



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CAMPUS DE SÃO CARLOS

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

XXII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

PORTO RICO, 9 - 15 DE SETEMBRO DE 1.990

TRABALHO : FILTRO BIOLÓGICO DE BAIXA TAXA PARA REMOÇÃO DE MATÉRIA
ORGÂNICA PRESENTE EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE UMA INDÚS-
TRIA DE CONSERVAS ALIMENTÍCIAS.

AUTOR (ES) : JORGE HAMADA
JOSÉ ROBERTO CAMPOS

0806547

SYSNO	0806547
PROD	003507
ACERVO EESC	

AUTORES : Jorge Hamada: Professor Assistente junto à
Universidade Estadual Julio de Mesquita -
UNESP - Campus de Bauru e aluno do Progra-
ma de Doutorado da Escola de Engenharia
de São Carlos, Universidade de São Paulo -
EESC-USP

José Roberto Campos: Professor Associado,
docente do programa de Pós-graduação da
EESC-USP.

ENDEREÇO : Av. Dr. Carlos Botelho nº 1465
EESC-USP

CEP.: 13.560 - São Carlos, SP, Brasil

Fone: (0162) 71-2213

São Carlos, SP

Brasil

1990

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados da operação de uma instalação piloto de filtro biológico aeróbio de baixa taxa alimentada com efluentes líquidos de uma indústria de conservas alimentícias vegetais, que tem o tomate como sua principal matéria prima.

Apresenta-se também um estudo comparativo do emprego dos modelos matemáticos propostos por Velz, NRC, Eckenfelder e Galler e Gotaas.

No estudo realizado, obteve-se a melhor correlação para o Modelo de Eckenfelder com coeficientes ajustados. Também obteve-se boa correlação para o Modelo de NRC, adaptado aos dados disponíveis.

Neste estudo foi obtida remoção de DBO_5 acima de 90% para carga hidráulica aplicada de 0,99 e $1,92 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ e valores de 83% para carga hidráulica de $5,93 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

Os resultados comprovam que o filtro biológico aeróbio de baixa taxa aplica-se ao tratamento de efluentes de indústrias de conservas que têm no tomate uma matéria prima predominante.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained from the operation without recirculation of pilot low rate trickling filter for organic loading remove of wastewater from a canned food industry that uses tomato as its most important raw material, as well as comparative study with mathematic models usually employed for designs. The models are the following: Velz, NRC, Eckenfelder and Galler and Gotaas. In the comparative study, a better correlation of obtained data for Eckenfelder Model with adjusted coefficient was observed. A good correlation was also obtained with NRC model adapted to the available data.

In this study, removals of BODs above 90% for hydraulic loading of 0.99 and 1.92 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ and values 83% hydraulic loading of 5.93 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ were observed. This work showed the applicability of the trickling filter in the treatment of wastewater from food industry that use especially tomato and effluent BODs up to 700 mg/l .

FILTRO BIOLÓGICO DE BAIXA TAXA PARA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE UMA INDÚSTRIA DE CONSERVAS ALIMENTÍCIAS

* Jorge Hamada

** José Roberto Campos

1. DEFINIÇÃO

Os filtros biológicos são utilizados para tratamento de águas residuárias há várias décadas e têm sido tema frequente para estudos e pesquisa, principalmente em países europeus, por produzirem efluente bastante estabilizado, chegando, em muitos casos, a nitrificação completa. No Brasil, onde existem condições climáticas favoráveis, a utilização de filtro biológico é relativamente rara como opção de tratamento. Tal fato decorreu, entre outros motivos, provavelmente, por influência e disponibilidade muito grande de bibliografia especializada em todos os aspectos e suas modificações, ao passo que relativamente poucos trabalhos são publicados a respeito dos aspectos teóricos e práticos relacionados com o uso de filtro biológico.

Esse tipo de reator aeróbio apresenta muitos aspectos positivos e merece ser considerado como uma alternativa interessante quando se procura a solução mais adequada para tratamento de um efluente líquido, não devendo ser descartado por simples preconceito, conforme ocorre em muitos casos.

Filtro biológico pode ser definido como um reator biológico aeróbio destinado à oxidação biológica da matéria orgânica dissolvida ou em suspensão, contida, geralmente, em efluentes de decantadores ou de outros sistemas primários de tratamento de águas residuárias^(*).

(*) Professor Assistente na UNESP - Campus de Bauru, Mestre em Hidráulica e Saneamento e Doutorando pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

(**) Professor Livre Docente do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Basicamente, o filtro biológico consta de um leito de pedras ou outro material inerte, de formas e tamanhos adequados, que permitem a livre circulação do ar, sobre o qual dispositivos de distribuição lançam o despejo líquido a tratar.

Enquanto o líquido percola através do leito, matéria orgânica e outros nutrientes, além do Oxigênio, são transferidos para a película biológica aderida à superfície do meio suporte, onde ocorre assimilação por parte dos microrganismos existentes, enquanto que produtos intermediários e dióxido de Carbono são transferidos para fora da película. O Oxigênio difundido para o interior da película biológica é consumido pela respiração microbiana.

2. OBJETIVOS

Para desenvolvimento do presente trabalho, foi construída e operada uma instalação-piloto nas dependências da Indústria de Conservas alimentícias Hero - São Carlos, São Paulo, cujos objetivos principais envolvendo o filtro biológico de baixa taxa são os seguintes:

- Verificação da influência das variações de taxa de aplicação hidráulica na eficiência de remoção de matéria orgânica;
- Verificação da influência das variações de carga orgânica aplicadas ao filtro biológico;
- Avaliação e conhecimento das dificuldades operacionais da unidade; e
- Comparação e aplicabilidade dos valores de eficiência obtidos nos ensaios com valores estimados por modelos matemáticos usualmente empregados em projetos.

3. COMPONENTES BASICOS DO FILTRO BIOLÓGICO

O filtro biológico é constituído, basicamente, de um

sistema distribuidor, geralmente rotativo, do leito percolador e do sistema de drenagem e suporte. O distribuidor rotativo promove aplicações intermitentes ou contínuas sobre toda superfície do leito e pode ser impulsionado pela ação dinâmica do líquido descarregado ou por um motor elétrico.

O leito percolador é o suporte para os microrganismos e deve possuir, grande área superficial por unidade de volume, ser econômico, durável e apresentar grande volume de vazios. Os elementos mais comuns que podem ser utilizados como leito percolador são seixos rolados, pedra britada, escórias e, mais sofisticadamente, madeira modular ou plásticos modulares ou anulares de elevada área superficial e grande volume de vazios. As pedras e escórias podem apresentar tamanhos variando desde 25 mm até 120 mm com área superficial por unidade de volume entre 55 e 60 m^2/m^3 e porcentual de vazios entre 40 e 60%. Por outro lado o plástico modular pode apresentar uma área superficial de até 120 m^2/m^3 com porcentual de vazios próximo de 97%, além de apresentar uma relação massa/volume de no máximo 100 kg/m^3 contra 900 ou 1450 kg/m^3 de outros materiais.

O sistema de drenagem deve permitir a entrada de ar e suportar o leito percolador, sendo composto pela soleira, canal de coleta e drenos constituídos por blocos ranhurados dotados de canais internos.

4. CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS BIOLÓGICOS

Os filtros biológicos são classificados basicamente pela taxa de aplicação hidráulica ou pela carga orgânica aplicada como filtros de baixa taxa, taxa intermediária, alta taxa e taxa super alta conforme mostra a Tabela 1(2).

Os filtros biológicos de baixa taxa, geralmente, são operados sem recirculação e intermitentemente através de um sifão dosador ou de bombas, apresentam efluente nitrificado e raramente ultrapassam 2,5 m de altura. Os demais filtros biológicos operam continuamente e com recirculação, podendo alcançar 12 m de altura

Tabela 1. - Características Básicas para Classificação dos Filtros Biológicos^(a).

ITENS	Taxa de Aplicação Hidráulica (m ³ /m ² /dia)	Carga Orgânica volumétrica (kg de DBO ₅ /m ³ /dia)
Baixa Taxa	1 - 4	0,05 - 0,32
Taxa Interme- diária	4 - 10	0,24 - 0,48
Alta Taxa	10 - 40	0,32 - 1,00
Taxa Super Alta	40 - 200	0,80 - 6,00

no caso de taxas super altas, o que é possível e necessário devido ao pequeno tempo de detenção hidráulico proporcionado por módulos plásticos ou similares, que devem constituir o leito percolador.

5. VENTILAÇÃO DO LEITO PERCOLADOR

Os principais fatores responsáveis pelo fluxo interno de ar em filtros descobertos são as correntes naturais internas e o efeito dos ventos. As correntes naturais são comandadas pela diferença de temperatura do ar ambiente e do ar presente nos vazios do leito percolador, que adquire temperatura próxima a do líquido existente. Se o líquido é mais quente que o ar ambiente, o fluxo será ascendente e se for mais frio o fluxo será descendente, que é a situação mais desejável devido a maior demanda de oxigênio nas camadas próximas a superfície do leito. A corrente de ar, que surge pela carga de pressão resultante da diferença de temperatura pode ser estimada pela Equação 1⁽²⁾.

$$D = 0,353.(1/T_c - 1/T_n)^z \quad (1)$$

onde, D: Corrente de Ar medida como pressão (cm de col.de água)

z: Altura do Filtro biológico (cm)

Tc: Temperatura menor em graus kelvin
Tn: Temperatura maior em graus kelvin

6. OXIGENAÇÃO

A descrição do fluxo de líquido e ar através de um filtro biológico e das reações de biodegradação é extremamente difícil, por isso é necessário fazer um número razoável de aproximações. Inicialmente, deve-se observar que o fluxo não é contínuo, devido a utilização generalizada de distribuidores rotativos e, ainda, o fluxo tende a seguir caminhos preferenciais, tendo portanto seções não homogêneas.

As correntes naturais geralmente são suficientes para oxigenar o leito adequadamente, contudo a ventilação induzida pode elevar a taxa de transferência de oxigênio para o líquido que percola melhorando o desempenho do filtro biológico na remoção de matéria orgânica ou mesmo na nitrificação. Uma estimativa da taxa máxima de transferência de oxigênio pode ser feita utilizando o modelo de Higbe, descrito por Schroeder e coautores⁽⁴⁾:

$$Nm = -2.[D'/(t_c \cdot \pi)]^{1/2} \cdot (C_s - C_v) \quad (2)$$

onde,

Nm: Fluxo médio de Oxigênio (mg/cm²/s)

D': Difusividade do Oxigênio na água (cm²/s)

Cs: Concentração de Saturação do Oxigênio (mg/l)

Cv: Concentração de Oxigênio no líquido (mg/l)

t_c: Tempo de Contato (s)

π: Valor de π (3,1416...)

Trabalhos recentes têm abordado o traçado de microperfis de Oxigênio em películas biológicas, como o estudo realizado por Kuenen e coautores⁽⁵⁾, onde avaliou-se também a camada limite líquida de difusão, cuja espessura variou de 100 a 500 μm (micrometros), sobre a película biológica, além de se mostrar como

maior limitante no transporte de Oxigênio para os microrganismos.

7. TRANSFERÊNCIA DE MASSA AO NÍVEL DA PELÍCULA BIOLÓGICA

O estudo da transferência de massa ao nível da película biológica pode ser melhor compreendido utilizando-se modelos cinéticos nas condições de equilíbrio.

Devem ser consideradas três condições de perfil de concentração de substrato que penetra na película biológica. A primeira condição aborda a película biológica espessa, onde o perfil de concentrações tende assintoticamente para zero ou um valor limite de biodegradabilidade e apresenta um valor máximo de fluxo de substrato nas proximidades da interface película biológica/líquido. A segunda condição, que pode ser considerada extrema, é o caso da película totalmente penetrada pelo substrato, com concentração invariável. A terceira condição admite casos intermediários entre os primeiros, em que o perfil de concentração não apresenta tendência assintótica a um determinado valor, o que leva a considerar a película biológica como fina, ou pouco espessa.

Considerando-se a película espessa pode-se definir uma equação diferencial com base na Lei de Fick e na relação de Monod dentro de um balanço de massa. A equação resultante é a seguinte^(*):

$$\frac{d^2(S_c)}{dz^2} = \frac{k \cdot S_c \cdot X_c}{D_c \cdot (S_c + K_s)} \quad (3)$$

onde:

- S_c : Concentração de Substrato em Determinado ponto da Película Biológica (mg/l);
- k : Taxa de Utilização Máxima de substrato (dia⁻¹);
- X_c : Concentração de Bactérias dentro da Película Biológica, considerada constante (mg/l);
- D_c : Coeficiente de Difusão dentro da Película Biológica (cm²/dia); e

K_s : Coeficiente numericamente igual à concentração de substrato correspondente a metade da máxima velocidade específica de crescimento de microrganismos (mg/l).

A equação (3) é diferencial não linear de segunda ordem e pode ser resolvida analiticamente para dois casos limites $S_c \gg K_s$ e $S_c \ll K_s$, ou utilizando métodos numéricos para valores de S_c intermediários. Para os dois primeiros casos e as seguintes condições de contorno:

$$S_c = S_c \text{ em } z = 0$$

$$dS_c/dz = 0 \text{ em } z = L_e$$

obtem-se o seguinte valor para o fluxo de substrato na superfície da película biológica com $S_s \gg K_s$:

$$J_o = A_c \cdot k \cdot X_c \cdot L_e \quad (4)$$

e para $S_s \ll K_s$, é válida a seguinte expressão para o fluxo de substrato na superfície da película biológica:

$$J_o = A_c \cdot (D_c \cdot k \cdot X_c / K_s)^{1/2} \cdot S_s \quad (5)$$

onde:

- S_s : concentração de substrato na superfície da película biológica;
- L_e : profundidade da película biológica onde S_c é mínima.
- A_c : área superficial de película biológica.

Para determinação do fluxo de substrato em películas biológicas pouco espessas deve-se utilizar recursos computacionais que são operados com relativa facilidade para as condições de equilíbrio. Trabalhos como os desenvolvidos por Rittmann e MacCarty⁽⁶⁾⁽⁷⁾ utilizam-se dos parâmetros adimensionalizados de fluxo de substrato, concentração de substrato e espessura da

película biológica para aplicação do método das diferenças finitas como modo de resolução das equações envolvidas.

As equações de fluxo tanto na camada limite (camada estagnante de fluido), como na superfície da película biológica podem ser incluídas no balanço de massa do filtro biológico para resultarem em modelos matemáticos, que devidamente ajustados, permitirão sua aplicação em projetos.

Como exemplo, considerando-se o esquema apresentado na Figura 1, e o balanço de massa respectivo para $K_s \gg S_s$, obtém a expressão:

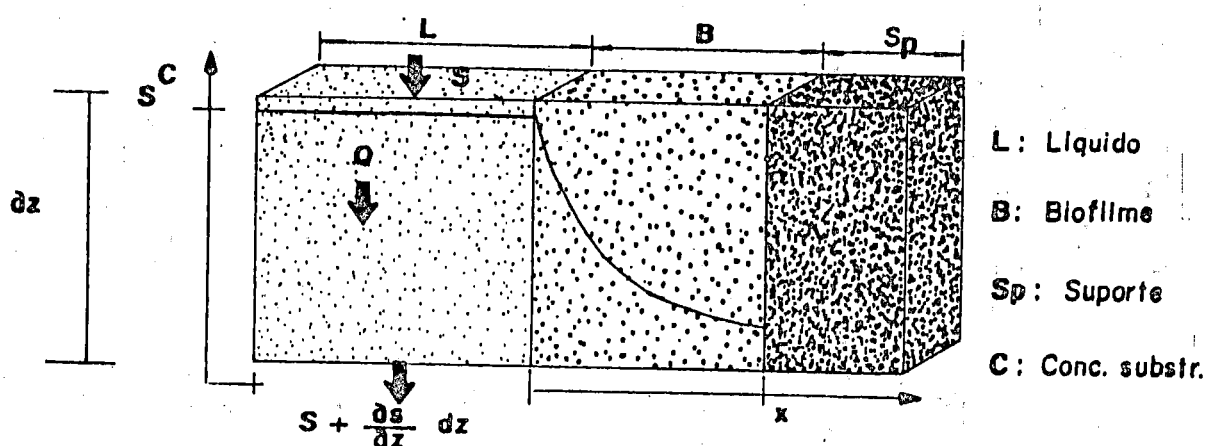


Figura 1 - Representação esquemática para análise de transferência de massa em filtros biológicos

$$\frac{\partial S}{\partial t} dV = Q \cdot S - Q \cdot \left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) + dZ \cdot [-S_a \cdot A \cdot S_s \cdot (D_c \cdot k \cdot X_c / K_s)^{1/2}] \quad (6)$$

onde

Q: vazão;

S: concentração de substrato na superfície da película biológica;

Z: profundidade do filtro biológico;

Sa: área superficial de película biológica por unidade de volume do reator; e

A: área de seção transversal do filtro biológico.

e o termo $dZ \cdot S_a \cdot A$ equivale à área superficial de película biológica, A_c por elemento de altura ($A_c = \int A \cdot S_a \cdot dZ$).

Para as condições de equilíbrio a Equação 6 resulta em:

$$Q \, dS/dZ = - S_a \cdot A \cdot S_s \cdot (D_c \cdot k \cdot X_c / K_s)^{1/2} \quad (7)$$

Integrando a expressão entre os limites S_o e S_e e 0 e Z, obtém-se:

$$S_e/S_o = e^{[-(D_c \cdot k \cdot X_c / K_s)^{1/2} \cdot S_a \cdot Z \cdot A / Q]} \quad (8)$$

O termo $(D_c \cdot k \cdot X_c / K_s)^{1/2}$, pode ser expresso como sendo uma constante K^* , que pode ser determinada experimentalmente. Essa equação é a mesma que a de Eckenfelder apresentada por Metcalf & Eddy⁽⁸⁾ sendo expressa com os termos $m = 1$ e $n = 1$.

8. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS EM PROJETOS DE FILTROS BIOLÓGICOS

Muitos modelos matemáticos teóricos e empíricos têm sido propostos para descrever o processo de remoção de matéria orgânica em filtros biológicos. Dentre esses modelos, destacam-se historicamente os seguintes: Velz⁽⁹⁾, Howland⁽⁹⁾, National Research Council⁽¹⁰⁾, Eckenfelder⁽¹¹⁾ e Galler e Gotaas⁽¹²⁾ entre outros. Obviamente são modelos desenvolvidos à alguns anos ou mesmo em décadas passadas, porém continuam sendo utilizados pela facilidade de emprego em projetos e por representarem adequadamente o processo de remoção de matéria orgânica.

A carga orgânica de um despejo líquido, que percola pelo filtro biológico, sofre um processo de transformação pela oxidação biológica, floculação e sedimentação. A cinética de remoção dessa carga orgânica, medida como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), é bem representada por uma equação de primeira ordem e pode ser expressa por:

$$dS/dt = - k \cdot S \quad (9)$$

onde, S : Concentração de matéria orgânica como DBO (mg/l)
 t : Tempo (s)
 k : constante de proporcionalidade (s^{-1})

Embora a DBO indique aproximadamente a concentração da matéria orgânica degradável do afluente e do efluente, não mostra o que ocorre realmente dentro do filtro biológico, através de variáveis físicas. O primeiro a tentar mostrar teoricamente o fenômeno foi Velz⁽⁸⁾, que postulou o seguinte:

$$S_e/S_o = e^{-k' \cdot Z} \quad (10)$$

onde, k' : constante de proporcionalidade (m^{-1})
 S_e : DBO do efluente (mg/l)
 S_o : DBO do afluente (mg/l)
 Z : Profundidade do filtro biológico (m)

Posteriormente, Howland⁽⁹⁾, propôs que a taxa de remoção de DBO é função do tempo de contato (t_c)

$$S_e/S_o = e^{-k'' \cdot t_c} \quad (11)$$

com $t_c = c \cdot Z / (q \cdot n)$ (12)
em que k'' , c e n : constantes empíricas

q : Taxa de aplicação hidráulica ($m^3/m^2/dia$)

Howland estabeleceu um fator corretivo, K_t , para o efeito da variação de temperatura sobre a taxa de reação:

$$K_t = 1,035^{(T-20)} \quad (13)$$

em que T = Temperatura real ($^{\circ}C$)

assim a equação resultante pode ser expressa por:

$$S_e/S_o = [-c' \cdot K_t \cdot Z / (q^n)] \quad (14)$$

onde $c' = k'' \cdot c$

Eckenfelder⁽¹¹⁾ considerou o decréscimo da massa de microrganismos ativos da película biológica (X_a) de acordo com a seguinte expressão:

$$X_a = c'' \cdot 1/Z^m \quad (15)$$

em que, c'' : constante de proporcionalidade, que correlacionada à constante c e combinada às equações (11), (12) e (15) resulta em:

$$S_e/S_o = (-K' \cdot Z^{1-m}) / q^n \quad (16)$$

O termo Z^{1-m} pode ser escrito como $Z \cdot (1/Z)^m$, que por sua vez pode ser igualado à $K^* \cdot Z \cdot S_a^m$, resultando na expressão:

$$S_e/S_o = (K^* \cdot S_a^m \cdot Z) / q^n \quad (17)$$

que é a expressão de Eckenfelder descrita por Metcalf & Eddy⁽²⁾ e aplicada em projetos. As equações (16) e (17) pressupõe que todos os compostos orgânicos são removidos com a mesma taxa, porém isto não ocorre, pois existem compostos mais fáceis de serem assimilados. Desta forma a equação (16) foi modificada para descrever a remoção global, correlacionando-se melhor com dados existentes:

$$S_e/S_o = (1 + K'' \cdot Z^{1-m} / q^n)^{-1} \quad (18)$$

da mesma maneira a equação (14) pode ser escrita como:

$$S_e/S_o = [1 + K \cdot S_a^m \cdot Z \cdot (A/Q)^n]^{-1} \quad (19)$$

onde

- k : $k'' \cdot k^* =$ Constante obtida experimentalmente (m/dia).
- S_a : Área superficial por unidade de volume do leito percolador (m^2/m^3)
- A : Área de seção transversal do filtro biológico (m^2)
- Q : Vazão aplicada ao filtro (m^3/dia)
- m : Constante empírica
- q : Q/A

Os valores de k , m , e n podem ser determinados por análise de regressão linear múltipla, utilizando-se parâmetros obtidos preferencialmente de instalação piloto. Eckenfelder⁽¹¹⁾ determinou valores médios para esses coeficientes utilizando dados de filtros biológicos com leito de pedras, aplicados ao tratamento de esgotos domésticos, sendo estes $k=2,5$, $m=0,33$ e $n=0,50$.

Quando se utiliza recirculação, o afluente é diluído pela vazão de recirculação e dessa forma o parâmetro S_o é expresso por:

$$S_o = (S_i + R \cdot S_e) / (R + 1) \quad (20)$$

onde

- S_i : DBOs real do afluente (mg/l)
- $R = Q_r/Q$: Relação entre a vazão de recirculação (Q_r) e a vazão real afluente

Um dos primeiros modelos empíricos foi desenvolvido pelo National Research Council⁽¹⁰⁾, através de dados obtidos em instalações militares de tratamento de esgoto durante a segunda guerra mundial.

$$E = \{1 + C' \cdot [U/(V \cdot F)]^{b'}\}^{-1} \quad (21)$$

onde

- E : Eficiência do filtro biológico ($1-S_e/S_o$)
- U : Carga orgânica afluente (lb DBOs/dia)

V: Volume do filtro (1.000.ft³)

F: Fator de recirculação

b' = 0,50 e C' = 0,561 para esgotos domésticos

o fator de recirculação é definido por:

$$F = \frac{1 + R}{1 + (1-p).R^2} \quad (22)$$

onde

p: Fração biodegradável da DBO₅

R: Qr/Q

Galler e Gotaas⁽¹²⁾ desenvolveram através de simples regressão linear múltipla um modelo com base nas seguintes variáveis independentes: razão de recirculação, temperatura, vazão afluyente, profundidade, carga orgânica e raio do filtro biológico. O estudo baseou-se em extensivos dados experimentais de diversos filtros biológicos em escala real e piloto existentes em diferentes países, sendo que o afluyente, embora predominantemente de esgotos domésticos, apresentava-se extremamente heterogêneo.

$$S_e = \frac{G.Q.(S_o + R.S_e)^{1,19}}{(1+R)^{0,70} \cdot (1+Z)^{0,67} \cdot T^{0,25}} \quad (23)$$

onde

$$G = \frac{0,464 \cdot (43,560/T)^{0,13}}{p^{0,20} \cdot T^{0,15}} \quad (24)$$

Q: Vazão afluyente (mgd)

R: Razão de recirculação

r: Raio de filtro (ft)

Se e So em mg/l

T: Temperatura do afluyente (°C)

9. ASPECTOS BIOLÓGICOS

A comunidade biológica consiste primariamente de bactérias aeróbias, facultativas e anaeróbias, fungos, algas e protozoários. Além desses, vermes, larvas de insetos e moluscos estão presentes.

A natureza da flora bacteriana é função da natureza do despejo, da carga orgânica, da taxa de aplicação hidráulica e da profundidade. As bactérias aeróbias e facultativas são predominantes e têm o papel primário de decompor a matéria orgânica. Em camadas inferiores de filtros biológicos de baixa taxa e taxa intermediária, estão presentes as bactérias nitrificantes.

Os fungos, também são responsáveis pela eventual degradação da matéria orgânica, concorrendo com as bactérias, contudo sua presença normalmente está associada a baixas temperaturas, a valores baixos de pH, a presença de águas residuárias industriais e outros fatores nutricionais⁽¹³⁾. Embora sejam úteis o controle de fungos é frequentemente desejável para impedir a colmatção do leito, uma vez que formam uma massa mais volumosa que a bacteriana para oxidar a mesma quantidade de matéria orgânica. Por outro lado sua presença é desejável em filtros de taxas de aplicação hidráulica muito elevadas, uma vez que podem formar uma rede suporte para melhorar a retenção da película biológica.

A fauna protozoária é mais rica que em lodos ativados e além destes outros organismos ceifadores como vermes oligoquetos, insetos e suas larvas, moluscos e ácaros devem ser considerados de grande importância no controle da película biológica, principalmente em filtros de baixa taxa.

10. MATERIAIS E MÉTODOS

A instalação-piloto de filtro biológico foi montada nas dependências da indústria de conservas alimentícias Hero, em São Carlos - SP. A principal matéria prima processada pela indústria é o tomate (80%), seguida pela goiaba (10%), milho (5%) e outros como morango, pêssego, figo, abacaxi, Jabuticaba, ameixa, laranja e massas (5%). A Figura 2 mostra esquematicamente o sistema montado a partir do decantador primário da indústria.

O filtro biológico constituiu-se de seção transversal circular com diâmetro de 0,57 m e leito de pedregulhos com tamanhos variando entre 4,0 e 8,0 cm a partir da superfície, correspondendo a um peso específico médio de 1.350 kgf/m^3 e área superficial estimada em $60 \text{ m}^2/\text{m}^3$. O leito, com 2,0 m de profundidade, apresentava tomadas de amostras intermediárias a cada 0,50 m.

As amostras foram coletadas semanalmente de todas os pontos de coleta, sendo estas decantadas previamente, com excessão do afluente, para análise de DBOs, além de outros parâmetros. As 5 fases distintas de operação, corresponderam às taxas médias de aplicação hidráulica de 1,0; 2,0; 3,8; 6,0 e 8,8 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

11. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3 e 4 mostram respectivamente as variações de DBOs e a eficiência na remoção da mesma para as diversas profundidades do filtro biológico, e diferentes taxas de aplicação hidráulica. A DBOs do despejo industrial apresentou variações quantitativas e qualitativas da matéria prima processada, que em geral são dependentes sazonais.

A adaptação do filtro biológico frente as variações horárias e diárias da carga orgânica afluente foi bastante eficiente, mostrando que para as condições de operação estudadas não foi requisito fundamental a inclusão de um tanque para equalização qualitativa do despejo.

Somente uma condição extrema de carga orgânica favoreceu

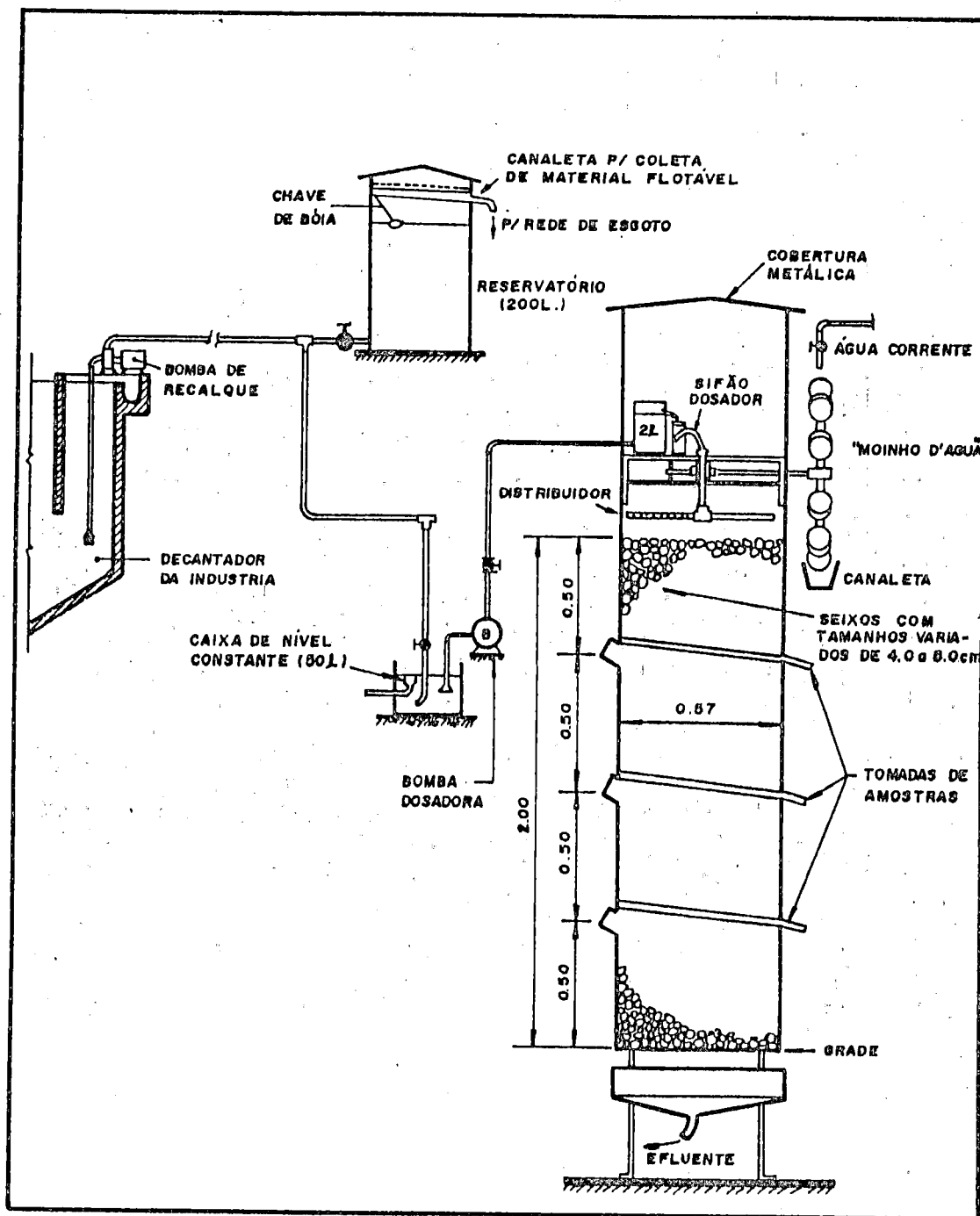


Figura 2 - Representação esquemática da instalação-piloto do filtro biológico de baixa taxa.

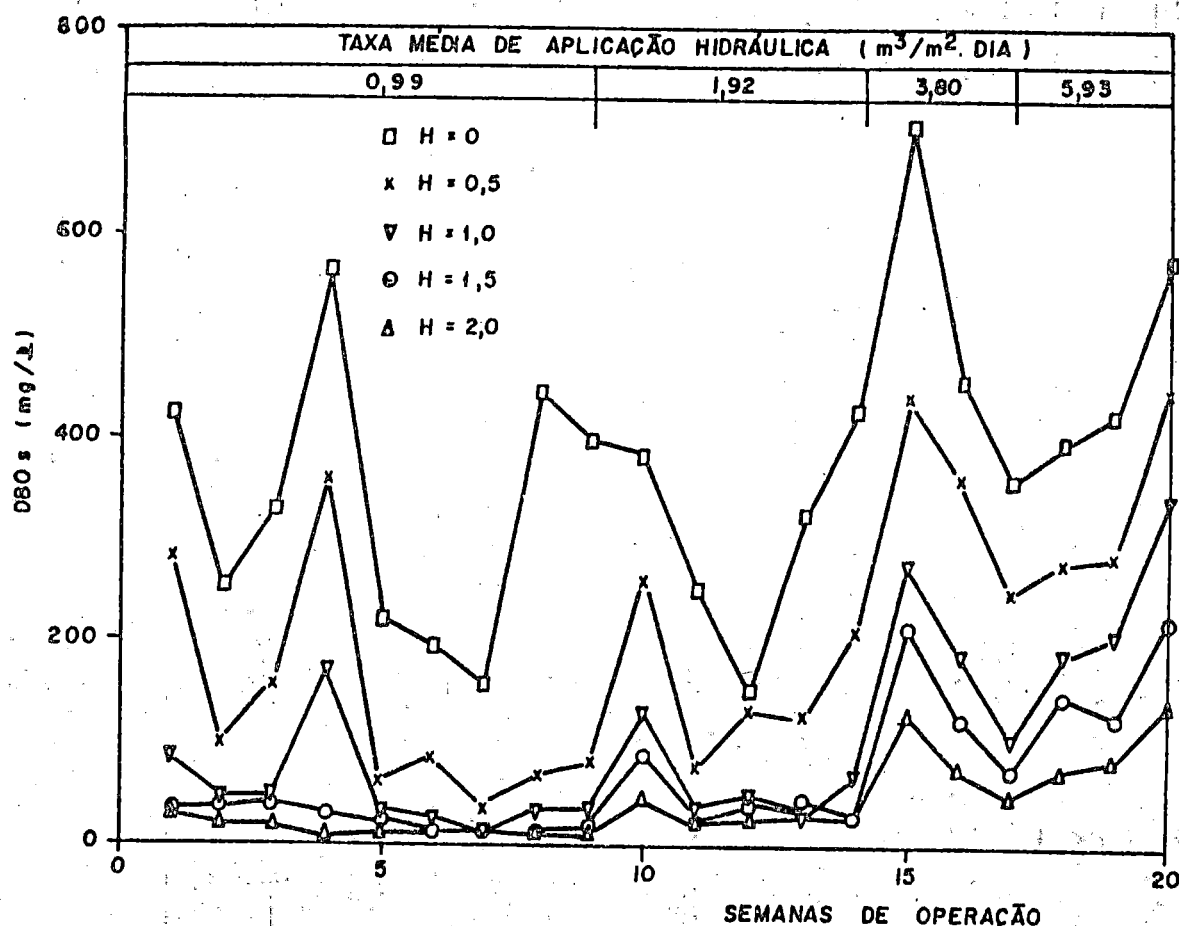


Figura 3 - Variações de DBOs para diversas profundidades durante os períodos de operação contínua.

o desequilíbrio operacional, sob o ponto de vista ecológico do filtro, sendo esta, consequência provável de um choque de carga nos momentos iniciais de adaptação da taxa de aplicação hidráulica média de $3.8 m^3/m^2 \cdot dia$, quando o sistema recebeu parte de uma descarga de fundo do decantador industrial por um período de 24 horas, tendo a DBOs ultrapassado o valor de $1000 mg/l$. O choque de carga propiciou o desenvolvimento excessivo de vermes anelídeos e uma queda significativa da eficiência do filtro biológico. O controle adequado, com paralização do sistema por 24 horas e posterior aplicação de taxa hidráulica elevada efetivou o arraste intenso de quase toda a comunidade de vermes presentes. A taxa de

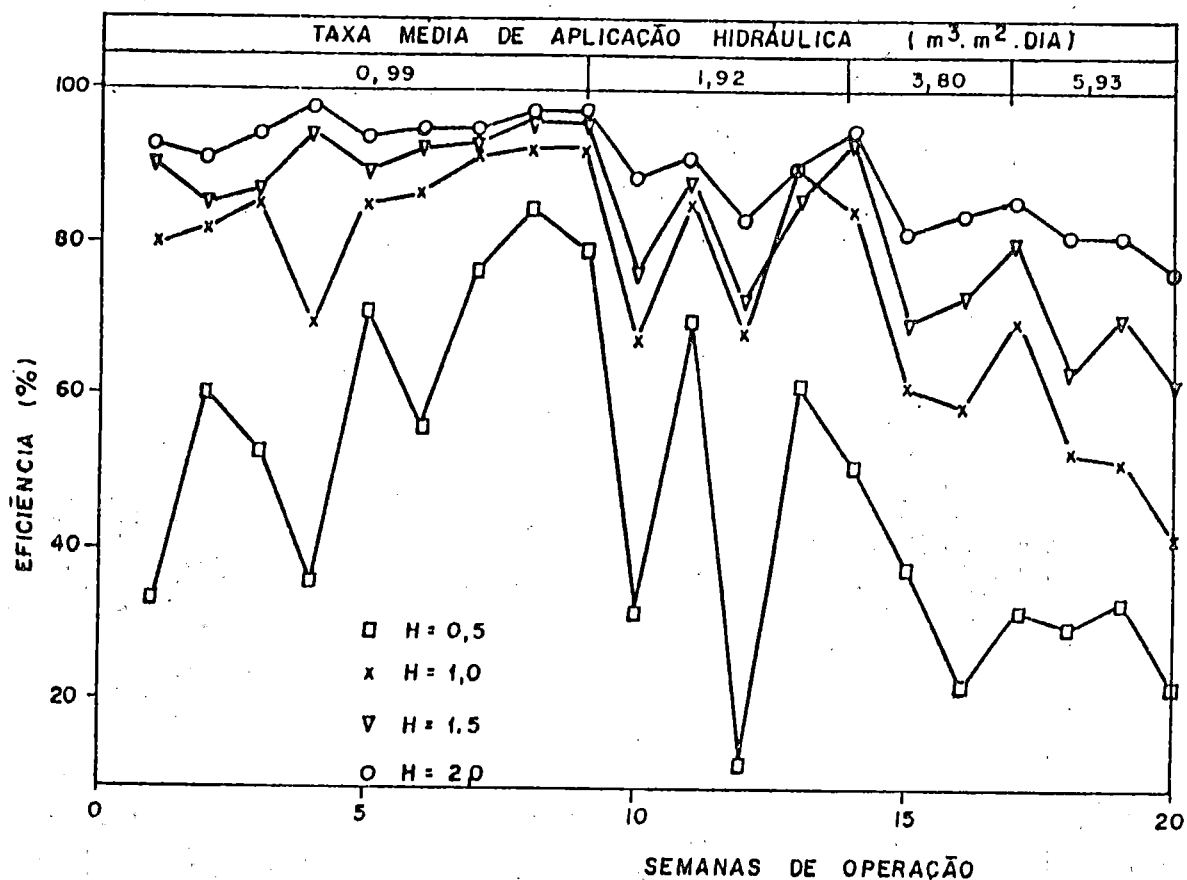


Figura 4 - Variações da eficiência na remoção de DBOs para diversas profundidades durante os períodos de operação contínua.

crescimento bacteriano, muito maior que a dos vermes anelídeos, definiu o reequilíbrio do sistema, que em poucos dias apresentou valores de eficiência próximos daqueles obtidos para o regime permanente.

O desempenho do filtro em termos de carga orgânica efetiva, medida como kgDBOs/dia, pode ser observado na Figura 5. A carga orgânica aplicada para as duas taxas iniciais, se comparada as demais são desproporcionais às taxas hidráulicas aplicadas. Isto se deve aos valores de DBOs elevados, coincidentes com as taxas hidráulicas maiores. Os valores de DBOs média observada para as taxas hidráulicas médias de 0,99, 1,94, 3,80 e 5,93 m³/m²/dia, foram respectivamente 334,2, 309,6, 508,7 e 464,7 mg/l.

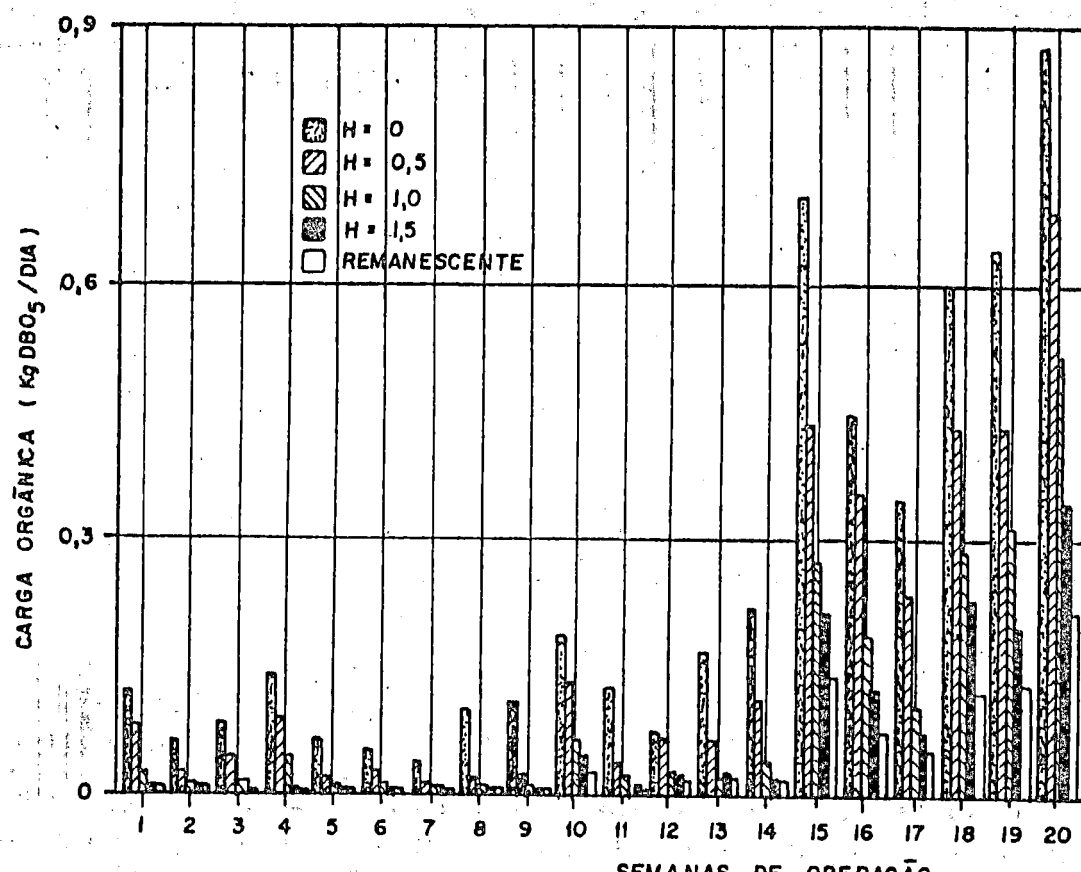


Figura 5 - Desempenho do filtro biológico em função da carga orgânica aplicada durante os períodos de operação contínua para as diversas profundidades.

Outro parâmetro de interesse para avaliar o desempenho do filtro biológico é a carga orgânica volumétrica, ou seja, carga orgânica aplicada por unidade de volume do leito percolador medida em termos de $\text{kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$, como mostra a Figura 6. A carga orgânica aplicada a cada segmento de leito percolador é remanescente do segmento anterior, medida em relação ao volume restante de leito. O efluente final neste caso foi medido com base no volume total, pois é remanescente de todo o leito.

O desempenho médio do filtro biológico em termos de DBOs, em função das taxas de aplicação hidráulicas pode ser observado na Figura 7. O aumento da taxa de aplicação e hidráulica e consequentemente da carga orgânica média faz supor uma cinética de remoção com ordem tendendo a zero, admitindo-se que o tempo de detenção seja diretamente proporcional a profundidade. Essa

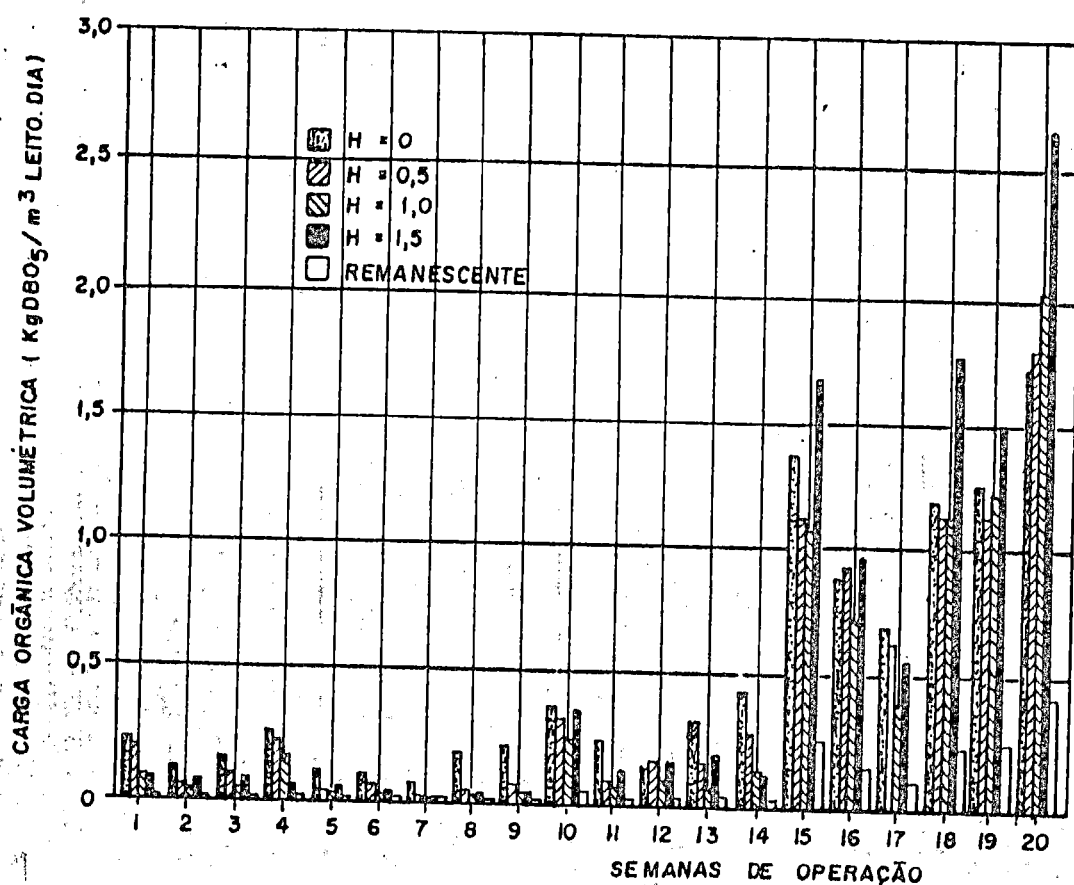


Figura 6 - Desempenho do filtro biológico em função da carga orgânica volumétrica aplicada durante os períodos de operação contínua para diversas profundidades.

tendência é melhor observada na Figura 8, que apresenta valores médios de eficiência em função da profundidade e das taxas médias de aplicação hidráulica. Este fato implica diretamente que para as cargas orgânicas elevadas, associadas a taxas de aplicação hidráulicas maiores, como as presentes neste estudo, resultam na relativa independência da concentração inicial de substrato. Isto se deve ao melhor aproveitamento das camadas mais profundas do leito, que para taxas menores apresentaram-se subutilizadas. Essa característica pode ser bem observada na Figura 9, que mostra a porcentagem de remoção de DBOs de cada segmento de 0,50 m de leito em relação a carga total média aplicada para as diversas taxas de aplicação hidráulica. Os valores apresentados na Figura 9 são basicamente as tangentes obtidas nos segmentos da Figura 7, as quais variam relativamente pouco nos vários segmentos para a taxa

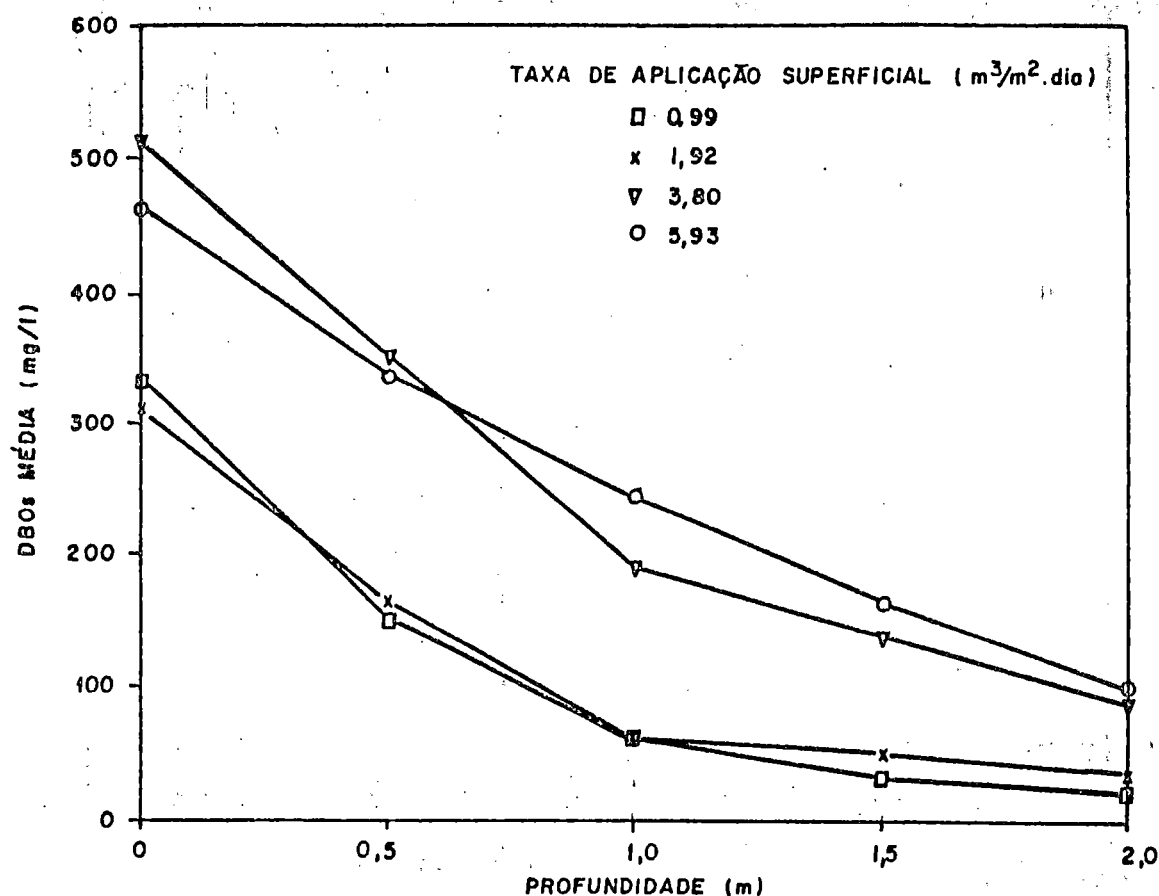


Figura 7 - Desempenho do filtro biológico em função da profundidade para valores médios de DBOs relativos às taxas de aplicação hidráulica.

de aplicação hidráulica de $5,93 m^3/m^2/dia$. O crescimento da carga orgânica afluyente induz à definição da taxa de remoção de substrato constante, contudo a DBOs efluente não obstante deverá crescer e o valor da taxa $k = Efic/H$ diminuirá. Esse fato pode ser observado utilizando-se a Equação 16 de Eckenfelder, e uma vez considerada a melhor distribuição do substrato em todo o leito em taxas elevadas, ter-se-á:

$$S/S_0 = (-k' \cdot Z^{1-m})/q^n \quad (16)$$

O valor de $1-m$, ajustado para os dados obtidos neste estudo, resultaram igual a 1,04, portanto muito próximo da unidade, com

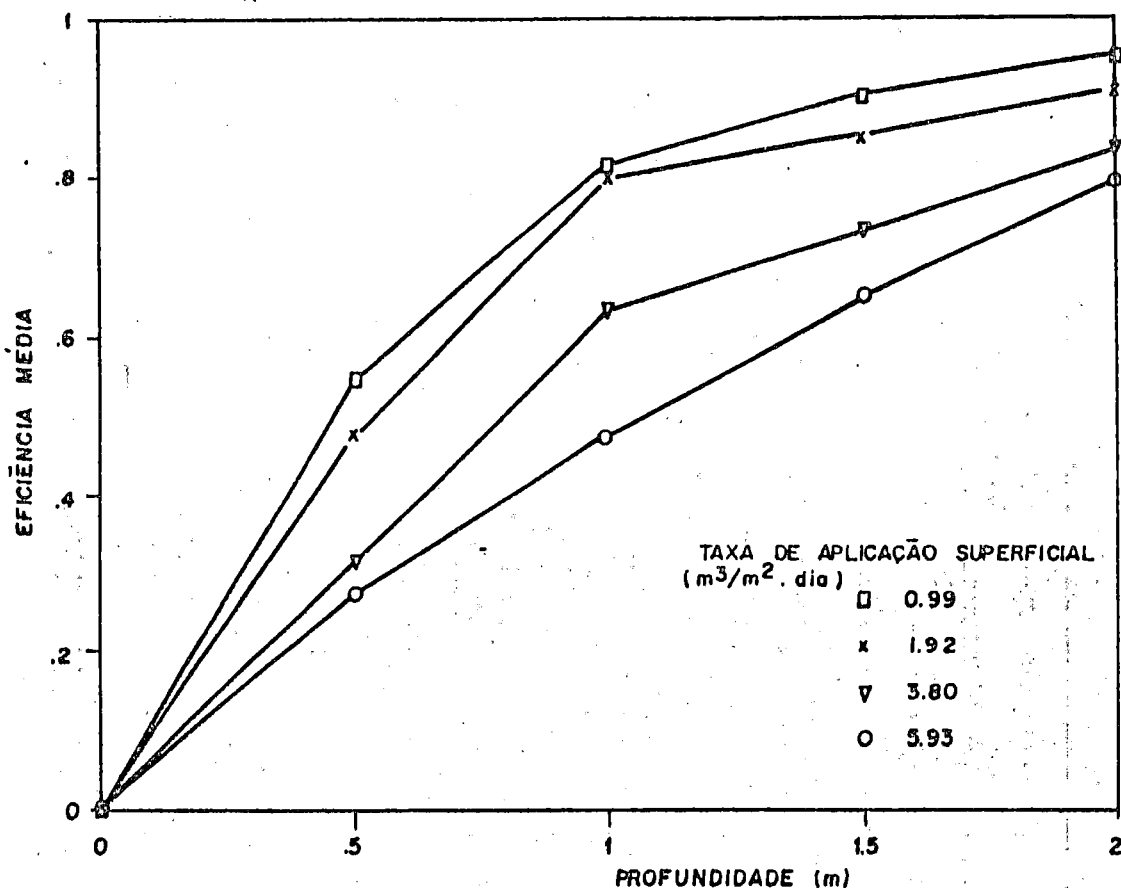


Figura 8 - Eficiência do filtro biológico em função da profundidade na remoção de DBO5, correspondente a valores médios relativos às taxas de aplicação hidráulica estudadas.

coeficiente de correlação de 0,9977. Isto corresponderia a seguinte equação:

$$S/S_0 = (-k'/Z^{1,04})q^n \quad (25)$$

Para condições pré-determinadas de S_0 e q , a equação pode ser considerada praticamente linear em relação a profundidade Z , correspondente a curva apresentada da Figura 7, para a taxa de aplicação hidráulica de 5,93 m³/m²/dia. A Equação 16, utilizada por Metcalf e Eddy, é bem aplicada para filtros biológicos de alta taxa ou taxa super alta, onde a distribuição da carga orgânica é mais

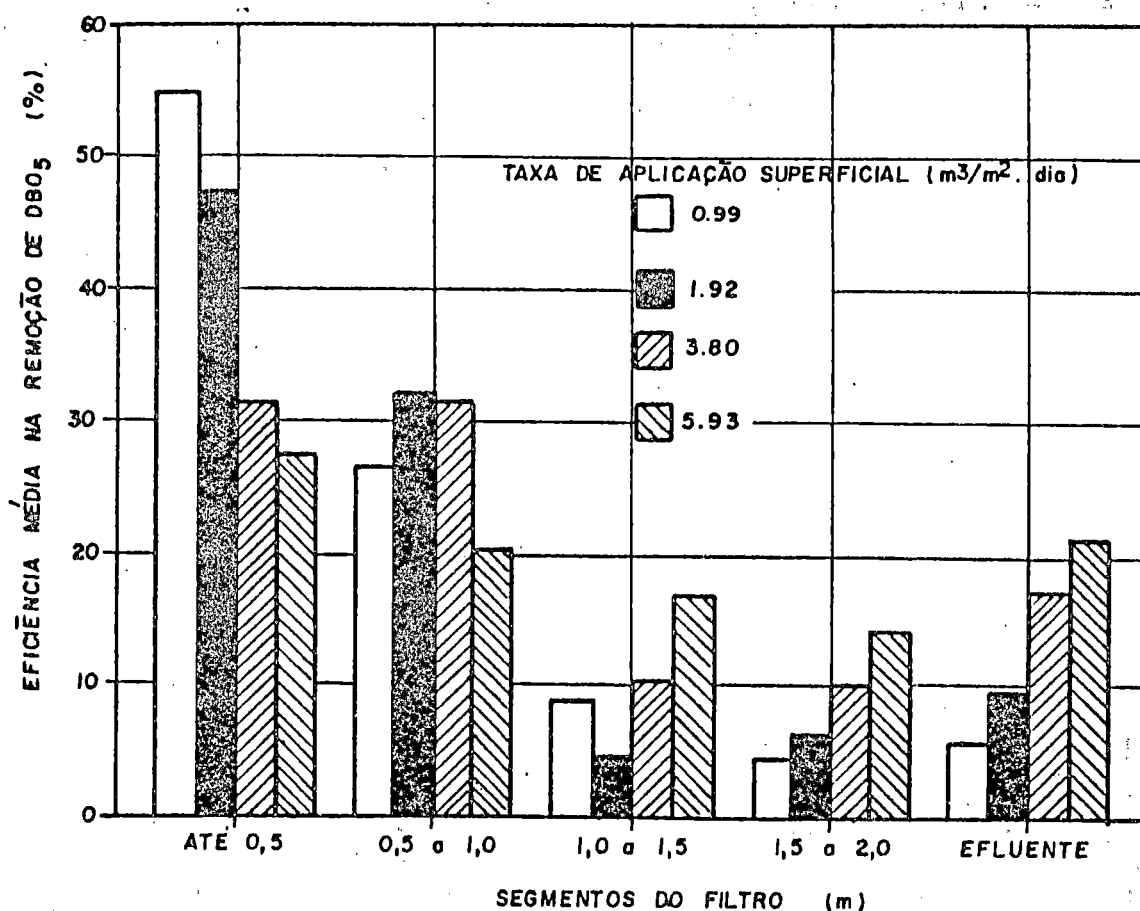


Figura 9 - Remoção relativa de DBO₅ em cada segmento de 0,50 metros do filtro biológico, baseada em valores médios das taxas de aplicação hidráulica estudada.

homogênea em todo o leito, correspondendo às características observadas em taxas mais elevadas neste trabalho. Para as condições operacionais de baixa taxa, tanto orgânica como hidráulica, envolvidas no período inicial desta pesquisa, a Equação 18 de Eckenfelder mostrou-se melhor adaptada.

12. ESTUDO COMPARATIVO

Os modelos matemáticos escolhidos neste trabalho podem ser considerados os mais importantes do ponto de vista histórico no estudo e desenvolvimento de filtros biológicos. São eles: Velz⁽⁹⁾, National Research Council⁽¹⁰⁾, Eckenfelder⁽¹¹⁾ e Galler e Gotaas⁽¹²⁾. Esses modelos com unidades expressas predominantemente no Sistema Internacional e considerando-se a inexistência de recirculação no filtro biológico, resultam nas seguintes expressões:

Velz,

$$E = 1 - e^{-k' \cdot Z} \quad (27)$$

em que

E: eficiência na remoção de DBOs

k': constante experimental (m^{-1})

Z: profundidade do leito percolador (m)

NRC,

$$E = \{1 + C' \cdot [0,06243 \cdot q \cdot S_o / Z]^{b'}\}^{-1} \quad (28)$$

em que

C', b': constantes experimentais

q: taxa de aplicação hidráulica ($m^3/m^2 \cdot dia$)

S_o: DBOs afluentes (mg/l)

Z, (m)

Eckenfelder,

$$E = 1 - (1 + K'' \cdot Z^{1-m} / q^n)^{-1} \quad (29)$$

em que

K'', m, n: constantes experimentais

q, ($m^3/m^2 \cdot dia$)

Z, (m)

Galler e Gotaas,

$$E = 1 - \frac{0,408 \cdot S_o^{0,19} \cdot Q^{0,13}}{(1 - 3,281 \cdot Z)^{0,67} \cdot r^{0,25} \cdot T^{0,15}} \quad (30)$$

em que Q : vazão aplicada (m^3/dia)
 r : raio do filtro biológico (m)
 T : temperatura do líquido afluente ($^{\circ}C$)
 S_o , (mg/l)
 Z , (m)

os coeficientes e expoentes apresentados são frutos de uma análise de regressão linear múltipla com extensivos dados coletados de filtros biológicos operados e estudados em diversas partes do mundo, cujas características do afluente, embora predominantemente de esgotos domésticos apresentavam-se extremamente heterogêneos, uma vez que as características dos esgotos domésticos variam drasticamente com o tipo de sociedade que os produzem, sem contar, em muitos casos, com a contribuição industrial à rede coletora. Contudo, considerando-se as mesmas condições de estudo dos autores é possível identificar os coeficientes e expoentes como constantes experimentais a serem determinadas. Dessa forma a expressão de Galler e Gotaas, pode ser escrita como:

$$E = 1 - \frac{C^* \cdot S_o^{b1} \cdot Q^{b2}}{(1 + 3,281 \cdot Z)^{b3} \cdot T^{b4}} \quad (31)$$

em que C^* : constante experimental que contém o termo r
 $b1, b2, b3$ e $b4$: outras constantes experimentais

As equações 27, 28, 29 e 31 podem ser linearizadas e através de análise de regressão linear múltipla, e utilizando-se os dados obtidos neste trabalho, foram determinadas as constantes experimentais, que definiram as seguintes expressões e os respectivos coeficientes de determinação múltipla (R^2):

Velz,

$$E = 1 - e^{-(0,052 + 1,07 \cdot Z)} \quad (32)$$

$$R^2 = 0,7478$$

NRC,

$$E = (1 + 0,00567 \cdot [0,06243 \cdot q \cdot S_o / Z]^{1,0395})^{-1} \quad (33)$$
$$R^2 = 0,9957$$

Eckenfelder,

$$E = 1 - (1 + 4,90 \cdot Z^{1,043} / q^{0,748})^{-1} \quad (34)$$
$$R^2 = 0,9977$$

Galler e Gotaas,

$$E = 1 - \frac{55,563 \cdot S_o^{0,0713} \cdot q^{0,797}}{(1 + 3,281 \cdot Z)^{1,127} \cdot T^{1,160}} \quad (31)$$
$$R^2 = 0,8890$$

Essas equações foram utilizadas para comparar suas aplicabilidades frente aos dados obtidos. O coeficiente de determinação múltipla, R^2 , é o parâmetro fundamental para se verificar a aplicabilidade das equações e a comparação visual permite conferir essa verificação. De forma genérica, o coeficiente R^2 , mostra a proximidade ou a relação entre dados e a média dos mesmos representado pela curva ajustada no processo. As Figuras 10, 11, 12 e 13 mostram as curvas representativas dos modelos ajustados e os dados obtidos respectivamente para as taxas médias de aplicação hidráulica de 0,99, 1,92, 3,80 e 5,93 m³/m².dia.

Considerando-se os coeficientes de determinação múltipla para os vários modelos ajustados, conclui-se que o modelo melhor adaptado é o de Eckenfelder, com $1-m = 1,043$, $n = 0,748$ e k'' , correspondente a equação original em unidades inglesas, igual a 1,49. Esses valores diferem bastante da média encontrada por Eckenfelder na utilização de filtros biológicos para tratamento de esgotos domésticos cujos valores foram de $1-m = 0,67$, $n = 0,50$ e $k''=2,5$, contudo a faixa de valores em trabalhos citados por Eckenfelder engloba os valores encontrados na presente pesquisa.

O modelo do National Research Council mostrou-se bem adaptado com coeficiente de determinação múltipla igual a 0,9957. Embora o modelo original fixe as constantes em $C'=0,056$ e $b'=0,50$, estas foram utilizadas como coeficientes a serem determinados no ajuste da equação. Assim, utilizando-se as unidades originais da

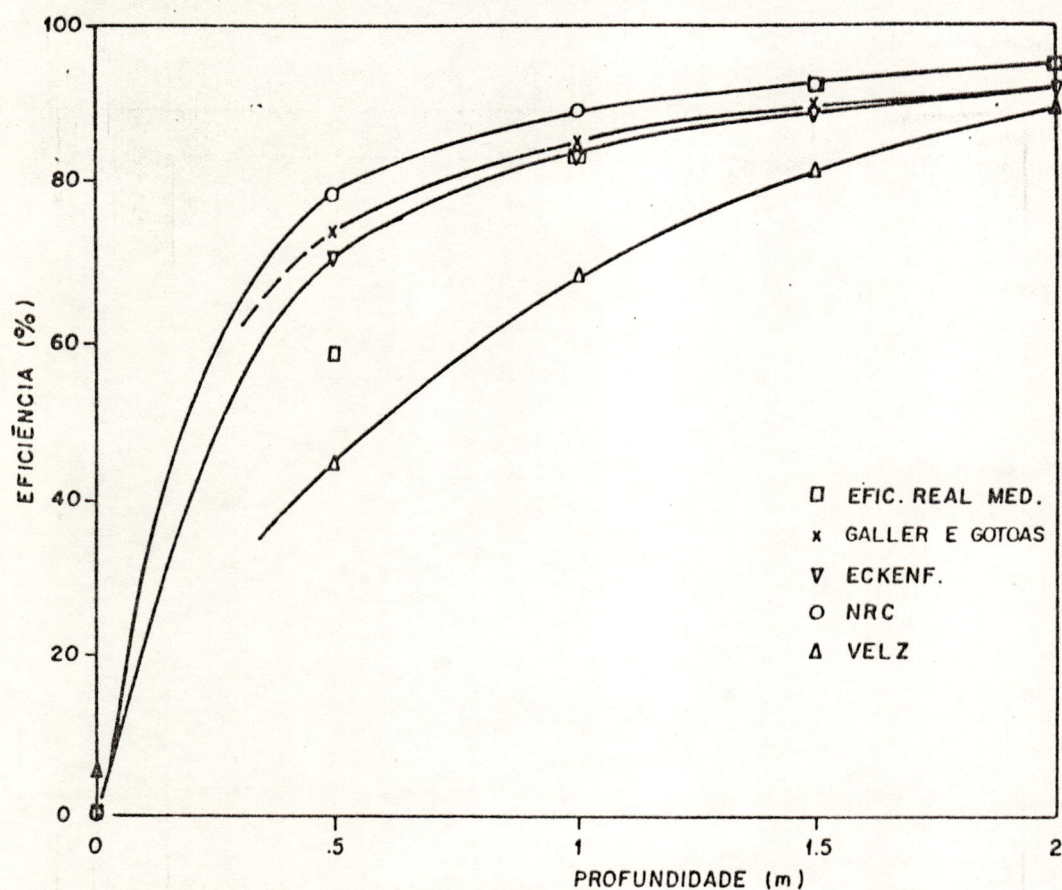


Figura 10 - Comparação entre vários modelos estudados em relação a eficiência média de remoção de DBOs como função da profundidade para taxa média de aplicação hidráulica de $0,99 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

equação do NRC, essas constantes ajustadas resultaram em $C'=0,00567$ e $b'=1,0385$, cujos valores são bem diferentes da equação original. Essa diferença resulta principalmente das condições diferenciadas de operação e natureza do afluente.

O modelo proposto por Velz, considerando-se a proposta original com a variação do efluente como função única da profundidade, apresentou-se com coeficiente de determinação múltipla, R^2 , igual a 0,7478. O mesmo modelo pode ser melhor ajustado, se for considerada a variação do coeficiente k' como função exponencial da taxa de aplicação hidráulica, contudo isto significaria uma modificação não prevista nas condições

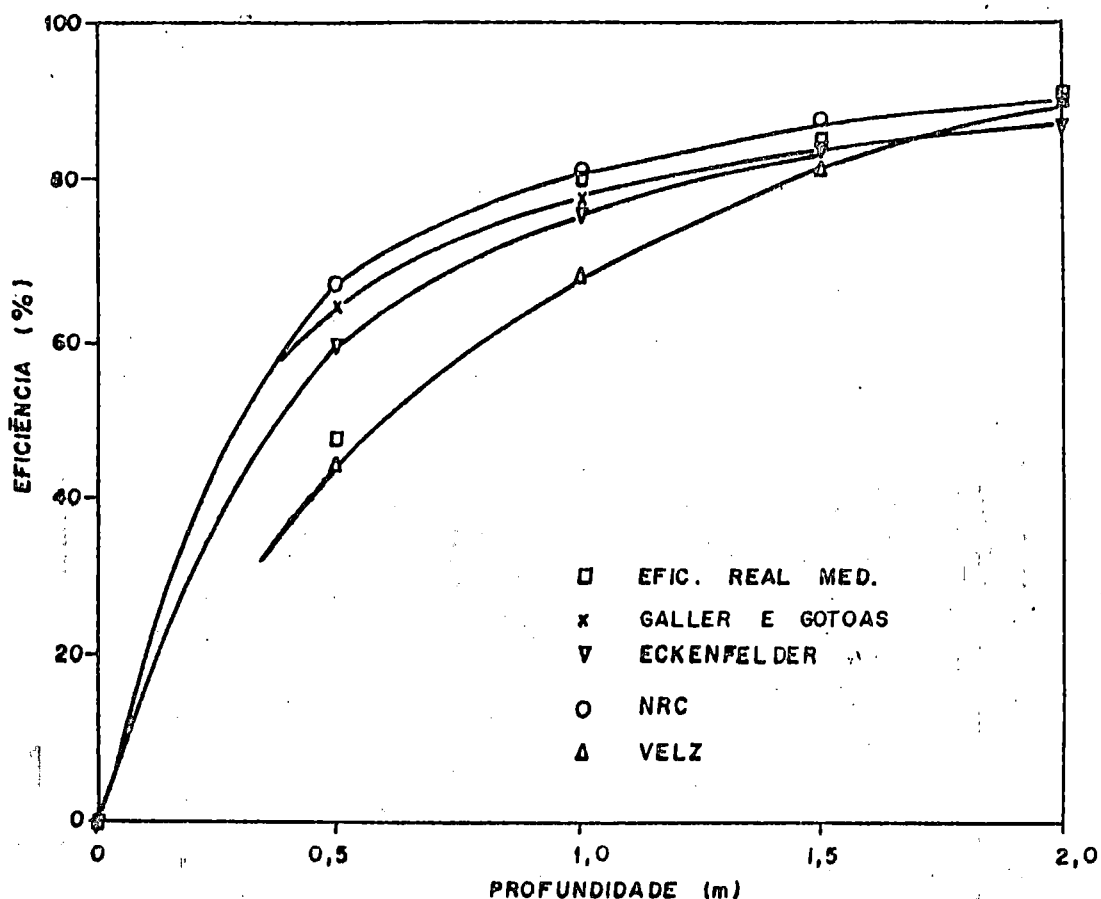


Figura 11 - Comparação entre vários modelos estudados em relação a eficiência média de remoção de DBOs como função da profundidade para taxa média de aplicação hidráulica de $1,92 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

apresentadas por Velz. O valor de k' resultante, apresenta-se como equação de uma reta cujo o intercepto não se dá na origem. Este fato é inerente ao ajuste da equação, contudo o valor do intercepto é muito próximo de zero e pode ser desprezado na aplicação do modelo. Dessa forma pode se considerar o valor de k' como sendo igual a 1,066, resultando na seguinte expressão:

$$E = 1 - e^{-1,066.Z} \dots\dots\dots (32)$$

O modelo proposto por Galler e Gotaas embora se apresentasse com os coeficientes e expoentes previamente definidos pela equação original, foi também ajustado, resultando em valores

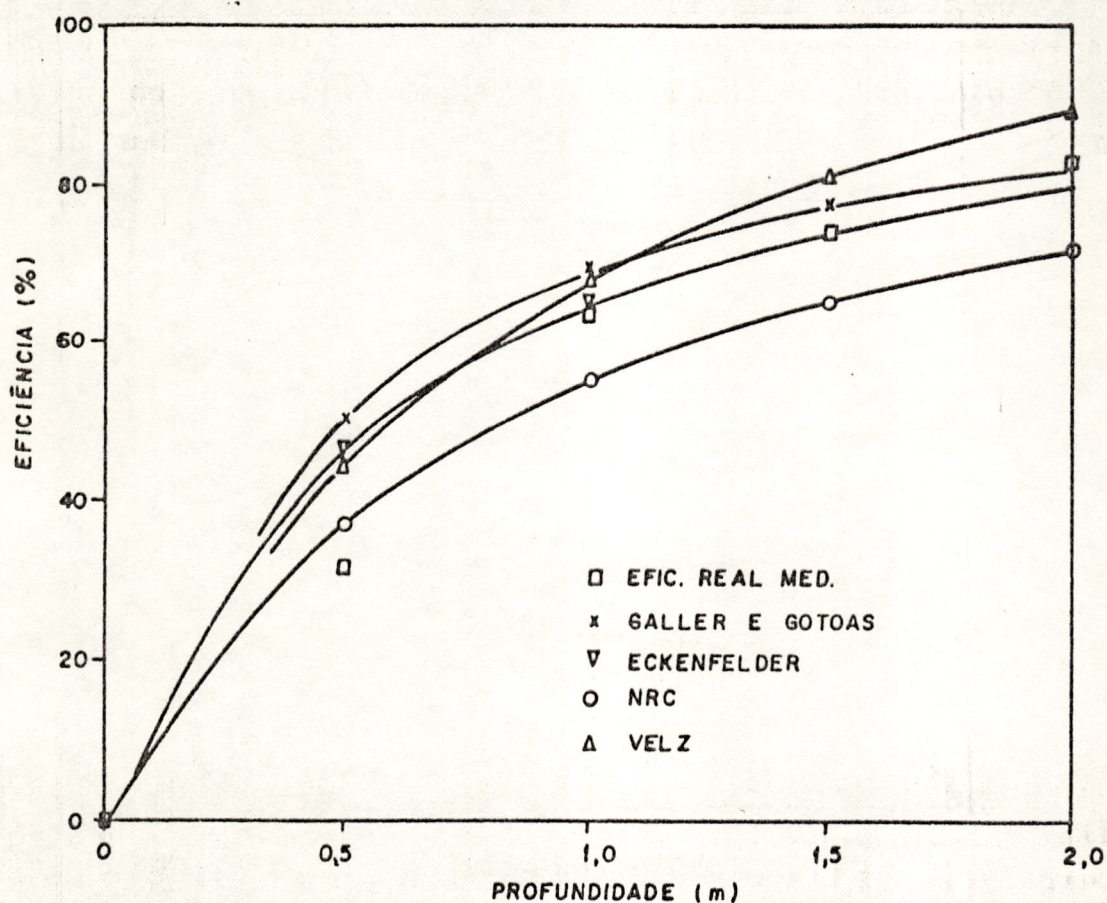


Figura 12 - Comparação entre vários modelos estudados em relação a eficiência média de remoção de DBO₅ como função da profundidade para taxa média de aplicação hidráulica de 3,80 m³/m².dia

totalmente distintos, como mostra a Equação 31. O parâmetro raio do filtro permanece embutido na constante C^* pois não pode ser considerado como variável da equação por ser constante, portanto o seu expoente não pode ser determinado. Como mostra as Figuras 10, 11, 12 e 13, o ajuste dessa equação resultou em valores de intercepto do eixo das eficiências, E , muito distanciados da origem, o que impede sua utilização na avaliação do desempenho filtro biológico para valores de profundidade inferiores a 0,50 m.

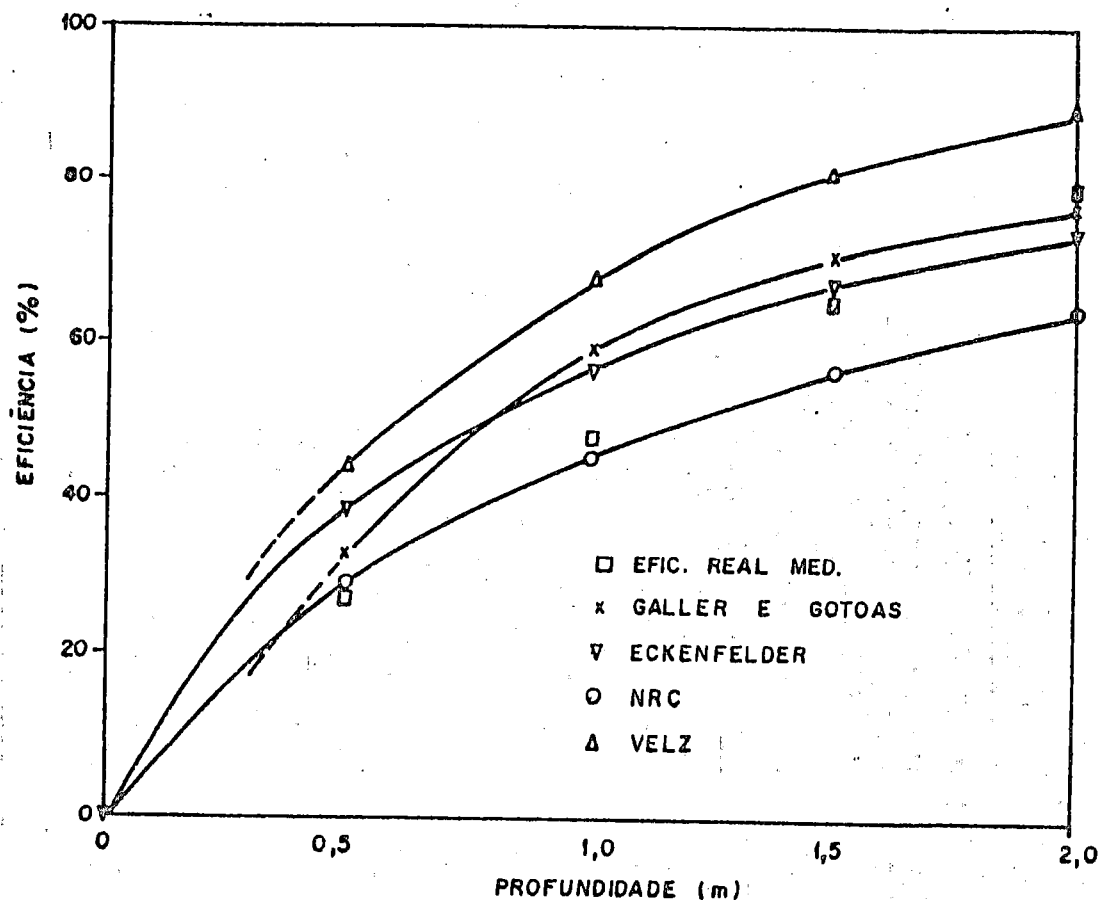


Figura 13 - Comparação entre vários modelos estudados em relação a eficiência média de remoção de DBOs como função da profundidade para taxa média de aplicação hidráulica de 5,93 m³/m².dia

13. CONCLUSÕES

O filtro biológico de baixa taxa mostrou-se adequado para o tratamento do afluente constituído pelas águas residuárias da indústria de conservas alimentícia Hero, proveniente de um decantador primário com características subdimensionadas, cuja DBOs apresentou variações que oscilaram entre 150 e 700 mg/l. O desempenho global do filtro biológico na remoção da DBOs para todas as taxas estudadas esteve sempre acima de 80%, com excessão de alguns pontos, que foram desprezados devido a problemas operacionais. O bom desempenho do reator mesmo para cargas orgânicas características de filtros biológicos de alta taxa pode ser explicado pela coincidência da maior produção industrial com o período sazonal referente ao verão onde a temperatura do afluente, que naturalmente é elevada, permite maior velocidade nas reações bioquímicas envolvidas. Durante o inverno a temperatura do efluente é inferior, porém manteve-se sempre acima da temperatura ambiente.

Alguns problemas operacionais estiveram relacionados a choques de carga, contudo a capacidade de recuperação do filtro biológico é muito elevada e o controle de operação mais adequado permite segurança no seu desempenho. A operação do filtro biológico com taxas baixas de aplicação hidráulica resultou na formação de camadas espessas e abrangentes de fungos, contudo seu controle não foi atividade estritamente necessária pois não se apresentou como limitante na aeração e oxigenação do leito devido sua elevada permeabilidade associada a baixa carga orgânica aplicada. Taxas de aplicação hidráulica iguais ou superiores a $3,80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ minimizaram a presença de fungos na superfície e mostraram características otimizadas de operação limitadas a taxa de $5,93 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Isto se verifica pela contribuição efetiva de todo o leito na remoção de carga orgânica, considerando-se a profundidade de 2,0 m e a eficiência acima de 80%. Filtros biológicos que forem operar com o mesmo afluente a taxas de aplicação hidráulica inferiores a $3,80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ podem reduzir a altura do leito, uma vez que camadas mais inferiores a essas não

contribuirão com mais de 7% em média na degradação e considerando-se que a fração não biodegradável possa constituir cerca de 4 a 5% da amostra decantada, torna-se evidente na prática, a sua inutilidade.

Dentre os modelos utilizáveis em projetos para remoção de carga orgânica, o de Eckenfelder mostrou-se melhor adaptado com coeficiente de determinação múltipla $R^2=0,9977$, baseado em dados médios por taxa de aplicação hidráulica utilizada. A utilização de dados globais resultaram em correlação pouco inferior para todos os modelos devido ao peso maior considerado no método aos número maior de dados existentes para a taxa de aplicação de hidráulica de $0,99 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e os coeficientes encontrados são ligeiramente diferentes. O modelo de Galler e Gotaas, sem ajuste deve ser utilizado de preferência em sua forma original, principalmente pela indeterminação do raio da instalação-piloto para a escala real, contudo a determinação de novas constantes pode ser adequada em filtros biológicos de alta taxa aliada a novas considerações que podem ser embutidas no modelo. O modelo do NRC devidamente ajustado pode ser considerado uma opção adequada para o dimensionamento de filtros biológicos por ser facilmente aplicável, além de mostrar parâmetros compatibilizados com o modelo de Eckenfelder. O modelo de Velz é muito limitado em sua composição de parâmetros, contudo pode ser perfeitamente adaptado para tornar-se aplicável admitindo-se a inclusão de novas variáveis dentro da constante única considerada. Se for considerado k' como função logarítmica da taxa de aplicação hidráulica é possível obter um coeficiente de determinação múltipla de 0,962 com $k'=1,559-0,471.\ln(q)^{(1)}$.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) HAMADA, J. - "Emprego de filtro biológico de baixa taxa para tratamento de águas residuárias de uma indústria de conservas alimentícias". Dissertação de mestrado. 112p. 1985. Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- 2) METCALF & EDDY, Inc. - Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. 2a Edição. NY, McGraw-Hill. 920p. 1979.
- 3) TCHOBANOGLOUS. G. - "Evaluation of the progress of the City of Sacramento in meeting the discharge Requirements established for the main wastewater treatment plant". Report from Attorney General's Office, California, EUA. Nov. 1972.
- 4) SCHOROEDER, E.D. e TCHOBANOGLOUS. G. - "Mass transfer limitation on trickling filters design". Journal of WPCF. EUA. Vol 48(4), pp 771-775. Abril, 1976.
- 5) KUENEN, J.G., JORGENSEN, B.B. e REVSDECH, N.P. - "Oxygen microprofiles of trickling filter biofilms". *Water Research*. Vol 20. pp 1589-1598. Dez. 1986.
- 6) RITTMAN, B.E e McCARTY, P.L. - "Variable-order model of bacterial film kinetics". *Journal of Environmental Eng. Division, ASCE*. Vol 104(5). pp 889-900. Out. 1978.
- 7) RITTMAN, B.E e McCARTY, P.L. - "Model of steady-state-biofilm kinetics". *Biotechnology and Bioengineering*. Vol 23. pp 2343-2357. 1980.
- 8) VELZ, C.J. - "A basic law for the performance of biological filters". *Sewage Works Journal*. Vol 20. pp 607-617. Jul. 1948.
- 9) HOWLAND, W.E. - "Flow over porous media as in a trickling filter". *Proceeding, 12th Industrial Wastes Conference, Purdue University Engineering Extension Series n^o. 94*. pp 435-465. 1958.
- 10) NATIONAL RESEARCH COUNCIL - "Sewage treatment at military

instalations". *Sewage Works Journal*. Vol 18(5).
pp 791-1028. Set. 1946.

- 11) ECKENFELDER Jr, W.W. - "Trickling filtration design and performance". *Journal of Sanitary Eng. Division, ASCE*. Vol 87(4). pp 35-45. Jul. 1961.
- 12) GALLER, W.S. e GOTAAS, H.B. - "Analysis of biological filters variables". *Journal of San. Eng. Division, ASCE*. Vol 90(6). pp 59-79. Dez. 1964.
- 13) HAWKES, H.A. - "The ecology of wastewater treatment". Pergamon press, London. 203p. 1963.