drenos (ver fig.1). Há vários modelos de remoção de substrato: entre os 'empíricos' estão o do NRC, do Alto-Mississippi, de Galler-Gotaas, da EPA; entre os 'teóricos' estão o de Velz, de Howland, de Eckenfelder, de Jank-Drynan e de Williamson-McCarty.

## 2 - OTIMIZAÇÃO

Num problema de otimização, deseja-se maximizar (extremar) a chamada função objetivo' (FO), determinando valores de certas variáveis ( de controle') para as quais se tem liberdade. Pode haver restrições devido a leis físicas, políticas, económicas. O enunciado

maximizar (ou minimizar): **FUNÇÃO OBJETIVO**  
 pela manipulação de: **VARIÁVEIS DE CONTROLE**  
 restrito a: **VÍNCULOS**

se torna matematicamente

max. (ou min.)  $F^*$  ( $x_1, x_2, x_3$ )  
 restrito a  $x_1, x_2, x_3$   
 $g^*$  ( $x_1, x_2, x_3$ ) = 0

onde  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  são variáveis de controle e  $g^*$  é a função que exprime o vínculo.

Os parâmetros e/ou as variáveis são ligados entre si por modelo matemáticos, que devem ser incorporadas aos problemas de programação não-linear como restrições de igualdade, representadas pela função tecnológica (que consiste de relações funcionais) ou por restrições de desigualdades, que estabelecem limites que garantem factibilidade física ou compatibilidades.

O projeto de instalações de tratamento de esgoto deve atender a dois critérios: a estação deve conseguir tratamento adequado e o projeto deve ser economicamente factível (ótimo em relação aos custos e à operação em dada situação).

A função objetivo representa os custos, tanto de construção quanto de operação, enquanto que as restrições se dão em relação às variáveis físicas. A função tecnológica é a equação de funcionamento do sistema, que rege a interrelação entre as variáveis, baseada em princípios básicos do processo.

Considerando uma estação de tratamento de esgotos como um modelo de fluxo de rede e cada tipo de unidade de operação e processo como um nó, o custo total da estação pode ser minimizado escolhendo-se as unidades de operação e os processos económicos para um caminho de fluxo necessário à obtenção de uma dada redução de DEO.

### 3 - METODOLOGIA

Ainda que parte de um sistema maior, o FBA (no caso, de tipo 'aceloo') em si já constitui uma unidade complexa, onde as alternativas de interação entre seus diversos componentes (não só com relação a custos) alteram o resultado final, medido em termos de eficiência de remoção de DBO.

### 3.1 - a função tecnológica (FT)

Foi adotado o modelo proposto por Eckenfelder, de maior aplicabilidade e abrangência que os demais, e onde se pode relacionar o raio  $R'$  às variáveis de decisão (número de filtros, fator de recirculação, profundidade). Explicitando a Eq:

$$R = \frac{\left( \frac{0,935 \cdot Q}{N \cdot \Pi} t \right)^{0,5} + \frac{L}{i} \frac{e}{1+FR}}{0,67} + 0,20$$

$$k ( 0,305 \cdot H )$$

onde

R = raio do filtro (m)  
Li = DBO aplicada no afluente ao filtro (mg/l)  
Le = DBO remanescente no efluente (mg/l)  
Qt = vazão (m<sup>3</sup>/d)  
N = número de filtros  
FR = taxa de recirculação  
k = constante  
H = profundidade do filtro (m)

Para anualização dos custos, foi adotada vida útil de 30 anos (concreto, aço, fundações, dreno, meio filtrante), de 20 anos (distribuidor rotativo, tubos, peças, comportas) e de 15 anos para as bombas. Com uma taxa de juros de 10% a.a., calculou-se o fator de reposição de capital, para cada caso.

3.2 - Cálculo para as parcelas componentes da função objetivo (preços em dólar)

Os custos foram quantificados considerando as quantidades relevantes e incorporando as técnicas de projeto cabíveis. Os detalhes desta quantificação constam da dissertação original. Exprimem-se aqui os custos apenas em forma funcional para indicar as variáveis de decisão (quais sejam, nº de filtros N, raio R, altura H, diâmetro de aproximação D1, diâmetro aumentado D2, diâmetro de recirculação D3) que os determinam. Supõe-se que a vazão de projeto Qt é conhecida.

3.2.A - custos de investimento

3.2.A.a - terrenos

O arranjo dos filtros prevê um sistema de recirculação independente, num terreno retangular e colocado de maneira radial com relação à caixa de distribuição de vazões (fig. 2). Funcionalmente o custo anualizado de terreno é dado por:

$$TERR = f1 (N, R)$$

3.2.A.b - caixa de distribuição de vazões

De seção circular, com chegada central e saídas simétricas. Considerando US\$ 90/m<sup>3</sup> de concreto e US\$ 83 /100 kg de aço / m<sup>3</sup> de concreto, tem-se o custo anualizado da caixa de distribuição como

$$CXDT = f2 (N, D1)$$

3.2.A.c - estrutura de concreto e quantidades de aço

Com alturas variando entre 1 e 3m e os raios entre 6 e 60m foram feitos cálculo estruturais para uma série de valores intermediários, de modo a se obter equações que representassem as solicitações resultantes de empuxo ativo. As paredes foram consideradas como tendo espessura constante de 20 cm. A espessura da laje (cogumelo) de fundo foi adotada como sendo igual a 22 cm. Desta modo, o custo anualizado da estrutura de concreto é expresso funcionalmente como

$$CONC = f3 (N, R, H)$$

Foram determinados os momentos fletores, os esforços de anel e as forças cortante nas paredes; na laje de fundo foram determinados os momentos fletores e verificadas a fissuração e a punção. Em muitos casos, os valores recomendados pelas normas eram superiores aos mínimos necessários, resultando num

superdimensionamento das estruturas. A equação que representa funcionalmente o custo do aço é

$$ASSO = f4 (N, R, H)$$

### 3.2.A.d - fundações

Foram adotadas estacas pré-moldadas, com diâmetro de 30 cm e resistência de 40 t, de custo elevado, mas que tornam o sistema mais independente do tipo de solo. O custo das fundações é funcionalmente expresso como

$$FUND = f5 (N, R, H)$$

### 3.2.A.e - meio filtrante

Foi adotada brita, de diâmetro = 75 mm. Seu custo é expresso por

$$MEIO = f6 (N, R, H)$$

### 3.2.A.f - distribuidores rotativos

Baseado em dados de fabricante, o custo é

$$DIST = f7 (N, R, Qt)$$

### 3.2.A.g - bombas

Escolhidas bombas de construção modular, de sucção simples, grande flexibilidade de operação e baixo custo de manutenção. Sua equação de custo é

$$BOMB = f8 (N, Qt)$$

### 3.2.A.h - drenos

$$DREN = f9 (N, R)$$

### 3.2.A.i - tubos e peças

Para cada unidade de filtro, há peças acessórias como tubos com flanges, curvas de 90°, tees, válvulas de retenção, registro de gaveta e comporta manual. Foram ajustadas funções relacionando os custos com diâmetros (entre 0,1 e 1,0m) da tubulação de ferro fundido, a partir de dados de tabelas de preço. Assim, obtiveram-se os seguintes custos:

#### 3.2.A.i.i - tubulação de aproximação (diâmetro D1)

Compreende o trecho da caixa de distribuição de vazões até a junção com a tubulação de recirculação. O custo anualizado incluindo registros, curvas de 90° e comporta, é expresso funcionalmente:

$$TAPR = f10 (N, R, H, D1)$$

#### 3.2.A.i.ii - tubulação aumentada (diâmetro D2)

Recebe as vazões de aproximação e de recirculação. O custo anualizado, incluindo custos de tees e curvas de 90°, é

$$TAUM = f11 (N, R, H, D2)$$

#### 3.2.A.i.iii - tubulação de recirculação (diâmetro D3)

O custo anualizado desta tubulação, com curvas, registros, válvulas, é

$$TREC = f12 (N, R, D3)$$

### 3.2.B - Custos de operação e manutenção

#### 3.2.B.a - energia elétrica

O custo anual pode ser expresso como

$$ENEL = f13 (N, H, FR)$$

#### 3.2.B.b - mão-de-obra

Supõe-se que um operador tem capacidade para cuidar de 2 filtros. Assim, o custo anual da mão-de-obra é

$$MAOD = f14 (N)$$

### 3.3 - a função objetivo (FO $\longrightarrow$ FC)

A função objetivo é a somatória de todas as parcelas anteriores, isto é, o custo total anualizado de um FBA.

$$FC = TERR + CXDT + CONC + ASSO + FUND + MEIO + DIST + BOMB + DREN + TAPR + TAUM + TREC + ENEL + MAOD$$

$$= f (N, R, FR, H, D1, D2, D3)$$

### 3.4 - a otimização

A explicitação da função custo permitiu identificar 7 variáveis de decisão (número de filtros N, raio R, altura H, fator de recirculação FR, diâmetro de aproximação D1, diâmetro aumentado D2, diâmetro de recirculação D3).

Sendo separável a função tecnológica, e de modo a evitar que fosse mais uma restrição, pôde-se eliminar 'R' como variável de decisão através de sua substituição direta. As variáveis de decisão foram limitadas dentro das conveniências tecnológicas e operacionais. Suas restrições foram:

- a)  $2 < n_0$  de filtros  $< 10$  (valor mínimo que garanta segurança e flexibilidade operacional, e valor máximo para evitar concentração exagerada de vazões);
- b)  $1,0 < \text{profundidade} < 4,0$  m (valor mínimo que garante suficiente tempo de contato entre microrganismos e esgotos e distribua adequadamente as vazões, e valor máximo para garantir boas condições de ventilação - manter a aerobiose);
- c)  $1 < \text{taxa de recirculação} < 4$  (valor mínimo que dilua cargas orgânicas, equalize cargas hidráulicas e semeie o filtro com microrganismos aclimatados, e valor máximo economicamente recomendável);
- 1)  $0,1 < \text{diâmetros} < 1,0$  m (faixa de diâmetros comercialmente disponíveis).

Assim, o problema de otimização pôde ser enunciado como:

$$\text{min } FC (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$$

$$\begin{array}{ll} \text{sujeito a} & \begin{array}{ll} 2 < x_1 < 10 & (x_1 \text{ é o número de filtros}) \\ 1 < x_2 < 4 & (x_2 \text{ é a profundidade}) \\ 1 < x_3 < 4 & (x_3 \text{ é a taxa de recirculação}) \\ 0,1 < x_4 < 1,0 & (x_4 \text{ é o diâm. de aproximação}) \\ 0,1 < x_5 < 1,0 & (x_5 \text{ é o diâm. aumentado}) \\ 0,1 < x_6 < 1,0 & (x_6 \text{ é o diâm. de recirculação}) \end{array} \end{array}$$

A otimização do problema acima foi obtida utilizando a subrotina E04JAF, da biblioteca NAG, indicada para quando as restrições são limites simples e as equações dos componentes de custo são não-lineares.

Das instruções da subrotina foi desenvolvido um programa em FORTRAN onde eram explicitadas as variáveis de decisão, seus limites superiores e inferiores, a função tecnológica (explicitada em função de 'R'), os componentes da função custo e as variáveis auxiliares.

Como dados de entrada foram fornecidos a capacidade da estação (vazão em m<sup>3</sup>/d), a DBO do afluente e do efluente (em mg/l) e a natureza dos despejos (domésticos ou industriais). Também foram dados valores de solução tentativa para as variáveis de decisão, para inicialização da busca do projeto de custo mínimo.

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSAO

Os dados de entrada foram a capacidade da estação (de 2.000 a 125.000 m<sup>3</sup>/d, para esgotos domésticos, e de 2.000 a 35.000 m<sup>3</sup>/d para esgotos industriais), a DBO do afluente (mantida em 300 mg/l para ambos tipos de despejos), e a eficiência de remoção, com valores de 30, 50, 70, 80, 90 e 95%.

Usando-se o modelo de Eckenfelder como função tecnológica, foram feitos três estudos: para esgotos domésticos com temperaturas de 20 e 30 °C e com esgotos industriais. Com o modelo de Galler-Gotaas, considerou-se o tratamento de despejos industriais (DBO afluente de 300 mg/l), e despejos domésticos com DBO afluente de 100 mg/l e 300 mg/l.

O projeto foi definido basicamente pelas 6 variáveis de decisão (a FT estava enunciada a partir de R). Não foi feita restrição quanto ao limite das taxas hidráulicas, tomando-se para análise valores que eram obtidos das computações. Na prática, valores máximos devem ser observados, dependendo de cada situação.

Foram obtidos os custos de operação (soma dos gastos de energia elétrica e de mão-de-obra), o custo total dos filtros (que é a própria função custo) e o custo por m<sup>3</sup> tratado (custo total anualizado dividido pelo volume tratado num ano).

##### 4.1 - Projetos para esgoto doméstico (modelo Eckenfelder)

Os projetos de custo mínimo são mostrados na fig. 3, para estações de diversas capacidades e eficiências, obtidos para tratar esgotos domésticos a 20 °C ( $K = 2,85$ ;  $m = 0,67$ ;  $n = 0,50$ ) e a 30 °C ( $K = 4,02$ ; ' $m$ ' e ' $n$ ' não se alteram). ' $K$ ' foi modificado para incorporar o efeito de temperatura, usando-se o fator  $O_t$ , definido por Howland.

Observa-se que a variação do nº de filtros é linear, em cada eficiência, indicando que a vazão de cada filtro é a mesma, independentemente do tamanho da estação. A altura é aproximadamente constante, para cada eficiência (também independe da vazão. A taxa de recirculação é decrescente, porquanto maiores eficiências exigem maior nº de filtros.

Nota-se que o raio e os diâmetros das tubulações são crescentes e tendem a um valor constante quando a vazão aumenta. Para maiores eficiências, o projeto ótimo apresenta menores taxas hidráulicas (devido à divisão da vazão total entre os diversos filtros) e menores custos relativos de operação e manutenção (maior número de filtros requer altos investimentos).

Os custos por m<sup>3</sup> tratado são bastante elevados para pequenas vazões, mas diminuem quando a vazão aumenta: a partir de 20.000 m<sup>3</sup>/d, o custo/m<sup>3</sup> independe da capacidade da estação, e é determinado pela necessidade de maiores eficiências. Nota-se também o efeito da temperatura no valor das variáveis de decisão e dos custos.

#### 4.2 - Projetos para efluentes líquidos industriais (modelo de Eckenfelder)

A fig. 4 mostra resultados em que foram usados, para os parâmetros, valores apresentados por Hamada, a partir de um estudo de efluentes de indústrias de conservas alimentícias (vazões menores que 35.000 m<sup>3</sup>/d,  $K = 6,025$ ;  $m = -0,757$  e  $n = 1,066$ ). Estão também representados, para comparação, valores obtidos pelo mesmo modelo para parâmetros médios de esgotos domésticos, naquelas vazões.

Percebe-se que o número de filtros para despejos industriais é maior que para esgotos domésticos, e os resultados apresentam, para o raio, para os diâmetros D1, D2 e D3, comportamento semelhante ao caso anterior. Os diâmetros são menores que os dos esgotos domésticos devido ao maior nº de filtros.

Os projetos ótimos requerem a altura no seu limite superior (4m) e a taxa de recirculação no limite inferior (1). As taxas hidráulicas e os custos de operação são inferiores àqueles referentes a esgotos domésticos e exibem o mesmo comportamento.

Os custos para estações de esgotos industriais, ainda que apresentando comportamento similar aos de esgotos domésticos, foram sempre superiores a eles, evidenciando o fato de que esgotos industriais são compostos de material mais homogêneo. Também aqui a eficiência exerce efeito significativo no valor das variáveis e do custo.

#### 4.3 - Comparação entre experimentos nas diversas condições (ambos os modelos de Eckenfelder e Galler-Gotaas, despejos domésticos e industriais, temperaturas de 20 °C e 30 °C).

Os custos por m<sup>3</sup> tratado - em eficiências de 70 e 90% - para as situações anteriormente descritas estão representados pelas curvas da fig. 5, cujo comportamento é bem aproximado. Tais custos são grandes para pequenas estações, diminuem e ficam independentes das vazões.

Tratando esgotos domésticos com eficiência de 70% ambas as formulações mostram resultados próximos. Os custos por m<sup>3</sup> tratado, para efluentes industriais, nos dois modelos, são pelo menos duas vezes superiores aos custos de despejos domésticos que, por sua vez, admitem grandes estações, já que os custos não apresentam elevação significativa.

Percebe-se que maiores eficiências requerem menores estações devido ao custo exponencialmente crescente com relação ao tamanho da estação. Tal situação não se verifica claramente para esgotos domésticos estudados pelo modelo Eckenfelder. Nota-se que o efeito do modelo sobre o projeto não é tão significativo para menores eficiências, mas o é para as grandes eficiências.

Deve-se ressaltar o fato dos proponentes dos modelos terem utilizados dados experimentais diferentes. Conjetura-se que o efeito da escolha de um modelo ou de outro sobre os custos de tratamento não se exprimirá tão drasticamente se forem interpretados dados para um resíduo específico, dentro da formulação de cada modelo.

Nas fig. 6 e 7 estão representados os custos totais minimizados dos FBA, em eficiências de 70 e 90%, para as diversas situações estudadas. Ambos os modelos mostraram custos próximos quando a DBO do afluente e a temperatura são as mesmas. Maiores temperaturas e menores cargas têm menores custos de tratamento.

### 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia adotada, considerando os principais componentes do sistema, permitiu que se divisassem aqueles mais relevantes aos estudos de otimização, tendo sido obtidos valores que proporcionam custos mínimos (projetos ótimos). Mostrou-se

viável a explicitação das funções tecnológicas e das funções exprimindo os custos dos diversos componentes. A função objetivo, definida como somatório dos custos elementares de investimento e operação, indicou 6 variáveis de decisão (nº de filtros, a altura, a taxa de recirculação, o diâmetro de aproximação, o diâmetro de recirculação e o diâmetro aumentado). O raio do filtro e outras variáveis de projeto podem ser determinadas a partir das funções tecnológicas.

Em vista da forma não-linear da função objetivo, concluiu-se que a busca de soluções ótimas deveria ser realizada pelo método de programação compatível, em vez das linearizações tentadas na literatura. Os resultados obtidos a partir das otimizações repetidas para diversos conjuntos de parâmetros são apresentados em forma gráfica e analisados para expor relevância de parâmetros de projeto, tais como temperaturas, tipos e concentrações de despejos, capacidades das estações.

Ficou evidenciada a importância de se proceder à caracterização dos despejos, adequando os parâmetros à sua natureza através de estudos-piloto, uma vez que tais parâmetros alteram significativamente as dimensões dos projetos. Foi verificado que, quanto maior a taxa de carregamento orgânico, maior deve ser a altura do filtro. Em compensação, a elevação de temperatura exerce um efeito razoável no sentido de reduzir as dimensões e os custos de FBA.

Maiores eficiências e vazões exigem menores taxas de recirculação e maior nº de filtros, que operarão com maiores taxas hidráulicas. Tendo em vista a constatação do aumento dos custos relativos à operação com altas eficiências (e/ou altas vazões, no caso dos esgotos domésticos), os filtros de grandes dimensões se apresentam como a alternativa mais econômica para estes casos, se se dispõem de recursos suficientes para investimento.

Demonstrou-se por meio deste estudo que, através do objetivo de minimização de custos, é possível reunir aspectos tecnológicos e sócio-económicos de tratamento de resíduos para dimensionamento dos sistemas. O processo de otimização se encarrega de compatibilizar as diversas exigências de modo a obter a alternativa mais econômica. A importância do presente ensaio reside na utilização de modelos matemáticos para explicitar as consequências econômicas de parâmetros de projeto, tais como carga orgânica e temperatura. Os consistentes resultados obtidos com o estudo permitem melhor interpretar a interrelação entre as variáveis de projeto e validam procedimentos conceituais, ajustando-os a situações específicas por força da função tecnológica e das imposições econômicas.

Deve-se ressaltar que os resultados dizem respeito aos arranjos de projeto aqui adotados. Entretanto, a formulação do problema admite que conceitos alternativos sejam incorporados. Enfatiza-se a necessidade de confronto entre os dados experimentais de laboratório e modelos matemáticos diversos para definição de parâmetros que sirvam de base aos estudos econômicos.

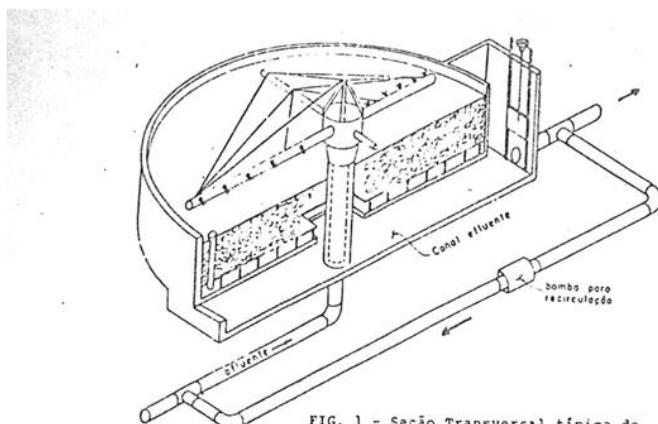


FIG. 1 - Seção Transversal típica de F.B.A.

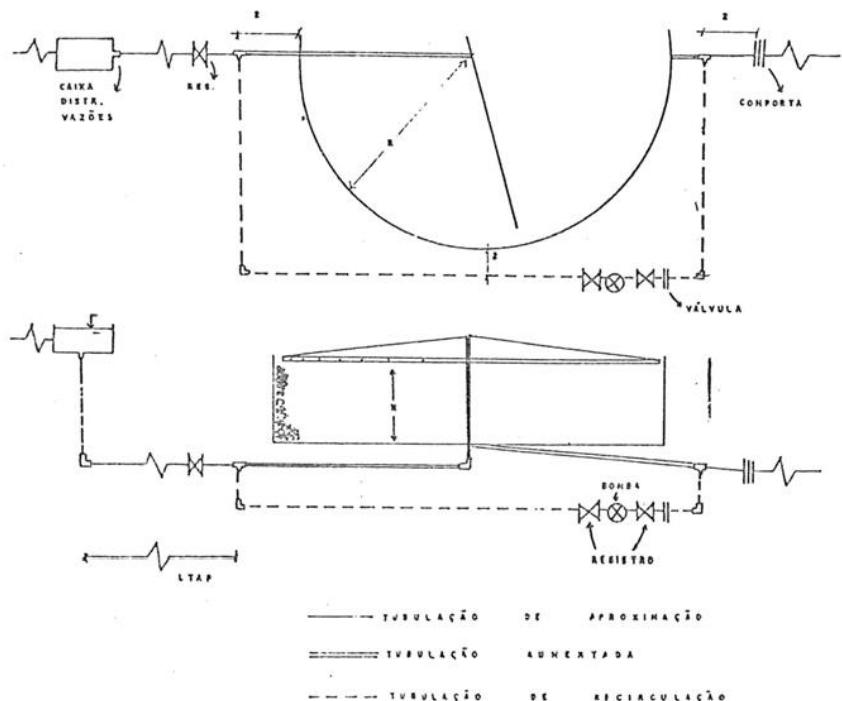


FIG. 2 - Disposição do F.B.A. e das tubulações de aproximação, aumentada e de recirculação.

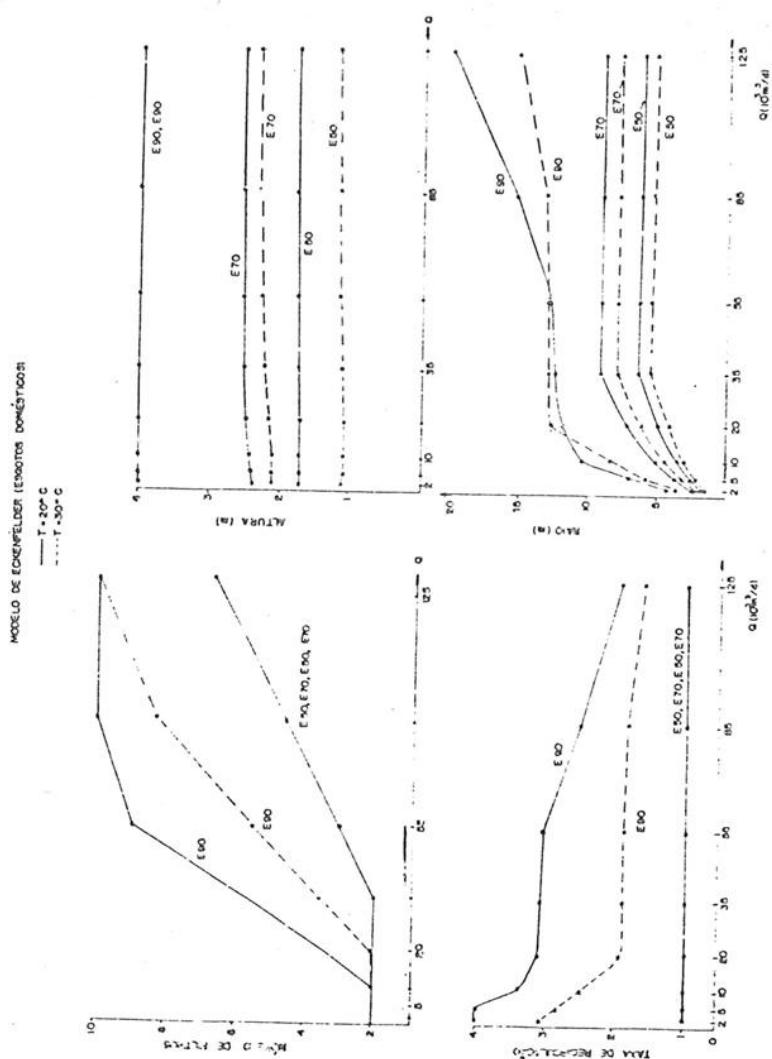
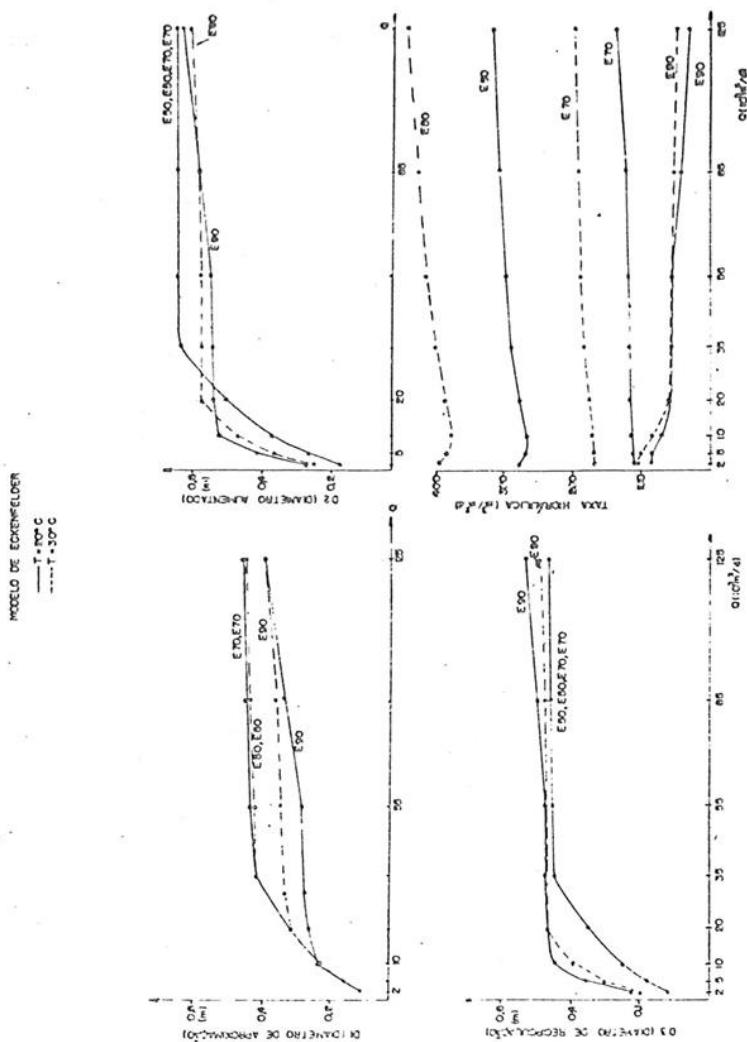
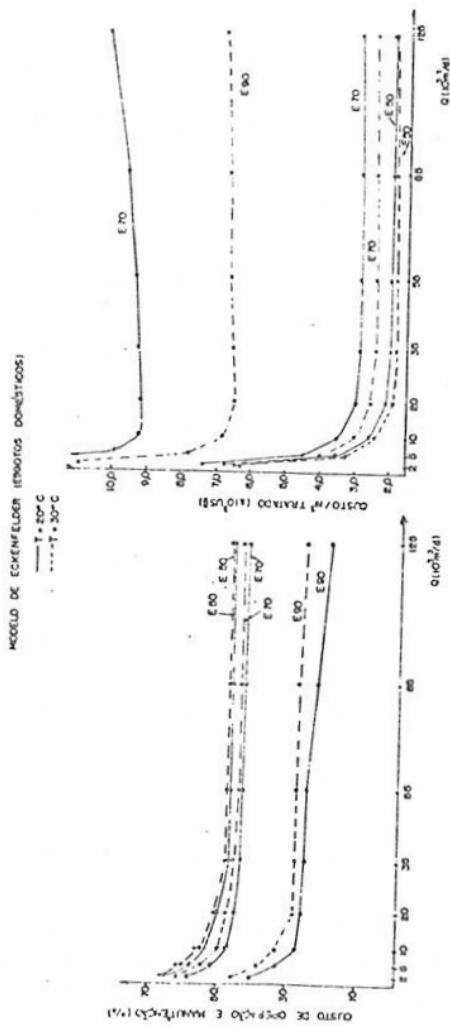


FIG. 3 - Resultados da otimização dos projetos de F.B.A. através do modelo de Eckenfelder para  $T = 20^{\circ}\text{C}$  e  $T = 30^{\circ}\text{C}$  (esgotos domésticos).

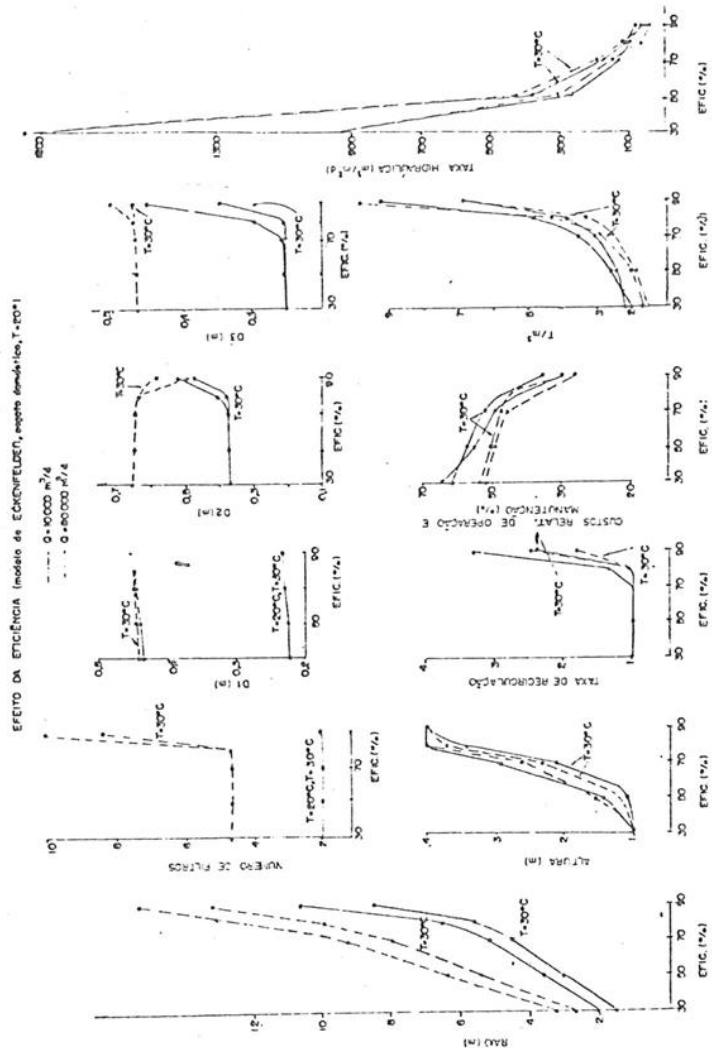
Continuação da figura 3



Continuação da figura 3



Continuação da figura 3



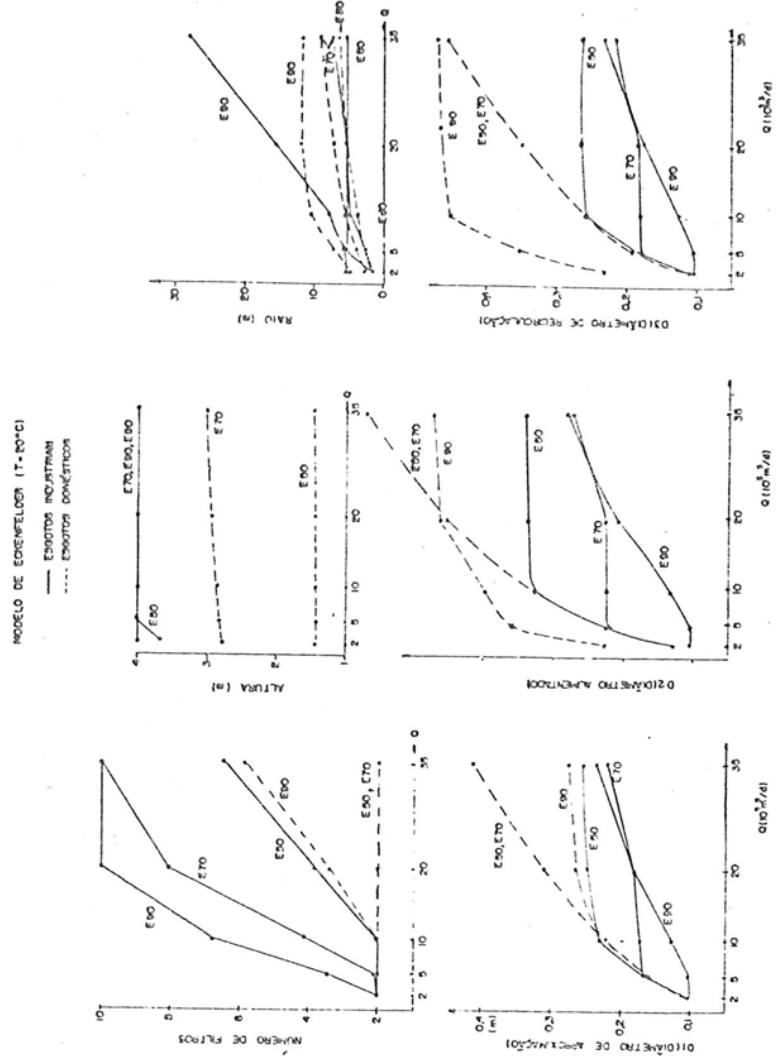
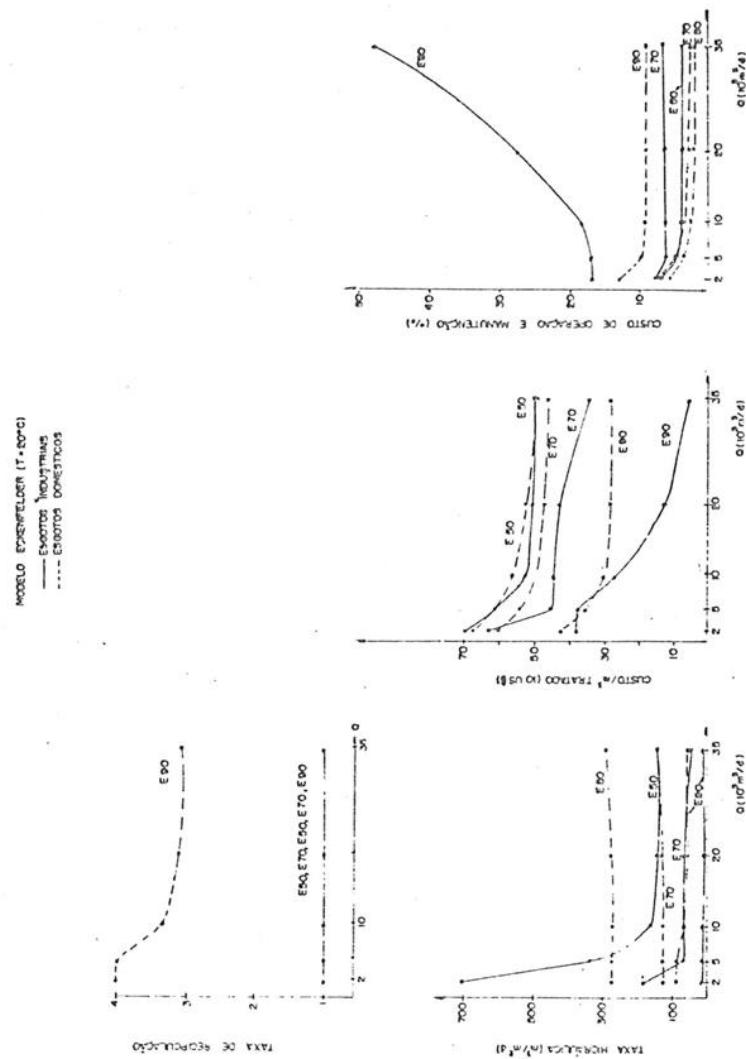


FIG. 4 - Resultados da otimização dos projetos de F.B.A. através do modelo de Eckenfelder para esgotos domésticos e efluentes líquidos industriais (T = 20°C).

Continuação da figura 4



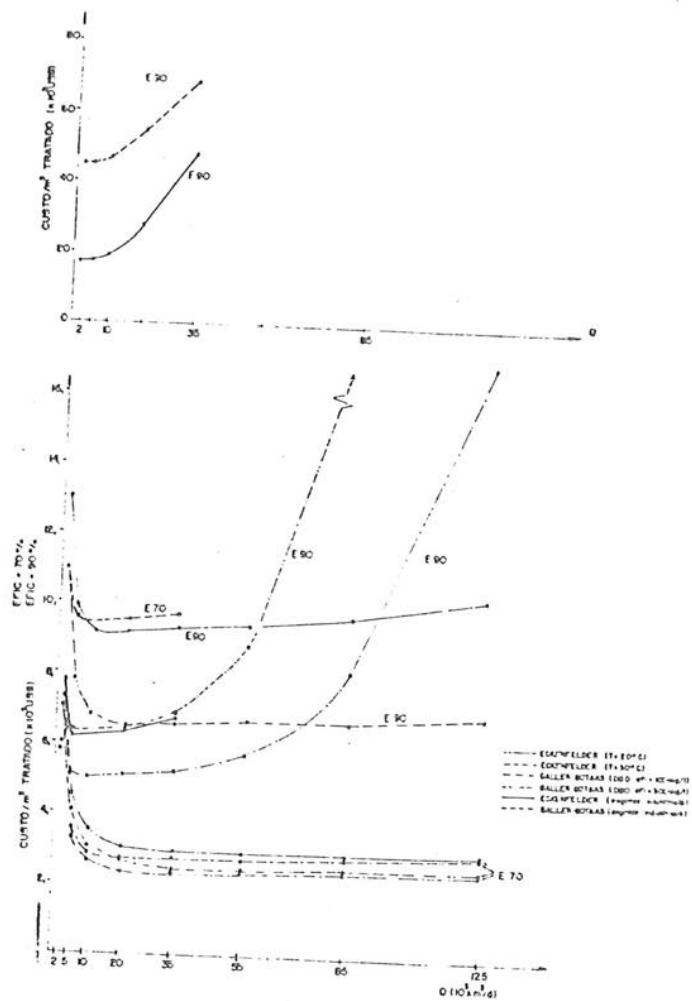


FIG. 5 - Custo por m<sup>3</sup> tratado de esgotos para eficiências de 70% e 90%.

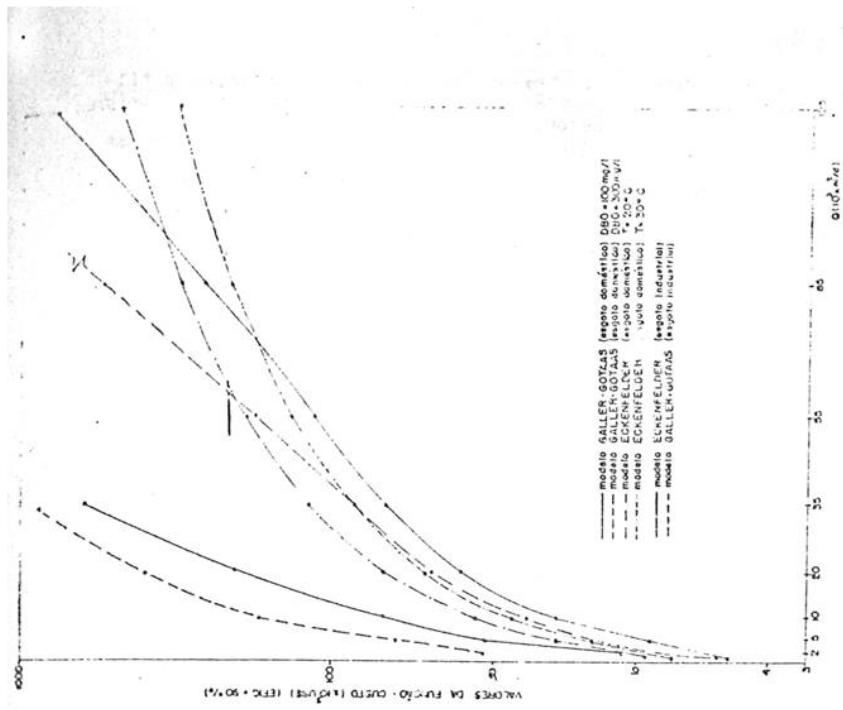
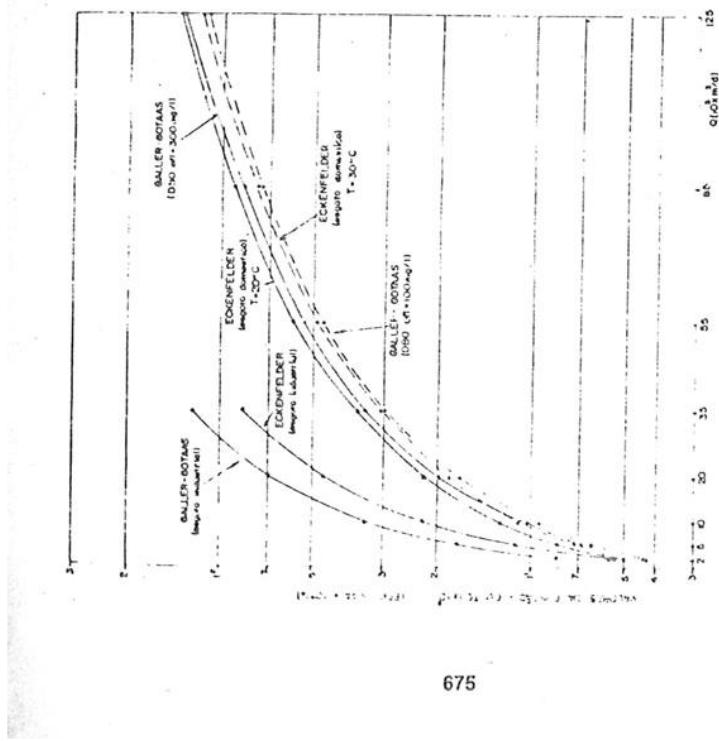


FIG. 6 - Resultados da função-custo para eficiência de  $k\%.$



675

FIG. 7 - Resultados da função-custo para eficiência do

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - BAKER, J. & GRAVES, Q. "Recent approaches for trickling filter design", Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE, nq SA 1, fev/68, pp. 65
- 2 - CONVERSE, A. "Otimização", trad. Altair Rios Neto, EDUSP, SP, 1977, 165 pp.
- 3 - ECKENFELDER, W. & O'CONNOR, D. "Biological Waste Treatment", Pergamon Press, 1961, 221 pp.
- 4 - ECKENFELDER, W. "Trickling filter design and performance", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, vol.87, nq SA 4, jul/61, p. 33
- 5 - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), Process Design Manual, "Wastewater treatment facilities for seweried small communities", cap. 9 - Fixed films systems - , out/1977, 49 pp.
- 6 - GALLER, W. & GOTTAAS, H. "Analysis of biological filter variables". Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, vol. 90, nq SA 6, dez/64, pp. 59
- 7 - \_\_\_\_\_, "Optimization analysis for biological filter design", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, vol. 92, nq SA 1, fev/66, pp. 163
- 8 - \_\_\_\_\_, "Design optimization for biological filter models", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, vol. 99 nq EE 6, dez/73, pp. 831
- 9 - GERMAIN, J. "Economical treatment of domestic waste by plastic medium trickling filters", Journal WPCF, vol. 38, nq 2 fev/64, pp. 192
- 10 - HIMMELBLAU, D. "Applied non-linear programming", Ed. McGraw-Hill, Nova Iorque, 1972, 498 pp.
- 11 - MANUAL OF PRACTICE nq 8 - Wastewater Treatment Plant Design, Water Pollution Control Federation, Lancaster, EUA, 1977
- 12 - NAG - Numerical Algorithm Group - "Minimizing or Maximizing a Function - EO4JAF", in Fortran Manual Library, vol.3, 1981
- 13 - SOBRINHO, P. "Tratamento de esgotos comésticos através de filtros biológicos de alta taxa - comparação experimental de meios de suporte de biomassa", Revista DAE, nq 135, dez/83 pp. 58