Campus de São Carlos

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA
INSTALAÇÃO DE FILTRAÇÃO DIRETA
DESCENDENTE COM TAXA DECLINANTE
VARIÁVEL EM ESCALA REAL E PILOTO**

Elizabeth Regina Halfeld da Costa

Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 28/11/01

Ass.: *Guilherme*

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA
INSTALAÇÃO DE FILTRAÇÃO DIRETA
DESCENDENTE COM TAXA DECLINANTE
VARIÁVEL EM ESCALA REAL E PILOTO**

ELIZABETH REGINA HALFELD DA COSTA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036812

**São Carlos
2001**

Class.	TESE - EESC
Curr.	1651
Tombo	T0248/01

st 1213021

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C837a Costa, Elizabeth Regina Halfeld da
Avaliação do funcionamento de uma instalação de
filtração direta descendente com taxa declinante
variável em escala real e piloto / Elizabeth Regina
Halfeld da Costa. -- São Carlos, 2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Di Bernardo.

1. Filtração. 2. Taxa declinante. 3. Armazenamento
a montante dos filtros. 4. Parâmetros de projeto.

I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ELIZABETH REGINA HALFELD DA COSTA**

Tese defendida e julgada em 28-09-2001 perante a Comissão Julgadora:

Aprovada

Prof. Tit. **LUIZ DI BERNARDO** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Prof. Dr. **RENATO MACHADO**
(Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul -PUC/RS)

Aprovada

Prof. Dr. **CARLOS GOMES DA NAVE MENDES**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovada

Prof. Dr. **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Aprovada

Ingeniero **JORGE ARBOLEDA VALENCIA**
(Hidrosan Ltda./Bogotá/Colômbia)

Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedicatória

*Ao meu pai,
por deixar em mim a semente da continuidade*

*É bom chegar quando se tem paciência.
E, para se chegar aonde quer que seja,
não é preciso dominar a força ,mas a razão.
É preciso, antes de mais nada querer.*

Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luiz Di Bernardo por ter me colocado diante de desafios que, com certeza, me fizeram crescer;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos recursos financeiros para o desenvolvimento da pesquisa (Proc.1997/03046-7) e pela concessão de bolsa de doutorado (Proc.96/02815-4)

À CAESB-(Companhia de Saneamento de Brasília) na pessoa da Dr^a Ângela Biaggini, por viabilizar o trabalho desenvolvido na Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto;

Aos funcionários da CAESB que participaram desse trabalho, em especial ao operador João Luís, por sua incansável dedicação durante todo o trabalho experimental;

Aos professores Fazal e Marcius Giorgetti pelos ensinamentos que ultrapassaram a sala de aula;

Ao Cleber, um toque de afeto que contribuiu na minha jornada, com carinho, dedicação e companheirismo;

À Sônia Magalhães, por ser a grande impulsionadora de todas as minhas viagens;

Ao Professor Marcos Vianna, pelo incentivo profissional e pelo admirável exemplo de respeito, simpatia e simplicidade;

Aos colegas Paulo Tadeu, Simone, Eraldo, Nélia, Walter Lúcio, Deísa e Ruth pela convivência agradável durante os anos que passamos juntos;

Aos amigos mineiros, Lili, Lita, Helô, Chamone, Nô, Helena, Zete e Chica, pela presença constante, pelas gargalhadas freqüentes e lágrimas de emoção.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
<i>ABSTRACT</i>	xvii
1- INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS	5
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1- Hidráulica da filtração	6
3.2- Armazenamento de água a montante dos filtros	14
3.3- Estudos recentes sobre a filtração com taxa declinante variável	15
3.4- Taxa de filtração máxima e qualidade do efluente	51
4- MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1- Introdução	56
4.2- Estação de tratamento de água do rio descoberto	58
4.3- Instalação Piloto da ETA-RD	67
4.4- Etapas do desenvolvimento da pesquisa	69
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES	112
5.1- Resultados dos ensaios para obter as perdas de carga nos filtro FP2	112
5.2- Resultados dos ensaios para obter as curvas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD	119
5.3- Resultados das simulações de acordo com o modelo matemático	143
5.4- Resultados dos ensaios com água coagulada da ETA-RD	149
5.5- Determinação de ΔH_0	165
5.6- Resultados dos gastos com água de lavagem	167
5.7- Dificuldades na operação da ETA-RD e discussão final do trabalho	174
6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	184
ANEXOS	188
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	258

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Arranjo típico da entrada e saída de filtros com taxa constante, (DI BERNARDO, 1993)	7
Figura 3.2	Arranjo típico da entrada e saída de filtros com taxa declinante variável, (DI BERNARDO, 1993)	8
Figura 3.3	Configuração típica de um sistema com taxa declinante variável constituído de quatro filtros na situação repetitiva. (DI BERNARDO, 1993)	9
Figura 3.4	Níveis nos filtros com taxa declinante ARBOLEDA et al. (1985)	11
Figura 3.5	Esquema de um sistema de filtração direta descendente com pré-floculação mostrando o armazenamento a montante dos filtros.(MACHADO,1995)	14
Figura 3.6	Variação da perda de carga e dos níveis em função das taxas de filtração em um sistema com taxa declinante variável, (DI BERNARDO, 1993)	21
Figura 3.7	Variação típica da perda de carga, no meio filtrante de um filtro com taxa constante funcionando com taxa igual à máxima prevista no sistema de filtração com taxa declinante variável, (TEIXEIRA, 1991)	29
Figura 3.8	Resultados da operação simultânea do SFTD e FTC, carreira de filtração do filtro F_1 ; $T_{\max} = T_{\text{med}} = 300 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (TEIXEIRA, 1991)	30
Figura 3.9	Comportamento do SFTD para a taxa média de filtração de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ e carga hidráulica disponível de $1,6\text{m}$; variação da perda de carga no FTC operado com taxa de filtração de $407 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (TEIXEIRA, 1991)	31
Figura 3.10	Determinação da duração da carreira de filtração conforme metodologia proposta, $T_{\text{med}} = 300 \text{ m}^3/\text{m}^2 .\text{d}$ e carga hidráulica de $1,6 \text{ m}$ (TEIXEIRA,1991)	32
Figura 3.11	Variação das perdas de carga e dos níveis de operação em função das taxas de filtração de um SFTD com armazenamento de água a montante dos filtros. (MACHADO,1995)	36
Figura 3.12	Situação hipotética mostrando o N_{eq} estabelecido no SFTD imediatamente após a colocação de um filtro recém-lavado em operação, (MACHADO,1995)	41
Figura 3.13	Perdas de carga no material filtrante limpo, turbulenta e total em função da taxa de filtração (MENDES, 1999)	45
Figura 3.14	Imposição da taxa máxima de filtração, determinação de N_1 e estimativa inicial para N_2 , (MENDES, 1999)	46
Figura 3.15	Determinação da perda de carga total para o filtro mais limpo da bateria, após a 1ª elevação de N_1 para N_2 , e da taxa de filtração que passará a operar após retorno do filtro recém lavado ao funcionamento, (MENDES,1999)	47
Figura 3.16	Determinação das taxas de filtração de todos os filtros da bateria e aferição da estimativa inicial de variação de N_1 para N_2 , (MENDES,1999)	48

Figura 3.17	Determinação de N_3 e as taxas de filtração para os filtros remanescentes, durante lavagem de filtro mais sujo da bateria, (MENDES,1999)	49
Figura 4.1	Esquema geral da ETA-RD	59
Figura 4.2	Ângulo δ de posicionamento da válvula borboleta na canalização efluente de cada câmara, NETTO (1998)	62
Figura 4.3	Válvula Borboleta da SVEDALA FAÇO instalada na ETA-RD .	64
Figura 4.4	Coeficiente de perda de carga (K) em função da abertura da válvula borboleta tipo SVEDALA FAÇO (catálogo do fabricante)	65
Figura 4.5	Foto do operador com controle de abertura e fechamento da válvula borboleta	66
Figura 4.6	Esquema geral da Instalação Piloto	68
Figura 4.7	Quadro sinóptico das etapas e passos do desenvolvimento da pesquisa	70
Figura 4.8	Área de armazenamento da Instalação Piloto modificada	74
Figura 4.9	Corte DD da unidade de floculação modificada	75
Figura 4.10	Corte EE da unidade de floculação modificada	76
Figura 4.11	Esquema geral da Instalação Piloto modificada	77
Figura 4.12	Caixa de chegada com vertedor triangular e tubulação que encaminha a água à câmara 4	78
Figura 4.13	Foto das câmaras 4, 5 e 6 e o canal de água floculada	79
Figura 4.14	Foto ilustra a vista de cima das câmaras 4 e 5 e o agitador mecanizado	79
Figura 4.15	Foto ilustrando a luva de união na tubulação oriunda do floculador desencaixada e o mangote flexível ligado à tubulação de entrada do filtro piloto	80
Figura 4.16	Instalação Piloto modificada.....	82
Figura 4.17	Instalação Piloto modificada.....	83
Figura 4.18	Foto da vista lateral da IP modificada, mostrando o FP2, o reservatório de água para lavagem e as bombas	84
Figura 4.19	Foto da IP com os dois filtros. O filtro da esquerda é o filtro FP2 modificado com os piezômetros instalados ao longo do meio filtrante	85
Figura 4.20	Foto do piezômetro 10 instalado na tubulação de saída de água filtrada do FP2, ao fundo o filtro e o meio filtrante	86
Figura 4.21	Foto da mangueira abastecendo de água tratada a caixa de chegada	87
Figura 4.22	Foto das válvulas de entrada de água bruta e de descarga de fundo da caixa de chegada, na instalação Piloto	88
Figura 4.23	Foto da trena utilizada para medir a altura da lâmina d água sobre o vertedor triangular	89
Figura 4.24	Foto mostrando a luva de união encaixada após aferir a vazão	90
Figura 4.25	Foto apresentando a proveta de 2000 ml utilizada para medir as vazões nos ensaios. Ao fundo tem-se a tubulação de saída de água filtrada do FP2	91
Figura 4.26	Esquema da instalação Piloto com os piezômetros ao longo do meio granular em FP2.....	93

Figura 4.27	Gabarito utilizado, ressaltando os ângulos investigados	95
Figura 4.28	Foto apresentando o gabarito embaixo do ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas	96
Figura 4.29	Foto da régua instalada na borda do filtro 3	97
Figura 4.30	Esquema que mostra as réguas instaladas no filtro, na caixa de inspeção da caixa de efluentes e a carga hidráulica disponível (Hd)	98
Figura 4.31	Foto da régua instalada na caixa de inspeção da caixa de efluentes	99
Figura 4.32	Quadro sinóptico mostrando como foram realizados os ajustes dos dados nos ensaios na IP e na ETA-RD	102
Figura 4.33	Foto apresentando a válvula de esfera com alavanca, a válvula D, a tubulação de saída do FP2 e a proveta de 2000 ml	106
Figura 4.34	Foto do FP2 com a mangueira cristal transparente mostrando os níveis N ₃ , N ₂ , marcados durante um dos ensaios	107
Figura 4.35	Foto mostrando a mangueira transparente e o nível N ₃ na unidade de floculação	108
Figura 4.36	Foto apresentando o reservatório de água para lavagem (tanque azul), o reservatório de água de lavagem (tanque verde), o ponto de coleta de amostra de água de lavagem (tubulação verde de ½")	111
Figura 5.1	Perdas de carga em função da taxa de filtração na camada suporte, na camada de areia e no meio granular, ajuntados pelo M.M.Q	116
Figura 5.2	Perda de carga em função da taxa de filtração na tubulação do FP2, ajuntados pelo M.M.Q.	117
Figura 5.3	Dados de taxa de filtração em função da perda de carga total, ajuntados pelo M.M.Q.	118
Figura 5.4	Esquema do filtro 3 (planta e corte) mostrando as áreas do filtro de cada câmara e cota da passarela onde foram instalada a régua	120
Figura 5.5	Esquema do filtro 9 (planta e corte) mostrando as áreas do filtro de cada câmara e cota da passarela onde foram instalada a régua	121
Figura 5.6	Esquema em planta da caixa de efluentes apresentando o comprimento do vertedor, as caixas de inspeção e o ponto onde foi instalada a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor	122
Figura 5.7	Corte da caixa de efluentes apresentando a caixa de inspeção do vertedor, a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor e as cotas do topo da caixa de inspeção do vertedor (1252,116 m) e do vertedor (1250,863 m)	123
Figura 5.8	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 20 ⁰	126
Figura 5.9	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 26 ⁰	126

Figura 5.10	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 30^0	127
Figura 5.11	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 36^0	127
Figura 5.12	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 50^0	128
Figura 5.13	Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perda de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 90^0	128
Figura 5.14	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 20^0	130
Figura 5.15	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 26^0	130
Figura 5.16	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 30^0	131
Figura 5.17	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 36^0	131
Figura 5.18	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 50^0	132
Figura 5.19	Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 90^0	132
Figura 5.20	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 20^0	133
Figura 5.21	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 26^0	133
Figura 5.22	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 30^0	134
Figura 5.23	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 36^0	134
Figura 5.24	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 50^0	135
Figura 5.25	Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 90^0	135
Figura 5.26	Curvas de perda de carga na Vb correspondente a cada abertura investigada	139
Figura 5.27	Pontos (T, H_t), valores obtidos de perda de carga em toda a tubulação exceto na válvula borboleta	139

Figura 5.28	Pontos (T, Ht), referentes a todos os ensaio realizados nos filtros da estação e respectiva curva de perda de carga na tubulação em geral, ajustada pelo M.M.Q.	140
Figura 5.29	Comparação entre as curvas de perda de carga total na ETA-RD e a curva de perda de carga total na IP	142
Figura 5.30	Curvas de perda nos filtros da ETA-RD e os pontos de (Taxa de filtração x perda de carga total no FP2 (P9-P10)	151
Figura 5.31	Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 1-Anexo F.....	154
Figura 5.32	Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 6-Anexo F (réplica).....	154
Figura 5.33	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 2, Anexo F	155
Figura 5.34	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 7, Anexo F(réplica)	155
Figura 5.35	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 3/Anexo F....	156
Figura 5.36	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 8/Anexo F (réplica)	156
Figura 5.37	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 4/Anexo F....	157
Figura 5.38	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 9/Anexo F (réplica)	157
Figura 5.39	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 5/Anexo F.....	158
Figura 5.40	Perda de carga na areia em função da espessura tabela 10/Anexo F (réplica)	158
Figura 5.41	Turbidez afluyente ao longo do tempo nos ensaios realizados com água floculada na Instalação Piloto para taxa média de 315 $m^3/m^2.dia$, considerando três taxas máximas de filtração distintas conforme o modelo matemático	160
Figura 5.42	Turbidez afluyente ao longo do tempo nos ensaios realizados com água floculada na Instalação Piloto para taxa média de 253 $m^3/m^2.dia$, considerando-se duas taxas máximas de filtração distintas conforme o modelo matemático	163
Figura 5.43	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=484 m^3/m^2.d$	169
Figura 5.44	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=474 m^3/m^2.d$	169
Figura 5.45	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=515 m^3/m^2.d$	170
Figura 5.46	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=580 m^3/m^2.d$	170
Figura 5.47	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=347 m^3/m^2.d$	171
Figura 5.48	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=484 m^3/m^2.d$	171

Figura 5.49	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	172
Figura 5.50	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	172
Figura 5.51	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	173
Figura 5.52	Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	173
Figura 5.53	Coefficientes obtidos a partir das equações ajustadas de perda de carga na tubulação em função dos ângulos de abertura da válvula borboleta na ETA-RD	178
Figura 5.54	Esquema que mostra a carga hidráulica disponível (Hd), para a vazão ($1,727 \text{ m}^3/\text{s}$) ao final do dia do teste	182

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Taxas de filtração, perdas de carga, coeficientes de resistividade devido à retenção de impurezas e equações de escoamento laminar de F_1	23
Quadro 3.2	Determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles, (DI BERNARDO,1993)	26
Quadro 3.3	Taxas de filtração, perdas de carga, coeficientes de resistividade devido à retenção de impurezas e equações de escoamento laminar de F_1	37
Quadro 3.4	Determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes durante a lavagem de um filtro de bateria, (MACHADO,1995)	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Experimentos realizados por alguns autores simulando um SFTD, nas instalações piloto, utilizando-se água decantada ETA-SC	52
Tabela 3.2	Características granulométricas dos três filtros (PREZOTTI, 1991)	53
Tabela 4.1	Valores de K em função de δ para válvulas borboleta NETTO (1998)	62
Tabela 5.1	Leituras piezométricas obtidas nos ensaios na instalação piloto para cada vazão e a taxa de filtração correspondente	114
Tabela 5.2	Taxa de filtração em função das perdas de carga na camada suporte, na camada de areia, no meio filtrante na tubulação e total	115
Tabela 5.3	Dados referentes à área das câmaras, à área total e à cota da passarela onde foi instalada a régua nos filtros 3 e 9	119
Tabela 5.4	Equações de perda de carga turbulenta ajustada e total calculada e respectivos coeficientes de correlação	129
Tabela 5.5	Valores aproximados de k para cada ângulo de abertura e equações de perda de carga na válvula borboleta obtidos a partir do gráfico da figura 4.4 e da eq 5.23	138
Tabela 5.7	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 3,43 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 20^\circ$	144
Tabela 5.8	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,81 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 26^\circ$	144
Tabela 5.9	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,14 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 30^\circ$	145
Tabela 5.10	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,49 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 36^\circ$	145
Tabela 5.11	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,14 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 30^\circ$	146
Tabela 5.12	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,49 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha = 36^\circ$	146

Tabela 5.13	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,30 \times 10^{-4} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=50^0$	147
Tabela 5.14	Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 9,53 \times 10^{-5} T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=90^0$	147
Tabela 5.15	Resumo das simulações mais indicadas para as vazões de trabalho	148
Tabela 5.16	Valores de taxa de filtração em função da perda de carga total (P9-P10) obtidos para os ângulos de 26; 36; 50 e 90 graus de abertura da válvula borboleta nos ensaios de água tratada para ajuste da válvula de esfera no FP2	150
Tabela 5.17	Resumo dos principais dados obtidos nos ensaios do anexo F relacionados com as simulações escolhidas para serem testadas experimentalmente	153
Tabela 5.18	Duração dos ensaios para várias taxas máximas referentes a taxa média de 315 m ³ /m ² .dia, de acordo simulações contidas no Anexo E	162
Tabela 5.19	Duração dos ensaios para várias taxas máximas referentes a taxa média de 253 m ³ /m ² .dia, de acordo simulações contidas no Anexo E	164
Tabela 5.20	Valores de $N_{I\text{Teórico}}$, $N_{I\text{exp real}}$ (ETA-RD), $N_{I\text{real mod}}$ (ETA-SC), $\Delta H_{\text{exp real}}$, $\Delta H_{\text{Machado}}$, para as taxas máximas de filtração das tabelas do Anexo F	166
Tabela 5.21	Volume consumido de água para lavagem, turbidez de água de lavagem em função do tempo no FP2 e respectivas velocidades ascensionais para lavagem	168
Tabela 5.22	Diferença entre os ângulos das válvulas borboletas e os ângulos digitais registradas nas mesas de comando e no Controlador Lógico Programável	175
Tabela 5.23	Ângulos da válvula borboleta e respectivos coeficientes obtidos a partir das equações da tabela 5.4	177
Tabela 5.24	Equações de perda de carga total obtidas utilizando-se os coeficientes interpolados no gráfico da figura 5.53 para cada ângulo da válvula borboleta	179
Tabela 5.25	Taxas média, máxima, mínima e relação entre as taxas média e máxima obtidas para vários ângulos, em simulações para a vazão de 3,1 m ³ /s e de 5,3 m ³ /s da ETA-RD, considerando 14 filtros em funcionamento	180
Tabela 5.26	Taxas média, máxima, mínima e relação entre as taxas média e máxima obtidas em simulações, para a vazão (1,7 m ³ /s), típica do "Horário de ponta" na estação	181

Tabela 1 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,029l/s	190
Tabela 2 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,037l/s	190
Tabela 3 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,053l/s	191
Tabela 4 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,074l/s	191
Tabela 5 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,093l/s	192
Tabela 6 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,108l/s	192
Tabela 7 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,124l/s	193
Tabela 8 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000) temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,140l/s	193
Tabela 9 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,152l/s	194
Tabela 10 A	Resultado dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação (Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25 ⁰ C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,190l/s	194
Tabela B1	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 20 ⁰)	196
Tabela B2	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 26 ⁰)	197
Tabela B3	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 30 ⁰)	198
Tabela B4	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 36 ⁰)	199

Tabela B5	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 50 ⁰)	200
Tabela B6	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 90 ⁰)	201
Tabela B7	Resultado do ensaio com água tratada no filtro9 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 20 ⁰)	202
Tabela B8	Resultado do ensaio com água tratada no filtro3 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 26 ⁰)	203
Tabela B9	Resultado do ensaio com água tratada no filtro9 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 30 ⁰)	204
Tabela B10	Resultado do ensaio com água tratada no filtro9 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 36 ⁰)	205
Tabela B11	Resultado do ensaio com água tratada no filtro9 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 50 ⁰)	206
Tabela B12	Resultado do ensaio com água tratada no filtro9 de ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 90 ⁰)	207
Tabela 1C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 20 ⁰ de abertura da válvula borboleta	209
Tabela 2C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 26 ⁰ de abertura da válvula borboleta	210
Tabela 3C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 30 ⁰ de abertura da válvula borboleta	211
Tabela 4C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 36 ⁰ de abertura da válvula borboleta	212
Tabela 5C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 50 ⁰ de abertura da válvula borboleta	213
Tabela 6C	Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 90 ⁰ de abertura da válvula borboleta	214
Tabela 1D	Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 20 ⁰	216
Tabela 2D	Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 26 ⁰	217

Tabela 3D	Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 30^0	218
Tabela 4D	Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 36^0	219
Tabela 5D	Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 50^0	220
Tabela E1	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 20^0$)	222
Tabela E2	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 26^0$)	223
Tabela E3	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 30^0$)	224
Tabela E4	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 36^0$)	225
Tabela E5	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 30^0$)	226
Tabela E6	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 36^0$)	227
Tabela E7	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 50^0$)	228
Tabela E8	Resultado da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b = 90^0$)	229
Tabela F1	Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,54$	231
Tabela F2	Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 253,3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,87$	232
Tabela F3	Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,64$	233
Tabela F4	Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,84$	234
Tabela F5	Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,37$	235
Tabela F6	Réplica do ensaio com a $T_{\text{máx}} = 484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,54$	236
Tabela F7	Réplica do ensaio com a $T_{\text{máx}} = 474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,87$	237
Tabela F8	Réplica do ensaio com a $T_{\text{máx}} = 515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,64$	238
Tabela F9	Réplica do ensaio com a $T_{\text{máx}} = 580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,84$	239
Tabela F10	Réplica do ensaio com a $T_{\text{máx}} = 347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,37$	240
Tabela G1	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\text{máx}}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	242

Tabela G2	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	242
Tabela G3	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	242
Tabela G4	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	243
Tabela G5	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	243
Tabela G6	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	243
Tabela G7	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	244
Tabela G8	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	244
Tabela G9	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	244
Tabela G10	Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=374 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	245
Tabela H1	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=30^\circ$)	247
Tabela H2	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=30^\circ$)	248
Tabela H3	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=30^\circ$)	249
Tabela H4	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=30^\circ$)	250
Tabela H5	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)	251
Tabela H6	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)	252
Tabela H7	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)	253
Tabela H8	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)	254
Tabela I1	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=30^\circ$)	256
Tabela I2	Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)	257

LISTA DE ABREVIATURA

CAESB	Companhia de Água e Esgoto de Brasília
CLP	Controlador Lógico Programável
FDD	Filtração Direta Descendente
F3	Filtro 3 da ETA Rio Descoberto
F9	Filtro 9 da ETA da ETA Rio Descoberto
FP	Filtro Piloto
FP2	Filtro Piloto Dois
FTC	Filtração com taxa constante
FTDV	Filtração com taxa declinante
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETA-RD	Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto
ETA-SC	Estação de Tratamento de Água de São Carlos
IP	Instalação Piloto
M.M.Q	Método dos mínimos quadrados
NBR	Norma brasileira
No	Nível que ocorrerá se todos os filtros estiverem limpos e operando com taxa média de filtração
N ₁	Nível mínimo dinâmico de operação, após o sistema de filtração estar no processo repetitivo
N ₂	Nível dinâmico de operação, quando o filtro mais sujo da bateria tiver que ser retirada para lavagem
N ₃	Nível máximo, que ocorrerá se o filtro a ser lavado permanecer um tempo relativamente longo fora de operação (durante a lavagem)
N _{eq}	Nível de Equilíbrio
N _r	Nível de Referência
N _{lav}	Nível de lavagem
N _{Ireal}	Nível mínimo de operação real
N _{Iteórico}	Nível mínimo de operação teórico
P	Piezômetro
pH	Potencial Hidrogeniônico
SFTD	Sistema de Filtração com Taxa Declinante
uT	Unidade de turbidez
Vb	Válvula borboleta

LISTA DE SÍBOLOS

A	Área de um filtro da bateria (L^2)
Aa	Área adicional de armazenamento a montante dos filtros (L^2)
A _i	Área interna do filtro (L^2)
A _r	Área das câmaras + área do canal central de água de lavagem (L^2)
Cd	Coefficiente de desuniformidade
dh	Variação do nível de água durante a lavagem (L)
dt	Duração da lavagem em t (T)
e	Tamanho efetivo (L)

g	Aceleração da gravidade (L/T^2)
h	Perda de carga devido à retenção de impurezas (L)
H	Perda de carga total (L)
Hd	Carga hidráulica disponível (L)
H_{tub}	Perda de carga na tubulação (L)
H_v	Perda de carga na válvula (L)
H_{dFP2}	Perda de carga total em FP2 (L)
H_{LFP2}	Perda de carga no meio filtrante em FP2 (L)
h_{tubFP2}	Perda de carga na tubulação em FP2 (L)
K_0	Coefficiente de perda de carga laminar inicial (T)
K_t	Coefficiente de perda de carga turbulenta (L^5T^2)
K	Coefficiente de resistividade devido à retenção de impurezas
K_{ro}	Coefficiente de resistividade devido à retenção de impurezas inicial
K_{ra}	Coefficiente de resistividade devido à retenção de impurezas em T_a
K_{rb}	Coefficiente de resistividade devido à retenção de impurezas em T_b
K_{rmax}	Coefficiente de resistividade devido à retenção de impurezas em T_{max}
k	Inverso do coeficiente de permeabilidade
mg	Tamanho do menor grão (L)
Mg	Tamanho do maior grão (L)
n	Número de filtros
Q	Vazão (L^3/T)
R	Coefficiente de determinação
R^2	Coefficiente de correlação
t	Tempo (T)
T	Taxa de Filtração (LT^{-1})
T_{max}	Taxa máxima de filtração (LT^{-1})
T_{min}	Taxa mínima de filtração (LT^{-1})
T_{med}	Taxa média de filtração (LT^{-1})
T_{max}^*	Taxa que ocorre no filtro remanescente durante a lavagem (LT^{-1})
T_a^*	Taxa que ocorre no filtro remanescente durante a lavagem (LT^{-1})
T_b^*	Taxa que ocorre no filtro remanescente durante a lavagem (LT^{-1})
T_{med}^*	Taxa média durante a lavagem durante a operação (LT^{-1})
$T_{med arm}$	Taxa média de filtração durante a lavagem com armazenamento adicional a montante dos filtros (L/T)
T_{med}	Taxa média de filtração durante a operação
V	Velocidade média da seção da tubulação (L/T)
Vol	Volume (L^3)
(x, y)	Sistema de coordenadas
Δt	Espaço de tempo em foram realizadas as leituras na régua
ΔH	Diferença entre os níveis registrados em Δt
ΔH_0	Elevação de $N_{Iteórico}$ para N_{Ireal}
Δx	Variação do nível de equilíbrio
δ	Ângulo de posicionamento da válvula borboleta
α	Coefficiente determinado experimentalmente

RESUMO

COSTA, E.R.H. (2001). **Avaliação do funcionamento de uma instalação de filtração direta descendente com taxa declinante variável em escala real.** São Carlos, 2001. 261p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Um sistema de filtração rápida com taxa declinante variável devidamente projetado e operado pode funcionar como uma alternativa econômica e prática uma vez que este tipo de sistema dispensa equipamentos de controle de vazão e de nível, diminuindo o custo da obra e simplificando a operação. Várias são as formas encontradas por pesquisadores para o estudo destes sistemas, mas a grande maioria os pesquisou em escala piloto; alguns modelaram matematicamente a hidráulica do sistema tentando obter parâmetros de projeto, outros utilizaram métodos gráficos que permitem visualizar o que acontece teoricamente nesses sistemas, mas poucos são os trabalhos desenvolvidos em escala real. O sistema de filtração com taxa declinante variável, na realidade, é bastante simples mas, na maior parte das vezes, uma implantação inadequada pode dificultar a operação e por consequência tornar o processo complexo e pouco eficiente. Este trabalho consistiu em desenvolver uma metodologia de trabalho que permite estudar esse sistema em escala real por meio de simulações numa instalação piloto com características similares à da instalação em escala real com o intuito de se obterem as condições mais adequadas de operação do sistema. O trabalho ressalta as dificuldades encontradas numa instalação com filtração direta descendente e taxa declinante variável em escala real, quando seu funcionamento ocorre sem uma operação prévia, na qual os equipamentos e o sistema deveriam ter sido devidamente ajustados. O desenvolvimento desse trabalho resultou em uma metodologia que permite obter parâmetros de projeto de um sistema com taxa declinante variável a partir de uma instalação piloto constituída de um único filtro, levando-se em conta a área de armazenamento a montante dos filtros.

Palavras-chave: Filtração; taxa declinante; armazenamento a montante dos filtros; parâmetros de projeto.

ABSTRACT

COSTA, E.R.H. Investigation of full scale of a variable declining rate filtration system. São Carlos, 2001. 261p. Doctoral Thesis - Engineering School of São Carlos - University of São Paulo.

A variable declining rate filtration system, designed and operated with care, can be an economical and practical alternative for water treatment as this type of system requires no control equipment for discharge and head. There are various ways to study such systems but most of them employed pilot scale tests; some either modelled the hydraulic of the system mathematically trying to obtain project parameters; others made use of graphical methods to visualise what occurs within these systems. Very few studies have been conducted at full scale. Although declining rate filtration systems are rather simple, their inadequate implantation can pose difficulties in operation, thus making the process complex and less efficient. This work consisted of developing a methodology of investigation that permits the study of full scale rate filtration systems by means of simulations in a pilot installation with the same characteristics as the real system, in order to determine the most adequate operational conditions. This research reveals the difficulties associated with the study of an actual direct down flow and a variable declining rate filtration system, when it functions without a previous experimental operation in which the system and its equipment are adequately adjusted. The development of this work has led to a methodology that allows for obtaining project parameters of a declining variable rate system by means of a pilot installation comprising one single filter, taking into account the storage upstream the filters

Keywords: Filtration, variable declining rate, project parameters, storage upstream the filters.

1 INTRODUÇÃO

Vários tipos de filtros têm sido utilizados ao longo do tempo em tratamento de águas de abastecimento, entretanto foi no século XX que houve o predomínio da chamada filtração rápida por gravidade. Os filtros rápidos por gravidade diferem entre si quanto ao tipo do meio filtrante (camada simples ou camadas múltiplas), ao escoamento (ascendente ou descendente) e ao método de operação (filtração com taxa constante ou filtração com taxa declinante).

Na década de 50, a constatação de que os controladores de vazão podiam prejudicar a qualidade da água filtrada fez com que pesquisadores se interessassem pelo emprego de taxas declinantes na filtração rápida. Porém, o método de operação conhecido como taxa declinante variável foi apresentado pela primeira vez por CLEASBY (1969, 1972a, 1972b), que destacou dois métodos que dispensam o uso de controladores de vazão: a distribuição eqüitativa de vazão e a taxa declinante variável, ressaltando que o último seria mais vantajoso, por esse motivo o recomendado. O autor efetuou algumas adaptações nos filtros de algumas estações de tratamento na China e nos EUA, retirando equipamentos de controle de vazão e de nível, permitindo que os filtros funcionassem como vasos comunicantes, e obteve resultados satisfatórios sobretudo com relação à qualidade do efluente nos momentos em que havia variações de vazão.

Nessa época, a necessidade de se empregar taxas de filtração cada vez maiores e de se produzir água filtrada com boa qualidade resultou na utilização de sistemas de filtração com taxa declinante, como método de operação de filtros, associada à adoção de meios filtrantes de camadas múltiplas. Porém, nesse período, não se tem registro de um grande número de instalações projetadas ou adaptadas para a operação com taxa declinante. Algumas estações de tratamento, no entanto, estavam trabalhando segundo esse método de operação, devido ao fato de que seus

controladores, de vazão e de nível, apresentarem defeitos ou simplesmente não funcionarem.

Foi nos anos 80 que os trabalhos experimentais em instalação piloto, realizados por DI BERNARDO & CLEASBY (1980) mostraram a superioridade da filtração com taxa declinante variável sobre a taxa constante. A partir desses experimentos, questões a respeito da carga hidráulica necessária, das variações do nível de água, da influência do número de filtros na bateria, das perdas de carga turbulenta e da taxa máxima de filtração passaram a ter respostas mais satisfatórias. Esse trabalho forneceu importantes subsídios para o equacionamento hidráulico destes sistemas.

A partir de então, surgiram vários estudos a respeito da hidráulica da filtração com taxa declinante e das variáveis que envolvem estes sistemas. ARBOLEDA et al. (1985) desenvolveram um modelo matemático, procurando determinar os parâmetros relativos a um sistema de filtração com taxa declinante. O modelo proposto utiliza sistemas de equações relacionando as perdas de carga (laminares e turbulentas) e as taxas de filtração com o tempo.

Ainda na década de 80, DI BERNARDO (1985, 1986a) apresentou um modelo matemático visando descrever o comportamento de uma bateria de filtros, utilizando um sistema de equações obtido a partir de fórmulas de perda de carga utilizadas em projetos de filtração. Sua resolução, por método iterativo, fornece as variações de nível e as vazões nos filtros tanto durante a operação dos filtros quanto durante a lavagem de cada unidade.

O modelo de Di Bernardo não recorre a equações empíricas e não possui parâmetros de difícil determinação. O dimensionamento do sistema é facilmente obtido e permite analisar os efeitos da taxa média de filtração, do número de filtros em funcionamento, da carga hidráulica disponível e das perdas de carga turbulentas envolvidas.

Posteriormente, várias pesquisas experimentais, enfocando a filtração com taxa declinante variável foram realizadas em instalações piloto. SOUSA (1990) estudou o posicionamento da crista do vertedor de saída em relação ao topo do meio filtrante. Na mesma época, TEIXEIRA (1991), utilizando o modelo de DI BERNARDO (1993), obteve uma metodologia para a previsão da duração da carreira de um

sistema de filtração com taxa declinante, composto por um número qualquer de unidades, a partir de um único filtro piloto, o qual funciona com taxa de filtração constante e igual à máxima prevista pelo modelo. MACHADO (1995) estabeleceu um modelo matemático que leva em conta a influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros.

Ao final na década de 90, pesquisadores como MENDES (1999) e GABRIEL (2000) propuseram métodos gráficos para a determinação dos parâmetros de projeto dos sistemas com taxa declinante, baseados nas hipóteses do modelo de DI BERNARDO (1993).

A maior parte dos pesquisadores, como DI BERNARDO & CLEASBY (1980), CLEASBY E DI BERNARDO (1980), SOUZA (1990), TEIXEIRA (1991), MACHADO (1995), estudaram a filtração com taxa declinante em instalações piloto. Outros, como MENDES (1999) e GABRIEL (2000), utilizaram métodos gráficos de forma bastante interessante para determinar os parâmetros de projeto, porém sem o respaldo de trabalhos experimentais.

Apesar das conclusões favoráveis ao uso da filtração com taxa declinante, um estudo publicado pela AWWA Filtration Committee (1984) recomenda que mais pesquisas sejam realizadas principalmente em instalações reais, sob condições bastante controladas. Em contrapartida, um artigo publicado por CORNWELL (1984) relata os bons resultados operacionais de várias estações de tratamento nos EUA que trabalhavam como um sistema de taxa declinate variável, principalmente no que diz respeito à facilidade de operação.

O estudo da filtração direta descendente envolve muitas variáveis, dentre as quais estão: as características do meio filtrante, o tipo de coagulante, o uso de auxiliares de floculação e filtração, a existência de pré-floculação, as taxas média e máxima de filtração e a qualidade da água bruta. De todas estas variáveis, a taxa máxima de filtração requer atenção especial, uma vez que ela ocorre no filtro mais limpo da bateria.

O presente trabalho propõe a aplicação da metodologia sugerida por TEIXEIRA (1991), e da modelação matemática, incluindo armazenamento de água a montante dos filtros, apresentada por MACHADO (1995) a um caso em escala real

da filtração direta descendente com pré-floculação e taxa declinante variável levando-se em conta o armazenamento de água a montante dos filtros.

O trabalho consistiu basicamente em adequar uma instalação piloto de forma que ela apresente características similares à da instalação em escala real, em termos de área de armazenamento a montante dos filtros e das perdas de carga envolvidas. A partir de então, diversas simulações foram realizadas na instalação piloto para se obterem as condições mais adequadas de operação da instalação em escala real.

O trabalho ressalta as dificuldades encontradas numa estação com filtração direta descendente e taxa declinante variável, quando seu funcionamento ocorre sem uma operação prévia, na qual os equipamentos e o sistema deveriam ser devidamente ajustados.

A metodologia desenvolvida neste trabalho viabiliza estudar a estação em escala real testando os parâmetros de projeto com flexibilidade, facilitando desta forma a operação do sistema.

2 OBJETIVO

Esse trabalho tem por objetivos:

1. Desenvolver uma metodologia de trabalho que permita estudar um sistema com taxa declinante variável em escala real testando os parâmetros de projeto numa instalação piloto com flexibilidade, facilitando desta forma sua operação;
2. Realizar simulações na instalação piloto com características similares à da instalação em escala real para obter as condições mais adequadas de operação do sistema;
3. Apresentar sugestões, com base em dados experimentais e em simulações numéricas, para a melhoria do desempenho do sistema em escala real com taxa declinante variável em questão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidráulica da filtração

Em um sistema de filtração, a carga hidráulica e a resistência total dos filtros variam com o tempo, podendo dar origem tanto a taxas de filtração constantes quanto variáveis, dependendo da entrada e da saída dos filtros. Assim, conforme a disposição construtiva e do sistema de operação, a filtração pode ser de dois tipos:

- a) Filtração com taxa constante (FTC)
- b) Filtração com taxa declinante variável (FTDV)

3.1.1 Características da filtração com taxa constante (FTC)

Nesse método, conhecido como “*Método de Distribuição Equitativa de Vazões*”, a entrada de água nos filtros se dá por meio de vertedores com descarga livre no interior do filtro. Assim, a vazão afluenta é dividida equitativamente e o nível de água no interior de cada um deles varia independentemente dos demais. Dessa forma, a vazão será constante se o aumento da perda de carga com o tempo, devido à retenção de impurezas, for acompanhado do aumento da carga hidráulica disponível.

O nível de água, em cada filtro, variará de um valor mínimo (filtro limpo) a um valor máximo (filtro sujo) e será diferente em cada filtro da bateria dependendo do grau de colmatação de cada um deles.

O nível mínimo de operação, quando o filtro estiver limpo, não deve se situar abaixo do topo do meio filtrante, para isso deve ser prevista a instalação de uma válvula ou caixa provida de vertedor para ajuste do nível de operação. O vertedor de

saída deve se localizar em cota próxima à do topo do meio filtrante para que não haja ocorrência de pressão relativa negativa. A figura 3.1 mostra esquematicamente o arranjo típico da entrada e saída dos filtros que trabalham segundo esse método de operação.

FIGURA 3.1 - Arranjo típico da entrada e saída de filtros com taxa constante, (DI BERNARDO, 1993).

3.1.2 Característica da filtração com taxa declinante variável (FTDV)

A estrutura das unidades filtrantes de um sistema com taxa declinante variável é semelhante à do sistema com distribuição equitativa de vazão, diferenciando-se apenas na localização da entrada de água aos filtros. No método de filtração com taxa declinante variável a entrada de água é afogada, localizando-se abaixo do nível mínimo de operação dos filtros; as unidades, então, passam a constituir um sistema de vasos comunicantes, com níveis de água interdependentes.

A distribuição de água pode ser feita por meio de tubulações ou canal de dimensões suficientemente grandes para não restringir o escoamento, pois a vazão

em um trecho qualquer se altera em função do número de filtros e da sequência de lavagem.

A saída de água pode ser efetuada por meio de um vertedor, localizado em uma câmara individual ou geral, a jusante dos filtros. A cota da crista deste vertedor deve ser localizada acima do topo do meio filtrante.

Essas condições de entrada e saída permitem que as taxas de filtração sejam estabelecidas apenas pelo grau de colmatação de cada meio filtrante. O nível de água será ligeiramente diferente nos filtros da bateria, exceto para o filtro que, em algum instante, se encontrar em operação de lavagem.

Na figura 3.2 é mostrado o arranjo típico da entrada e da saída dos filtros com taxa declinante variável.

FIGURA 3.2 -Arranjo típico da entrada e saída de filtros com taxa declinante variável, (DI BERNARDO, 1993).

DI BERNARDO (1993) recomenda que a veiculação de água aos filtros se faça por meio de canal ao invés de tubulações pois o nível de água no canal é visível

DI BERNARDO (1993) recomenda que a veiculação de água aos filtros se faça por meio de canal ao invés de tubulações pois o nível de água no canal é visível facilitando sua observação por parte do operador. Além disso, a perda de carga ao longo do canal é relativamente baixa, de modo que todos os filtros são submetidos à mesma carga hidráulica.

Na Figura 3.3, têm-se os níveis referidos a um sistema típico com quatro filtros na bateria e as respectivas taxas de filtração após a operação se encontrar em uma situação repetitiva.

FIGURA 3.3 -Configuração típica de um sistema com taxa declinante variável constituído de quatro filtros na situação repetitiva, (DI BERNARDO, 1993).

De acordo com DI BERNARDO (1993) existem três níveis que ocorrem no canal comum de alimentação dos filtros que são importantes na filtração com taxa declinante variável:

1. O nível N_1 acontece após o filtro recém-lavado entrar em operação. Depois da rápida transferência de água dos demais filtros e do canal de alimentação de água para o mesmo, com o filtro recém lavado em operação, a resistência total à filtração é diminuída até um nível em que a vazão total efluente se iguale à total afluyente;

2. O nível N_2 corresponde ao instante em que o filtro mais sujo da bateria é retirado de operação para ser lavado. A carga hidráulica disponível para a filtração,

que deve ser definida pelo projetista, é igual à diferença entre o N_2 e a crista do vertedor de saída.

3. O nível N_3 ocorre no final da lavagem de um dos filtros da bateria; nessa situação, o nível de água no canal comum de alimentação dos filtros sobe, pois os filtros remanescentes em operação devem absorver a vazão daquele que foi tirado de operação para ser lavado.

Observando a figura 3.3, percebe-se que cada filtro trabalha com uma taxa de filtração determinada pelo seu grau de colmatação. No período entre as lavagens dos filtros as taxas permanecem praticamente constantes, pois o aumento da resistência dos filtros é compensado pelo aumento da perda da carga hidráulica através da elevação do nível da água de N_1 para N_2 no canal comum de alimentação dos filtros.

Quando o nível N_2 for atingido, o filtro mais sujo deve ser retirado de operação para ser lavado. No final da lavagem deste filtro, o nível de água eleva-se até atingir o nível N_3 no canal comum de alimentação dos filtros, pois a vazão do filtro retirado de operação deve ser absorvida pelos restantes.

No momento em que o filtro recém-lavado começa a operar e passa a fazê-lo com taxa máxima, o nível de água no canal comum de alimentação diminui até atingir um valor mínimo (N_1) voltando a elevar-se, repetindo-se assim o ciclo.

O comportamento repetitivo é a característica básica desse sistema. Ao longo da carreira de filtração cada filtro tem sua taxa reduzida na forma de degraus. A duração de cada ciclo depende da qualidade do afluente.

ARBOLEDA et al. (1985) descrevendo um sistema com taxa declinante variável, definiu que as perdas de carga, as quais regulam o comportamento dos filtros, são de dois tipos:

1. **Laminares:** no meio filtrante, onde o número de Reynolds é menor que 6, podendo estas serem:
 - a. devido ao meio filtrante limpo (no começo da carreira);
 - b. devido à colmatação (que varia no decorrer do tempo).
2. **Turbulenta:** nos drenos, tubos, válvulas, acessórios e vertedores efluentes, as quais não se alteram no decorrer do tempo e possuem o número de Reynolds muito alto.

Segundo ARBOLEDA et al. (1985), a grandeza destas perdas de carga definem os seguintes níveis de água no filtro (ver figura 3.4):

1. O nível estático, que coincide com a crista do vertedor efluente, quando este existe;
2. O nível mínimo, que é a altura de água no vertedor somada às perdas de carga laminares no meio filtrante limpo e às perdas de carga nas tubulações efluentes;
3. O nível de equilíbrio definido como a altura compatível com o estado de colmatação dos filtros, quando começa a carreira de filtração, depois que um filtro limpo é colocado em operação;
4. O nível de colmatação, definido como a máxima altura permissível de variação de nível durante a carreira;
5. O nível de lavagem que é o nível final alcançado no canal comum de alimentação quando um filtro estiver fora de serviço para lavagem.

FIGURA 3.4 - Níveis nos filtros com taxa declinante ARBOLEDA et al. (1985)

3.1.3 Classificação dos filtros com taxa declinante variável

De acordo com ARBOLEDA et al. (1985) os filtros que funcionam como um sistema de taxa declinante variável podem ser classificados em quatro tipos:

a) Baixa perda de carga turbulenta na entrada e na saída

A alimentação deste tipo de filtro deve ser feita por meio de um canal ou tubulação muito grande de forma a produzir baixa perda de carga para qualquer vazão tanto no canal comum quanto nas unidades filtrantes da bateria.

A entrada nos filtros deve estar sempre abaixo do nível de equilíbrio, não produzindo uma perda de carga maior que uns poucos centímetros para qualquer vazão que precise entrar na respectiva unidade, principalmente quando esta for maior que a vazão média.

O sistema efluente se faz por meio de um vertedor individual ou coletivo cuja crista se posiciona de tal forma que a entrada do afluente permaneça sempre submersa e evite que o meio filtrante possa secar no começo da carreira.

Nesse caso, o nível de água no canal comum de alimentação dos filtros possui praticamente o mesmo nível que os filtros e estes, por sua vez, possuem todos praticamente o mesmo nível. Os filtros trabalham como células de um único grande filtro dividido, o que permite uma vantagem adicional de poder interconectá-lo para efetuar uma lavagem com a água dos remanescentes. A saída deste tipo de filtro não possui nenhuma restrição que possa aumentar a perda de carga turbulenta.

b) Alta perda de carga turbulenta na entrada e baixa na saída

Esta condição ocorre quando existem válvulas ou comportas na entrada que produzem alta perda de carga turbulenta. Os níveis de água dentro dos filtros são mais baixos que o nível de água no canal comum e os níveis nas unidades distintas da bateria são diferentes.

c) Baixa perda de carga turbulenta na entrada e alta na saída

Esse caso se apresenta quando existe um canal comum que está abaixo do nível de equilíbrio e as válvulas ou comportas de entrada produzem baixa perda de carga mas, na tubulação efluente produzem altas perdas de carga, maiores que a perda de carga no meio granular limpo.

d) Alta perda de carga turbulenta na entrada e na saída;

Este caso é comum em estações de tratamento mais antigas. Neste tipo de filtro o problema hidráulico é mais complexo pois os níveis de água nas unidades entre si e no canal comum são distintos como também a restrição na tubulação efluente introduz uma menor variação em cada filtro à medida que as perdas de carga turbulentas aumentam para uma mesma carreira de filtração.

A respeito desta classificação, ARBOLEDA et al.(1985) concluiu em seu artigo que a medida que as perdas de carga turbulentas diminuem, a relação entre as taxas média e máxima (T_{max}/T_{med}) aumenta, sendo maior quanto maior for o número de filtros conectados.

3.1.4 Vantagens da FTDV sobre a FTC

GREGORY e YADAY apud ARBOLEDA (1985), por meio de experimentos, mostraram as seguintes vantagens dos FTDV em relação aos FTC;

1. produzem melhor qualidade de água;
2. produzem carreiras de filtração mais longas.

CLEASBY & DI BERNARDO (1980), também através de experimentos afirmam que as principais vantagens da FTDV sobre a FTC são:

1. Obtenção de uma água filtrada de melhor qualidade;
2. Se a vazão da estação for aumentada, a taxa de filtração será elevada gradativamente sem prejuízo da qualidade da água filtrada, o que é mais comum de acontecer no FTC;
3. A perda de carga pode ser observada pelo nível de água nos filtros;
4. Utilização de menor perda de carga para o mesmo tempo de funcionamento;
5. Os custos inicial, de operação e manutenção dos equipamentos serão eliminados.

ARBOLEDA (1991) apresentou como vantagens da FTDV sobre a FTC:

1. a aplicação simples do método;
2. a diminuição considerável dos custos de construção;
3. a facilidade de operação dos filtros.

3.2 Armazenamento de água a montante dos filtros

De acordo com MACHADO (1995), existem situações em que os canais de alimentação dos filtros apresentam capacidade de armazenamento que não pode ser considerada desprezível, já que são normalmente projetados com dimensões relativamente grandes para minimizar as perdas de carga em toda a sua extensão. Isso diz respeito tanto aos canais de alimentação dos filtros, na filtração direta em linha, quanto aos canais de coleta de água decantada e de alimentação dos filtros, nos sistemas de tratamento completo.

Nos sistemas de filtração direta descendente com pré-floculação, os filtros, o canal de alimentação dos filtros e as unidades de pré-floculação trabalham praticamente num mesmo nível, transferindo uma grade área de armazenamento ao sistema de filtração com taxa declinante variável.

Na figura 3.5, tem-se um esquema de um sistema conforme descrito, mostrando a igualdade dos níveis entre as unidades e os do armazenamento substancial a montante dos filtros.

FIGURA 3.5 - Esquema de um sistema de filtração direta descendente com pré-floculação mostrando o armazenamento a montante dos filtros (MACHADO, 1995).

CLEASBY (1989) apud MACHADO (1995) apresenta como vantagem do armazenamento de água a montante dos filtros, a redução dos picos de turbidez que ocorre nos filtros remanescentes, quando esses absorvem a vazão daquele que foi retirado de operação para ser lavado.

DI BERNARDO (1986b) afirma que a desvantagem que a grande capacidade de armazenamento pode trazer ao sistema está relacionada com a pequena variação de nível de água entre lavagens sucessivas e durante a lavagem de um filtro, podendo causar dificuldades na operação e requerer o uso de dispositivos de medição de perda de carga. A grande vantagem que o mesmo autor cita refere-se à possível ausência de picos acentuados de turbidez no efluente, quando um filtro é retirado de operação.

3.3 Estudos recentes sobre a filtração com taxa declinante variável

A partir da década de 80, surgiram vários estudos a respeito da hidráulica da filtração com taxa declinante e das variáveis envolvidas nestes sistemas.

Modelos matemáticos teóricos para o equacionamento dos sistemas de filtração com taxa declinante surgiram e a maioria deles apresentava características desfavoráveis com utilização de equações relativamente complexas, necessitando de resolução por métodos numéricos para descrever as alterações do filtro com o tempo e a necessidade de se recorrer a formulações empíricas, dificultando a determinação de seus parâmetros em instalações experimentais.

Alguns pesquisadores desenvolveram métodos experimentais ou gráficos para a determinação dos parâmetros de projeto dos sistemas com taxa declinante. Tais métodos propõem maneiras de estudar o comportamento hidráulico possibilitando determinar as taxas de filtração dos filtros de uma bateria, os níveis de operação e lavagem e a carreira de filtração.

Os trabalhos experimentais, modelos desenvolvidos e métodos de estudo que mostraram um melhor entendimento dos sistemas com taxa declinante serão então discutidos.

3.3.1 Método de Cleasby e Di Bernardo

DI BERNARDO & CLEASBY (1980) realizaram estudos baseados em investigações experimentais os quais contribuíram significativamente para o projeto de sistemas de filtração com taxa declinante (SFTD). Esta pesquisa, além de comprovar a superioridade da filtração com taxa declinante, forneceu subsídio para um melhor equacionamento da hidráulica desses sistemas. Em artigo subsequente, CLEASBY & DI BERNARDO (1980) discutiram questões como carga hidráulica necessária, as variações dos níveis de água, a influência do número de filtros de uma bateria, das perdas de carga turbulentas e da taxa máxima de filtração e passaram a ter respostas mais satisfatórias a respeito do assunto.

CLEASBY & DI BERNARDO (1980) mostraram que a turbidez máxima no efluente de um sistema com taxa declinante ocorreu imediatamente após o filtro limpo ter sido colocado em funcionamento. Eles sugeriram limitar a taxa inicial do filtro limpo, utilizando-se por exemplo, um orifício limitador de vazão, que pode ser inserido na tubulação efluente. Assim, a taxa máxima de filtração no nível mais baixo e no mais alto de operação (considerando-se todos os filtros em operação) pode ser manipulada pelo ajuste de perda de carga turbulenta na tubulação efluente.

DI BERNARDO & CLEASBY (1980) utilizando quatro filtros piloto, trabalhando como um sistema de taxa declinante, empregaram taxas médias de 7,33; 12,22 e 17,11 m/h (175; 193,2; 410,64 m³/m².dia). Esses autores adotaram a taxa máxima de filtração, no início da carreira de 1,3 a 1,5 vezes a taxa média fixada. Isso foi obtido adotando-se valores adequados para a carga hidráulica disponível (correspondendo ao nível N₂), ou aumentando as perdas de carga turbulentas.

Na determinação das taxas de filtração, os autores assumiram uma distribuição simétrica das taxas de filtração em relação à taxa média. Esta hipótese supõe uma variação linear do coeficiente de permeabilidade durante a colmatação dos filtros, o que na realidade não ocorre.

Os autores ressaltaram a importância de se limitar a taxa máxima, uma vez que elas ocorrem imediatamente após o filtro limpo ter sido colocado em funcionamento. Tal limitação baseou-se no valor da relação entre as taxas máxima e média, que segundo eles, não deveria ultrapassar 1,5, para as situações estudadas (qualidade da água e do meio filtrante). Desta forma, o valor da taxa máxima foi condicionado ao valor da taxa média, sem considerar qual seria a capacidade com que o filtro mais limpo poderia operar, ou seja, a taxa máxima que o filtro mais limpo suportaria sem que houvesse deterioração da água filtrada.

Não obstante estas limitações, a metodologia apresentada contribuiu significativamente para o desenvolvimento de projetos de SFTD. Outro grande mérito que ela apresenta é que não recorre à utilização de coeficientes empíricos.

3.3.2 Modelo de Arboleda

ARBOLEDA et al. (1985) desenvolveram um modelo matemático procurando determinar os parâmetros relativos a um SFTD. O modelo proposto utiliza sistemas de equações relacionando as perdas de carga (laminares e turbulentas) e as taxas de filtração com o tempo.

Os autores levaram em consideração que a perda de carga laminar no meio filtrante varia desde um valor inicial (quando o meio filtrante está limpo) até o final da carreira (quando os poros são obstruídos pelas partículas) e que as perdas de carga turbulentas ou quadráticas são as produzidas nos drenos, válvulas, acessórios e tubos.

A fim de determinar os valores da perda de carga no meio filtrante, no final da carreira de filtração, os autores precisaram recorrer a uma equação empírica para descrever a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo; optaram por uma atribuída a IVES (1969). Tal escolha fez incluir ao modelo três constantes empíricas de difícil determinação, as quais variam com as condições tanto da água que entra no filtro quanto das características do meio filtrante.

A determinação das constantes empíricas são obtidas por meio da calibração do modelo, ajustando-se a equação aos dados experimentais obtidos nos trabalhos experimentais de GREGORY & YADAY apud ARBOLEDA et al. 1985, DI BERNARDO & CLEASBY (1980) e o de ARBOLEDA & RICHTER (1980).

Gregory e Yaday usaram em seus trabalhos experimentais quatro filtros de areia e antracito em laboratório, em Medmenhan e complementaram suas investigações na estação de tratamento de Burhan (Inglaterra). Di Bernardo e Cleasby também utilizaram quatro filtros de areia e antracito na universidade de Iowa. Conforme citado em ARBOLEDA et al. (1985) no trabalho experimental destes autores a perda de carga na entrada dos filtros foi considerada alta.

ARBOLEDA & RICHTER apud ARBOLEDA et al. (1985) obtiveram dados na estação de tratamento em Cochabamba, Bolívia, que possuía seis filtros com taxa declinante variável com baixa perda de carga tanto na entrada quanto na saída. Conforme ARBOLEDA et al. (1985), a perda de carga turbulenta baixa aumentava a relação entre as taxas máxima e média no começo do ciclo em até 2,0 e 2,2.

CLEASBY & DI BERNARDO (1980) citam, como referência, uma comunicação pessoal de Arboleda, realizada em abril de 1980, onde além de confirmar a relação obtida entre as taxas máxima e média em Cochabamba, o autor reforçou que a turbidez média efluente chegou a valores médios de 0,5 uT e máximos de 1 uT, para taxas de 7,3 a 9,8 m/h (175 a 235 m³/m².d). Também foi mencionado que os valores de taxas mínimas no filtro mais sujo ficou entre 20 a 50% em relação ao valor da taxa média, na mesma estação. É possível que aquele valor de turbidez seja resultado da mistura da água com turbidez elevada, proveniente do filtro mais limpo com taxa máxima de filtração, com a água dos filtros mais sujos com taxas de filtração menores, ou então devido aos valores relativamente baixos das taxas médias utilizadas.

Os dados obtidos na estação em Cochabamba foram usados para analisar o comportamento dos sistemas que possuem perda de carga turbulenta baixa.

O modelo de ARBOLEDA (1985) considera que a vazão total que entra na bateria de filtros é igual à total que está saindo por todas as unidades dos filtros.

Para generalizar as equações para um sistema de n unidades filtrantes o autor fez as seguintes suposições:

1. Que os filtros trabalhem como vasos comunicantes, sem restrição na entrada e por tanto possuem o mesmo nível;
2. Que o coeficiente de perda de carga turbulenta seja o mesmo em todos os filtros (ou seja, as características hidráulicas dos filtros sejam as mesmas);

3. Que o coeficiente de perda de carga laminar inicial também seja o mesmo. De acordo com o próprio autor, esta suposição não é de todo correta pois após a lavagem, a porosidade depende da forma com que o filtro foi lavado.

O método utilizado por ARBOLEDA et al. (1985) foi o de diferenças finitas utilizado para as condições iniciais (todos os filtros limpos) e ao longo da carreira de filtração.

A partir do modelo descrito e de simulações em filtros com taxa declinante, para algumas condições específicas (água afluyente ao filtro e do tipo do meio filtrante) ARBOLEDA et al. (1985) concluíram que:

1. À medida que diminuem as perdas de carga quadrática, a relação $T_{\max}/T_{\text{med}}$ aumenta com o aumento do número de filtros conectados entre si.
2. Nos casos estudados pelo autor a relação vai de 1,5 a 2 para 4 filtros, quando a perda de carga turbulenta é 40% da perda de carga total, ou 2,5 para 12 filtros, quando não há perda de carga.
3. A profundidade dos filtros é maior quando maior for a perda de carga turbulenta e, quanto maior a perda de carga turbulenta, menor a relação $T_{\max}/T_{\text{med}}$.

Com o desenvolvimento do modelo, os autores proporcionaram uma boa discussão, dando um outro enfoque a respeito da relação entre as taxas máxima e média. O modelo serve como indicador do comportamento hidráulico de um certo SFTD, uma vez que foi calibrado ajustando-se as equações para um tipo de água afluyente aos filtros e considerando os mesmos possuidores de um determinado meio filtrante.

3.3.3 Di Bernardo

DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b) apresentou um modelo que procura descrever o comportamento de uma bateria de filtros através de um sistema de equações. O modelo não emprega qualquer equação que represente a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo, por consequência, não há parâmetros empíricos a serem adotados ou determinados experimentalmente.

O modelo tem se constituído numa ferramenta bastante útil para o projeto e a análise dos sistemas de filtração com taxa declinante variável. Através dele é possível determinar as taxas de filtração e as variações de nível de água nos filtros, tanto durante a operação, quanto no período em que um dos filtros é retirado para lavagem. As influências da taxa média de filtração, do número de unidades, da perda de carga turbulenta total e da carga hidráulica disponível, entre outros fatores, também podem ser investigadas com a utilização desse modelo.

Para concepção do modelo, o autor considerou uma bateria de filtros trabalhando de maneira repetitiva, com as vazões, em cada um deles, mantendo-se constante em um mesmo ciclo (intervalo de tempo entre duas lavagens) e declinando na forma de degraus, em ciclos consecutivos.

O modelo faz uso de curvas de variação da perda de carga e dos níveis em função das taxas de filtração mostradas na figura 3.6. As curvas 1 e 2 representam, respectivamente, a perda de carga laminar devido ao meio filtrante limpo e à perda de carga turbulenta nas tubulações e acessórios. O ponto 0 refere-se à cota da crista do vertedor de saída a partir do qual se iniciam as curvas de perda de carga.

A curva 1+2 (soma das perdas de carga laminar e turbulenta) é a representação gráfica da eq (3.1).

$$H = k_0 T + k_t T^y \quad (3.1)$$

onde:

H = perda de carga total (L);

k_0 = coeficiente de perda de carga laminar inicial(T);

k_t = coeficiente de perda de carga turbulenta ($L^{-5} T^2$);

T = taxa de filtração (LT^{-1}).

FIGURA 3.6 - Variação da perda de carga e dos níveis em função das taxas de filtração em um sistema com taxa declinante variável. DI BERNARDO (1993).

Considerando-se que a vazão afluyente seja constante, os filtros sejam idênticos e que a qualidade do afluyente não varie consideravelmente, os filtros funcionam numa sucessão de estágios. Isso pode ser visto na figura 3.3. O filtro F_1 trabalha com a taxa T_{max} no intervalo $(t_0 - t_1)$, T_a em $(t_1' - t_2)$, T_b em $(t_2' - t_3)$ e T_{min} em $(t_3' - t_4)$.

As diferenças de tempo $(t_1 - t_1')$, $(t_2 - t_2')$, $(t_3 - t_3')$ e $(t_4 - t_4')$ correspondem aos momentos em que ocorrem as transições com aumento da taxa de filtração nos filtros remanescentes em operação, no início dos períodos, e taxas constantes no final.

No modelo, o autor considera que o escoamento através do meio filtrante é laminar, permanecendo laminar mesmo em estágios de elevada colmatação. Sendo assim, a perda de carga devido à retenção de impurezas é uma função linear da taxa de filtração, podendo ser expressa como:

$$h = K T v \quad (3.2)$$

onde;

h = perda de carga devido à retenção de impurezas (L)

K = coeficiente de resistividade devido à retenção de impurezas (T)

$T v$ = Taxa de filtração (LT⁻¹).

Cada um dos valores de h_0 , h_a , h_b , e h_{max} na figura 3.6 pode ser representado como função da respectiva taxa de filtração de acordo com uma equação similar à eq.(3.2), conforme os diferentes níveis de colmatação determinados por k . Os valores de k são inversamente proporcionais ao coeficiente de permeabilidade K , que são determinados sem que haja qualquer formulação empírica.

O autor assumiu que o valor do coeficiente de resistividade devido à retenção de impurezas mantém-se constante durante um período de transição mostrado na figura 3.3. Essa hipótese baseia-se no fato de que a quantidade de matéria retirada dos filtros remanescentes em operação nesse período não é significativa.

De acordo com essas considerações, DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b, 1993) montou um sistema de equações que fornecem as taxas em cada filtro e as variações de nível no canal comum de alimentação dos filtros. Assim, considerando uma bateria de quatro filtros, pode-se identificar as situações do Quadro 3.1, no qual estão representadas as taxas de filtração, as perdas de carga, os coeficientes de resistividade devido à retenção de impurezas, bem como as equações de escoamento laminar do filtro F_1 , no decorrer do tempo, mostrando os níveis atingidos no canal comum de alimentação dos filtros, em acordo com o que foi mostrado nas figuras 3.3 e 3.6.

QUADRO 3.1 - Taxas de filtração, perdas de carga, coeficientes de resistividade devido à retenção de impurezas e equações de escoamento laminar de F_1 .

Tempo	Nível	Filtro	Condição	Taxa de Filtração (m/d)	Coeficiente de resistividade	Perda de carga devido a retenção de impurezas (m)	Equações de escoamento laminar no filtro F_1
T_0	N_1	$*F_1$ F_2 F_3 F_4	Início	T_{max} T_a T_b	zero K_{r0} K_{ra}	zero h_a h_b	Perda de carga no F_1 $h_0 = 0$(3.3)
T_1	N_2	$*F_1$ F_2 F_3 F_4	antes da lavagem de F_4	T_{min} T_{max} T_a T_b	K_{rb} K_{r0} K_{ra} K_{rb}	h_{max} h_0 $h_a + h_0$ $h_b + h_0$	Perda de carga no F_1 $h_0 = k_{r0} \cdot T_{max}$(3.4)
T_1'	N_1	F_4 $*F_1$ F_2 F_3	após F_4 entrar em operação	T_{min} T_{max} T_a T_b T_{min}	K_{max} zero K_{r0} K_{ra} K_{rb}	$h_{max} + h_0$ zero h_a h_b h_{max}	Perda de carga no F_1 , durante os períodos de transição (N_2-N_1). $h_a = K_{r0} \cdot T_a$(3.5) K_r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K_{r0} em $N_2 = k_{r0}$ em N_1 , então; $\frac{h_0}{T_{max}} = \frac{h_a}{T_a} \Rightarrow h_a = h_0 \frac{T_a}{T_{max}}$(3.6)
T_2	N_2	F_4 $*F_1$ F_2 F_3	antes da lavagem de F_3	T_{max} T_a T_b	K_{r0} K_{ra} K_{rb}	h_0 $h_a + h_0$ $h_b + h_0$	Perda de carga no F_1 $h_a + h_0 = K_{ra} \cdot T_a$(3.7)
T_2'	N_1	F_3 F_4 $*F_1$ F_2	após F_3 entrar em operação	T_{min} T_{max} T_a T_b T_{min}	K_{max} zero K_{r0} K_{ra} K_{rb}	$h_{max} + h_0$ zero h_a h_b h_{max}	Perda de carga no F_1 , durante os períodos de transição (N_2-N_1) $h_b = k_{ra} \cdot T_b$(3.8) K_r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K_{ra} em $N_2 = k_{ra}$ em N_1 , então; $\frac{h_a + h_0}{T_a} = \frac{h_b}{T_b} \Rightarrow h_b = (h_0 + h_a) \frac{T_b}{T_a}$(3.9)

Continuação do QUADRO 3.1

Tempo	Nível	Filtro	Condição	Taxa de Filtração (m/d)	Coefficiente de resistividade	Perda de carga devido a retenção de impurezas (m)	Equações de escoamento laminar no filtro F ₁
T ₃	N ₂	F ₃ F ₄ *F ₁	antes da lavagem de F ₂	T _{max} T _a T _b	K _{r0} K _{ra} K _{rb}	h ₀ h _a +h ₀ h _b +h ₀	Perda de carga no F ₁ $h_b + h_0 = k_{rb} \cdot T_b \dots\dots\dots(3.10)$
T ₃ '	N ₁	F ₂ F ₃ F ₄ *F ₁	após F ₂ entrar em operação	T _{min} T _{max} T _a T _b T _{min}	K _{max} zero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	h _{max} +h ₀ zero h _a h _b h _{max}	Perda de carga no F ₁ , durante os períodos de transição (N ₂ -N ₁). $h_{max} = k_{rb} \cdot T_{min} \dots\dots\dots(3.11)$ K _r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K _{rb} em N ₂ = k _{rb} em N ₁ , então; $\frac{h_b + h_0}{T_b} = \frac{h_{max}}{T_{min}} \Rightarrow h_{max} = (h_b + h_0) \frac{T_{min}}{T_b} \dots\dots\dots(3.12)$
T ₄	N ₂	F ₂ F ₃ F ₄ *F ₁	antes da lavagem de F ₁	T _{max} T _a T _b	K _{r0} K _{ra} K _{rb}	h ₀ h _a +h ₀ h _b +h ₀	Perda de carga no F ₁ $(h_{max} + h_0) = k_{rmax} \cdot T_{min} \dots\dots\dots(3.13)$
T ₄ '	N ₁	F ₁ F ₂ F ₃ F ₄	após F ₁ entrar em operação	T _{min} T _{max} T _a T _b T _{min}	K _{max} zero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	h _{max} +h ₀ zero h _a h _b h _{max}	onde $K_{rb} = k_{rmax}$ em N ₂ dependendo do número de filtros Retorno à condição inicial (T ₁) $h_0 = k_{ro} \cdot T_{max} \dots\dots\dots(3.4)$

O coeficiente K_0 , devido à retenção de impurezas no filtro F_1 , no nível N_2 foi considerado o mesmo (no filtro F_1), quando o nível N_1 foi atingido, após o filtro F_4 (recém-lavado) ter entrado em operação e a vazão total afluyente ter sido igualada à total afluyente.

Se o N_2 for conhecido, torna-se possível iniciar um cálculo para determinar as taxas de filtração e as perdas de carga. Uma seqüência de passos para obtenção das mesmas é descrita a seguir:

1. Fixar a carga hidráulica e , por conseqüência, o N_2 para que a relação entre as taxas máxima e média fique compreendida entre 1,3 e 1,5, propiciando carreiras de filtração razoáveis;
2. Igualar a equação de perda de carga total, eq. (3.1), à carga hidráulica disponível, substituindo t por t_0 e H por H_d .

$$H_d = k_0 T_0 + k_t T_0^y \quad (3.14)$$

A equação 3.14 fornecerá um valor da taxa de filtração T_0 , no nível N_2 (sem retenção de impurezas); porém, quando um filtro recém-lavado entra em operação, o nível no canal comum de alimentação dos filtros não é N_2 ; então, para efeito de cálculo, o autor considerou que a T_{max} seja igual a $0,85 T_0$; a eq. (3.14) é escrita da seguinte forma, obtendo-se:

$$H_d - h_0 = k_0 T_{max} + k_t (T_{max})^y \quad (3.15)$$

3. Obter, k_{r0} substituindo os valores de h_0 e T_{max} na eq. (3.4) do quadro 1 e com as equações 3.5 ou 3.6, a relação T_a e h_a ; a eq (3.1), para a taxa de filtração T_a , no nível N_1 , transforma-se em:

$$H_d - h_0 - h_a = k_0 T_a + k_t (T_a)^y \quad (3.16)$$

Através de duas equações, que relacionam T_a e h_a , é possível determinar ambos parâmetros.

4. Utilizar, da mesma forma, as demais equações do quadro 3.1 e da equação 3.1 para determinar os outros pares de parâmetros (T_b , h_b ; T_{min} , h_{max}).

5. Se o somatório das taxas de filtração for igual a 4 quatro vezes a taxa média (no caso de quatro filtros), o valor de T_{max} assumido anteriormente está correto; caso contrário, deve-se assumir um novo valor para T_{max} e assim sucessivamente até que essa igualdade seja satisfeita.

O mesmo procedimento deve ser aplicado para a determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes em operação, como se pode ver no Quadro 3.2.

QUADRO 3.2 - Determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes no final da lavagem de um deles (DI BERNARDO 1993)

Nível	Condição	Equação
N_2	antes de F_4 ser retirado de operação para lavagem	$k_t(T_{max})^y + (k_{r0} + k_0)T_{max} = H_d$(3.17)
		$k_t(T_a)^y + (k_{ra} + k_0)T_a = H_d$(3.18)
		$k_t(T_b)^y + (k_{rb} + k_0)T_b = H_d$(3.19)
		$k_t(T_{min})^y + (k_{rmax} + k_0)T_{min} = H_d$(3.20)
		$T_{max} + T_a + T_b + T_{min} = T_M$(3.21)
N_1	vazão afluyente igual à vazão total efluente	$k_t(T_{max}^*)^y + (k_0 + k_{r0})T_{max}^* = H_d + \Delta h$(3.22)
		$k_t(T_a^*)^y + (k_0 + k_{ra})T_a^* = H_d + \Delta h$(3.23)
		$k_t(T_b^*)^y + (k_0 + k_{rb})T_b^* = H_d + \Delta h$(3.24)
		$T_{max}^* + T_a^* + T_b^* = T_M$(3.25)
		$T_m^* = 4 / 3 . T_m$(3.26)
		onde: T_{max}^* , T_a^* , T_b^* : são taxas de filtração que ocorrem nos filtros remanescentes durante a lavagem de um filtro (m/dia)

O método de dimensionamento proposto para quatro filtros pode ser generalizado para qualquer número de filtros N , como mostrado a seguir.

Parâmetros Conhecidos : Kt ; Ko ; y ; Hd ; Tm ; N

Durante a filtração:

$$T_{max} = F T_o \quad (3.27)$$

F : entre 0,7 e 0,9

$$k_{ro} = \frac{h_o + h_i}{2 T_{max}} \quad \text{para } i = 0 \quad (3.28)$$

$$H = Kt (Ti)^y + Ko Ti + h_o + h_i \quad \text{para } 1 \leq i \leq (N - 1) \quad (3.29)$$

$$h_i = k_{r_{i-1}} \cdot Ti \quad (3.30)$$

$$k_{ri} = \frac{h_o + h_i}{Ti} \quad \text{para } i = 0 \quad (3.31)$$

$$\sum_{i=0}^N Ti = N T_m \quad (3.32)$$

Durante a lavagem:

$$Kt (Ti)^y + Ko Ti + k_{ri} Ti = Hd \quad \text{para } 1 \leq i \leq N \quad (3.33)$$

$$\sum_{i=1}^N Ti = N T_m \quad (3.34)$$

$$Kt (T_i^*)^y + Ko T_i^* + K_{ri} T_i^* = Hd + \Delta h \quad \text{para } 1 \leq i \leq N - 1 \quad (3.35)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} T_i^* = (N - 1) T_m^* \quad (3.36)$$

$$\frac{N T_m}{(N - 1)} = T_m^* \quad (3.37)$$

O modelo proposto por Di Bernardo reproduz, com aceitável precisão, o comportamento das taxas e perdas de carga nos sistemas estudados porém o mesmo não considera a influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, além de não prever o desempenho do sistema ao longo do tempo. Ou seja, assume uma situação de equilíbrio que deve ser atingida rapidamente, mantendo-se constante e repetindo-se a cada ciclo.

O autor ainda condicionou o valor da taxa máxima ao valor da taxa média, sem considerar qual seria a taxa máxima que o filtro mais limpo suportaria sem que houvesse deterioração da água filtrada.

3.3.4 Método para prever a duração da carreira de filtração

TEIXEIRA (1991) desenvolveu uma metodologia a partir de considerações teóricas e investigações experimentais que permitem prever a duração da carreira de filtração e de intervalos entre as lavagens de um sistema de filtração com taxa declinante variável com um número qualquer de filtros, utilizando um único filtro piloto trabalhando com taxa constante.

Essa metodologia foi verificada pelo autor operando uma instalação piloto, constituída de quatro filtros com taxa declinante variável e de um filtro com taxa constante com as mesmas características dos filtros do sistema com taxa declinante. O meio filtrante de todas as unidades era composto de uma camada de 1,25 m de areia. Os ensaios com taxa declinante foram realizados para as taxas médias de 250, 300 e 350 m³/m².dia e cargas hidráulicas de 1,2, 1,61, e 1,61 m respectivamente.

Em suas investigações, o filtro com taxa constante (FTC) foi operado em paralelo com o sistema de filtração com taxa declinante (SFTD). A taxa de filtração no (FTC) a princípio foi igual à taxa média do (SFTD), posteriormente passou a ser igual à taxa máxima prevista para comprovar, realmente, que não é a taxa média de filtração que deve ser usada no FTC, como havia sido recomendado por CLEASBY & DI BERNARDO (1980).

As etapas dessa metodologia são descritas a seguir:

1ª Etapa: definição das características do meio filtrante (materiais, granulometria, espessura(s) da(s) camada(s); disposição das unidades (dimensões, número, sistema de drenagem, tubulações e acessórios, tipo de lavagem); pré-tratamento (produtos químicos, dosagens etc);

2ª Etapa: montagem de um filtro para trabalhar com taxa constante e nível variável, tendo o meio filtrante idêntico ao definido na 1ª Etapa;

3ª Etapa: obtenção, na instalação piloto, da curva de perda de carga no meio filtrante limpo em função da taxa de filtração.

4ª Etapa: cálculo teórico da equação de perda de carga turbulenta em função da taxa de filtração. (Caso seja possível a reprodução das características geométricas do filtro, na instalação piloto, pode se obter a curva real);

5ª Etapa: obtenção da curva de perda de carga total;

6ª Etapa: aplicação do modelo de DI BERNARDO (1986a, 1986b), considerando-se as curvas obtidas nos passos anteriores e os valores definidos para a taxa média de filtração, o número de filtros e a carga hidráulica disponível, obtendo-se os níveis de operação e as taxas nas unidades do SFTD;

7ª Etapa: operação do filtro piloto com taxa constante, mantida igual à taxa máxima do SFTD, para uma variação de perda de carga devida à retenção de impurezas igual à variação de nível ($N_2 - N_1$) no SFTD, obtida na 5ª etapa;

8ª Etapa: Multiplicação do intervalo de tempo (Δt) correspondente àquela variação de nível ($N_2 - N_1$) pelo número de filtros da bateria da estação de tratamento, obtendo-se a duração da carreira de filtração, como pode ser visto na figura 3.7.

FIGURA 3.7 - Variação típica da perda de carga, no meio filtrante de um filtro com taxa constante funcionando com taxa igual à máxima prevista no sistema de filtração com taxa declinante variável, (TEIXEIRA, 1991).

TEIXEIRA (1991) também observou que a taxa máxima de filtração aumentava enquanto a mínima diminuía entre lavagens sucessivas, permanecendo praticamente constantes aquelas taxas intermediárias. Segundo o autor, esse comportamento era decorrente do fato do meio filtrante ser constituído unicamente de areia, com coeficiente de desuniformidade igual a 1,5, causando retenção substancial de impurezas no topo, de modo que, após um certo tempo de operação, a curva de perda de carga tornava-se exponencial ao invés de retilínea.

Na Figura 3.8 são mostradas as perdas de carga no SFTD e FTC, as taxas de filtração, previstas pelo modelo de DI BERNARDO (1986a,1986b) e a turbidez do afluente e efluentes do SFTD e do FTC obtidas por TEIXEIRA (1991) quando o FTC funcionou com taxa de filtração igual à média das taxas do SFTD.

Teixeira observou que a inclinação das retas correspondentes às perdas de carga não são iguais, quando se toma como referência o filtro F_1 do SFTD. Segundo esse pesquisador, o mesmo comportamento foi observado para os demais filtros do (SFTD).

FIGURA 3.8 - Resultados da operação simultânea do SFTD e FTC, carreira de filtração do filtro F_1 ; $T_{\max} = 407$; $T_{\text{med}} = 300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (TEIXEIRA, 1991).

Os resultados obtidos por TEIXEIRA (1991), quando o FTC funcionou em paralelo com o SFTD, porém com a taxa máxima prevista pelo modelo de DI BERNARDO (1986a, 1986b), são mostrados na figura 3.9. A inclinação das retas de perda de carga da figura 3.9 foram praticamente iguais nos diferentes ciclos, resultando igual em aproximadamente 41 horas a duração da carreira de filtração do filtro F_3 do SFTD.

FIGURA 3.9 - Comportamento do SFTD para a taxa média de filtração de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ e carga hidráulica disponível de 1,6 m; variação da perda de carga no FTC operado com taxa máxima de filtração de $407 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (TEIXEIRA, 1991).

Os resultados obtidos por TEIXEIRA (1991) apresentados na Figura 3.10, mostram a variação da perda de carga no FTC, operado com a taxa máxima de filtração do SFTD. Assim, para a variação de $N_2 - N_1 = 0,32$ m, a duração do ciclo é, aproximadamente, de 10 horas. Portanto esse intervalo de tempo, multiplicado pelo número de filtros (quatro filtros), fornece 40 horas, valor muito próximo ao de 41 horas, que foi a duração da carreira de filtração de um filtro do SFTD. Esse comportamento também foi observado para as demais taxas médias de filtração, comprovando a metodologia proposta.

FIGURA 3.10 - Determinação da duração da carreira de filtração conforme metodologia proposta, $T_{med} = 300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ e carga hidráulica de 1,6m (TEIXEIRA, 1991).

A metodologia desenvolvida por TEIXEIRA (1991) contribuiu para a determinação de parâmetros de projeto de sistemas de filtração com taxa declinante variável e permitiu a determinação da duração da carreira de filtração. Contudo TEIXEIRA, em suas pesquisas, não considerou a influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros para simular o que geralmente ocorre nas estações de tratamento de água, em escala real, principalmente nos casos de estações com ciclo completo ou filtração direta descendente com pré-floculação.

O autor também condicionou o valor da taxa máxima ao da taxa média. Em seus experimentos, Teixeira estudou valores de taxa máxima de 450, 501 e 504 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ referentes às respectivas taxas médias de 250, 300 e 350 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$, considerando o valor da relação entre as taxas máximas e médias entre 1,3 e 1,5 aproximadamente.

3.3.5 Modelo de MACHADO

O modelo de MACHADO (1995) tem como base as mesmas considerações do modelo de DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b). Porém, Machado considera a influência da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros em sistemas de filtração com taxa declinante variável (SFTD).

O autor estudou o comportamento de um SFTD com e sem armazenamento adicional de água a montante dos filtros, utilizando-se uma instalação piloto interligada a tanques de armazenamento na entrada do sistema, tentando simular o que possivelmente acontece nas estações de tratamento de água em escala real.

Paralelamente, MACHADO (1995) desenvolveu uma metodologia para a determinação do nível de água mínimo de operação (N_1) de um SFTD a partir da operação de um único filtro piloto interligado a um tanque de armazenamento, trabalhando com a taxa de filtração máxima do sistema de filtração com taxa declinante.

O método de dimensionamento apresentado por Machado foi testado com os dados experimentais, apresentando resultados compatíveis, permitindo a determinação das taxas de filtração e as variações de nível nos SFTD com e sem capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros.

Para o desenvolvimento da investigação experimental, Machado utilizou uma instalação piloto de 4 e 6 filtros funcionando como um sistema de filtração com taxa declinante variável. Os filtros possuíam meio filtrante de antracito e areia. A água decantada da ETA-SC (estação de tratamento de água de São Carlos-SP) era bombeada para uma caixa de nível constante provida de extravasor. Essa caixa alimentava três tanques cilíndricos com áreas (em planta) iguais a 4, 8 e 16 vezes a área de um dos filtros da bateria (4 A_F , 8 A_F , 16 A_F) para simular o armazenamento adicional de água a montante dos filtros.

A investigação experimental foi dividida em cinco etapas:

1ª Etapa: ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga no meio filtrante limpo (laminar) e nas válvulas, tubulações e acessórios de entrada e saída de cada filtro, sistema de drenagem etc. (turbulenta) para diferentes taxas de filtração. Baseando-se nas medidas efetuadas, foi introduzida uma perda de carga adicional por meio de uma válvula de esfera localizada na tubulação de saída de cada filtro de forma que a perda de carga turbulenta resultasse igual em todas as unidades. A fixação da perda de carga nas saídas foi realizada para manter a taxa máxima de filtração entre 1,3 e 1,5 vezes a taxa média.

2ª Etapa: a partir das equações de perda de carga obtidas na 1ª Etapa, foram definidas as cargas hidráulicas disponíveis de 1,25 e 1,80 m, respectivamente, para as taxas médias de filtração de 300 e 405 m³/m². dia, utilizando-se o modelo proposto por DI BERNARDO (1985,1986a, 1986b);

3ª Etapa: execução de ensaios com água decantada da estação de tratamento de água de São Carlos como afluentes à instalação piloto, tendo sido estudadas quatro capacidades adicionais de armazenamento de água a montante dos filtros (4 A_F, 12 A_F, 20 A_F e 28 A_F), além do ensaio sem armazenamento adicional de água a montante dos filtros para as taxas médias de filtração de 300 e 405 m³/m².dia e baterias com 4 e 6 filtros em funcionamento;

4ª Etapa: execução de ensaios com água tratada da ETA-SC como afluente, com baterias de 4 e 6 filtros e taxa média de filtração igual a 300 m³/m². dia, para as seguintes condições:

- a) durante a lavagem de um filtro (20 min) e até que o nível N₁ fosse atingido após o filtro recém-lavado ter entrado em operação;
- b) durante a lavagem de um filtro de bateria (até que ocorresse a igualdade da vazão afluente com a vazão total efluente e até que o nível N₁ fosse atingido) após o filtro recém-lavado ter entrado em operação.

Para ambas condições, os ensaios foram realizados sem capacidade adicional de armazenamento de água a montante dos filtros e com as capacidades adicionais de 4 A_F, 12 A_F, 20 A_F e 28 A_F;

5ª Etapa: execução de ensaios para a determinação do nível mínimo de operação (N₁).

➤ Desenvolvimento do Modelo

A metodologia para a elaboração do modelo matemático proposto por MACHADO (1995) considera o comportamento do SFTD com e sem capacidade adicional de armazenamento de água a montante dos filtros e foi desenvolvida com base no modelo proposto por DI BERNARDO (1985), procurando-se utilizar, sempre que possível, os mesmos critérios.

Segundo MACHADO (1995), nos sistemas com capacidade substancial de armazenamento de água a montante dos filtros, o período decorrido desde o instante em que um filtro recém lavado é colocado em operação e o momento em que a vazão total afluyente se iguala à efluente (período de transição) pode ser longo. Assim, uma quantidade de partículas já estará retida no meio filtrante do filtro mais limpo da bateria quando o nível mínimo N_1 for atingido, consumindo uma boa parte da carga hidráulica total disponível. Partindo dessa consideração, o nível N_1 , nesse caso, não atingirá “o ponto” na curva de perda de carga total, correspondente à taxa de filtração máxima (T_{max}) do sistema de filtração com taxa declinante, situando-se ligeiramente acima desse “ponto”. Essa elevação do nível mínimo de operação ($\bar{N}_1$) corresponde à perda de carga devida à retenção de impurezas que ocorre no período de transição e será maior para maiores capacidades de armazenamento.

Machado denominou essa elevação do nível N_1 de Δh_0 e a variação de $(N_2 - N_1)$, de h_l . Na figura 3.11, é mostrada a variação das perdas e carga e dos níveis de operação com as taxas de filtração de um SFTD com capacidade substancial de armazenamento de água a montante dos filtros, conforme proposto por MACHADO (1995).

O valor de Δh_0 , que é função da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, poderá ser determinado a partir de uma equação que relaciona esse valor com a capacidade de armazenamento adotada. Tal equação baseia-se nos dados experimentais levantados por Machado durante sua pesquisa.

Para facilitar o equacionamento, Machado admitiu um nível N_1 teórico, que corresponde ao nível estabelecido pela taxa de filtração máxima (T_{max}) do modelo de DI BERNARDO (1985, 1986a, 1986b), nível que será alcançado num tempo relativamente rápido, como nos sistemas sem armazenamento, de modo que o valor do coeficiente de resistividade, devido à retenção de impurezas, mantém-se constante durante este período de transição (teórico).

FIGURA 3.11 - Variação das perdas de carga e dos níveis de operação em função das taxas de filtração de um SFTD com armazenamento de água a montante dos filtros (MACHADO, 1995)

Desta forma, pode-se montar um sistema de equações que, a partir da carga hidráulica total disponível e da taxa média de filtração, fornece as taxas em cada um dos filtros e as variações de nível no sistema.

No Quadro 3.3, tem-se o que ocorre na situação repetitiva para uma bateria de quatro filtros, de acordo com MACHADO (1995).

A equação (3.1) pode ser escrita para cada situação, com os valores de k aparecendo em duas situações diferentes (antes e após a lavagem de um filtro).

QUADRO 3.3 - Taxas de filtração, perdas de carga, coeficientes de resistividade devido à retenção de impurezas e equações de escoamento laminar de F_1 .

Tempo	Nível	Filtro	Condição	Taxa de Filtração (m/d)	Coeficiente de resistividade	Perda de carga devido a retenção de impurezas (m)	Equações de escoamento laminar no filtro F_1
T_0	N_1	$*F_1$ F_2 F_3 F_4	Início	T_{max} T_a T_b T_{min}	zero K_{r0} K_{ra} K_{rb}	zero h_a h_b h_{max}	Perda de carga no F_1 $\Delta h_0 = 0 \text{ e } h_l = 0 \dots\dots(3.38)$
T_1	N_2	$*F_1$ F_2 F_3 F_4	antes da lavagem de F_4	T_{max} T_a T_b T_{min}	K_{r0} K_{ra} K_{rb} K_{max}	$\Delta h_0 + h_l$ $h_a + \Delta h_0 + h_l$ $h_b + \Delta h_0 + h_l$ $h_{max} + \Delta h_0 + h_l$	Perda de carga no F_1 $\Delta h_0 + h_l = k_{r0} \cdot T_{max} \dots\dots(3.39)$
T_1'	N_1	F_4 $*F_1$ F_2 F_3	após F_4 entrar em operação	T_{max} T_a T_b T_{min}	zero K_{r0} K_{ra} K_{rb}	zero h_a h_b h_{max}	Perda de carga no F_1 , durante os períodos de transição (N_2, N_1) $h_a = K_{r0} \cdot T_a \dots\dots(3.40)$ K_r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K_{r0} em $N_2 = k_{r0}$ em N_1 , então; $\frac{\Delta h_0 + h_l}{T_{max}} = \frac{\Delta h_0 + h_l}{T_a} \Rightarrow h_a = \Delta h_0 + h_l \frac{T_a}{T_{max}} \dots\dots(3.41)$
T_2	N_2	F_4 $*F_1$ F_2 F_3	antes da lavagem de F_3	T_{max} T_a T_b T_{min}	K_{r0} K_{ra} K_{rb} K_{max}	$\Delta h_0 + h_l$ $h_a + \Delta h_0 + h_l$ $h_b + \Delta h_0 + h_l$ $h_{max} + \Delta h_0 + h_l$	Perda de carga no F_1 $h_a + \Delta h_0 + h_l = K_{ra} \cdot T_a \dots\dots(3.42)$
T_2'	N_1	F_3 F_4 $*F_1$ F_2	após F_3 entrar em operação	T_{max} T_a T_b T_{min}	zero K_{r0} K_{ra} K_{rb}	zero h_a h_b h_{max}	Perda de carga no F_1 , durante os períodos de transição (N_2, N_1) $h_b = k_{ra} \cdot T_b \dots\dots(3.43)$ K_r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K_{ra} em $N_2 = k_{ra}$ em N_1 , então; $\frac{h_a + \Delta h_0 + h_l}{T_a} = \frac{h_b}{T_b} \Rightarrow h_b = (\Delta h_0 + h_l + h_a) \frac{T_b}{T_a} \dots\dots(3.44)$

Continuação do QUADRO 3.3

Tempo	Nível	Filtro	Condição	Taxa de Filtração (m/d)	Coefficiente de resistividade	Perda de carga devido a retenção de impurezas (m)	Equações de escoamento laminar no filtro F ₁
T ₃	N ₂	F ₃ F ₄ *F ₁	antes da lavagem de F ₂	T _{max} T _a T _b	K _{r0} K _{ra} K _{rb}	Δh ₀ +h ₁ h _a +Δh ₀ +h ₁ h _b +Δh ₀ +h ₁	Perda de carga no F ₁ $h_b + \Delta h_0 + h_1 = k_{rb} \cdot T_b \dots\dots\dots(3.45)$
T ₃ '	N ₁	F ₂ F ₃ F ₄ *F ₁	após F ₂ entrar em operação	T _{min} T _{max} T _a T _b T _{min}	K _{max} zero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	h _{max} +Δh ₀ +h ₁ zero h _a h _b h _{max}	Perda de carga no F ₁ , durante os períodos de transição (N ₂ .N ₁). $h_{max} = k_{rb} \cdot T_{min} \dots\dots\dots(3.46)$ K _r mantém-se constante nos filtros remanescentes, K _{rb} em N ₂ = k _{rb} em N ₁ , então; $\frac{h_b + \Delta h_0 + h_1}{T_b} = \frac{h_{max}}{T_{min}} \Rightarrow h_{max} = (h_b + \Delta h_0 + h_1) \frac{T_{min}}{T_b} \dots\dots\dots(3.47)$
T ₄	N ₂	F ₂ F ₃ F ₄ *F ₁	antes da lavagem de F ₁	T _{max} T _a T _b T _{min}	K _{r0} K _{ra} K _{rb} K _{max}	Δh ₀ +h ₁ h _a +Δh ₀ +h ₁ h _b +Δh ₀ +h ₁ h _{max} +Δh ₀ +h ₁	Perda de carga no F ₁ $(h_{max} + \Delta h_0 + h_1) = k_{rmax} \cdot T_{min} \dots\dots\dots(3.48)$ onde K _{rb} = k _{rmax} , dependendo do número de filtros
T ₄ '	N ₁	F ₁ F ₂ F ₃ F ₄	após F ₁ entrar em operação	T _{max} T _a T _b T _{min}	zero K _{r0} K _{ra} K _{rb}	zero h _a h _b h _{max}	Retorno à condição inicial (T ₁) $\Delta h_0 + h_1 = k_{ro} \cdot T_{max} \dots\dots\dots(3.39)$

Assim, conhecido o nível N_2 , é possível iniciar o cálculo que permite determinar as taxas de filtração e as perdas de carga envolvidas, seguindo os mesmos passos do modelo de DI BERNARDO (1985,1986a, 1986b), já descritos no item 3.3.3.

Conhecendo-se Δh_o e h_l , a eq. (3.15) pode ser reescrita da seguinte forma, obtendo-se o valor h_l :

$$H_d - \Delta h_o + h_l = k_o T_{max} + k_t (T_{max})^y \quad (3.49)$$

Com os valores de h_l , Δh_o e T_{max} na eq. (3.39), obtém-se k_o . Por meio da eq. (3.40) ou da eq.(3.41) tem-se a relação entre T_a e h_a . A eq.(3.1) para a taxa de filtração T_a , no nível N_1 , transforma-se em:

$$H_d - \Delta h_o + h_l - h_a = k_o T_a + k_t (T_a)^y \quad (3.50)$$

Assim, há duas equações que relacionam T_a e h_a , o que possibilita determinar ambos parâmetros. Utilizando-se as equações do quadro 3.3 e a eq (3.1) é possível conhecer as demais taxas. Se $(T_{max} + T_a + T_b + T_{min})$ resultar igual a $4T_{med}$ (no caso de 4 filtros), o valor de T_{max} assumido inicialmente estará correto; caso contrário, outro valor de T_{max} deve ser assumido e, assim sucessivamente, até que se obtenha aquela igualdade.

O valor de Δh_o , que é função da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, foi determinado a partir das equações, que relacionam este valor com a capacidade total de armazenamento adotada. Tais equações foram determinadas com base em dados experimentais obtidos por MACHADO (1995). O valor de Δh_o corresponde à diferença entre o nível mínimo de operação (N_1) real e o valor da perda de carga total referente à taxa de filtração máxima. O valor de Δh_o depende:

1. Da capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, pois quanto maior o armazenamento mais longo será o período de transição e, obviamente, maior quantidade de impurezas será retida no filtro recém-lavado.

2. Da qualidade da água, pois para águas com teor de sólidos suspensos ou turbidez mais elevados, o valor de Δh_o também será maior.

Desta forma, o método de determinação deste parâmetro, anteriormente proposto, não pode ser generalizado para qualquer tipo de água utilizada como afluente ao SFTD, sendo recomendado apenas para águas decantadas com turbidez máxima de 5 uT. Em vista disto, MACHADO (1995) propôs uma metodologia para a determinação do nível mínimo (N_1) e/ou de Δh_o .

➤ Metodologia para a determinação do nível N_1 (5ª Etapa)

Para determinação do nível N_1 , MACHADO (1995) utilizou um único filtro piloto interligado a um tanque de armazenamento com capacidade previamente estabelecida, operando com a taxa de filtração máxima do SFTD.

Com o objetivo de manter uma mesma área total de armazenamento (área dos filtros mais a área de armazenamento adicional) dos ensaios realizados nas etapas anteriores, o autor operou quatro filtros piloto em paralelo com a taxa de filtração máxima definida pelo modelo de DI BERNARDO (1985), para uma taxa de filtração média de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e para uma carga hidráulica total disponível de 1,25m.

Foram realizados dois tipos de ensaios, um com água tratada e outro com água decantada como afluente e, para ambas condições, os ensaios foram efetuados sem capacidade adicional de armazenamento a montante dos filtros e com as capacidades adicionais de 4A, 12A, 20A e 28A.

O ensaio era iniciado com todos os filtros previamente limpos e até que se atingisse o nível de equilíbrio (nível estabelecido no SFTD imediatamente após a colocação de um filtro recém-lavado em operação).

O nível de equilíbrio (N_{eq}), para cada situação foi determinado pela relação estabelecida entre o nível alcançado durante a lavagem do filtro (N_3) e o nível de saída da água de lavagem (N_{lav}), segundo as eq (3.51) e eq (3.52).

$$\text{Condição de equilíbrio: } \Delta x(At - A) = xA \quad (3.51)$$

sendo:

At : área de armazenamento de água a montante dos filtros (L^2)

A : área de um filtro da bateria (L^2)

Nível de equilíbrio:

$$N_{eq} = N_3 - \Delta x = N_{lav} + x \quad (3.52)$$

Na figura 3.12 tem-se o nível de equilíbrio, estabelecido para uma situação hipotética, para uma bateria de quatro filtros operando em paralelo com um tanque de armazenamento.

FIGURA 3.12 - Situação hipotética mostrando o N_{eq} estabelecido no SFTD imediatamente após a colocação de um filtro recém-lavado em operação (MACHADO,1995).

Os níveis estabelecidos durante as lavagens (N_3), utilizados para a determinação dos níveis de equilíbrio nestes ensaios, foram os valores médios determinados nos ensaios com água tratada e decantada como afluente, para uma duração das lavagens de 20 minutos. Machado encerrava o ensaio quando ocorria a igualdade das vazões afluente e total efluente, estabelecendo-se, neste instante, o nível N_1 do SFTD, tendo em vista que o filtro recém-lavado em um sistema de filtração com taxa declinante variável é que define este nível.

O nível N_1 relaciona-se com a qualidade do afluente, variando com o tempo necessário para ocorrer a sua estabilização e, obviamente, com a quantidade de partículas retidas no meio filtrante. Assim, esta determinação teve como objetivo generalizar o modelo proposto para diferentes condições do afluente (quantidade de sólidos, dosagens de produtos químicos, temperatura), cobrindo toda a faixa de variação esperada na situação real.

➤ **Determinação de N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes ao final da lavagem de um filtro da bateria**

Para a determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes em operação ao final da lavagem de um filtro do SFTD, MACHADO (1995) considerou que a soma das vazões efluentes não se iguala à vazão afluente quando existe armazenamento adicional a montante dos filtros. Seus dados experimentais comprovaram que, sem capacidade adicional de armazenamento de água a montante dos filtros, a vazão total efluente é praticamente igualada à vazão afluente no final da lavagem de um filtro da bateria, para uma duração da lavagem de 20 minutos. No entanto, quando existe armazenamento adicional a montante dos filtros, o intervalo de tempo para que ocorra esta igualdade das vazões é bem superior, sendo tanto maior quanto maior for o armazenamento e geralmente superior ao tempo em que um filtro permanece fora de operação.

Assumindo-se que os coeficientes de resistividade nos filtros remanescentes permaneçam inalterados durante a lavagem do filtro mais sujo da bateria, são obtidas as equações apresentadas no Quadro 4 para uma bateria de 4 filtros.

QUADRO 3.4 - Determinação do nível N_3 e das taxas de filtração nos filtros remanescentes durante a lavagem de um filtro da bateria, (MACHADO, 1995).

Nível	Condição	Equação
N_2		$k_t(T_{max})^y + (k_{r0} + k_0)T_{max} = H_d \dots\dots\dots(3.53)$
	antes de F4 ser retirado de	$k_t(T_a)^y + (k_{ra} + k_0)T_a = H_d \dots\dots\dots(3.54)$
	operação para	$k_t(T_b)^y + (k_{rb} + k_0)T_b = H_d \dots\dots\dots(3.55)$
	lavagem	$k_t(T_{min})^y + (k_{rmax} + k_0)T_{min} = H_d \dots\dots\dots(3.56)$
		$T_{max} + T_a + T_b + T_{min} = T_{Med} \dots\dots\dots(3.57)$
N_3		$k_t(T_{max}^*)^y + (k_0 + k_{r0})T_{max}^* = H_d + dh \dots\dots\dots(3.58)$
	vazão afluente	$k_t(T_a^*)^y + (k_0 + k_{ra})T_a^* = H_d + dh \dots\dots\dots(3.59)$
	diferente da vazão	$k_t(T_b^*)^y + (k_0 + k_{rb})T_b^* = H_d + hd \dots\dots\dots(3.60)$
	total	$T_{max}^* + T_a^* + T_b^* = 4T_M - \frac{dh}{dt} \frac{Aa}{A} \dots\dots\dots(3.61)$
	efluente	$T_m^* = 4 / 3. T_{med} \dots\dots\dots(3.62)$
		$T_{med arm}^* = \alpha.. T_{med}^* \dots\dots\dots(3.63)$
		$T_{max}^* + T_a^* + T_b^* = 3T_{med arm}^* \dots\dots\dots(3.64)$

sendo:

T_{max}^*, T_a^* e T_b^* : são taxas de filtração que ocorrem nos filtros remanescentes durante a lavagem de um filtro (L/T);

$T_{med arm}^*$: taxa média de filtração durante a lavagem com armazenamento adicional a montante dos filtros (L/T);

T_{med}^* : taxa média de filtração durante a lavagem sem armazenamento adicional a montante dos filtros (vazão afluente igual à vazão total efluente) (L/T);

T_{med} : taxa média de filtração durante a operação (L/T);

dh : variação do nível de água durante a lavagem ($N_3 - N_2$) (L);

dt : duração da lavagem (T);

Aa : área adicional de armazenamento a montante dos filtros (L^2);

A : área de um filtro da bateria (L^2);

α : coeficiente (determinado experimentalmente).

O coeficiente α , que relaciona as taxas médias de filtração, durante a lavagem de um filtro, com e sem armazenamento adicional à montante do SFTD, foi determinado com base nos dados experimentais de MACHADO (1995), para a taxa média de filtração de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ com 4 e 6 filtros na bateria e duração da lavagem de 20 minutos.

O método de dimensionamento proposto para quatro filtros pode ser generalizado para qualquer número de filtros n . Segundo o autor, o modelo teórico proposto foi comprovado, obtendo-se resultados satisfatórios na simulação das taxas de filtração e dos níveis de operação para diferentes valores de capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros. Com o uso da metodologia para determinação do nível mínimo de operação, o modelo poderá ser calibrado para diferentes características do afluente.

O modelo sugerido por MACHADO (1995) acrescenta valiosas contribuições ao estudo da filtração com taxa declinante variável, uma vez que a capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros é um fato que normalmente ocorre em estações reais de tratamento de água, tanto nas do tipo ciclo completo quanto nas de filtração direta descendente com ou sem pré-floculação. Porém, para a determinação de parâmetros de projetos obtidos por Machado, é necessário montar uma instalação piloto que trabalhe como um SFTD, que possua no mínimo quatro filtros. Esse tipo de operação pode ser pouco prática e onerosa diante das necessidades de se obter dados com mais rapidez e facilidade. Além disso, o modelo não considerou a previsão da duração da carreira de filtração.

Machado também condicionou o valor da taxa máxima ao da taxa média, sem considerar qual deveria ser a taxa máxima que o filtro mais limpo suportaria sem que houvesse deterioração da água filtrada. Em seus experimentos, as taxas máximas utilizadas foram de 432 e $588 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, considerando respectivamente as taxas médias de 300 e $405 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, mantendo o valor da relação entre as taxas máxima e média próximo de 1,4.

3.3.6 Método gráfico de Mendes

A solução gráfica proposta por MENDES (1999) é baseada no método proposto por DI BERNARDO (1986), para dimensionamento de sistema de filtração com taxa declinante variável. Esta solução pode ser obtida em papel milimetrado, partindo do conhecimento dos seguintes elementos básicos da instalação a ser projetada:

1. Perda de carga do meio filtrante limpo $H_1(L)$, obtida por meio da equação de Carman-Kozeny e das características dos materiais filtrantes específicos, expressa em função da taxa de filtração;
2. Perda de carga na comporta de entrada de água aos filtros, sistema de drenagem do fundo dos filtros, tubulação, válvula, e vertedor de saída de água filtrada, denominada de perda de carga turbulenta $H_2(L)$, expressa em função da taxa de filtração;
3. Número de filtros da bateria;
4. Taxa média de filtração adotada para projeto T_{med} (LT^{-1});

Através do conhecimento desses elementos e considerando por exemplo um SFTD com quatro filtros, as seguintes etapas podem ser seguidas:

1. Traçam-se as curvas $(H_1) \times (T)$; $(H_2) \times (T)$ e $(H_1 + H_2) \times (T)$, conforme figura 3.13;

FIGURA 3.13 - Perdas de carga no material filtrante limpo, turbulenta e total em função da taxa de filtração (MENDES, 1999).

2. Limita-se a taxa máxima de filtração que ocorrerá no filtro recém lavado da bateria, a um valor, normalmente menor que $1,5 \times T_{med}$;

3. Determina-se, o valor de N_1 que ocorrerá logo após a colocação do filtro recém lavado em funcionamento e obtenção do equilíbrio entre as vazões afluyente e efluente dos filtros da bateria, como pode ser observado na Figura 3.14. (A elevação de N_1 para N_2 é valor desconhecido, porém, deve-se adotá-lo, como estimativa inicial para posterior verificação, o que permitirá dar continuidade ao processo).

FIGURA 3.14 - Imposição da taxa máxima de filtração, determinação de N_1 e estimativa inicial para N_2 , (MENDES, 1999).

3. Admite-se que as taxas de filtração em cada unidade permaneçam constantes, durante a elevação de N_1 para N_2 . (O autor afirma que este fato é muito próximo do observado em instalações em escala real, havendo uma compensação equitativa entre o aumento da carga hidráulica proporcionado pela elevação do nível e o aumento da resistência ao escoamento devido à contínua retenção de impurezas em cada filtro).

4. Traça-se a nova curva de perda de carga no material filtrante ($H1'$) e a curva de perda de carga total para o filtro mais limpo da bateria, após a primeira elevação de nível, como pode ser visto na figura 3.15. O valor de $H1$ para a taxa de filtração em que trabalha o filtro F1 (filtro mais limpo da bateria) designado de $P1$, deve sofrer um acréscimo iguala à variação de N_1 para N_2 , passando ao valor de $P1'$. Com o retorno do filtro que havia sido retirado para lavagem ao funcionamento, o nível de água no canal comum de alimentação dos filtros tenderá, novamente, ao valor de N_1 , tendo em vista a menor resistência da bateria ao escoamento de água, proporcionada pelo filtro recém lavado.

FIGURA 3.15 - Determinação da perda de carga total para o filtro mais limpo da bateria, após a 1ª elevação de N_1 para N_2 , e da taxa de filtração que passará a operar após retorno do filtro recém lavado ao funcionamento (MENDES, 1999).

5. Determinam-se as respectivas taxas de filtração, sejam quantos filtros forem, respeitando-se as perdas de carga totais atuantes em cada filtro da bateria, cada um em seu estágio crescente de colmatação, conforme pode ser visto na Figura 3.16.

6. Verifica-se, se a média aritmética de todas as taxas de filtração obtidas coincidem e com o valor da taxa de filtração média desejada (T_{med}). Caso contrário, faz-se necessário corrigir a estimativa inicial adotada para a variação entre N_1 e N_2 .

FIGURA 3.16 - Determinação das taxas de filtração de todos os filtros da bateria e aferição da estimativa inicial de variação de N_1 para N_2 (MENDES, 1999).

7. Determinam-se as taxas de filtração nos filtros que continuam em operação durante a lavagem do filtro mais sujo, para qualquer estágio pré ou pós equilíbrio de vazões afluente e efluente dos filtros, a partir da obtenção do nível máximo operacional (N_3) que ocorrerá após novo equilíbrio de vazões, que acontece quando a relação entre a somatória das taxas de filtração dos filtros remanescentes e o número total de filtros da bateria coincidir com o valor de T_{med} , conforme figura 3.17.

Qualquer situação intermediária entre N_2 e N_3 é facilmente determinada, conhecendo-se o tempo médio de lavagem dos filtros e a área de armazenamento a montante dos filtros.

FIGURA 3.17 - Determinação de N_3 e taxas de filtração para os filtros remanescentes, durante a lavagem do filtro mais sujo da bateria (MENDES, 1999).

O método proposto tem grande utilidade didática, é uma ferramenta versátil para investigar a variação das taxas individuais de cada filtro durante a variação de nível entre N_1 e N_2 ; porém, para desenvolvimento de seu método, o autor também condicionou o valor da taxa máxima ao da taxa média.

3.3.7 Método gráfico e modelo proposto por GABRIEL (2000)

GABRIEL (2000) propôs uma metodologia gráfica pela qual é possível determinar e visualizar os diferentes níveis operacionais de água e as taxas de filtração de cada filtros da bateria, em condições de operação e de lavagem.

A partir desse método, GABRIEL (2000) propôs uma nova modelação matemática para a determinação algébrica dos parâmetros de projeto e operação de um sistema de filtração com taxa declinante variável, partindo da perda de carga total de um filtro limpo, do número de filtros da bateria, da taxa de filtração média desejada, do nível máximo que a água pode atingir no filtro, e da taxa máxima de filtração no sistema.

O autor representou a equação da perda de carga total em um filtro limpo, utilizando-se de um termo quadrático, representando a perda de carga turbulenta, e um linear, representando a perda de carga laminar. Assim, equações matemáticas, considerando uma bateria composta de um número qualquer de filtros, foram deduzidas e generalizadas para obter as condições otimizadas de projeto e operação desse tipo de sistema. Tal procedimento apresenta uma solução que permite obter a maior duração da carreira de filtração.

O modelo baseou-se nas mesmas hipóteses adotadas por DI BERNARDO (1996) e MENDES (1999) e foi desenvolvido e aplicado à diversos exemplos teóricos. Para a aplicação do modelo matemático, utilizou-se um programa em linguagem PASCAL (FREE PASCAL), que permitiu a obtenção das diversas soluções para cada simulação testada.

Na solução analítica, foi proposto uma metodologia de escolha da alternativa ideal de operação dentre as diversas possíveis, objetivando-se maximizar a duração da carreira de filtração.

Baseado nas simulações realizadas, GABRIEL (2000) concluiu que nenhum problema operacional ocorreria se a relação entre as taxas máxima e média atingisse valores da ordem de 1,88, principalmente quando o número de filtros de uma bateria for elevado. Esse valor promoveria uma maior duração da carreira de filtração, desde que a taxa média de filtração não ultrapassasse de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, valor próximo ao dos efetivamente encontrados em grande parte das instalações em escala real. O autor porém não comprovou experimentalmente o resultado de suas conclusões.

O método gráfico de Gabriel permite uma maior facilidade de visualização e de interpretação da operação de cada filtro dentro do sistema. Quanto ao modelo matemático, o próprio autor sugeriu que se desenvolvesse um sistema de equações representando um sistema mais próximo do real, considerando-se uma perda de carga constituída de um termo linear, um quadrático e um terceiro que eleve a taxa de filtração à um coeficiente α cujo valor fosse diferente de 1 ou 2. Desta forma, os resultados representariam melhor a realidade do sistema.

O trabalho desenvolvido com certeza amplia a visão do funcionamento do sistema de filtração com taxa declinante, porém faltou ao autor o respaldo de um trabalho experimental que confirmasse, de forma contundente, as conclusões obtidas.

3.4 Taxa de filtração máxima e qualidade do efluente

A taxa de filtração tem sido considerada de grande importância em relação à qualidade e à quantidade de água a ser produzida por carreira de filtração.

A procura por uma taxa de filtração ótima em uma unidade de filtração ganha maior importância quando se trata de um SFTD, no qual a taxa de filtração máxima acontece no filtro mais limpo da bateria e é neste filtro que pode ocorrer a degradação inicial da qualidade do efluente durante a filtração, de acordo com AMIRTHARAJAH & WETSTEIN (1980).

A qualidade do efluente no começo do funcionamento do filtro é pobre e sendo o filtro mais limpo da bateria o mais vulnerável, a taxa máxima ideal deve ser pesquisada de forma que o sistema produza carreiras de filtração razoáveis mantendo a qualidade do efluente dentro dos padrões recomendáveis.

Muitos pesquisadores como CLEASBY & DI BERNARDO (1980), DI BERNARDO & CLEASBY (1980), TEIXEIRA (1991), MACHADO (1995), MENDES (1999) condicionam a taxa máxima de filtração em um SFTD, à taxa média, limitando-a a valores que vão de 1,3 a 1,5 vezes o valor da taxa média do sistema.

ARBOLEDA et al. (1985), questionando a relação entre as taxas máxima e média, concluiu que ela está ligada à profundidade do filtro, à perda de carga na tubulação de saída e ao número de filtros do SFTD, podendo chegar a 2 (considerando-se 4 filtros) e 2,5 (considerando-se 12 filtros), conforme citado no item 3.3.2.

De acordo com ARBOLEDA (1991), a relação entre as taxas máxima e a média em um SFTD não deve exceder a um determinado valor limite, para que a qualidade da água não se deteriore. ARBOLEDA (1994) afirma que, nos Estados Unidos, esse limite não deve ultrapassar 1,5 em alguns estados, e 2 em outros. O mesmo autor afirma que no Brasil a relação exigida é de 1,3 e que em outros países da América Latina não existe nenhuma norma, por isso sugere-se adotar um valor igual a 2, devido ao fato de que se tem trabalhado com taxas médias de 250 a 300 m³/m².dia. Esse fator implica que as unidades recém lavadas teriam que trabalhar com taxas máximas de 500 a 600 m³/m².dia referentes às respectivas taxas médias.

Várias pesquisas em instalações piloto foram realizadas na Estação de Tratamento de São Carlos (ETA-SC) simulando um SFTD. Durante as pesquisas a água decantada da estação foi utilizada como afluente aos filtros e várias taxas de filtração foram investigadas.

A qualidade da água decantada na ETA-SC variou em cada experimento e durante cada um deles. As taxas de filtração médias e máximas também assumiram valores diferentes uma vez que cada pesquisador propunha um tipo de investigação.

A tabela 3.1 mostra um resumo dos experimentos realizados por cada autor simulando um SFTD, nas instalações piloto montada na ETA-SC. Nessa tabela, tem-se informações sobre a carga hidráulica disponível, sobre as taxas média e máxima pesquisadas e a relação entre elas. Também é mostrado o tipo de meio filtrante, a turbidez da água decantada afluente ao filtro e a turbidez global efluente.

TABELA 3.1 - Experimentos realizados por alguns autores simulando um SFTD, nas instalações piloto, utilizando-se água decantada da ETA-SC.

Autor	Filtros e Meio filtrante	Afluente	T_{med}	T_{max}	T_{max} em N_3	$Relação T_{max}/T_{med}$	Turbidez efluente Global	Carga hidráulica (m)
			(m ³ /m ² .d)					
SOUZA (1990)	4 filtros Areia quartzosa *Cd=1,33 e =1,25m mg=0,7mm Mg=2 mm	Coagulação com sulfato de alumínio cal e polímero natural	300 400	401 451	482 574	1,34 1,13	Turbidez menor que 1uT Não houve traspasse	1,6 1,6
TEIXEIRA (1991)	4 filtros areia quartzosa *cd=1,33 e=1,25m mg=0,7mm Mg=2 mm	Turbidez maior que 1 uT e menor que 3 uT	250 300 350	354 406 436	420 486 534	1,40 1,34 1,23	Turbidez menor que 0,5 uT Não houve traspasse	1,2 1,61 1,61
MACHADO (1995) Com ou sem armazenamento	4 e 6 filtros areia *Cd=1,55 mg=0,42m Mg=1,41mm Antracito *Cd=1,4 e=0,5m mg=0,59mm Mg=2mm	Turbidez menor que 5 uT	300 405	440 598	457 663	1,47 1,47	Turbidez menor que 0,3 uT Não houve traspasse	1,25 1,8

*Cd=coeficiente de desuniformidade; e=espessura (L); mg=tamanho do menor grão (L) Mg = tamanho do maior grão (L)

A Tabela 3.1 evidencia as taxas máximas obtidas tanto na operação quanto na lavagem quando N_3 foi atingido. Para os dois meios distintos investigados foi possível trabalhar com taxas acima de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, ressaltando que o efluente global manteve boa a qualidade não havendo traspasse.

Em todos os experimentos, a relação entre as taxas máxima e média não passou de 1,5 independente da taxa média utilizada.

PREZOTTI (1991) estudou e comparou o desempenho de três filtros rápidos de areia com espessura de 1,2 m e granulometria praticamente uniforme ($C_d=1$), variando-se em cada um deles, o tamanho efetivo, o tamanho do menor e do maior grão, para taxas de filtração de 200; 300; 400; 500; 600 e $750 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

As características granulométricas dos três filtros estudados pelo autor encontram-se na tabela 3.2

TABELA 3.2 - Características granulométricas dos três filtros (PREZOTTI, 1991)

Características	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Espessura da camada de areia	1,2	1,2	1,2
* C_d	1,0	1,0	1,0
Tamanho do menor grão	0,83	0,97	1,25
Tamanho do maior grão	1,25	1,45	1,65

* C_d =coeficiente de desuniformidade

Os filtros foram operados com taxa constante e nível variável. A água afluenta aos filtros era proveniente dos decantadores da ETA-SC, cuja turbidez variou de 1,2 a 8,7 uT.

Nos ensaios realizados com os três filtros o autor concluiu que:

1. A turbidez da água filtrada após a etapa inicial de amadurecimento dos filtros, manteve-se sempre inferior a 1 uT e com valores praticamente iguais em todos os filtros para todos os ensaios realizados, independente das taxas de filtração e das características granulométricas do meio filtrante.
2. O filtro 3 com granulometria maior do que a dos outros apresentou melhores resultados em termos de distribuição das impurezas retidas ao longo do meio filtrante, resultando carreiras mais longas para uma mesma taxa de filtração e, por conseguinte, maior produção de água filtrada;

3. O aumento da taxa de filtração acarretou uma maior distribuição das impurezas retidas ao longo do meio filtrante para todos os filtros estudados.
4. Para as taxas de filtração de 500 e 600 m³/m².dia estudadas os filtros 2 e 3 apresentaram carreiras de filtração maiores se comparados ao filtro 1.
5. Para taxa de 700 m³/m².dia não foi detectado nenhum traspasse.

Dos estudos realizados que possibilitaram relacionar as taxas de filtração e a qualidade do efluente, a maior parte deles foram realizados com água proveniente de decantadores em uma estação de ciclo completo. Poucos são os estudos que se referem a filtração direta com ou sem pré-floculação.

Estudos experimentais realizados por DI BERNARDO (1992), em dois filtros piloto (um de areia praticamente uniforme e outro de areia e antracito) instalados na ETA-Rio Descoberto em Brasília, tiveram como objetivos:

1. comparar a eficiência dos dois;
2. otimizar a dosagem de coagulante, cal e polímero;
3. investigar as condições de pré-floculação (gradientes de velocidade e tempo de floculação).

A água bruta durante o trabalho variou entre 2 e 32 uT e os filtros trabalharam com vazão constante.

Foram testadas em ambos os filtros as taxas de 300, 400, 500 e 600 m³/m².dia, e os resultados dos ensaios possibilitaram concluir o seguinte:

1. No início de operação, com o filtro limpo, ocorreu pelo menos um pico de turbidez no efluente independentemente da taxa de filtração, condições da pré-floculação, filtro considerado e uso de polímeros;
2. Em ambos os filtros a turbidez do efluente foi inferior a 0,5 uT ficando muitas vezes menor que 0,2 uT.
3. Para a taxa de 600 m³/m².dia, ocorreu traspasse no filtro de areia quando o afluente era água coagulada (sem pré-floculação), independente do uso de polímero como auxiliar de filtração. Com a pré-floculação o traspasse foi completamente eliminado, mesmo sem o uso de polímero;

4. O filtro de areia demonstrou ser mais eficiente que o de areia e antracito e a pré-floculação foi considerada importantíssima uma vez que ela evitou a ocorrência de traspasse, possibilitando uma penetração mais profunda das impurezas resultando carreiras mais longas.

Muitas pesquisas têm sido realizadas em relação aos SFTD e em todas elas percebe-se que a taxa de filtração máxima depende do tipo do meio filtrante, da carga hidráulica disponível, do mecanismo de coagulação, do tipo de coagulante empregado e da utilização ou não de auxiliares de coagulação ou filtração, da qualidade da água a ser filtrada e do tipo de tratamento (filtração direta com ou sem pré-floculação, ou ciclo completo), sendo assim, fica difícil fixar-se uma taxa máxima de filtração, razão pela qual é imprescindível a realização de investigações experimentais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

Este trabalho foi desenvolvido na Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto (ETA-RD), em Brasília-DF. A ETA-RD era constituída, anteriormente, de uma caixa de chegada de água bruta, uma calha Parshall (para medição de vazão e mistura rápida), duas câmaras de mistura rápida em série providas de agitador mecânico do tipo turbina e oito filtros de areia e antracito, que trabalhavam como um sistema de filtração com taxa declinante variável. A capacidade da estação, nessa época, variava entre 2,38 e 3,0 m³/s.

Devido às alterações na qualidade da água bruta do manancial que abastece a estação e à necessidade de se tratar uma nova vazão (6,0 m³/s), a ETA-RD precisou ser ampliada. Em vista disso, estudos em escala piloto foram realizados com o objetivo de se obter parâmetros de projeto para ampliação.

A metodologia disponível, na época, para a investigação experimental, consistia na operação de um único filtro piloto com taxa constante, a partir do qual se podia prever o que aconteceria no sistema de filtração com taxa declinante variável, contendo qualquer número de filtros. Tal metodologia foi proposta por TEIXEIRA (1991), já referenciada no item 3.3.4.

Para o desenvolvimento dessa metodologia foi necessário utilizar a modelação matemática proposta por DI BERNARDO (1986a, 1986b) com a finalidade de prever a taxa máxima de filtração no sistema, a qual deveria ser adotada no filtro piloto. A metodologia foi devidamente comprovada, tendo sido utilizada no trabalho realizado na Instalação Piloto (IP) da CAESB.

Porém, a metodologia proposta por TEIXEIRA (1991) e utilizada para levantamento dos parâmetros de projeto da ETA-RD não considerou o problema

relacionado ao armazenamento de água a montante dos filtros. Todavia, os ensaios realizados na Instalação Piloto mostraram que os melhores resultados foram obtidos com a floculação antes da filtração em lugar de somente encaminhar a água coagulada aos filtros. Sendo assim, ao final dos estudos, concluiu-se que era necessário projetar novas unidades de pré-floculação e de filtração.

Na época, não havia modelação matemática disponível para considerar a capacidade de armazenamento de água a montante dos filtros, o que foi desenvolvido, posteriormente, por MACHADO (1995), através de estudos realizados em uma instalação piloto de um sistema de filtração com taxa declinante (SFTD), utilizando-se água decantada da Estação de Tratamento de São Carlos. Portanto, nos estudos realizados na Instalação Piloto em Brasília, para a previsão da taxa máxima de filtração do SFTD da ETA-RD, foi utilizado o modelo proposto por DI BERNARDO (1986a, 1986b), tendo sido previstas as taxas máximas de $600 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ relativas às vazões máxima de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e mínima de $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, para as quais foram realizados 50 ensaios (para cada taxa), variando-se as condições de pré-tratamento.

O presente trabalho sugere a aplicação da metodologia proposta por TEIXEIRA (1991) e da modelação matemática que considera o armazenamento a montante dos filtros proposta por MACHADO (1995) equiparando-se uma estação de tratamento em escala real de filtração direta descendente (FDD) com pré-floculação, a uma Instalação Piloto constituída basicamente de um floculador com três câmaras, cuja área foi devidamente calculada para equivar a área à montante dos filtros da ETA-RD, e de um filtro trabalhando com taxa constante e nível variável.

A metodologia desenvolvida sugere um questionamento a respeito da limitação da relação entre as taxas média e máxima de filtração num SFTD.

Todos os autores citados na Revisão Bibliográfica ressaltam a importância da limitação da taxa máxima, uma vez que ela ocorre imediatamente após o filtro limpo ter sido colocado em funcionamento. Esta limitação, de acordo com a maior parte dos autores citados, baseia-se na relação entre as taxas máxima e média que, segundo eles, não deveria ultrapassar um certo valor que varia de autor para autor. Desta forma, o valor da taxa máxima é condicionado ao valor da taxa média, sem

considerar qual seria a capacidade com que o filtro mais limpo poderia operar, de forma a produzir mais água sem que houvesse deterioração da água filtrada.

Raciocinando desta maneira, um SFTD com taxa média de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ trabalhará com taxa máxima de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, se a relação entre elas for de 1,5. Caso o mesmo sistema tenha que trabalhar com taxa média de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a máxima será de $450 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, mantendo a mesma relação (1,5). Se o mesmo sistema pudesse trabalhar com taxa média de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e máxima de $450 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, a relação entre as taxas seria de 2,25.

Concluindo, ao limitar o valor da taxa máxima à média, não se tem claro o valor da taxa máxima ótima a qual se pode obter no filtro mais limpo da bateria, de forma que o mesmo possa trabalhar sem que haja deterioração da qualidade de água efluente.

4.2 Estação de tratamento de água do Rio Descoberto

Atualmente, a ETA-RD é basicamente constituída de uma caixa de chegada de água bruta, uma calha Parshall (para a medição de vazão e mistura rápida), duas câmaras para pré-floculação, compostas de quatro compartimentos cada, e 14 filtros de areia praticamente uniforme, trabalhando como um sistema de filtração com taxa declinante variável.

Um esquema geral da ETA-RD pode ser visto na figura 4.1.

FIGURA 4.1 - Esquema geral da ETA-RD

A água bruta chega a uma caixa que possui dimensões de 6,8 x 6,8 x 7,66 m e área de 46,24 m², na qual se aplica cloro, através de um difusor, para controle e remoção de algas.

A medição de vazão de água bruta afluyente à ETA é feita na calha Parshall. Antecedendo a essa, há um canal de aproximação que tem como função regularizar o escoamento de água, de forma a permitir as medições de vazão com precisão adequada.

O canal possui 6,8 m de largura por 1,67 m de profundidade e 7,0 m de comprimento e nele ocorrem a aplicação e dispersão da suspensão de cal para ajuste do pH de coagulação. A calha Parshall, que também cumpre o papel de misturador rápido, possui uma garganta de 3,66 m (14 pés) e capacidade de medição máxima de 9,9 m³/s e mínima de 0,23 m³/s. No ponto onde ocorre a melhor mistura, o sulfato de alumínio é aplicado.

Em algumas épocas do ano, um polieletrólito não iônico ou aniônico de baixa carga é aplicado no ressalto, que ocorre após a calha Parshall no trecho de um canal em rampa, para promover uma melhor dispersão do produto. Uma grade metálica com aberturas de 0,25 x 0,25 m promove um gradiente de velocidade em torno de 545 s⁻¹.

Após a calha Parshall existe um canal de água coagulada com extensão de 36,80 m que possui diversas variações tanto na seção transversal quanto nas cotas de fundo, com rampas intermediárias que provocam um escoamento variável. O canal de água coagulada se bifurca em dois outros, sendo cada um deles responsável pela alimentação de cada uma das duas câmaras de floculação.

O sistema de pré-floculação, composto de duas unidades, foi projetado para funcionar com capacidade nominal de até 3 m³/s cada uma, possuindo quatro câmaras de dimensões de 8,35 x 8,35 x 4,04 m. Equipamentos de agitação, tipo turbina de fluxo axial, promovem os gradientes determinados em cada compartimento e têm condições de ajustar as rotações e portanto o gradiente. O escoamento de água por esses compartimentos obedece uma seqüência de entradas e saídas alternadas (superiores e inferiores) de forma a atenuar curtos circuitos. O tempo de detenção de cada compartimento é de 1,4 minutos, referente ao volume de 256 m³ e à vazão nominal de 3,0 m³/s.

As unidades de floculação abastecem uma bateria com quatorze filtros, cada filtro é constituído de duas câmaras de 50 m² de área. Os quatorze filtros operam pelo sistema de taxas declinantes.

O meio granular é constituído por uma camada suporte de pedregulho de 0,525 m de espessura e uma de areia de 1,2 m com as seguintes características granulométricas:

Areia:

- tamanho do menor grão: 1,19 mm;
- tamanho do maior grão: 1,68 mm;
- tamanho efetivo: 1,2 a 1,30 mm;
- coeficiente de “desuniformidade” < 1,2.

Pedregulho com sete camadas:

- tamanho médio do pedregulho: 0,449 à 3,592 cm.

O sistema de lavagem dos filtros é realizado com ar e água de forma não simultânea.

Para que os 14 filtros permaneçam em funcionamento, uma válvula borboleta instalada na canalização efluente de cada câmara nos filtros cumpre a função de introduzir uma perda de carga turbulenta adicional, para atender as variações da vazão afluyente à ETA. O controle do posicionamento das válvulas de todos os filtros da bateria tem importância fundamental para a operação do sistema de filtração.

De acordo com o Projeto Executivo de Ampliação e Melhorias (1993), foi considerado, para cálculo das perdas de carga nos filtros da estação, o seguinte:

- a) Perda de carga turbulenta:
 1. Comporta de entrada
 2. Sistema de drenagem
 3. Tubulação de saída
 4. Canal geral de coleta
 5. Válvula borboleta na canalização de cada câmara
- b) Perda de carga laminar:
 1. Camada de areia
 2. Camada suporte de pedregulho

Conforme descrito no projeto, para as vazões afluentes previstas de 6,0 m³/s, 4,6 m³/s e 3,0 m³/s, o ângulo δ de posicionamento das válvulas deveria ser conforme projeto de 45, 55 e 60 graus respectivamente, (como pode ser visto na figura 4.2).

FIGURA 4.2 - Ângulo δ de posicionamento da válvula borboleta na canalização efluente de cada câmara, AZEVEDO NETTO (1998)

A determinação dos ângulos da válvula borboleta em função da vazão de trabalho foi obtida considerando-se o cálculo de perda de carga na válvula borboleta a partir dos valores dos coeficientes de perda de carga (K) em função do ângulo δ da válvula borboleta, conforme AZEVEDO NETTO (1998). A tabela 4.1 mostra os valores de K em função do ângulo δ para válvulas borboleta obtidos em AZEVEDO NETTO (1998).

TABELA 4.1 - Valores de K em função do ângulo δ para válvulas borboleta NETTO (1998).

$\delta (^{\circ})$	K	$\delta (^{\circ})$	K
5	0,24	40	10,8
10	0,52	45	18,7
15	0,9	50	32,6
20	1,54	55	58,8
25	2,51	60	118,0
30	3,91	65	256,0
35	6,22	70	750,0

No sistema de filtração da ETA-RD, a carga hidráulica (diferença entre a cota do nível de água no canal comum de distribuição de água aos filtros de uma bateria e a crista do vertedor geral de saída de água filtrada) estabelecida em projeto, foi de 2,6 m.

Ao sair dos filtros a água é encaminhada a uma caixa de efluentes onde se encontra o vertedor geral de água filtrada.

Os níveis de interesse, considerados no SFTD, foram definidos como:

N_0 - Nível que ocorrerá se todos os filtros estiverem limpos e operando com a taxa média de filtração;

N_1 - Nível mínimo dinâmico de operação, após o sistema de filtração estar no processo repetitivo;

N_2 - Nível dinâmico de operação, quando o filtro mais sujo da bateria tiver que ser retirado para lavagem;

N_3 - Nível máximo, que ocorrerá se o filtro a ser lavado permanecer um tempo relativamente longo fora de operação (durante a lavagem).

Para que os filtros de uma bateria funcionem como vasos comunicantes, característica peculiar da filtração com taxa declinante, é necessário que o nível mínimo dinâmico de operação (N_1), para qualquer vazão afluyente seja superior à cota da crista do vertedor da canaleta central de coleta de água de lavagem.

Na determinação do nível N_3 , foi aceito no projeto que a vazão total efluente dos filtros remanescentes em operação no final da lavagem de um filtro qualquer resultasse igual à vazão afluyente, desprezando-se os efeitos do armazenamento nos canais e demais unidades a montante dos filtros e, igualmente, nestes próprios.

A diferença entre o nível de água N_2 e a lâmina de água no vertedor de saída é igual à carga hidráulica disponível para a filtração.

4.2.1 Condições atuais de operação da ETA-RD

Embora o Projeto Executivo de Ampliação e Melhorias da ETA-RD (1993) previsse as vazões de trabalho de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, sabe-se que hoje a estação trabalha, nos períodos de 0:00 às 18:00 horas e de 22:00 às 24:00 horas, com vazões de $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente, e que nos dias da semana no horário denominado “*Horário de Ponta*” (18:00 às 22:00 horas) a vazão da estação diminui para $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

As 28 válvulas borboleta instaladas na canalização efluente de cada câmara nos filtros são do tipo SVEDALA FAÇO padrão AWWA, cujo perfil do disco é cientificamente determinado. Suas superfícies são lisas e o posicionamento da sede de borracha reduz a um mínimo a perda e carga. Sendo assim, os coeficientes de perda de carga (K) das válvulas instaladas (SVEDALA FAÇO) não correspondem aos coeficientes de perda de carga obtidos no Projeto Executivo de Ampliação e Melhorias da ETA-RD (1993). Isso significa que a relação entre as vazões de trabalho da estação e o ângulo de abertura das válvulas borboletas deve ser reavaliada.

A figura 4.3 mostra um desenho da válvula SVEDALA FAÇO instalada na ETA-RD e a figura 4.4 mostra o gráfico fornecido pelo fabricante da válvula borboleta SVEDALA FAÇO, contendo os coeficientes de perda de carga K em função da abertura do disco das válvulas instaladas na ETA-RD.

FIGURA 4.3 - Válvula Borboleta da SVEDALA FAÇO instalada na ETA-RD.

FIGURA 4.4 - Coeficiente de perda de carga (K) em função da abertura da válvula borboleta tipo SVEDALA FAÇO (catálogo do fabricante).

De acordo com o gráfico da figura 4.4, para um ângulo de abertura de 30° o coeficiente de perda de carga é de aproximadamente 40. Considerando os cálculos do Projeto Executivo (1993) para um ângulo de abertura de 30° , o ângulo δ correspondente é de 60° e, para este ângulo o coeficiente de perda de carga de acordo com a tabela 4.1, é de 118. Isso evidencia a diferença entre as perdas de carga na válvula borboleta consideradas no Projeto Executivo (1993) e as perdas de carga das válvulas SVEDALA FAÇO existentes na estação.

É válido ressaltar que a diferença entre as perdas de carga na válvula borboleta consideradas no Projeto Executivo (1993) e as perdas de carga das válvulas SVEDALA FAÇO é maior quanto menor for o ângulo de abertura do disco da válvula podendo chegar a valores 7,5 vezes maiores que as consideradas em projeto.

A estação é automatizada e um Controlador Lógico Programável (CLP) é responsável pela abertura automática de todas as válvulas borboleta simultaneamente.

Conforme procedimentos operacionais, determinados pela CAESB na época da pesquisa, os ângulos de abertura mais utilizados na estação, considerando quatorze filtros em funcionamento, eram de 30° para vazões entre 3.100 l/s e 4.300 l/s, 40° para vazões entre 4.300 l/s e 5.300 l/s e 60° para vazões superiores a 5.300 l/s.

No “*Horário de Ponta*” o procedimento operacional consistia em trabalhar com apenas oito filtros mantendo a abertura do ângulo das válvulas borboleta em 20° .

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, percebeu-se que os ângulos de abertura das válvulas borboleta registradas no CLP e nas mesas de comando não correspondiam aos mesmos indicados pelo ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas contido no operador.

A figura 4.5 mostra uma foto do operador com controle de abertura e fechamento das válvulas borboleta da câmara B do filtro 3.

FIGURA 4.5 -Foto do operador com controle de abertura e fechamento da válvula borboleta.

Na foto é possível perceber as posições aberto (90^0) e fechado (0^0), além dos ângulos intermediários de $22,5^0$, 45^0 e $67,5^0$. Nota-se que o ângulo indicado no ponteiro do controle de abertura e fechamento é de aproximadamente 11^0 ; nesse mesmo momento, o valor digital registrado na mesa de comando e no CLP foi de 20^0 .

Investigações realizadas em todas as outras válvulas mostraram que a diferença entre o valor dos ângulos mostrados no operador e o valor digital obtido no CLP (ou na mesa de comando) variava de válvula para válvula, ou seja; quando o CLP registrava um determinado ângulo de abertura para todas as válvulas em conjunto, cada válvula abria um ângulo diferente do requerido pelo CLP. Estas diferenças chegaram a ser da ordem de 20^0 , conforme o ângulo requerido.

4.3 Instalação piloto da ETA-RD

A Instalação Piloto da ETA-RD era constituída basicamente de uma caixa com vertedor triangular de 15 cm de altura e ângulo de $28^0 4' 22''$, para medição de vazão e/ou mistura rápida, uma unidade de floculação com seis câmaras, possuindo um sistema de agitação composto por quatro paletas de 30 x 125 mm, sustentadas por um eixo de 12,7 mm que possibilitava a obtenção de gradientes de velocidade de até 200 s^{-1} e dois filtros de areia praticamente uniforme funcionando em paralelo. Na figura 4.6 tem-se um esquema geral da Instalação piloto.

FIGURA 4.6 - Esquema geral da Instalação Piloto

4.4 Etapas do desenvolvimento da pesquisa

A presente pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas:

A primeira constou em adequar a Instalação Piloto existente, de forma que a mesma possuísse uma área de armazenamento a montante do filtro proporcional à área de armazenamento a montante existente na ETA-RD e que um único filtro, trabalhando com taxa constante e nível variável, também simulasse o filtro recém lavado do sistema de filtração com taxa declinante variável da ETA-RD.

A segunda baseou-se em ensaios com água tratada que possibilitaram o levantamento de dados para obtenção das curvas de perda de carga total tanto nos filtros da ETA-RD quanto no filtro piloto (FP). Esta etapa teve como objetivo equivar a perda de carga total obtida nos filtros da estação à obtida no filtro piloto (FP).

A terceira fundamentou-se na aplicação do modelo matemático de MACHADO (1995) ao sistema de filtração com taxa declinante variável em questão, a partir do conhecimento da taxa média de filtração, do número de filtros, da carga hidráulica prevista em projeto, da área de armazenamento a montante dos filtros (obtida na primeira etapa) e das equações de perda de carga total obtidas nos filtros da ETA-RD, (conforme a segunda etapa).

A quarta etapa, realizada na Instalação Piloto modificada, consistiu em primeiro equivar a curva de perda de carga total no filtro piloto conforme as curvas de perda de carga total obtidas na ETA-RD, utilizando-se água tratada para, em seguida, realizar ensaios com água coagulada na ETA-RD, utilizando-se a taxa máxima de filtração obtida pelo modelo matemático, conforme a terceira etapa, para obter, o nível N_{Ireal} , ΔH_0 , a previsão da carreira de filtração, e o gasto com água para lavagem, após cada ensaio com água coagulada.

As quatro etapas foram realizadas em passos que serão descritos com o auxílio do quadro sinóptico da figura 4.7:

FIGURA 4.7 - Quadro sinóptico das etapas e passos do desenvolvimento da pesquisa

4.4.1 Primeira etapa

1º Passo : Cálculo da área de armazenamento na ETA-RD.

2º Passo: Determinação da área de armazenamento na Instalação Piloto.

3º Passo: Modificações na Instalação Piloto para adequar a área de armazenamento a montante do filtro piloto definida no 1º e 2º Passos desta etapa.

4º Passo: Modificações em um dos dois filtros piloto da instalação para que ele trabalhe com taxa constante e nível variável, simulando o mais próximo possível do filtro recém lavado do sistema de filtração com taxa declinante variável da ETA-RD.

4.4.2 Segunda etapa

1º Passo: Ensaios com água tratada, na Instalação Piloto, utilizando-se 10 taxas de filtração distintas, a fim de obter dados para determinação das curvas de perda de carga no meio filtrante, turbulenta e total.

2º Passo: Ajuste dos dados obtidos nos ensaios do 1º Passo desta etapa para obter as equações das curvas de perda de carga no meio filtrante, turbulenta e total no filtro piloto.

3º Passo: Ensaios com água tratada em dois dos filtros da ETA-RD a fim de obter dados para determinação das curvas de perda de carga total no filtro, considerando-se seis diferentes ângulos de abertura da válvula borboleta, escolhidos em função das vazões de trabalho da estação.

4º Passo: Ajuste dos dados obtidos nos ensaios realizados, conforme o 3º Passo desta etapa, para obtenção de seis equações das curvas de perda de carga total na ETA-RD, correspondentes aos seis ângulos de abertura da válvula borboleta investigados.

5º Passo: Equiparação da equação da curva de perda de carga total na Instalação Piloto, obtida conforme o 2º passo desta etapa com as curvas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD, obtidas conforme o 4º passo desta etapa.

4.4.3 Terceira etapa

1º Passo: Aplicação do modelo matemático de Machado ao SFTD da ETA-RD a partir do conhecimento da taxa média de filtração, referentes às duas vazões mais comuns da estação (4,1 e 5,1 m³/s), do número de filtros (14), da carga hidráulica máxima disponível (2,6 m), da capacidade de armazenamento a montante do filtro e das seis equações de perda de carga total obtidas, na segunda etapa.

2º Passo: escolha da equação de perda de carga total mais adequada (obtida no 4º passo da segunda etapa) em função da vazão de trabalho e do ângulo de abertura da válvula borboleta, para aplicação do modelo de forma a questionar os valores mais adequados da relação $T_{\max}/T_{\text{med}}$.

3º Passo: Obtenção das taxas máximas de filtração, dos níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_3 , por meio do modelo matemático de Machado, considerando-se as equações de perda de carga mais adequadas obtidas na segunda etapa, para cada vazão de trabalho da ETA-RD, levando-se em conta a relação entre $T_{\max}/T_{\text{med}}$ para a qual foram obtidos carreiras de filtração razoáveis sem prejuízo da água filtrada.

4.4.4 Quarta etapa

1º Passo: Ajuste da curva de perda de carga total no filtro piloto com as curvas de perda de carga total obtidas na ETA-RD, utilizando-se água tratada.

2º Passo: Realização de ensaios na Instalação Piloto com água coagulada na ETA-RD, com as taxas máximas de filtração (relativas às duas vazões mais comuns de trabalho da ETA-RD), obtidas pelo modelo de Machado (1995), considerando-se à área de armazenamento a montante do filtro piloto proporcional a área de armazenamento a montante dos filtros da ETA-RD, para a obtenção do N_{real} .

3º Passo: Determinação do ΔH_0 .

4º Passo: Cálculo do tempo gasto para atingir o nível N_2 e previsão da carreira de filtração.

5º Passo: estudos do volume de água para lavagem.

4.4.1.1 Área de armazenamento na ETA-RD

A área de armazenamento total dos filtros na ETA-RD foi estabelecido por (ver figura 4.1- Esquema geral da ETA-RD):

1. canais de água coagulada (área = $95,2 \text{ m}^2$);
2. câmaras de floculação (área = $557,78 \text{ m}^2$);
3. canais de água floculada (área = $108,4 \text{ m}^2$);
4. canais de alimentação de água aos filtros (área = $198,4 \text{ m}^2$);
5. unidades de filtração (área = 1400 m^2);
6. canais centrais de coleta de água de lavagem dos filtros (área = $182,0 \text{ m}^2$).

A área de armazenamento total na ETA-RD resultante foi de $2.541,71 \text{ m}^2$. Uma unidade de filtração é constituída de duas câmaras de 50 m^2 , totalizando para cada unidade, uma área filtrante de 100 m^2 . Logo, a área de armazenamento total é igual a, aproximadamente, 25 vezes a área filtrante de um filtro na ETA-RD.

4.4.1.2 Determinação da área de armazenamento da Instalação Piloto

Na Instalação Piloto, a mesma relação obtida na ETA-RD, entre a área de armazenamento total e a área do filtro piloto foi mantida. Para isto, a área de armazenamento total correspondente, na Instalação Piloto, foi determinada por:

1. uma câmara de floculação com agitador com área $0,144 \text{ m}^2$;
2. duas câmaras de floculação com área de $0,144 \text{ m}^2$ cada;
3. um canal de veiculação de água floculada com área de $0,235 \text{ m}^2$;
4. um filtro piloto, com $0,185 \text{ m}$ de diâmetro interno, com área correspondente de $0,0269 \text{ m}^2$.

Sendo assim, $0,667 \text{ m}^2$ foi a área de armazenamento total a montante do filtro piloto, determinada para manter a relação entre as áreas de armazenamento total e do filtro, na Instalação Piloto igual a 25.

4.4.1.3 Modificações na Instalação Piloto (área de armazenamento)

Para que a área de armazenamento fosse implantada na unidade de floculação existente, algumas modificações foram realizadas. A figura 4.8 apresenta a área de armazenamento na Instalação Piloto modificada.

FIGURA 4.8 - Área de armazenamento da Instalação Piloto modificada

A área de armazenamento é constituída de uma câmara de floculação (câmara 4), que funciona com um agitador mecanizado, duas câmaras interligadas entre si (câmaras 5 e 6) e o canal de veiculação de água floculada. As três câmaras, juntamente com o canal de veiculação de água floculada, correspondem a área de armazenamento na ETA-RD.

Nas figuras 4.9 e 4.10 são apresentados cortes detalhando as modificações realizadas na unidade de floculação da Instalação Piloto para obtenção da área de armazenamento adicional.

FIGURA 4.9 - Corte DD da unidade de floculação modificada

FIGURA 4.10 - Corte EE da unidade de floculação modificada

O esquema geral da figura 4.11 mostra a Instalação Piloto modificada. A água na instalação entra pela caixa de chegada, passa pelo vertedor triangular, sendo encaminhada por uma tubulação de 50 mm, até a câmara 4, passando depois pelas câmaras 5 e 6 e pelo canal de água floculada. Posteriormente, a água é levada ao filtro por uma tubulação de 50 mm acoplada a um mangote flexível. Na junção da tubulação com o mangote tem-se uma luva de união que foi instalada para que a vazão de água pudesse ser aferida volumetricamente antes da água entrar no filtro piloto. Para aferir a vazão volumetricamente utilizou-se uma proveta de plástico de 2000 ml.

A foto apresentada na figura 4.12 ilustra a caixa de chegada com vertedor e a tubulação que encaminha a água até a câmara 4.

FIGURA 4.12 - Caixa de chegada com vertedor triangular e tubulação que encaminha a água à câmara 4.

A foto da figura 4.13 ilustra a câmara de floculação 4 com o agitador, as câmaras 5 e 6 e o canal de água floculada que definem a área de armazenamento da instalação modificada.

A foto da figura 4.14 mostra a vista de cima da unidade de floculação, contendo a câmara 4 com o agitador mecanizado, a câmara 5 e sua interligação com a câmara 6, a tubulação de entrada de água na câmara 4 e a saída de água para o canal de água floculada.

A foto da figura 4.15 mostra a luva de união na tubulação oriunda do floculador desencaixada do mangote flexível, que está ligado à tubulação de entrada no filtro piloto.

FIGURA 4.13 - Foto das câmaras 4 , 5 e 6 e o canal de água floculada.

FIGURA 4.14 - Foto ilustra a vista de cima das câmaras 4 e 5 e o agitador mecanizado.

FIGURA 4.15- Foto ilustrando a luva de união na tubulação oriunda do floculador desencaixada e o mangote flexível ligado à tubulação de entrada do filtro piloto.

4.4.1.4 Modificações na Instalação Piloto (filtro piloto)

Dos dois filtros da Instalação Piloto apenas um, o filtro piloto 2 (FP2), foi utilizado sendo que nele algumas modificações foram feitas de forma que:

- a) o filtro piloto 2 e a unidade de floculação trabalhassem como vasos comunicantes. Para isso, o (FP2) teve sua altura aumentada até a cota do topo da unidade de floculação de modo que a entrada de água no FP2 fosse sempre afogada;
- b) a perda de carga total no FP2 pudesse ser a mesma obtida nos filtros da ETA-RD. Para isso, uma válvula de esfera instalada na saída do FP2 foi a responsável por introduzir uma perda de carga adicional turbulenta, tal como acontece com a válvula borboleta instalada na saída da tubulação dos filtros da estação, proporcionando dessa forma uma equiparação das condições de trabalho entre o FP2 e os filtros da estação.

As figuras 4.16 e 4.17 auxiliam na descrição do funcionamento do filtro piloto 2 modificado.

O filtro piloto 2 foi totalmente isolado do 1 por meio do fechamento de uma válvula de gaveta.

A entrada de água no filtro 2 ocorre quando o mangote flexível for acoplado à luva de união, interligando a tubulação que sai da unidade de floculação à tubulação de entrada de água no filtro piloto 2.

No FP2 as válvulas A e D, quando abertas, são responsáveis, respectivamente, pela entrada e saída de água no filtro. A válvula E deve estar fechada durante a operação de filtração.

A lavagem do filtro é realizada com ar e água de maneira não simultânea. O ar deve ser injetado por um compressor e a água para lavagem encaminhada ao filtro por meio de bomba.

A tubulação de água para lavagem encaminha a água do reservatório de água para o filtro no momento em que as válvulas C e E forem abertas e as válvulas A e D fechadas.

A válvula de esfera, R, instalada na tubulação de saída dos filtros é o responsável por introduzir a perda de carga adicional turbulenta cumprindo a função da válvula borboleta na ETA.

Nove piezômetros instalados no filtro são usados para medir a perda de carga em diversos pontos ao longo do meio filtrante e o piezômetro 10, instalado na tubulação de água filtrada, é usado para determinar a perda de carga na tubulação de saída do filtro.

No ponto 3 (ver figura 4.16), situado na geratriz inferior da tubulação de água filtrada, foi definido o nível de referência (N_r) na IP. Este nível correspondente à cota do vertedor geral de água filtrada dos filtros da ETA-RD, o qual foi utilizado como ponto de partida para a determinação e obtenção dos níveis de trabalho na Instalação Piloto.

No ponto 4 (ver figura 4.16), situado na geratriz inferior da tubulação de saída de água de lavagem, foi definido o nível de lavagem. Este nível corresponde à cota da crista da canaleta de água de lavagem na ETA-RD.

FIGURA 4.16 - Instalação Piloto modificada

FIGURA 4.17 - Instalação Piloto modificada

A foto da figura 4.18, apresenta a vista lateral da IP modificada, mostrando o FP2, o reservatório de água para lavagem, as bombas.

FIGURA 4.18 - Foto da vista lateral da IP modificada, mostrando o FP2, o reservatório de água para lavagem e as bombas.

Duas mangueiras transparentes foram instaladas, uma no FP2 acima do piezômetro 9 e outra na unidade de floculação para que os níveis de água nas duas unidades fossem observados (ver figura 4.16).

A IP modificada passou então a ser constituída de uma caixa de chegada com vertedor, três câmaras de floculação interligadas e um único filtro funcionando com taxa constante. Na foto da figura 4.19 tem-se a IP com os dois filtros, evidenciando-se os piezômetros instalados ao longo do meio filtrante, o filtro da esquerda é o FP2, escolhido para trabalhar com taxa constante e nível variado.

FIGURA 4.19 - Foto da IP com os dois filtros. O filtro da esquerda é o FP2 modificado com os piezômetros instalados ao longo do meio filtrante.

A foto da figura 4.20 mostra o piezômetro 10 instalado na tubulação de saída de água filtrada do filtro escolhido. Ao fundo, uma parte do filtro mostrando o meio filtrante.

FIGURA 4.20 - Foto do piezômetro 10 instalado na tubulação de saída de água filtrada do FP2, ao fundo o filtro e o meio filtrante.

4.4.2.1 Ensaios para obter as perdas de carga no FP2

As curvas de perda de carga total, no meio filtrante e na tubulação, foram determinadas por meio de dez ensaios com água tratada na Instalação Piloto. Cada ensaio correspondeu a uma vazão distinta.

Antes da realização dos ensaios, toda instalação foi devidamente lavada. O FP2 foi lavado com ar e água até que a turbidez da água de lavagem atingisse valor menor que 1 uT.

Uma mangueira de 25 mm, encaixada numa válvula de esfera, abasteceu de água tratada a caixa de chegada com vertedor triangular, conforme ilustrado na foto da figura 4.21.

FIGURA 4.21 - Foto da mangueira abastecendo de água tratada a caixa de chegada.

A caixa de chegada foi totalmente isolada através do fechamento das válvulas de entrada de água bruta e de descarga de fundo como é mostrado na foto da figura 4.22.

FIGURA 4.22 - Foto das válvulas de entrada de água bruta e de descarga de fundo da caixa de chegada, na Instalação Piloto.

Uma trena foi utilizada para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor triangular como pode ser visto na foto da figura 4.23. A vazão de cada ensaio foi medida pela altura da lâmina d'água (H) sobre o vertedor utilizando-se a eq (4.1);

$$Q = 1,32 \operatorname{tg}(\alpha/2) H^{2,47} \quad (4.1)$$

onde;

Q = vazão (m³/s)

α = ângulo do vertedor triangular = 28°

H = altura da lâmina d'água no vertedor

FIGURA 4.23 - Foto da trena utilizada para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor triangular.

As figuras 4.11 e 4.16 ajudam na compreensão da descrição do ensaio, para determinação das curvas de perda de carga total, no meio filtrante e na tubulação conforme descrito a seguir:

1. Abrir a válvula de esfera acoplada à mangueira permitindo a entrada de água tratada na caixa de chegada;
2. esperar que a altura da lâmina d'água sobre o vertedor da caixa de chegada se estabilize;
3. medir o valor da lâmina d'água sobre o vertedor determinando uma vazão através da eq (4.1);
4. esperar que a água tratada percorra toda a unidade de floculação (câmaras 4, 5, 6 e o canal de floculação);
5. esperar que a água chegue à tubulação no ponto onde foi instalada a luva de união, a qual estará desencaixada.

6. medir volumetricamente (utilizando-se proveta de 2000 ml) a vazão de água neste ponto até estabilizar ou seja, até que a vazão medida volumetricamente seja aproximadamente a mesma vazão determinada pela altura da lâmina d'água sobre o vertedor.
7. aferir a vazão, no mínimo 5 vezes, certificando-se da estabilização;
8. encaixar o mangote na tubulação de entrada de água no filtro, conforme é apresentado na foto da figura 4.24;

FIGURA 4.24 - Foto mostrando a luva de união sendo encaixada após aferir a vazão.

9. manter as válvulas de gaveta B, C, D, E e a de esfera R fechadas;
10. manter a válvula A aberta;
11. encher o filtro até um nível acima do piezômetro 9;
12. abrir então as válvulas D e R para a passagem da água tratada pelo filtro;
13. deixar o nível de água estabilizar no interior do filtro;
14. medir volumetricamente (utilizando-se proveta de 2.000 ml) a vazão na saída do filtro até que se verifique que a mesma é aproximadamente igual à vazão de entrada medida no encaixe da luva de união.

15. registrar os níveis nos 10 piezômetros;
16. obter a perda de carga total (diferença de nível entre os piezômetros 9 e 10);
17. obter a perda de carga laminar (diferença de nível entre os piezômetros 9 e 1);
18. obter a perda de carga turbulenta (diferença entre os piezômetros 10 e 1 ou diferença entre as perdas de carga total e laminar).
19. Repetir o ensaios para nove outras vazões distintas.

A foto da figura 4.25 mostra a proveta de 2.000 ml de plástico utilizada para medir as vazões. A tubulação azul ao fundo é a tubulação de saída de água filtrada.

FIGURA 4.25 - Foto apresentando a proveta de 2000 ml utilizada para medir os volumes nos ensaios. Ao fundo tem-se a tubulação de saída de água filtrada do FP2.

4.4.2.2 Ajuste dos dados obtidos nos ensaios com água tratada na IP

Cada ensaio, determinado por uma vazão, correspondeu a uma taxa de filtração. Para cada taxa de filtração foram obtidas as perdas de carga total (diferença entre piezômetros 9 e 10) no meio granular (diferença de nível entre os piezômetros 9 e 1) e na tubulação (diferença de nível entre os piezômetros 1 e 10).

Um esquema do FP2, apresentado na figura 4.26, mostra a localização dos piezômetros ao longo do meio filtrante.

Os piezômetros P1, P2, P3 situam-se na camada suporte. A diferença entre as leituras piezométricas em P3 e P1 representa a perda de carga na camada suporte.

Os piezômetros P4, P5, P6, P7, P8 e P9 localizam-se ao longo do meio filtrante. A diferença entre as leituras piezométricas em P9 e P3 representa a perda de carga na camada de areia.

A diferença entre as leituras piezométricas em P9 e P1 resulta na perda de carga no meio granular, ou seja, é a perda de carga na camada suporte somada à da camada de areia.

Os dados das perdas de carga no FP2, total (h_{dFP2}), no meio filtrante (h_{LFP2}) e na tubulação (h_{tubFP2}) em função da taxa de filtração (T) dos dez ensaios foram colocados em um sistema de coordenadas na forma de pontos (x,y). Os três conjuntos de dez pontos (referentes aos dez ensaios) foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados (M.M.Q), obtendo-se assim três curvas ajustadas: a de perda de carga total, a de perda de carga no meio granular e a de perda de carga na tubulação no FP2.

FIGURA 4.26 - Esquema da Instalação Piloto com os piezômetros ao longo do meio granular em FP2

4.4.2.3 Ensaios para obter a perda de carga total no filtro da ETA-RD

A fim de se obter dados para determinação das curvas de perda de carga total nos filtros da estação, realizaram-se ensaios com água tratada nos filtros 3 e 9 da ETA-RD. Estes filtros foram escolhidos, dentre os quatorze da estação, por estarem em melhor condição de funcionamento e sem vazamentos.

Os testes foram realizados em dois filtros, a fim de assegurar que os filtros da estação pudessem ser considerados iguais, em termos de perda de carga. Para cada filtro, realizaram-se seis ensaios, cada um correspondeu a um ângulo de abertura da válvula borboleta, escolhido em função das vazões de trabalho da ETA-RD.

Durante a execução dos ensaios, o acionamento das válvulas borboleta foi feito utilizando-se o controle de abertura e fechamento do disco nas próprias válvulas borboleta, já que esta operação por meio do CLP e das mesas de comando não correspondiam à realidade.

Para que fosse possível encontrar o ângulo de abertura real da válvula borboleta, elaborou-se um gabarito contendo não só os ângulos indicados no controle de abertura e fechamento das válvulas como também ângulos intermediários (de 10 em 10 graus).

O gabarito foi colocado embaixo do ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas borboleta, de forma que os ângulos do gabarito coincidisse exatamente com os ângulos marcados pelo fabricante.

A figura 4.27 mostra uma cópia do gabarito utilizado durante os testes, ressaltando os seis ângulos (20° , 26° , 30° , 36° , 50° e 90°), escolhidos conforme vazão de trabalho da ETA-RD.

FIGURA 4.27 - Gabarito utilizado, ressaltando os ângulos investigados.

Na figura 4.28 tem-se uma fotografia do gabarito colocado embaixo do ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas borboleta.

FIGURA 4.28 - Foto apresentando o gabarito embaixo do ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas.

Um levantamento topográfico prévio foi realizado para se obter a área dos filtros escolhidos, as cotas da passarela, onde foram instadas as réguas, a cota do topo da caixa de inspeção na caixa de efluente e a cota do vertedor. Esses dados topográficos possibilitam o cálculo das vazões, das taxas de filtração, da altura da lâmina no vertedor e das cargas hidráulicas obtidas durante os testes.

O procedimento dos ensaios realizados nos filtros 3 e 9 da ETA-RD será descrito a seguir:

1. medir a área interna total (A_t) do filtro escolhido (A_t = área das câmaras+área do canal central de coleta de água de lavagem);
2. fechar a comporta de entrada de água coagulada / floculada ao filtro;
3. proceder a lavagem com ar e água como habitualmente é efetuada, preocupando-se em garantir a melhor limpeza possível dos filtros;
4. fechar a comporta de saída de água de lavagem, isolando totalmente o filtro;
5. instalar uma régua com marcas a cada centímetro, na borda do filtro, como pode ser visto na foto da figura 4.29 e no esquema da figura 4.30;

FIGURA 4.29 - Foto da régua instalada na borda do filtro 3.

6. abrir a válvula de água para lavagem e a válvula mestra, introduzindo água para lavagem, com uma velocidade de 0,1 a 0,2 m/s, aproximadamente, de forma que não haja expansão do meio filtrante;
7. encher lentamente o filtro até que o nível de água atinja a altura de 30 ± 1 cm abaixo da cota da passarela e fechar a válvula de água para lavagem;
8. verificar, através de amostras coletadas em vários pontos do filtro cheio, se a turbidez possui valores inferiores a 1 uT. Caso contrário, promover nova lavagem até que se consigam valores de turbidez menores que 1 uT .
9. aguardar um tempo, aproximadamente 1 hora, para verificar se o nível de água na régua não abaixou ou seja, certificar que não houve vazamento no filtro;
10. manter a vazão na estação constante, a partir deste momento até o final do ensaio;
11. medir a lâmina d'água sob o vertedor da caixa de efluentes utilizando uma régua que foi instalada na caixa de inspeção conforme mostrado no esquema da figura 4.30 e na foto da figura 4.31;

FIGURA 4.30 - Esquema que mostra as réguas instaladas no filtro, na caixa de inspeção da caixa de efluentes e a carga hidráulica disponível (Hd).

FIGURA 4.31 - Foto da régua instalada na caixa de inspeção da caixa de efluentes.

13. Abrir totalmente a válvula borboleta, (90^0 de acordo com o gabarito) de uma das câmaras e registrar a cada minuto, na régua, o nível de água no filtro;
14. determinar a carga hidráulica disponível (H_d), que é a diferença entre o nível de água no vertedor da caixa de efluentes e o nível de água no filtro, conforme mostrado no esquema da figura 4.30;
15. Obter a vazão Q para cada minuto da seguinte forma:

$$Q = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_t \cdot \Delta H}{\Delta t} \quad (4.2)$$

onde:

Q = Vazão (m³/min);

A_t = Área total do filtro (m²);

Δt = espaço de tempo em que foram realizadas as leituras na régua (1 minuto);

ΔH = diferença entre os níveis registrados em $\Delta t = 1$ minuto;

16. obter a taxa de filtração (T);

$$T = \frac{Q}{A_f} \quad (4.3)$$

onde:

A_f = área da câmara cuja válvula borboleta foi aberta;

17. Repetir o ensaio mudando ângulos de abertura da válvula borboleta para 50°, 36°, 30°, 26°, 20°.

Assim foram realizados os seis ensaios em cada filtro, um para cada ângulo de abertura da válvula borboleta.

4.4.2.4 Ajuste dos dados obtidos nos ensaios com água tratada na ETA-RD

Os dados obtidos nos seis ensaios com água tratada, realizados nos filtros 3 e 9 da ETA-RD, referentes à diferença entre os níveis registrados na régua, juntamente com os dados do levantamento topográfico relativos à área total dos filtros; à área das câmaras (onde a válvula borboleta foi aberta); à cota da passarela, (onde foram instaladas as régua nos filtros); à cota do topo da caixa de inspeção (na caixa de efluente); à cota do vertedor comum de água filtrada, possibilitaram calcular a vazão em cada câmara do filtro e a taxa de filtração correspondente, além da altura da lâmina sobre o vertedor e da carga hidráulica obtidas em cada espaço de tempo em que foram realizadas as leituras, ou seja, a cada minuto do ensaio.

Os dados calculados de taxa de filtração (T) e carga hidráulica (Hd), referentes aos ensaios realizados nos filtros 3 e 9, foram colocados, em conjunto, em um sistema de coordenadas (x, y) com a intenção de se obter um número maior de pontos para ajuste.

Assim, para cada ângulo investigado, um conjunto de pontos (T, Hd) gerados a partir dos ensaios nos dois filtros, foi obtido. Este conjunto de pontos representa a taxa de filtração em função da perda de carga total obtida nos filtros da ETA-RD, para cada ângulo de abertura da válvula borboleta investigado.

Da perda de carga total (Hd) correspondente à cada taxa de filtração (T), subtraiu-se o valor ajustado pelo método dos mínimos quadrados, da perda de carga no meio filtrante do FP2 (hL_{FP2}), para se obter o valor da perda de carga turbulenta em função da taxa de filtração nos filtros da estação.

Esta medida baseou-se no fato de que a perda de carga no meio filtrante na estação não pode ser obtida, mesmo tendo piezômetros instalados no começo e no final da camada filtrante dos filtros 3 e 9, pois o curto espaço de tempo do ensaio não permitiu a estabilização dos níveis d'água nos piezômetros para fazer as leituras.

Ao subtrair o valor ajustado da perda de carga no meio filtrante do FP2 (hL_{FP2}) do valor obtido da perda de carga total (Hd) nos dois filtros da estação, foram obtidos os valores de perda de carga na tubulação (H_{Tub}) dos filtros da ETA-RD, que é a perda de carga na tubulação em geral (H_t) somada à perda de carga na válvula borboleta (H_v).

Assim, os dados de taxa de filtração em função da perda de carga turbulenta (T, H_{Tub}) na ETA-RD também foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, conseguindo-se, para cada ângulo da válvula borboleta, uma curva de perda na tubulação ajustada a partir dos dados obtidos nos dois filtros da ETA-RD em conjunto.

Após obter a curva de perda de carga turbulenta ajustada, os valores de H_{Tub} foram somados aos valores da curva de perda de carga ajustada no meio filtrante (hL_{FP2}) do FP2. Essa operação foi feita para os seis ângulos de abertura da válvula borboleta investigados, obtendo-se então seis curvas ajustadas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD.

O quadro sinóptico da figura 4.32 mostra como foram realizados os ajustes dos dados obtidos nos ensaios na IP e na ETA-RD.

FIGURA 4.32 - Quadro sinóptico mostrando como foram realizados os ajustes dos dados nos ensaios na IP e na ETA-RD.

4.4.2.5 Comparação entre a curva de perda de carga total do FP2 e as dos filtros da ETA-RD

A curva de perda de carga total obtida no FP2 e curvas de perda de carga total obtidas para os vários ângulos da válvula borboleta nos filtros da ETA-RD foram colocadas em um mesmo gráfico para que fossem comparadas.

Esta comparação teve como objetivo saber o quanto de perda de carga turbulenta adicional teria que ser introduzida pela válvula de esfera do FP2, para que a curva de perda de carga total ajustada no FP2 e as curvas de perda de carga total ajustadas nos filtros da ETA-RD fossem similares.

4.4.3.1 Aplicação do modelo

A partir do conhecimento da taxa média de filtração, referente às duas vazões mais comuns da estação, do número de filtros (14), da carga hidráulica máxima disponível (2,6 m), área de armazenamento (25 vezes a área de um filtro) e das equações das seis curvas de perda de carga total ajustadas, aplicou-se o modelo matemático de MACHADO (1995) ao SFTD da ETA-RD.

Ao aplicar o modelo matemático considerou-se ΔH_o (diferença entre os níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_{real}) igual a zero, uma vez que os dados relativos a essa diferença, no programa, referem-se aos dados obtidos por Machado (1995), com água decantada da Estação de Tratamento de São Carlos. Com essa consideração foi possível obter o $N_{\text{teórico}}$, através do programa, deixando que o valor de N_{real} fosse posteriormente obtido em ensaios com água floculada da própria ETA-RD.

4.4.3.2 Escolha da equação da curva de perda de carga total adequada

Ao aplicar o modelo matemático considerou-se:

- as duas vazões mais comuns de trabalho da ETA-RD;
- quatorze filtros em funcionamento;
- carga hidráulica disponível de 2,6 m;
- área de armazenamento (25 vezes a área do filtro)
- as seis equações da curva de perda de carga total (uma para cada abertura da válvula borboleta estudada);

Escolheu-se, dentre as seis equações da curva de perda de carga total, as mais adequadas, de forma a questionar os valores mais apropriados da taxa máxima de filtração e da relação $T_{\max}/T_{\text{med}}$, ou seja, valores que produziram uma carreira de filtração com duração razoável sem prejuízo da qualidade da água filtrada.

4.4.3.3 Obtenção de $T_{\max}$, $N_{\text{Iteórico}}$ e N_3

Considerando-se as equações da curva de perda de carga mais adequadas visando produzir carreiras de filtração com duração razoável sem prejuízo da água filtrada, registraram-se as taxas máximas de filtração, os níveis $N_{\text{Iteórico}}$ e N_3 , de acordo com o modelo matemático de Machado, para que posteriormente fossem consideradas em ensaios com água floculada na IP.

4.4.4.1 Equivalência da curva de perda de carga total no FP às do filtro da estação

A equivalência da curva de perda de carga total do FP2 com as curvas de perda de carga total no filtro da ETA-RD, foi feita utilizando-se a válvula tipo esfera, responsável por introduzir uma perda de carga adicional turbulenta no FP2, tal como acontece com a válvula borboleta instalada na saída da tubulação dos filtros da estação.

A válvula esfera foi aberta ou fechada de forma a obter-se uma curva de perda de carga total no FP2 equivalente a cada uma das curvas de perda de carga total ajustada.

A curva de perda de carga total ajustada, escolhida entre as seis curvas ajustadas conforme item 4.4.2.4, será aquela cuja equação foi selecionada como a mais adequada, de acordo com o item 4.4.3.2.

Este ajuste foi feito utilizando-se água tratada da ETA-RD da seguinte forma:

1. abrir o registro de esfera da mangueira permitindo a entrada de água tratada na caixa de chegada;
2. escolher uma vazão correspondente a uma taxa de filtração qualquer para se trabalhar;

3. esperar que a altura da lâmina d'água sobre o vertedor da caixa de chegada se estabilize;
4. medir o valor da lâmina d'água sobre o vertedor determinando uma vazão a qual se quer trabalhar através da eq (4.1);
5. esperar que a água tratada percorra toda a unidade de floculação;
6. esperar que a água chegue à tubulação no ponto onde foi instalada a luva de união, a qual estará desencaixada;
7. determinar volumetricamente (utilizando-se proveta de 2000 ml) a vazão de água neste ponto até estabilizar;
8. aferir a vazão, no mínimo 5 vezes, certificando-se da sua constância;
9. registrar a vazão estabilizada;
10. encaixar o mangote na tubulação de entrada de água no filtro;
11. manter as válvulas B, C, D, E e o registro de esfera R fechados (ver figura 4.16);
12. manter a válvula A de entrada no FP2 aberta (ver figura 4. 16);
13. encher o filtro até um nível acima do piezômetro 9;
14. abrir as válvulas D e R para a passagem da água tratada pelo filtro (figura 4. 16);
15. deixar o nível de água estabilizar no interior do filtro;
16. medir volumetricamente, (com proveta de 2.000 ml) a vazão na saída do filtro até que se verifique que a mesma é aproximadamente igual à vazão de entrada, medida no encaixe da luva de união;
17. obter a perda de carga total (diferença de nível entre os piezômetros 9 e 10);
18. abrir ou fechar, por meio de alavanca, a válvula de esfera responsável por introduzir perda de carga turbulenta adicional até que o valor da perda de carga total no filtro piloto (diferença entre os piezômetros 9 e 10) seja o mesmo obtido na curva de perda de carga total ajustada (conforme item 4.4.2.4) a qual se queria equivaler;
19. esperar a estabilização aferindo sempre a vazão na saída do filtro;
20. fixar a posição do registro de esfera;
21. repetir o ensaio no mínimo cinco vezes com outras vazões (taxas de filtração) diferentes, com o intuito de verificar se, para outras taxas de filtração a perda de carga total corresponde a outros pontos da curva de perda de carga total ajustada em questão.

A foto da figura 4.33 apresenta a válvula de esfera com alavanca para ajuste da perda de carga. A foto também mostra a válvula D, a tubulação de saída do FP2 onde foram feitas as medidas de vazão e a proveta de 2000 ml.

FIGURA 4.33 - Foto apresentando a válvula de esfera com alavanca, a válvula D, a tubulação de saída do FP2 e a proveta de 2000 ml.

4.4.4.2 Ensaio com água coagulada e com $T_{\max}$ para obter N_{Ireal}

Após fixar a posição da válvula de esfera, equivalendo às curvas de perda de carga no FP2 à do filtro da estação (item 4.4.4.1), e obter os valores das taxas máximas de filtração, dos níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_3 , (item 4.4.3.3), realizaram-se ensaios na IP com água coagulada na ETA-RD para obter o N_{Ireal} .

O N_{Ireal} foi registrado por meio do piezômetro 9, quando a vazão de entrada foi igualada à de saída no FP2, ou seja; quando o nível no piezômetro 9 atingiu o seu valor mínimo. O término dos ensaios ocorreu quando o nível N_2 foi atingido.

O ensaio com água coagulada na ETA-RD seguiu os seguintes passos:

1. Marcar na mangueira transparente do FP2 e da unidade de floculação, os níveis de água N_2 e N_3 , a partir do nível de referência N_r situado no ponto 3 da Instalação Piloto (ver figura 4.16); (a foto da figura 4.34 apresenta a mangueira transparente com os níveis N_3 , N_2 marcados durante um dos ensaios).

FIGURA 4.34 - Foto do FP2 com a mangueira cristal transparente mostrando os níveis N_3 , N_2 , marcados durante um dos ensaios.

2. coletar amostra da água bruta na ETA-RD para medir turbidez, cor aparente e pH, no começo, no meio e ao final do ensaio;
3. abrir a válvula da tubulação de entrada de água coagulada, oriunda da ETA-RD;

4. regular a vazão referente a $T_{\max}$ de filtração definida pelo modelo, utilizando para isto, as válvulas de entrada de água coagulada e a de descarga de fundo (figura 4.22);
5. medir a vazão referente à $T_{\max}$ obtida pelo modelo no vertedor conforme eq(4.1);
6. esperar que a água coagulada percorra toda a unidade de floculação;
7. esperar que a água chegue à tubulação no ponto onde foi instalada a luva de união, a qual estará desencaixada;
8. aferir a vazão requerida ,volumetricamente, no ponto onde se localiza a luva de união, até certificar que a vazão obtida corresponde a $T_{\max}$ definida pelo modelo.
9. ligar o agitador mecanizado instalado na câmara 4 do floculador de forma a produzir o mesmo gradiente de velocidade requerido pelos agitadores na ETA-RD.
10. manter as válvulas B, C, D, E fechadas (ver figura 4.16);
11. fechar a válvula A de entrada no Filtro (ver figura 4. 16);
12. fechar a válvula de saída da unidade de floculação até que o N_3 obtido pelo modelo fosse atingido na unidade de floculação. (O N_3 foi observado na mangueira transparente conforme apresentado na figura 4.35);

FIGURA 4.35 - Foto mostrando a mangueira transparente e o nível N_3 na unidade de floculação.

13. abrir a válvula de saída da unidade de floculação e a válvula A de entrada de água no filtro, simultaneamente;
14. esperar a estabilização do nível no FP2 e na unidade de floculação, por meio da observação dos níveis de água nas mangueiras transparentes do FP2 e da unidade de floculação, definindo este nível como nível de equilíbrio (N_{eq});
16. abrir totalmente a válvula D de saída do filtro, disparando o cronômetro;
17. medir a vazão na saída do filtro (volumetricamente, com proveta de 2.000 ml), fazer as leituras piezométricas e coletar amostras da água coagulada e filtrada, para leitura de turbidez, cor aparente, pH e temperatura a cada 5 minutos, na primeira meia hora do ensaio;
18. medir a vazão na saída do filtro, fazer as leituras piezométricas e coletar amostras da água coagulada e filtrada para leitura de turbidez, cor aparente, pH e temperatura, na próxima hora, a cada 15 minutos;
19. medir a vazão na saída do filtro, fazer as leituras piezométricas e coletar amostras da água coagulada e filtrada para leitura de turbidez, cor aparente, pH e temperatura e a cada 30 min até que o N_2 estivesse próximo de ser atingido. Neste momento, a frequência das medições foi diminuída para 5 ou 15 min, dependendo da velocidade com que o nível de água no piezômetro 9 elevou-se.
20. Registrar o nível N_{IReal} , no piezômetro 9, quando a vazão na saída do filtro se igualar à de entrada ou seja, registrar o nível mínimo no piezômetro 9, durante o ensaio;
21. registrar o tempo no momento em que o N_{IReal} acontecer;
22. prosseguir o ensaio até que o nível N_2 fosse atingido;
23. registrar o tempo no momento que o nível N_2 fosse atingido;
24. terminar o ensaio;
25. determinar o tempo gasto para que o nível no piezômetro 9 chegue em N_2 ;

4.4.4.3 Determinação de ΔH_0

O valor de ΔH_0 foi determinado pela diferença entre os valores de $N_{\text{teórico}}$, obtido pelo modelo e de N_{real} obtido por meio do piezômetro 9, nos ensaios com água coagulada no momento em que a vazão de entrada no filtro piloto se igualou à vazão de saída.

4.4.4.4 Tempo necessário para que N_2 seja atingido e carreira de filtração

O tempo gasto desde a abertura da válvula D, quando o cronômetro foi disparado, até que o momento em que o nível N_2 foi atingido, multiplicado pelo número de filtros da estação, determinou a previsão da carreira de filtração.

4.4.4.5 Execução da lavagem

Após cada ensaio, o filtro piloto foi lavado com ar e água da seguinte forma:

1. Fechar as válvulas dos piezômetros;
2. Deixar uma lâmina d'água de 10 cm, aproximadamente, acima do leito filtrante e fechar totalmente a válvula D (ver figura 4.16);
3. Abrir a válvula do compressor;
4. Ligar o compressor;
5. Abrir a válvula que encaminha o ar para o FP2, injetando ar a uma vazão de 30 L/s (correspondente a uma taxa de 12 a 15 L/s x m²), durante 5 minutos;
6. Desligar o compressor;
7. Fechar a válvula que encaminha ar para o filtro;
8. Anotar o volume em m³ registrado no hidrômetro para controle do gasto com água de lavagem;
9. Abrir as válvulas C para passagem da água de lavagem e a válvula E para entrada de água para lavagem no filtro;
10. Abrir a válvula de gaveta do reservatório de água para lavagem;
11. Abrir a válvula da bomba;
12. Ligar a bomba;

13. Controlar, por meio da alavanca de uma válvula de esfera na tubulação de água para lavagem, a expansão do meio filtrante (30%);
14. Registrar, a cada 5 min, o volume em m^3 registrado no hidrômetro e coletar ao mesmo tempo amostras para medir a turbidez da água de lavagem;
15. Após 30 min de lavagem, desligar a bomba e fechar totalmente a válvula que permite a expansão do meio filtrante;
16. Fechar as válvulas de gaveta do reservatório de água para lavagem;
17. Terminar a operação de lavagem.

A foto da figura 4.36 apresenta o reservatório de água para lavagem (tanque azul) o reservatório de água de lavagem (tanque verde), o ponto de coleta de amostras de água de lavagem (tubulação verde de $\frac{1}{2}$ ").

FIGURA 4.36 - Foto apresentando o reservatório de água para lavagem (tanque azul), o reservatório de água de lavagem (tanque verde), o ponto de coleta de amostras de água de lavagem (tubulação verde de $\frac{1}{2}$ ").

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o que foi descrito no capítulo 4, a pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas, sendo que a primeira constou das modificações na Instalação Piloto, para propiciar a ela um funcionamento similar ao da ETA-RD. Assim, uma área de armazenamento a montante do filtro piloto foi implantada na unidade de floculação e um dos dois filtros da instalação foi modificado de tal maneira que ele pudesse trabalhar com taxa constante e nível variável.

A segunda consistiu de ensaios realizados com água tratada tanto na IP quanto na ETA-RD e teve como objetivo buscar uma equivalência da perda de carga total obtida nos filtros da estação com a obtida no filtro piloto.

A terceira fundamentou-se na aplicação do modelo matemático ao sistema de filtração com taxa declinante variável da ETA-RD para obter a taxa máxima de filtração e os níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_3 .

A quarta etapa, realizada na Instalação Piloto modificada, consistiu na equivalência da curva de perda de carga total no FP2 à curva mais adequada dentre as curvas de perda de carga total obtidas na ETA-RD, utilizando-se, para isso, a válvula de esfera instalada na tubulação de saída do FP2 para, em seguida, realizar ensaios com água coagulada na ETA-RD, utilizando-se a taxa máxima de filtração obtida pelo modelo, para obter o nível N_{real} , ΔH_0 , a previsão da carreira de filtração, e o volume gasto com água para lavagem.

5.1 Resultados dos ensaios para obter as perdas de carga no FP2

Para obter as curvas de perda de carga total no meio filtrante e na tubulação realizaram-se dez ensaios na IP utilizando-se água tratada da ETA-RD, cada um com uma vazão distinta, como descrito no item 4.4.2.1.

A turbidez da água tratada durante os ensaios, medida na entrada e na saída do filtro, foi sempre inferior a 0,9 uT.

Os resultados obtidos nestes ensaios referentes à temperatura da água, à altura da lâmina de água sobre o vertedor triangular (H), à vazão medida na entrada e na saída do filtro durante o ensaio, à taxa de filtração correspondente à vazão de saída do FP2, às leituras piezométricas bem como às perdas de carga no meio filtrante na tubulação e total são apresentadas na forma de tabelas e estão contidos no anexo A.

A diferença entre as vazões medidas na entrada e na saída do FP2 é relativamente pequena e pode ser justificada pela própria dificuldade de se conseguir precisão no momento de medir a vazão. Desta forma, considerou-se como taxa de filtração de trabalho aquela referente à vazão na saída do FP2.

Na tabela 5.1 são apresentadas as vazões na saída do FP2, as taxas de filtração correspondentes e as leituras piezométricas obtidas nos dez ensaios.

A tabela 5.2 apresenta a taxa de filtração em função das perdas de carga na camada suporte (P3-P1), na camada de areia (P9-P3) e no meio filtrante (P9-P1) no filtro FP2.

TABELA 5.1 - Leituras piezométricas obtidas nos ensaios na instalação piloto para cada vazão e taxa de filtração correspondente.

Piezômetros			**P1	**P2	**P3	**P4	**P5	**P6	**P7	**P8	*P9	*P10
Posicionamento dos piezômetros em relação ao topo do meio filtrante (m)			1,685	1,335	1,20	1,03	0,90	0,725	0,545	0,16	0,41	0,11
Ensaio	Vazão na saída do FP2 L/s	Taxa de filtração m ³ /m ² .dia	Leituras piezométricas									
1	0,029	88,23	105,0	105,2	106,0	107,0	107,5	108,4	109,4	112,1	114,8	105,0
2	0,037	112,56	105,0	105,5	106,8	107,5	108,5	109,5	110,5	114,4	115,9	105,0
3	0,053	161,24	105,1	106,0	107,9	109,2	110,2	111,9	113,6	118,6	121,9	105,1
4	0,074	225,13	105,5	106,5	109,2	111,4	113,0	115,2	118,0	125,3	130,3	105,5
5	0,093	282,93	105,9	107,0	110,5	113,0	115,0	118,0	121,0	130,5	136,2	105,8
6	0,108	328,56	106,1	107,5	112,0	115,0	117,5	120,0	124,0	135,9	143,0	106,0
7	0,124	377,24	106,1	107,9	112,5	117,0	117,6	120,5	124,5	137,2	147,0	106,0
8	0,140	425,92	106,3	108,0	113,5	117,5	119,5	123,0	127,0	142,0	153,0	106,1
9	0,152	462,42	106,6	108,5	114,5	118,5	121,3	125,3	130,5	145,3	159,0	106,3
10	0,190	578,03	106,8	109,2	117,2	122,0	125,5	130,2	136,3	149,0	170,0	106,5

*posicionados acima do meio filtrante

**posicionado abaixo do meio filtrante

TABELA 5.2 - Taxa de filtração em função das perdas de carga na camada suporte, na camada de areia, no meio filtrante na tubulação e total.

Taxa de Filtração	Perda de carga (m)				
	Camada suporte	Camada de areia	Meio granular	Tubulação	Total
88,23	0,010	0,088	0,098	*0,000	0,098
112,56	0,018	0,091	0,109	*0,000	0,109
161,24	0,028	0,140	0,168	*0,000	0,168
225,13	0,037	0,211	0,248	*0,000	0,248
282,93	0,046	0,257	0,303	0,001	0,304
328,56	0,059	0,310	0,369	0,001	0,370
377,24	0,064	0,345	0,409	0,001	0,410
425,92	0,072	0,395	0,467	0,002	0,469
462,42	0,079	0,445	0,524	0,003	0,527
578,03	0,104	0,528	0,632	0,003	0,635

*não detectado

Os dados de taxa de filtração (T) em função das perdas de carga na camada suporte (P3-P1), na camada de areia (P9-P3) e no meio granular (P9-P1) em FP2, foram colocados em um sistema de coordenadas cartesianas e ajustados pelo método dos mínimos quadrados (M.M.Q) determinando-se desta forma, três equações correspondentes a cada uma das perdas de carga.

O gráfico da figura 5.1 apresenta os pontos (taxa de filtração x perda de carga) e as respectivas equações das curvas de perda de carga ajustadas referentes às camadas suporte, de areia e no meio granular.

O coeficiente de determinação R^2 correspondente às três equações (ver figura 5.1), resultou maior que 0,99.

FIGURA 5.1 -Perdas de carga em função da taxa de filtração na camada suporte, na camada de areia e no meio granular, ajustadas pelo M.M.Q

Os coeficientes que multiplicam o termo quadrático nas equações ajustadas são muito pequenos e podem ser desconsiderados. Assim:

A eq. 5.1 é a equação de perda de carga da camada suporte ajustada;

$$h_{suporte} = 0,0002T \quad (5.1)$$

A eq. 5.2 é a equação de perda de carga na camada de areia.

$$h_{areia} = 0,0009T \quad (5.2)$$

Somando-se a eq. 5.1 à eq. 5.2 tem-se a eq. 5.3 (equação ajustada de perda de carga no meio granular).

$$h_{LFP2} = 0,0011T \quad (5.3)$$

em que;

$$T = \text{Taxa de filtração (m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia)}$$

A diferença entre as leituras piezométricas em P10 (localizado na tubulação de saída de FP2) e P1 (localizado no começo da camada suporte) resultou na perda de carga na tubulação. A perda de carga na tubulação, para as dez vazões investigadas, foi comparativamente menor, como pode ser observado através do gráfico da figura 5.2.

FIGURA 5.2 -Perda de carga em função da taxa de filtração na tubulação do FP2 ajustada pelo M.M.Q.

A eq. 5.4 corresponde à equação de perda de carga na tubulação ajustada.

$$Hd_{tubFP2} = 1 \times 10^{-8} T^2 - 7 \times 10^{-7} T \quad (5.4)$$

A diferença entre P9 e P10 resultou na perda de carga total em FP2 ou seja, a perda de carga no meio granular somada à da tubulação.

Colocando os dados de taxa de filtração (T) em função das perdas de carga total (P9-P10) em FP2 em coordenadas cartesianas e ajustando-os pelo método dos mínimos quadrados, obteve-se uma equação polinomial ajustada.

O gráfico da figura 5.3 apresenta os pontos (taxa de filtração x perda de carga total) e a respectiva equação de perda de carga total ajustada no FP2.

FIGURA 5.3 -Dados de taxa de filtração em função da perda de carga total ajustados pelo M.M.Q.

A eq. 5.5 corresponde à equação de perda de carga total ajustada,

$$Hd_{FP2} = 7 \times 10^{-8} T^2 + 0,0011T \quad (5.5)$$

A eq 5.5 possui um termo linear ($0,0011T$) que define a perda de carga no meio filtrante limpo, que é igual ao termo linear obtido na equação ajustada de perda de carga no meio granular (eq 5.3) e um termo quadrático igual a $7 \times 10^{-8} T^2$.

Desta forma ficaram definidas as curvas de perda de carga no meio granular e na tubulação e total no FP2.

A perda de carga na entrada do FP2 foi medida por meio de mangueiras transparentes instaladas tanto no FP2 (ver figura 4.33) quanto na unidade de floculação (figura 4.34) e o valor desta medida foi considerada insignificativa.

5.2 Resultados dos ensaios para obter as curvas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD

Para obter as curvas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD foram realizados seis ensaios no filtro 3 e seis no filtro 9, utilizando-se água tratada, um para cada ângulo de abertura da válvula borboleta, escolhidos em função das vazões de trabalho da ETA-RD, conforme descrito no item 4.4.2.3.

Para execução dos ensaios, um levantamento topográfico prévio foi realizado para se obter a área dos filtros escolhidos, as cotas da passarela, onde foram instaladas as réguas, a cota do topo da caixa de inspeção na caixa de efluente e a cota do vertedor.

A tabela 5.3 apresenta os dados referentes à área das câmaras, à área total e à cota da passarela onde foi instalada a régua em cada filtro.

TABELA 5.3 - Dados referentes à área das câmaras, à área total e à cota da passarela onde foi instalada a régua nos filtros 3 e 9.

Filtros	Área total do filtro (m ²)	Área da câmara A (fechada) (m ²)	Área da câmara B (aberta) (m ²)	Cota da passarela Onde foi instalada a Régua (m)
Filtro 3	120,564	49,98	51,41	1254,029
Filtro 9	119,340	50,49	50,89	1254,025

Um esquema dos filtros 3 e 9 em planta e corte, apresentando a área do filtro, a área de cada câmara e a cota da passarela onde foi instalada a régua, pode ser visto nas figuras 5.4 e 5.5, respectivamente.

Um esquema da caixa de efluentes em planta e corte é mostrado nas figuras 5.6 e 5.7. No esquema da figura 5.6 (esquema da caixa de efluentes em planta) são apresentados, o comprimento do vertedor, as caixas de inspeção e o ponto onde foi instalada a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor. Na Figura 5.7 (corte da caixa de efluentes) são apresentados a caixa de inspeção do vertedor, a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor e as cotas do topo da caixa de inspeção do vertedor (1252,116 m) e do vertedor (1250,863 m);

FIGURA 5.4 -Esquema do filtro 3 (planta e corte) mostrando as áreas do filtro de cada câmara e cota da passarela onde foi instalada a régua.

FIGURA 5.5 -Esquema do filtro 9 (planta e corte) mostrando as áreas do filtro de cada câmara e cota da passarela onde foi instalada a régua.

FIGURA 5.6 -Esquema em planta da caixa de efluentes apresentando comprimento do vertedor, as caixas de inspeção e o ponto onde foi instalada a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor.

FIGURA 5.7 -Corte AA'', caixa de efluentes apresentando a caixa de inspeção do vertedor, a régua para medir a altura da lâmina d'água sobre o vertedor e as cotas do topo da caixa de inspeção do vertedor (1252,116 m) e do vertedor (1250,863 m)

Os resultados dos ensaios com água tratada nos filtros 3 e 9 da ETA-RD estão contidos nas tabelas do anexo B. Cada tabela do anexo B refere-se a um ensaio diferente. Cada ensaio corresponde a um ângulo de abertura da válvula borboleta. Nas tabelas do anexo B encontram-se os dados de cada ensaio relativos:

1. ao tempo em que a válvula borboleta gastou para abrir o ângulo desejado;
2. à vazão da ETA-RD, registrada no CLP no momento do ensaio;
3. à turbidez da água tratada no filtro antes do começo do ensaio;
4. à temperatura da água no momento do ensaio;
5. à área total do filtro (A_t);
6. à área da câmara B, cuja válvula borboleta foi aberta;
7. à cota da passarela onde foi instalada a régua no filtro (ver figura 5.4 e 5.5);
8. à cota do topo da caixa de inspeção do vertedor onde foi instalada a régua (ver figura 5.6);
9. à cota do vertedor (ver figura 5.7);
10. à medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor no momento do ensaio (ver figura 5.7).

Também são encontrados os dados referentes aos intervalos de tempo (Δt) em que foram realizadas as leituras das respectivas lâminas de água (H) medidas na régua instalada no filtro.

Através dos dados de área total do filtro (A_t), área de cada câmara (A_c), e diferença entre os níveis de água a cada intervalo de tempo (ΔH) foi possível obter as vazões (Q) e as taxas de filtração (T) correspondentes, ao longo de todo o ensaio, utilizando-se a eq 4.2 e a eq 4.3, respectivamente.

A medida da lâmina de água sobre o vertedor, registrada por meio da régua instalada na caixa de inspeção subtraída da cota do topo da caixa de inspeção, permite calcular a cota e a altura da lâmina sobre o vertedor (ver figura 5.7).

A carga hidráulica (H_d) para cada intervalo de tempo foi calculada a partir da diferença entre a cota da lâmina de água de cada filtro e a cota da lâmina de água sobre o vertedor na caixa de efluentes para cada (Δt).

Os dados calculados de taxa de filtração (T) e carga hidráulica (Hd) referentes aos ensaios realizados nos filtros 3 e 9 foram colocados, em conjunto, em um sistema de coordenadas para se obter um número maior de pontos para ajuste.

Assim, para cada ângulo investigado, um conjunto de pontos (T, Hd) gerados a partir dos ensaios nos dois filtros, foi obtido. Este conjunto de pontos representa a taxa de filtração em função da perda de carga total obtida nos filtros da ETA-RD, para cada ângulo de abertura da válvula borboleta investigado.

Da perda de carga total (Hd) correspondente a cada taxa de filtração (T) subtraiu-se o valor ajustado pelo método dos mínimos quadrados, da perda de carga no meio filtrante do FP2 (h_{LFP2}), para se obter o valor da perda de carga na tubulação (h_{Tub}) em função da taxa de filtração nos filtros da estação. Esta medida baseou-se no fato de que a perda de carga no meio filtrante dos filtros 3 e 9 da estação não pôde ser obtida, pois o curto espaço de tempo do ensaio não permitiu a estabilização dos níveis d'água nos piezômetros instalados no começo e no final da camada filtrante, para fazer as leituras.

Assim, para cada ângulo investigado, um conjunto de pontos (T, H_{Tub}) referentes aos mesmos ensaios foi obtido.

Os valores obtidos de perda de carga na tubulação (H_{Tub}) dos filtros da ETA-RD, representam a soma dos valores de perda de carga na tubulação em geral (Hl) com a perda de carga na válvula borboleta (H_v).

As tabelas do anexo C mostram os valores das taxas de filtração em função:

1. das perdas de carga total (Hd) obtidas nos filtros da ETA-RD,
2. da perda de carga obtida no meio filtrante do FP2 (h_{LFP2}),
3. da perda de carga na tubulação (h_{Tub}),

As figuras 5.8; 5.9; 5.10; 5.11; 5.12 e 5.13 referem-se aos ensaios com os filtros 3 e 9 (F3 e F9) e correspondem, respectivamente, à abertura da válvula borboleta (Vb) de 20; 26; 30; 36; 50 e 90 graus. Em cada uma das figuras têm-se dois conjuntos de pontos (T, Hd) e (T, H_{Tub}) cujos valores representam a taxa de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, respectivamente.

FIGURA 5.8 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 20°.

FIGURA 5.9 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 26°.

FIGURA 5.10 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com Vb 30°.

FIGURA 5.11 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 36°.

FIGURA 5.12 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 50°.

FIGURA 5.13 - Conjunto de pontos que representam as taxas de filtração em função das perdas de carga total e na tubulação, ensaios em F3 e F9 com a Vb aberta 90°.

Os dados de perda de carga em função da taxa de filtração na tubulação (T, H_{Tub}) na ETA-RD foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, conseguindo-se, para cada ângulo da válvula borboleta, uma curva de perda na tubulação ajustada a partir dos dados obtidos nos dois filtros da estação.

Os gráficos das figuras 5.14; 5.15; 5.16; 5.17; 5.18; e 5.19 mostram o conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e a curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo método dos mínimos quadrados correspondente aos ângulos investigados.

Após obter a curva de perda de carga ajustada para a tubulação, somaram-se aos valores de H_{Tub} os valores da curva de perda de carga ajustada no meio filtrante ($h_{L_{FP2}}$) do FP2. Essa operação foi feita para os seis ângulos de abertura da válvula borboleta investigados, obtendo-se seis curvas ajustadas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD.

Os gráficos das figuras 5.20; 5.21; 5.22; 5.23; 5.24 e 5.25 correspondem a cada um dos ângulos investigados e representam as curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total, sendo a última calculada a partir dos valores ajustados da curva de perda de carga na tubulação somados aos valores ajustados da curva de perda de carga no meio filtrante ($h_{L_{FP2}}=0,0011T$) do FP2.

A tabela 5.4 apresenta as equações das curvas de perda de carga na tubulação ajustadas e total calculada para cada ângulo da válvula borboleta investigado e seus respectivos coeficientes de correlação.

TABELA 5.4 - Equações de perda de carga na tubulação ajustada e total calculada e respectivos coeficientes de correlação.

Ângulo de abertura da válvula borboleta	Equação de perda de carga turbulenta Ajustada pelo M.M.Q	Equação de perda de carga total calculada ($Hd=h_{Tub}+ h_{L_{FP2}}$)	R ²
20°	$h_{Tub}=3,43 \times 10^{-4} T^{1,5}$ (5.6)	$Hd=3,43 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.12)	0,925
26°	$h_{Tub}=2,81 \times 10^{-4} T^{1,5}$ (5.7)	$Hd=2,81 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.13)	0,895
30°	$h_{Tub}=2,14 \times 10^{-4} T^{1,5}$ (5.8)	$Hd=2,14 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.14)	0,930
36°	$h_{Tub}=1,49 \times 10^{-4} T^{1,5}$ (5.9)	$Hd=1,49 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.15)	0,938
50°	$h_{Tub}=1,30 \times 10^{-4} T^{1,5}$ (5.10)	$Hd=1,30 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.16)	0,978
90°	$H_{Tub}=9,53 \times 10^{-5} T^{1,5}$ (5.11)	$Hd=1,0 \times 10^{-4} T^{1,5}+0,0011T$ (5.17)	0,99

FIGURA 5.14 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 20°.

FIGURA 5.15 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 26°.

FIGURA 5.16 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 30°.

FIGURA 5.17 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 36°.

FIGURA 5.18 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 50°.

FIGURA 5.19 - Conjunto de pontos (T, H_{Tub}) e curva de perda de carga na tubulação ajustada pelo M.M.Q correspondente ao ângulo de abertura da Vb de 90°.

FIGURA 5.20 - Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 20°.

FIGURA 5.21 - Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 26°.

Figura 5.22: Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 30°.

FIGURA 5.23 - Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 36°.

FIGURA 5.24 - Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 50°.

FIGURA 5.25 - Curvas de perda de carga na tubulação ajustada e a total calculada para o ângulo de abertura de 90°.

Os valores extrapolados nas figuras 5.14; 5.15; 5.16; ... 5.23; 5.24; 5.25, referem-se aos valores que não puderam ser obtidos experimentalmente. Assim, utilizando-se as próprias equações de perda de carga ajustadas ou calculadas extrapolaram-se valores da taxa de filtração para se obter os valores de perdas de carga total e na tubulação.

Os valores obtidos de perda de carga na tubulação (H_{Tub}) dos filtros da ETA-RD representam a soma dos valores de perda de carga na válvula borboleta (H_v) com os de perda de carga na tubulação em geral (H_l), sendo que os valores de perda de carga na tubulação em geral referem-se à soma dos valores das perdas de carga no sistema de drenagem, na tubulação de saída no canal comum de coleta de água filtrada.

A perda de carga na comporta de entrada dos filtros da ETA-RD foi medida por meio de duas réguas, instaladas bem próximas da referida comporta de entrada, uma situada no canal comum de alimentação dos filtros e outra no próprio filtro para medir a altura da lâmina de água no canal e no filtro simultaneamente. Como a diferença medida entre as duas réguas foi quase imperceptível, a perda de carga na comporta de entrada foi considerada desprezível. Isso acontece pelo fato de as comportas terem dimensões relativamente grandes, para que se apresente baixa velocidade de escoamento (baixo gradiente de velocidade), já que os filtros podem receber água floculada com valores de gradiente menores que 50 s^{-1} .

A perda de carga na válvula borboleta SVEDALA-FAÇO pode ser calculada segundo a expressão geral das perdas de carga localizadas:

$$H_v = \frac{kV^2}{2g} \quad (5.18)$$

onde:

H_v = perda de carga na válvula borboleta (L);

V = velocidade média na seção da tubulação (L/T);

g = aceleração da gravidade (L/T^2).

k = coeficiente de perda de carga fornecido pelo fabricante SVEDALA-FAÇO (ver figura 4.4).

$$V = \frac{Q_{Tub}}{A_{Tub}} \quad (5.19)$$

em que:

Q_{Tub} = Vazão na tubulação (m^3/s);

A_{Tub} = Área da seção da tubulação (m^2).

mas,

$$A_{Tub} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.20)$$

A tubulação de saída de água filtrada, cuja válvula borboleta foi aberta para realização dos ensaios com água tratada, possui diâmetro $D = 700$ mm.

Durante os ensaios nos filtros 3 e 9, a vazão que passou pela tubulação de saída, cuja válvula borboleta foi aberta, foi igual à vazão que passou pela câmara aberta dos filtros ou seja;

$$Q_c = T \times Ac \quad (5.21)$$

em que:

Q_c = vazão na câmara aberta do filtro (m^3/s);

T = taxa de filtração ($m^3/m^2.dia$)

Ac = média das áreas das câmaras abertas nos filtros 3 e 9 (m^2).

Então, $Q_c = Q_{Tub}$ ou,

$$H_v = \left[\frac{k}{2g} \frac{(T^2 \times Ac^2)}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} \right] \div 86400 \quad (5.22)$$

já que:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$D = 0,7 \text{ m}$$

$$Ac = 51 \text{ m}^2$$

Então:

$$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times k \times T^2 \quad (5.23)$$

Nas tabelas do anexo D estão contidos os cálculos da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios realizados nos filtros 3 e 9 para os ângulos de abertura da válvula borboleta investigados.

No cálculo das perdas de carga na válvula borboleta considerou-se a equação de perda de carga na válvula borboleta (eq 5.23). O valor de k da eq 5.23, correspondente a cada ângulo de abertura da válvula borboleta, foi obtido conforme gráfico da figura 4.4, fornecido pelo fabricante.

Os valores aproximados de k obtidos conforme gráficos da figura 4.4 estão contidos na tabela 5.5.

TABELA 5.5 - Valores aproximados de k para cada ângulo de abertura e equações de perda de carga na válvula borboleta obtidos a partir do gráfico da figura 4.4 e da eq 5.23.

Ângulo de abertura	Valores aproximados de k	Equações da curva de perda de carga da válvula borboleta
20°	92	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 92 \times T^2$ (5.24)
26°	70	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 70 \times T^2$ (5.25)
30°	35	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 35 \times T^2$ (5.26)
36°	22	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 22 \times T^2$ (5.27)
50°	6	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 6 \times T^2$ (5.28)
90°	0,22	$H_v = 1,1991 \times 10^{-7} \times 0,22 \times T^2$ (5.29)

O gráfico da figura 5.26 apresenta as curvas de perda de carga na válvula borboleta (H_v) calculados a partir da Eq 5.23 e dos valores de k da tabela 5.5 para as taxas de filtração obtidas nos ensaios com os filtros 3 e 9. (Ver anexo D).

O gráfico da figura 5.27 apresenta os valores de perda de carga na tubulação em geral (H_t), ou seja, valores de H_{Tub} menos os valores de H_v para cada taxa de filtração obtida nos ensaios. (Ver anexo D).

Os valores da perda de carga na tubulação em geral é a soma das perdas de carga no fundo do filtro, na tubulação de saída, onde está instalada a válvula borboleta, e no canal geral de água filtrada, o qual encaminha a água até a caixa de efluentes.

FIGURA 5.26 - Curvas de perda de carga na Vb correspondente a cada abertura investigada.

FIGURA 5.27 - Pontos (T, H_t), valores obtidos de perda de carga na tubulação exceto na válvula borboleta.

A dispersão de pontos (T, H_t) da figura 5.27 demonstra que, para ensaios completamente distintos, envolvendo condições totalmente diferentes de abertura da válvula borboleta e de taxas de filtração, a relação entre a perda de carga na tubulação em geral é aproximadamente a mesma, já que o coeficiente de determinação R^2 da curva ajustada foi da ordem de 0,90, conforme ilustrado na figura 5.28.

FIGURA 5.28 - Pontos referentes a todos os ensaios realizados nos filtros da estação e respectiva curva de perda de carga na tubulação em geral, ajustada pelo M.M.Q.

As seis curvas de perda de carga total obtidas nos ensaios com água tratada na ETA-RD correspondentes aos seis ângulos de abertura da válvula borboleta, juntamente com a curva de perda de carga total na Instalação Piloto são mostradas na figura 5.29. Por meio dessa figura é possível fazer uma comparação das perdas de carga total obtidas na ETA-RD com a obtida na Instalação Piloto.

Tal comparação permite que se tenha uma idéia do valor de perda de carga turbulenta adicional a ser introduzido pela válvula tipo esfera, instalada na saída do filtro piloto 2, para que a perda de carga total no filtro piloto se equipare à requerida nos filtros da ETA-RD.

A partir do conhecimento das equações das seis curvas de perda de carga total, da taxa média de filtração, referente às duas vazões mais comuns da estação, do número de filtros (14), da carga hidráulica máxima disponível (2,6 m), área de armazenamento (25 vezes a área de um filtro), aplicou-se o modelo matemático de MACHADO (1995) ao SFTD da ETA-RD.

As vazões de trabalho de 4,1 e 5,1 m³/s ocorrem com mais frequência na estação fora do "*Horário de ponta*" (18:00 às 22:00 horas). Considerando estas vazões, foram realizadas simulações em computador, utilizando-se o modelo matemático, com a intenção de se obter os ângulos mais adequados de abertura da válvula borboleta, para cada vazão, considerando-se a taxa de filtração máxima com a qual seria razoável trabalhar e a relação entre as taxas máxima e média de forma a obter carreiras de filtração maiores sem deterioração da qualidade da água filtrada.

FIGURA 5.29 - Comparação entre as curvas de perda de carga total na ETA-RD e a curva de perda de carga total na IP

5.3 Resultados das simulações de acordo com o modelo matemático

Ao aplicar o modelo matemático foram considerados:

- a) as duas vazões mais comuns de trabalho da ETA-RD (5,1 e 4,1 m³/s);
- b) os quatorze filtros em funcionamento;
- c) a carga hidráulica disponível de 2,6 m;
- d) a área de armazenamento (25 vezes a área do filtro)
- e) as seis equações da curva de perda de carga total (uma para cada abertura da válvula borboleta estudada);
- f) o valor de ΔH_o (diferença entre os níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_{real}) igual a zero, uma vez que os dados relativos a essa diferença, no programa, referem-se aos dados obtidos por MACHADO (1995), com água decantada da ETA-SC. Esta consideração, possibilitou obter o $N_{\text{teórico}}$, através do programa, deixando que o valor de N_{real} fosse posteriormente obtido em ensaios com água floculada da própria ETA-RD.

Escolheu-se, então, dentre as seis equações da curva de perda de carga total, aquelas que seriam mais adequadas levando-se em consideração os valores da taxa máxima e da relação entre as taxas máxima e média obtidas em cada simulação.

Os resultados obtidos da simulação em computador encontram-se no Anexo E. Cada tabela do anexo E refere-se a uma curva de perda de carga diferente (obtida conforme o item 5.2) e nelas são encontrados os dados de entrada no programa (equação da curva de perda de carga, vazão, o número de unidades filtrantes, taxa média de filtração, carga hidráulica disponível, área total de armazenamento e o tempo de lavagem) e os resultados da simulação (taxas de filtração, níveis de trabalho, relação entre as taxas máxima e média, perda de carga devido à retenção de impurezas e coeficiente de resistividade), tanto para a operação quanto para a lavagem.

As tabelas 5.7; 5.8; 5.9 e 5.10 mostram uma síntese dos resultados da simulação em computador considerando-se a vazão de 4,1 m³/s e as tabelas 5.11; 5.12; 5.13; 5.14 mostram os resultados da simulação realizada para a vazão de 5,1 m³/s. Nestas tabelas estão os dados da altura de água no vertedor comum, número de filtros, taxa média e máxima de filtração, níveis de trabalho, além dos valores da relação entre as taxas máxima e média obtidas nas simulações.

TABELA 5.7 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 3,43 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=20^\circ$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 4,1	14		253,03
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N _{I teórico} =2,49 m N ₂ -N _{I teórico} = 0,11 m T _{max} =313 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,24	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m N ₃ =2,78 m N ₃ -N ₂ =0,18 m T _{max} =331 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,31
1,24<T _{max} /T _{med} <1,31			

TABELA 5.8 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,81 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=26^\circ$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 4,1	14		253,03
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N _{I teórico} =2,45 m N ₂ -N _{I teórico} = 0,15 m T _{max} =347 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,37	Durante a Lavagem	N ₂ =2,6m N ₃ =2,75m N ₃ -N ₂ = 0,15 m T _{max} = 363 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,44
1,37<T _{max} /T _{med} <1,44			

TABELA 5.9 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,14 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=30^0$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 4,1	14		253,03
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N _{1 teórico} =2,38 m N ₂ - N _{1 teórico} = 0,22 m T _{max} = 398 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,57	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m N ₃ =2,72 m N ₃ -N ₂ = 0,12 m T _{max} = 413 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,63
1,57<T _{max} /T _{med} <1,63			

TABELA 5.10 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,49 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=36^0$

variação de velocidade = 50

Dados de entrada do programa			
Vazão (m ³ /s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m ³ /m ² .dia)
Q= 4,1	14		253,03
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N ₁ teórico =2,30 m N ₂ - N ₁ teórico =0,3 m T _{max} =474 m ³ /m ² .dia T _{max} /T _{med} =1,87	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m N ₃ =2,68 m N ₃ -N ₂ =0,08 m T _{max} =486 m ³ /m ² .dia T _{max} /T _{med} =1,92
1,87<T _{max} /T _{med} <1,92			

TABELA 5.11 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 2,14 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=30^0$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 5,1	14		314,7
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N₂=2,6 m N₁ teórico = 2,48 m N₂ -N₁ teórico = 0,12 m T _{max} = 406 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,29	Durante a lavagem	N₂=2,6 m N₃= 2,77 m N₃ -N₂= 0,17 m T _{max} = 426 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,36
1,29<T _{max} /T _{med} <1,36			

TABELA 5.12 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,49 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=36^0$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 5,1	14		314,7
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N _{I teórico} =2,40 m N ₂ -N _{I teórico} =0,2 T _{max} = 484 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,54	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m N ₃ =2,72 N ₃ -N ₂ =0,12 T _{max} =502 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,6
1,54<T _{max} /T _{med} <1,60			

TABELA 5.13 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 1,30 \times 10^{-4}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=50^0$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 5,1	14		314,7
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m N ₁ teórico =2,37 m N ₂ -N ₁ teórico =0,23 m T _{max} =515 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,64	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m N ₃ =2,70 m N ₃ -N ₂ =0,10 m T _{max} =533 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,69
1,64<T _{max} /T _{med} <1,69			

TABELA 5.14 - Resultados da simulação em computador do modelo proposto considerando a equação de perda de carga total $Hd = 0,0011T + 9,53 \times 10^{-5}T^{1,5}$ referente ao ângulo de abertura da válvula borboleta $\alpha=90^0$

Dados de entrada do programa			
Vazão (m³/s)	Número de filtros		Taxa média de filtração (m³/m².dia)
Q= 5,1	14		314,7
Resultados obtidos na simulação			
Durante a operação	N ₂ =2,6 m	Durante a lavagem	N ₂ =2,6 m
	N _{1 teórico} =2,32 m		N ₃ =2,68
	N ₂ -N _{1 teórico} =0,28 m		N ₃ -N ₂ =0,08 m
	T _{max} =580 m³/m².dia		T _{max} =596 m³/m².dia
	T _{max} /T _{med} =1,84		T _{max} /T _{med} =1,89
1,84<T _{max} /T _{med} <1,89			

Dentre as simulações realizadas, seis foram escolhidas como as mais indicadas. Os critérios desta escolha foram os seguintes:

1. que o valor da relação entre as taxas máxima e média fosse maior que 1,3 para que a carreira de filtração tivesse duração razoável, conforme citado em DI BERNARDO (1993);
2. que o valor da taxa máxima fosse menor que $600 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, já que as pesquisas realizadas por PREZOTTI (1981) com água decantada da ETA-SC e por DI BERNARDO (1992) com água floculada da ETA-RD, em filtros de areia praticamente uniforme com espessura igual a 1,2 m, obtiveram boa eficiência. (ver item 3.4).

Desta forma, as simulações das tabelas 5.8; 5.9 e 5.10 foram as mais indicadas para a vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e as simulações das tabelas 5.12; 5.13 e 5.14 foram as mais indicadas para a vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}.\text{dia}$. Isto significa que, de acordo com o modelo, as aberturas mais indicadas da válvula borboleta seriam de 26; 30 e 36 graus para a vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}.\text{dia}$ e de 36; 50; 90 graus para a vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$. A tabela 5.15 mostra um resumo das simulações mais indicadas.

TABELA 5.15 - Resumo das simulações mais indicadas para as vazões de trabalho.

Simulações	Ângulos (Graus)	Vazão (m^3/s)	T_{max} ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	$T_{\text{max}}/T_{\text{med}}$
Tabela 5.8*	26	4,1	347	$1,37 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,44$
Tabela 5.9	30	4,1	398	$1,57 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,63$
Tabela 5.10*	36	4,1	474	$1,87 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,92$
Tabela 5.12*	36	5,1	484	$1,60 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,54$
Tabela 5.13*	50	5,1	515	$1,64 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,69$
Tabela 5.14*	90	5,1	580	$1,84 < T_{\text{max}}/T_{\text{med}} < 1,89$

*simulações escolhidas para testar experimentalmente

Devido à opção de se fazer réplicas e ao tempo restrito para executar o trabalho experimental, cinco das seis simulações foram escolhidas para serem testadas experimentalmente na Instalação Piloto. Duas referentes à vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e as três referentes à vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$. As simulações contidas nas tabelas 5.8; 5.10; 5.12; 5.13 e 5.14 foram as escolhidas.

As simulações das tabelas 5.8 e 5.10 foram escolhidas em detrimento da simulação da tabela 5.9, porque pensou-se em dar preferência ao estudo de taxas máximas que se diferenciasssem de forma significativa (ver tabela 5.15).

As taxas máximas, os níveis $N_{1\text{Teórico}}$ e N_3 , obtidos pelo modelo, foram posteriormente consideradas nos ensaios com água coagulada na IP.

5.4 Resultados dos ensaios com água coagulada da ETA-RD

Antes de começar cada ensaio com água coagulada, fez-se a equivalência das curvas de perda de carga total na IP com as obtidas no filtro da ETA-RD, conforme descrito no item 4.4.4.1.

Assim, depois de encaminhar a água tratada da ETA-RD até a IP, aguardou-se o momento em que a estabilização do nível de água no FP2 fosse atingido (vazão de entrada igual à de saída) para medir os níveis dos piezômetros 9 e 10.

A partir de então, abriu-se ou fechou-se parcialmente a válvula tipo esfera de forma que a curva de perda de carga total (diferença de nível entre os piezômetros 9 e 10) no FP2 equivalessse às curvas de perda de carga total da ETA-RD, de acordo com as simulações escolhidas.

Desta maneira, a válvula tipo esfera introduzia uma perda de carga adicional turbulenta no FP2, tal como acontece com a válvula borboleta instalada na saída da tubulação das câmaras nos filtros.

Depois de fixar a posição do registro de esfera repetiu-se o ensaio no mínimo cinco vezes com outras vazões diferentes (taxas de filtração) com o intuito de verificar se para outras taxas de filtração a perda de carga total corresponderia a outros pontos da curva de perda de carga total em questão.

As curvas de perda de carga total referentes aos ângulos de 26^0 ; 36^0 ; 50^0 e 90^0 da válvula borboleta foram então reproduzidas no FP2 antes de cada ensaio com água coagulada.

Na tabela 5.16 têm-se as taxas de filtração e a perda de carga total (P9-P10) obtidas durante os ensaios na Instalação Piloto referentes aos ângulos da válvula borboleta de 26; 36; 50 e 90 graus. No gráfico da figura 5.30 têm-se as curvas de perda de carga total referentes aos ângulos de 26^0 ; 36^0 ; 50^0 e 90^0 da Vb e os pontos de (Taxa de filtração x Perda de carga total (P9-P10)) reproduzidos no FP2.

TABELA 5.16 - Valores de Taxa de filtração em função da perda de carga total (P9-P10)) obtidos para os ângulos de 26; 36; 50 e 90 graus de abertura da válvula borboleta nos ensaios com água tratada para ajuste da válvula de esfera no FP2.

Ângulo de abertura da Vb = 26°			
Taxa de filtração M ³ /m ² .dia	P9 (m)	P10 (m)	P9-P10 (m)
270	2,56	1,06	1,50
285	2,66	1,06	1,60
300	2,71	1,06	1,65
305	2,86	1,06	1,80
320	3,21	1,06	2,15
340	3,36	1,06	2,30
354	3,46	1,06	2,40
390	3,56	1,06	2,50

Ângulo de abertura da Vb = 36°			
Taxa de filtração M ³ /m ² .dia	P9 (m)	P10 (m)	P9-P10 (m)
474	3,10	1,06	2,04
438	2,90	1,06	1,84
420	2,75	1,06	1,69
407	2,70	1,06	1,64
389	2,60	1,06	1,54
371	2,50	1,06	1,44

Ângulo de abertura da Vb = 50°			
Taxa de filtração m ³ /m ² .dia	P9 (m)	P10 (m)	P9-P10 (m)
554	3,34	1,06	2,28
529	3,28	1,06	2,22
496	2,99	1,06	1,93
429	2,65	1,06	1,59
398	2,49	1,06	1,43
392	2,47	1,06	1,41

Ângulo de abertura da Vb = 90°			
Taxa de filtração m ³ /m ² .dia	P9 (m)	P10 (m)	P9-P10 (m)
548	2,93	1,06	1,87
529	2,85	1,06	1,79
511	2,74	1,06	1,68
490	2,59	1,06	1,53
469	2,51	1,06	1,45
450	2,45	1,06	1,39

FIGURA 5.30 - Curvas de perda de carga total nos filtros da ETA-RD e os pontos de (Taxa de filtração x Perda de carga total no FP2 (P9-P10))

Por meio da tabela 5.16 e da figura 5.30 percebe-se que o ajuste da válvula de esfera foi realizado com sucesso uma vez que os vários pontos obtidos (Taxa de filtração x (P9-P10)), situaram-se bem próximo das curvas de perda de carga dos filtros da ETA-RD.

Após fixar a posição da válvula de esfera, equívulendo as curvas de perda de carga no FP2 às do filtro da estação e obter os valores das taxas máximas de filtração, dos níveis $N_{\text{teórico}}$ e N_3 , através da utilização do modelo matemático, realizaram-se ensaios na IP com água coagulada na ETA-RD para obter o nível de água N_{real} , conforme citado no item 4.4.4.2.

Na época dos ensaios, a turbidez da água bruta na ETA-RD era menor que 6 uT por esse motivo, a CAESB desligava seus agitadores justificando não ser necessária a utilização deles. Portanto, durante os ensaios, o agitador mecanizado instalado na câmara 4 foi ligado com uma rotação muito baixa (20 rpm), o que resultou num gradiente de 12 s^{-1} , de acordo com a calibração contida no Projeto Executivo de Ampliação da ETA-RD (1992). Essa agitação teve o intuito de impedir a ocorrência de zonas mortas na câmara 4.

Nas tabelas do Anexo F estão contidos os dados de turbidez, cor aparente e pH da água filtrada, bem como a vazão medida na saída do FP2 e as leituras piezométricas ao longo do tempo em que o ensaios ocorreram. Informações a respeito da turbidez, da temperatura da água bruta e da dosagem de sulfato de alumínio utilizada no momento dos ensaios também constam nas tabelas do Anexo F.

Cada tabela do Anexo F representa um ensaio realizado a partir das simulações escolhidas. Os ensaios são caracterizados basicamente pela sua taxa máxima e pela relação entre as taxas máxima e média. Cinco taxas máximas foram testadas experimentalmente duas vezes, totalizando dez ensaios.

A tabela 5.17 mostra um resumo dos principais dados obtidos nos dez ensaios com água coagulada contidos no Anexo F, conforme as simulações contidas na tabela 5.15.

TABELA 5.17 - Resumo dos principais dados obtidos nos ensaios do anexo F relacionados com as simulações escolhidas para serem testadas experimentalmente.

Anexo F (ensaio)	Simulações	Ângulo (Graus)	Vazão (m ³ /s)	T _{min} (m ³ /m ² .dia)	T _{max} (m ³ /m ² .dia)	T _{max} /T _{med}
Ensaio F1	Tabela 5.12	36	5,1	181	484	1,54<T _{max} /T _{med} <1,60
Ensaio F2	Tabela 5.10	36	4,1	102	474	1,87<T _{max} /T _{med} <1,92
Ensaio F3	Tabela 5.13	50	5,1	163	515	1,64<T _{max} /T _{med} <1,69
Ensaio F4	Tabela 5.14	90	5,1	132	580	1,84<T _{max} /T _{med} <1,89
Ensaio F5	Tabela 5.9	26	4,1	172	347	1,57<T _{max} /T _{med} <1,63
Ensaio F6	Tabela 5.12	36	5,1	181	484	1,60<T _{max} /T _{med} <1,54
Ensaio F7	Tabela 5.10	36	4,1	102	474	1,87<T _{max} /T _{med} <1,92
Ensaio F8	Tabela 5.13	50	5,1	163	515	1,64<T _{max} /T _{med} <1,69
Ensaio F9	Tabela 5.14	90	5,1	132	580	1,84<T _{max} /T _{med} <1,89
Ensaio F10	Tabela 5.9	26	4,1	172	347	1,57<T _{max} /T _{med} <1,63

Os pares das figuras (5.31 e 5.32); (5.33 e 5.34); (5.35 e 5.36); (5.37 e 5.38); (5.39 e 5.40) referem-se aos dez ensaios do anexo F e mostram a perda de carga na camada de areia, ao longo do tempo, em função de sua espessura, para cada ensaio. Estas figuras são apresentadas em pares para facilitar a comparação, já que os pares das figuras citadas mostram os ensaios considerados réplicas um do outro, onde o valor da taxa máxima de filtração foi mantido o mesmo e a turbidez da água afluyente ao filtro teve ligeiras variações, o que pode ser visto nas próprias figuras e nas tabelas do anexo F.

A qualidade da água afluyente ao FP2, na época dos ensaios, não sofreu grandes variações, uma vez que os ensaios foram realizados fora do período chuvoso. O coagulante utilizado era o sulfato de alumínio líquido comercial e sua dosagem durante os experimentos ficou em torno de 1,6 mg/L de Al₂(SO₄)₃ x 14 H₂O. A temperatura (26^o) durante os ensaios também permaneceu praticamente igual, pois os ensaios foram realizados geralmente no mesmo período do dia.

FIGURA 5.31- Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 1-Anexo F

FIGURA 5.32- Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 6/Anexo F(Réplica)

FIGURA 5.35 - Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 3/Anexo F

FIGURA 5.36 - Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 8/Anexo F(Réplica)

FIGURA 5.37- Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 4/Anexo F

FIGURA 5.38 - Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 9/Anexo F(Réplica)

FIGURA 5.39 - Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 5/Anexo F

FIGURA 5.40- Perda de carga na areia em função da espessura - tabela 10/Anexo F(Réplica)

Os ensaios e réplicas observados (aos pares) nas figuras (5.31 e 5.32); (5.33 e 5.34); (5.35 e 5.36); (5.37 e 5.38) e (5.39 e 5.40) demonstraram que, para uma mesma taxa máxima de filtração, os resultados das perdas de carga na camada de areia foram muito parecidas.

O tempo de encerramento dos ensaios (tempo gasto para que o nível de água no piezômetro 9 chegasse ao nível N_2 no FP2) também foi aproximadamente o mesmo nos ensaios e nas réplicas.

Os pares das figuras (5.31 e 5.32); (5.33 e 5.34); (5.35 e 5.36); (5.37 e 5.38) e (5.39 e 5.40) também revelam que as impurezas ficaram retidas a aproximadamente à 20 cm de profundidade em relação ao topo da camada de areia, próximo ao piezômetro P7.

Comparando-se os pares das figuras (5.31 e 5.32); (5.33 e 5.34); (5.35 e 5.36); (5.37 e 5.38) e (5.39 e 5.40) observa-se que a penetração de impurezas é maior para as taxas de filtração mais elevadas (515 e $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$).

Na figura 5.41, tem-se os valores da turbidez da água filtrada no FP2 ao longo do tempo dos ensaios referentes à taxas máximas de filtração simuladas, obtidas com a taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$) de acordo com as simulações do anexo E. Pode-se notar, por meio desta figura, que três pares de ensaios (réplicas) foram realizados com a taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$; dois com taxa máxima de filtração de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, dois com $515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e dois com $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, de forma que a relação entre as taxas máxima e média desses ensaios foi respectivamente de 1,54; 1,64 e 1,84.

Através da análise dos resultados dos ensaios, mostrados na figura 5.41 e contidos também nas tabelas do anexo F, percebe-se, que em todos os ensaios, a turbidez da água filtrada precisou de um período inicial para atingir um valor menor que 1 uT . Esta etapa, conhecida como etapa de amadurecimento do filtro, foi mais longa nos ensaios em que as taxas máximas foram da ordem de 484 e $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, cujas relações entre as taxas média e máxima foram respectivamente de 1,54 e 1,84. Nesses ensaios foi registrado que o filtro demorou cerca de 60 minutos para produzir água com turbidez inferior a 1 uT .

FIGURA 5.41 - Turbidez do efluente ao longo do tempo nos ensaios realizados com água floculada na Instalação Piloto para a taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, considerando-se três taxas máximas de filtração distintas, conforme o modelo matemático.

Nos ensaios realizados com a taxa máxima de $515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, na qual a relação entre as taxas máxima e média foi de 1,64, o período de amadurecimento foi três vezes menor em relação aos com taxas máximas de 484 e $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, para a mesma taxa média ($315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), ou seja, o tempo de amadurecimento foi de 20 minutos. Após esse período, a turbidez diminuiu, chegando a valores menores que 0,5 uT, após 60 minutos de ensaio.

Os ensaios com taxa máxima de $515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ($T_{\text{max}}/T_{\text{med}} = 1,64$) produziram não só um período menor de amadurecimento (início da filtração), como também forneceram valores de turbidez, ao longo do tempo, inferiores aos valores obtidos nos ensaios com taxa máxima de 484 e $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, quando a relação $T_{\text{max}}/T_{\text{med}}$ foi de 1,54 e 1,84, respectivamente. Nos ensaios com taxa máxima de $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a turbidez da água filtrada foi ligeiramente menor que nos ensaios com taxa máxima de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Os dois ensaios com taxa máxima de filtração de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ($T_{\text{max}}/T_{\text{med}}=1,54$) interessantemente apresentaram uma elevação de turbidez no final, sendo que em um deles (Ver tabela F1 do Anexo F) a turbidez chegou a ultrapassar o valor de 1uT ou seja, ocorreu traspasse. Observando-se a tabela F1 do anexo F, percebe-se uma variação razoável no pH da água filtrada, o que indica que o ensaio poderia estar com problemas na coagulação, porém, no ensaio da tabela F6 (réplica do F1), a variação do pH da água filtrada não foi tão evidenciada. Em ambos ensaios, a turbidez ao longo do ensaio também apresentou-se elevada, apesar da taxa máxima de filtração ter sido a mais baixa dentre os ensaios realizados com taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (ver Anexo E).

A duração dos ensaios (tempo gasto para que N_2 fosse atingido) com taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ encontra-se na tabela 5.18. Observando-se a tabela 5.18 constata-se que a duração dos ensaios com taxa de filtração de 515 variou entre 670 a 690 minutos chegando a ser mais que o dobro do tempo gasto nos ensaios com taxa de filtração de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, cujo valor da duração foi de 313 a 315 minutos. Quanto aos ensaios com taxa de filtração máxima de $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, a duração ficou entre 484 e 499 minutos. Isto significa aproximadamente 1,4 vezes menor que o tempo gasto nos ensaios com taxa máxima de filtração de $515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

TABELA 5.18 - Duração dos ensaios para várias taxas máximas referentes a taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, de acordo simulações contidas no Anexo E.

Ensaio referente à taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, conforme simulações do Anexo E				
Resultados Anexo F Ensaio	Taxa máxima ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	Duração dos ensaios a partir da abertura da válvula de saída do FP2		Previsão carreira de filtração de acordo com TEIXEIRA (1991)
		até atingir N_{Ireal}	até atingir N_2	Considerando 14 filtros em funcionamento
F1	484	120 minutos	315 minutos	73 h 30'
F3	515	120 minutos	690 minutos	161 h
F4	580	210 minutos	484 minutos	112 h 56'
F6	484	120 minutos	313 minutos	73h 2'
F8	515	120 minutos	670 minutos	156 h 20'
F9	580	210 minutos	498 minutos	116 h 12'

A duração dos ensaios com taxa máxima de filtração de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ também foi a menor, apesar da taxa máxima de filtração ter sido a mais baixa dentre os ensaios realizados com taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Observando-se os ensaios com taxa máxima de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, percebe-se que a duração deles foi pequena e que a qualidade da água filtrada foi pior se comparadas às dos outros ensaios com taxa média de $315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Tal fato demonstra que esses ensaios tiveram comportamentos diferentes do esperado. Ao que tudo indica, tal comportamento pode estar ligado a problemas na coagulação, uma vez que nesses ensaios aconteceram variações no pH da água filtrada.

Na figura 5.42, têm-se os valores da turbidez da água filtrada no FP2 ao longo do tempo dos ensaios referentes à taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (Vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$), de acordo com as simulações do anexo E. Podem-se notar, nessa figura, dois pares de ensaios (réplicas) realizados com a taxa máxima de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, dois com taxa máxima de filtração de $474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e dois com $347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, sendo que a relação entre as taxas máxima e média desses ensaios foi, respectivamente de 1,88; 1,37.

Observando-se os resultados dos ensaios da figura 5.41, percebe-se que neles também a turbidez da água filtrada precisou de um período inicial para atingir um valor menor que 1 uT e que este período inicial foi igual a 30 min, para todos os ensaios com a taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Depois desse período, a turbidez manteve-se abaixo de 1 uT , diminuindo para 0,5 ao final de todos os ensaios.

FIGURA 5.42 - Turbidez efluente ao longo do tempo nos ensaios realizados com água floculada na Instalação Piloto para a taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, considerando-se duas taxas máximas de filtração distintas, conforme o modelo matemático.

Conforme figura 5.42, nos pares de ensaios com a taxa máxima de $347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ($T_{\text{max}}/T_{\text{med}}=1,37$), obtiveram-se, na maior parte do tempo, valores de turbidez ligeiramente menores que os valores obtidos nos pares de ensaios com taxa máxima de $474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ($T_{\text{max}}/T_{\text{med}} = 1,88$).

A duração dos ensaios com taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ encontra-se na tabela 5.19, na qual constata-se que a duração dos ensaios com taxa de filtração de $347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ variou entre 613 a 633 minutos, pouco maior que a obtida nos ensaios com taxa de filtração de $474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, cujo valor da duração foi de 509 a 524 minutos.

TABELA 5.19 - Duração dos ensaios para várias taxas máximas referentes à taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, de acordo simulações contidas no Anexo E.

Ensaio referente à taxa média de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, conforme simulações do Anexo E				
Resultados Anexo F Ensaio	Taxa máxima ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	Duração dos ensaios a partir da abertura da válvula de saída do FP2		Previsão carreira de filtração de acordo com TEIXEIRA (1991)
		até atingir $N_{1\text{real}}$	até atingir N_2	Considerando 14 filtros em funcionamento
F2	474	150 minutos	509 minutos	118 h 46'
F5	347	210 minutos	633 minutos	147 h 42'
F7	474	150 minutos	524 minutos	122 h 16'
F10	347	210 minutos	613 minutos	143 h 2'

Ainda que tivesse havido pequenas variações na qualidade da água afluyente ao filtro, ao serem reproduzidos os ensaios chamados de réplicas, percebe-se que os resultados obtidos neles com a mesma taxa máxima de filtração foram semelhantes, quanto à turbidez da água filtrada, ao período de amadurecimento do filtro, à duração total do ensaio e às leituras piezométricas.

De todos os ensaios, os que apresentaram melhor desempenho foram os realizados com taxa máxima de filtração de $515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, tanto em termos da qualidade da água filtrada quanto em termos do tempo de duração.

De maneira geral, os ensaios demonstram que, para a faixa de turbidez obtida durante os ensaios com água coagulada na estação, as taxas máximas de filtração compreendidas entre 347 e $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ podem ser operadas com eficiência no filtro piloto, que simula o filtro mais limpo da bateria do SFTD da ETA-RD. Portanto, no sistema de filtração em questão, taxas máximas de filtração de até $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ podem ser viáveis quando a turbidez da água afluyente ao filtro atingir valores de até 6 uT aproximadamente.

O término dos ensaios ocorreu quando o nível N_2 foi atingido. Assim, considerando-se a previsão da carreira de filtração de acordo com TEIXEIRA (1991), a menor duração da carreira de filtração é de 73 horas e 30 minutos, conforme apresentado nas tabelas 5.18 e 5.19, para água afluyente com valores de turbidez de até 6 uT. De acordo com informações obtidas pela CAESB, a duração máxima da carreira obtida na época dos ensaios na ETA-RD é de aproximadamente de 30 horas, quando o nível 2, estipulado em projeto era atingido.

5.5 Determinação de ΔH_0

O valor de ΔH_0 foi determinado pela diferença entre os valores de $N_{I\text{teórico}}$, obtido pelo modelo e de $N_{I\text{exp real}}$ obtido experimentalmente através da leitura do piezômetro 9 nos ensaios com água coagulada, no momento em que a vazão de entrada no FP2 se igualou à vazão de saída, ou seja, quando o nível no piezômetro 9 atingiu o seu valor mínimo.

Os resultados dos níveis $N_{I\text{Teórico}}$ (calculado pelo modelo para $\Delta H=0$), $N_{I\text{exp real}}$ (obtido experimentalmente nos ensaios com água coagulada da ETA-RD) e $N_{I\text{real mod}}$ (obtido pelo modelo matemático de MACHADO (1995) considerando a água decantada da ETA-SC), foram colocados nas tabelas do Anexo F. Também foram ressaltados nas tabelas deste anexo o tempo gasto para que os níveis $N_{I\text{exp real}}$ e N_2 fossem atingidos.

Na tabela 5.20 têm-se os valores obtidos dos níveis $N_{I\text{Teórico}}$ ($\Delta H=0$), $N_{I\text{exp real}}$, $N_{I\text{real mod}}$, bem como os valores de ΔH_{Exp} ($N_{I\text{Teórico}} - N_{I\text{exp real}}$) e de $\Delta H_{\text{Machado}}$ ($N_{I\text{Teórico}} - N_{I\text{real mod}}$), para as taxas máximas de filtração apresentadas nas tabelas do Anexo F.

Observando-se a tabela 5.20, percebe-se que os valores experimentais obtidos por MACHADO (1995) demonstraram ser muito próximos aos obtidos na ETA-RD, nos ensaios correspondentes às tabelas F2; F3; F5 e suas respectivas réplicas F7; F8 e F10. Nestes ensaios as diferenças entre os valores ΔH_{Exp} e $\Delta H_{\text{Machado}}$ (a-b) variaram de 0 a 0,5 cm. Porém, nos ensaios F1 e F4 e suas respectivas réplicas F6 e F9, as diferenças entre ΔH_{Exp} e $\Delta H_{\text{Machado}}$ foram mais significativas.

TABELA 5.20 - Valores de $N_{I\text{teórico}}$, $N_{I\text{exp real}}$ (ETA-RD), $N_{I\text{real mod}}$ (ETA-SC), $\Delta H_{\text{Exp real}}$, $\Delta H_{\text{Machado}}$, para as taxas máximas de filtração das tabelas do Anexo F.

Tabela Anexo F	T_{max} $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$	$N_{I\text{teórico}}$ $\Delta H=0$	*(a) $N_{I\text{exp real}}$ Experimental	(b) $N_{I\text{real mod}}$	ΔH_{Exp}	$\Delta H_{\text{Machado}}$	(a)-(b)
		(m)			(cm)		
F1	484	2,401	2,460	2,419	5,900	1,800	*4,100
F2	474	2,304	2,320	2,320	1,600	1,600	0,000
F3	515	2,373	2,390	2,391	1,700	1,800	0,100
F4	580	2,320	2,350	2,329	3,000	0,900	*2,100
F5	347	2,460	2,460	2,465	0,000	0,500	0,500
F6	484	2,401	2,470	2,419	6,900	1,800	*5,100
F7	474	2,304	2,325	2,320	2,100	1,600	0,500
F8	515	2,373	2,395	2,391	2,200	1,800	0,400
F9	580	2,320	2,350	2,329	3,000	0,900	*2,100
F10	347	2,460	2,460	2,465	0,000	0,500	0,500

* ensaios onde a diferença entre ΔH_{Exp} e $\Delta H_{\text{Machado}}$ foi mais significativa.

* $N_{I\text{exp real}}$ foi obtido a partir do nível de referência da IP (geratriz inferior da tubulação de água filtrada (ver figura 4.16))

Nos ensaios com taxa máxima de $580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ foram obtidas diferenças entre os valores ΔH_{Exp} e $\Delta H_{\text{Machado}}$ em torno de 2,1 e nos ensaios com as taxas máximas de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, as diferenças foram de 4,1 e 5,1 cm. Os valores obtidos para a taxa máxima de $484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ resultaram estranhamente maiores que os obtidos com taxas maiores e diferenciaram-se bastante dos valores de $\Delta H_{\text{Machado}}$.

Ainda que as diferenças entre ΔH_{Exp} e $\Delta H_{\text{Machado}}$ na maior parte das vezes não fossem significativas, é razoável ressaltar que os valores de $\Delta H_{\text{Machado}}$ foram obtidos com água decantada (com turbidez $< 5 \text{ uT}$) da ETA-SC, onde o mecanismo de coagulação é por varredura e o valor de ΔH_{Exp} foi obtido com água pré-floculada na Instalação Piloto (com turbidez $< 6,10 \text{ uT}$) da ETA-RD, onde o mecanismo de coagulação é o de neutralização de cargas. Os flocos formados por varredura e por neutralização de cargas possuem naturezas diferentes e por esse motivo a comparação dos dados foi realizada para que se tivesse apenas uma noção do ocorrido.

5.6 Resultados do consumo com água de lavagem

Após cada ensaio, o filtro piloto foi lavado com ar e água e o volume de água de lavagem em m^3 foi registrado por um hidrômetro para saber o consumo com água para lavagem no FP2.

Como foi já descrito no item 4.4.4.5, a cada 5 min o volume em m^3 foi registrado ao mesmo tempo em que amostras de água de lavagem foram coletadas, na saída do FP2, para medir a turbidez.

Após 30 minutos de operação a lavagem foi terminada. O tempo (trinta minutos) para investigação da lavagem foi excessivo porque na época dos ensaios o critério para o término da lavagem dos filtros na ETA-RD era visual, chegando a ser realizado em duas etapas, que somadas chegavam até 25 minutos.

A expansão do meio filtrante utilizada durante a lavagem foi de 30%, seguindo procedimento a NBR-12216 (1992) que preconiza que a água de lavagem em contracorrente deve promover expansão do leito filtrante de 20 a 30 %.

Os gráficos das figuras 5.43; 5.44; 5.45; 5.46; 5.47; 5.48; 5.49; 5.50; 5.51 e 5.52 e a tabela 5.21 mostram o volume de água para lavagem e a turbidez de água de lavagem em função do tempo no FP2, após ensaios com água coagulada na ETA-RD com as taxas máximas de 484; 474; 515; 580 e 347 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Para água coagulada com turbidez entre 3,1 uT e 6,1 uT, independente da taxa máxima de filtração utilizada, foi possível lavar o FP2 de forma eficiente com 5 minutos.

Após 5 minutos de lavagem, produzindo expansão no meio filtrante de 30%, em todos os ensaios, a turbidez da água de lavagem resultou menor que 2,9 uT. Portanto, no filtro piloto de 0,0269 m^2 de área, o de volume consumido de água para lavagem foi de 0,2 e 0,3 m^3 , registrando desta forma velocidades ascensionais altas, de 1,48 à 2,23 m/min, respectivamente.

As velocidades ascensionais obtidas estão acima das velocidades ascensionais sugeridas por DI BERNARDO (comunicação pessoal), para filtros de camada única de areia praticamente uniforme, que deve ficar entre os valores de 1,2 e 1,3 m/min para filtros com aquelas características.

Na tabela 5.21, também se encontram os valores da velocidade ascensional para lavagem.

TABELA 5.21- Volume consumido de água para lavagem, turbidez de água de lavagem em função do tempo no FP2 e velocidades ascensionais para lavagem.

Anexo	T _{max}	Turbidez da água coagulada durante os ensaios	Turbidez da água de lavagem	Tempo (min)	Volume gasto com água de lavagem	Velocidade ascensional lavagem
G	(m ³ /m ² .d)	(uT)	(uT)		(m ³)	(m/min)
G1	484	5,4 <Turb.<6,0	2,9	5	0,2	1,48
G2	474	4,6 <Turb.<5,1	1,4	5	0,3	2,23
G3	515	4,1 <Turb.<4,5	1,9	5	0,3	2,23
G4	580	3,6 <Turb.<5,4	2,2	5	0,2	1,48
G5	347	3,1 <Turb.<4,2	1,0	5	0,2	1,48
G6	484	5,1 <Turb.<5,0	2,7	5	0,2	1,48
G7	474	3,7 <Turb.<5,1	1,5	5	0,3	2,23
G8	515	3,3 <Turb.<4,1	2,0	5	0,3	2,23
G9	580	3,5 <Turb.<5,4	2,3	5	0,3	2,23
G10	347	3,8 <Turb.<6,1	1,4	5	0,3	2,23

Os estudos realizados com água de lavagem não faziam parte dos objetivos deste trabalho uma vez que eles requereriam mais tempo para ser desenvolvidos, porém os dados levantados servem para dar uma idéia dos consumo com água para lavagem.

Para melhor avaliação final do processo, seria recomendável que se fizessem estudos mais detalhados a respeito do consumo de água de lavagem, considerando-se valores menores que 30 % para a expansão do leito filtrante, intervalos de tempos de coleta menores e verificando-se um tempo de lavagem de aproximadamente 15 minutos. Desta forma poder-se-ia fazer uma otimização do consumo de água para lavagem estipulando um limite de turbidez da água de lavagem para a qual se minimizaria o consumo.

FIGURA 5.43 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.44- Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.45 - Volume gasto de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max} = 515 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

FIGURA 5.46 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max} = 580 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

FIGURA 5.47 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.48 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.49 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.50 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$

FIGURA 5.51 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

FIGURA 5.52 - Volume de água para lavagem e turbidez da água de lavagem em função do tempo após ensaio com água coagulada na ETA-RD com $T_{\max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

5.7 Dificuldades na operação da ETA-RD e sugestões para melhoria do desempenho do sistema em escala real

Desde o início do desenvolvimento deste trabalho alguns problemas relacionados às válvulas borboleta, instaladas nas câmaras dos filtros da estação foram evidenciados. A princípio, percebeu-se que alguns ângulos de abertura das válvulas borboleta registrados no Controlador Lógico Programável (CLP) e nas mesas de comando não correspondiam aos mesmos indicados pelo ponteiro do controle de abertura e fechamento das válvulas contido no operador da válvula.

Posteriormente, foram realizadas investigações em todas as 28 válvulas borboletas da estação, utilizando-se um gabarito de ângulos apresentado na figura 4.26, instalado embaixo do ponteiro do controle de abertura e fechamento da válvula borboleta (ver figura 4.27).

A investigação foi realizada para os ângulos de 10^0 ; 20^0 ; 30^0 ; 40^0 ; 50^0 ; 60^0 ; 70^0 ; 80^0 ; e 90^0 seguindo o seguinte procedimento:

1. Colocou-se o gabarito embaixo do ponteiro do registro mecânico de cada válvula, de forma a encaixar os ângulos do gabarito com os ângulos de 0^0 e 90^0 , existentes no registro mecânico;
2. Acionou-se, manualmente, a abertura da válvula até que o ponteiro do registro mecânico atingisse o ângulo desejado, no gabarito (10^0 ; 20^0 ; 30^0 90^0);
3. Verificou-se, então, o valor do ângulo digital obtido na mesa de comando.

Os resultados desta investigação encontram-se na tabela 5.22, onde estão contidos, para cada câmara, os ângulos investigados e as leituras digitais correspondentes a cada ângulo, bem como as diferenças entre o valor obtido pelo ponteiro do registro mecânico e o valor digital obtido na mesa de comando.

Os resultados desta investigação mostram claramente que os ângulos de abertura das válvulas borboleta medidos no ponteiro do registro mecânico não correspondiam às leituras realizadas tanto na mesa de comando quanto no CLP e que a diferença entre estes valores varia de válvula para válvula, ou seja; cada válvula abria um ângulo diferente do requerido na mesa de comando e pelo CLP. Estas diferenças chegaram a ser da ordem de $21,9^0$ para o ângulo de 10^0 medido no ponteiro mecânico da válvula.

TABELA 5.22 - Diferença entre os ângulos das válvulas borboletas e os ângulos digitais registradas nas mesas de comando e no Controlador Lógico Programável

Ângulos da válvula borboleta	Ângulos digitais registrados na mesa de comando*																			
	0°		10°		20°		30°		40°		50°		60°		70°		80°		90°	
Filtros/Câmaras	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1/A	0,0	0,0	17,0	-7,0	28,0	-8,0	37,5	-7,5	45,9	-5,9	53,7	-3,7	61,8	-1,8	70,5	-0,5	80,4	-0,4	90,0	0,0
1/B	0,0	0,0	20,3	-10,3	31,1	-11,1	40,6	-10,6	49,0	-9,0	57,1	-7,1	65,8	-5,8	75,2	-5,2	85,3	-5,3	89,9	0,1
3/A	0,0	0,0	15,9	-5,9	26,5	-6,5	35,9	-5,9	44,0	-4,0	52,6	-2,6	61,1	-1,1	70,5	-0,5	80,8	-0,8	90,0	0,0
3/B	0,4	-0,4	21,4	-11,4	31,7	-11,7	40,3	-10,3	47,9	-7,9	55,1	-5,1	62,4	-2,4	70,1	-0,1	78,7	1,3	90,0	0,0
5/A	0,0	0,0	18,0	-8,0	29,1	-9,1	38,6	-8,6	46,6	-6,6	54,3	-4,3	62,8	-2,8	71,3	-1,3	81,0	-1,0	90,0	0,0
5/B	0,0	0,0	22,7	-12,7	33,2	-13,2	41,0	-11,0	50,0	-10,0	58,0	-8,0	66,1	-6,1	74,5	-4,5	84,5	-4,5	90,0	0,0
7/A	0,1	-0,1	25,9	-15,9	37,6	-17,6	47,1	-17,1	55,4	-15,4	62,7	-12,7	70,2	-10,2	77,9	-7,9	85,6	-5,6	90,1	-0,1
7/B	0,0	0,0	13,4	-3,4	27,9	-7,9	36,9	-6,9	44,9	-4,9	52,7	-2,7	60,5	-0,5	69,0	1,0	78,5	1,5	90,0	0,0
9/A	0,1	-0,1	15,1	-5,1	26,4	-6,4	35,7	-5,7	44,9	-4,9	53,2	-3,2	62,0	-2,0	71,2	-1,2	82,0	-2,0	92,3	-2,3
9/B	0,0	0,0	17,3	-7,3	27,3	-7,3	35,6	-5,6	43,3	-3,3	50,6	-0,6	57,7	2,3	66,5	3,5	75,7	4,3	86,0	4,0
11/A	0,2	-0,2	17,2	-7,2	26,4	-6,4	34,8	-4,8	42,5	-2,5	50,5	-0,5	59,1	0,9	69,0	1,0	80,6	-0,6	90,1	-0,1
11/B	0,3	-0,3	18,9	-8,9	29,1	-9,1	36,6	-6,6	44,4	-4,4	51,9	-1,9	59,7	0,3	68,1	1,9	77,6	2,4	89,0	1,0
13/A	0,0	0,0	16,3	-6,3	27,1	-7,1	36,1	-6,1	44,0	-4,0	51,7	-1,7	59,5	0,5	68,2	1,8	78,1	1,9	89,9	0,1
13/B	-2,3	2,3	21,4	-11,4	31,0	-11,0	38,4	-8,4	45,1	-5,1	52,0	-2,0	59,2	0,8	66,2	3,8	75,8	4,2	87,6	2,4
2/A	0,0	0,0	29,8	-19,8	38,7	-18,7	48,9	-18,9	57,3	-17,3	65,1	-15,1	72,4	-12,4	80,2	-10,2	89,0	-9,0	89,0	1,0
2/B	0,0	0,0	27,1	-17,1	36,9	-16,9	45,5	-15,5	53,4	-13,4	61,1	-11,1	68,8	-8,8	78,0	-8,0	86,6	-6,6	89,8	0,2
4/A	0,0	0,0	21,7	-11,7	31,4	-11,4	40,1	-10,1	47,5	-7,5	54,9	-4,9	62,8	-2,8	70,6	-0,6	80,6	-0,6	90,2	-0,2
4/B	0,0	0,0	17,4	-7,4	27,5	-7,5	35,5	-5,5	43,3	-3,3	50,6	-0,6	58,5	1,5	67,0	3,0	76,6	3,4	90,0	0,0
6/A	0,0	0,0	12,5	-2,5	24,2	-4,2	34,2	-4,2	43,3	-3,3	51,6	-1,6	58,7	1,3	69,4	0,6	79,9	0,1	90,1	-0,1
6/B	0,0	0,0	24,8	-14,8	33,9	-13,9	42,1	-12,1	49,4	-9,4	56,1	-6,1	62,3	-2,3	69,0	1,0	77,1	2,9	90,1	-0,1
8/A	0,0	0,0	18,5	-8,5	30,8	-10,8	40,4	-10,4	49,1	-9,1	57,3	-7,3	64,7	-4,7	72,4	-2,4	80,5	-0,5	87,5	2,5
8/B	0,1	-0,1	31,9	-21,9	39,8	-19,8	47,2	-17,2	54,0	-14,0	60,3	-10,3	67,1	-7,1	74,4	-4,4	83,2	-3,2	90,0	0,0
10/A	0,0	0,0	16,1	-6,1	25,4	-5,4	33,6	-3,6	41,6	-1,6	49,5	0,5	57,9	2,1	67,5	2,5	78,6	1,4	90,2	-0,2
10/B	0,0	0,0	13,3	-3,3	25,2	-5,2	35,0	-5,0	44,5	-4,5	53,3	-3,3	62,5	-2,5	72,3	-2,3	83,9	-3,9	90,1	-0,1
12/A	0,0	0,0	12,8	-2,8	23,1	-3,1	32,2	-2,2	40,7	-0,7	48,6	1,4	56,9	3,1	66,2	3,8	76,3	3,7	89,9	0,1
12/B	0,2	-0,2	16,9	-6,9	27,3	-7,3	36,3	-6,3	44,9	-4,9	52,8	-2,8	61,8	-1,8	71,0	-1,0	81,8	-1,8	90,8	-0,8
14/A	0,0	0,0	17,1	-7,1	28,7	-8,7	37,4	-7,4	45,3	-5,3	52,9	-2,9	60,4	-0,4	69,4	0,6	79,1	0,9	90,1	-0,1
14/B	0,0	0,0	13,6	-3,6	23,5	-3,5	32,3	-2,3	40,2	-0,2	48,4	1,6	57,2	2,8	66,6	3,4	77,3	2,7	90,0	0,0
Média dos valores	0,0		19,1		29,6		38,4		46,5		54,2		62,1		70,8		80,5		89,7	

* ângulos registrados no ponteiro do registro mecânico

** diferença entre o valor obtido pelo ponteiro do registro mecânico e o valor digital obtido na mesa de comando

Os ângulos mais utilizados na estação atualmente são de 30° , 40° e 50° , cujas diferenças chegam a valores próximos de $17,1^{\circ}$; $17,3^{\circ}$; e $15,1^{\circ}$, respectivamente. Isso quer dizer que os ângulos de 30° , 40° e 50° registrados pelo CLP são na realidade 44° , 57° , 65° , respectivamente.

O fabricante das válvulas SVEDALA-FAÇO informou que para um bom funcionamento delas, é preciso um ajuste, antes do funcionamento e uma pequena conferência após o período de seis meses de funcionamento. É preciso ressaltar que o ajuste adequado dessas válvulas é de grande importância para desempenho do sistema com taxa declinante.

Segundo a CAESB, tal ajuste não foi feito antes da operação e até o atual momento não é viável fazê-lo. Sem ele o trabalho de equiparação entre o filtro piloto e a ETA-RD não poderia ser realizado como havia sido previsto inicialmente. Porém o conhecimento dos problemas existentes na estação, em conjunto com os dados obtidos ao longo deste trabalho, resultou em alternativas que, se aplicadas, gerariam grandes benefícios ao sistema com taxa declinante da ETA-RD.

Conforme procedimentos operacionais determinados pela CAESB na época da pesquisa, os ângulos de abertura mais utilizados na estação, considerando-se quatorze filtros em funcionamento, eram de 30° para vazões entre 3.100 l/s e 4.300 l/s, 40° para vazões entre 4.300 l/s, e 5.300 l/s e 60° para vazões superiores a 5.300 l/s.

Os procedimentos estabelecidos pela CAESB provavelmente foram baseados em observações operacionais, porém a falta de ajuste nas 28 válvulas borboleta distorce a realidade do funcionamento do sistema da ETA-RD.

Diante de tal situação, e com base nos dados experimentais e em simulações numéricas, é possível apresentar sugestões para a melhoria do desempenho do sistema de filtração com taxa declinante variável da ETA-RD.

Partindo-se das equações de perda de carga na tubulação ajustada 5.6; 5.7; 5.8; 5.9; 5.10 e 5.11, mostradas na tabela 5.4, é possível obter os seus coeficientes que multiplicam a taxa de filtração (T) elevada ao expoente 1,5, em função dos ângulos de abertura das válvulas borboleta investigados.

A tabela 5.23 e a figura 5.53 mostram os ângulos e os respectivos coeficientes obtidos, a partir das equações ajustadas contidas na tabela 5.4.

TABELA 5.23 - Ângulos da válvula borboleta e respectivos coeficientes obtidos a partir das equações da tabela 5.4.

Ângulo de abertura da válvula borboleta	Coeficientes obtidos a partir das equações de perda de carga na tubulação para cada ângulo de abertura da válvula borboleta
20°	$3,43 \times 10^{-4}$
26°	$2,81 \times 10^{-4}$
30°	$2,14 \times 10^{-4}$
36°	$1,49 \times 10^{-4}$
50°	$1,30 \times 10^{-4}$
90°	$1,00 \times 10^{-4}$

O gráfico da figura 5.53 mostra a curva obtida por meio dos pontos que representam os coeficientes em função dos ângulos de abertura da válvula borboleta.

Observando-se o gráfico da figura 5.53, percebe-se claramente que a válvula borboleta instalada na ETA-RD caracteriza-se por dois comportamentos que se diferenciam quando próximos ao ângulo de 35°. Os coeficientes obtidos para os ângulos menores que 35° têm seus valores aumentados mais rapidamente em relação aos valores obtidos para ângulos maiores que 35°.

Utilizando-se os coeficientes interpolados do gráfico da figura 5.53, pode-se calcular a perda de carga total (H_d) para qualquer ângulo de abertura da válvula borboleta.

A tabela 5.24 mostra os coeficientes interpolados para vários ângulos de abertura da válvula borboleta (ver figura 5.53) e as equações de perda de carga total (H_d) obtidas a partir destes coeficientes.

FIGURA 5.53 - Coeficientes obtidos a partir das equações ajustadas de perda de carga na tubulação em função dos ângulos de abertura da válvula borboleta na ETA-RD

TABELA 5.24 - Equações de perda de carga total obtidas utilizando-se os coeficientes interpolados no gráfico da figura 5.53 para cada ângulo da válvula borboleta.

Ângulo de abertura da válvula borboleta	coeficientes interpolados para vários ângulos de abertura da Vb	Equações de perda de carga total obtidas utilizando-se os coeficientes interpolados no gráfico da figura 5.53
20 ⁰	$3,43 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 3,40 \times 10^{-4}T^{1,5}$
25 ⁰	$2,93 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 2,93 \times 10^{-4}T^{1,5}$
30 ⁰	$2,14 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 2,14 \times 10^{-4}T^{1,5}$
35 ⁰	$1,55 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,55 \times 10^{-4}T^{1,5}$
40 ⁰	$1,40 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,40 \times 10^{-4}T^{1,5}$
45 ⁰	$1,35 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,35 \times 10^{-4}T^{1,5}$
50 ⁰	$1,30 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,30 \times 10^{-4}T^{1,5}$
55 ⁰	$1,26 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,26 \times 10^{-4}T^{1,5}$
60 ⁰	$1,22 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,22 \times 10^{-4}T^{1,5}$
65 ⁰	$1,18 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,18 \times 10^{-4}T^{1,5}$
70 ⁰	$1,14 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,14 \times 10^{-4}T^{1,5}$
75 ⁰	$1,11 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,11 \times 10^{-4}T^{1,5}$
80 ⁰	$1,07 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,07 \times 10^{-4}T^{1,5}$
85 ⁰	$1,03 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,03 \times 10^{-4}T^{1,5}$
90 ⁰	$1,00 \times 10^{-4}$	$Hd=0,0011T + 1,00 \times 10^{-4}T^{1,5}$

As vazões de 4,1 e 5,1 m³/s são as mais freqüentes na ETA-RD, porém as de 3,1 e 5,3 m³/s também ocorrem fora do “Horário de Ponta”. Pensando-se nelas, resolveu-se investigar quais ângulos seriam mais adequados considerando-se a vazão mínima e a vazão máxima que ocorrem na ETA-RD. Dessa forma, utilizando-se o modelo matemático, as equações das curvas de perda de carga total obtidas e/ou interpoladas, a taxa média de filtração, o número de filtros da estação, foram feitas simulações a fim de obter os ângulos mais adequados a essas vazões.

Um resumo dos dados obtidos nas simulações para a vazão mínima (3,1 m³/s) e máxima de (5,3 m³/s) encontra-se na tabela 5.25.

TABELA 5.25 - Taxas média, máxima, mínima e relação entre as taxas média e máxima obtidas para vários ângulos, em simulações para a vazão de 3,1 m³/s e de 5,3 m³/s da ETA-RD, considerando 14 filtros em funcionamento.

Ângulos	Vazões da ETA-RD	Vazão (m ³ /s)	T _{med} (m ³ /m ² .d)	T _{max} (m ³ /m ² .d)	T _{min} (m ³ /m ² .d)	T _{max} /T _{med}
30°	Mínima	3,1	191,31	407	59	2,13
	Máxima	5,3	327,08	438	231	1,34
35°	Mínima	3,1	191,31	473	41	2,47
	Máxima	5,3	327,08	513	181	1,57
40°	Mínima	3,1	191,31	496	36	2,59
	Máxima	5,3	327,08	538	167	1,64
45°	Mínima	3,1	191,31	504	35	2,63
	Máxima	5,3	327,08	548	162	1,67
50°	Mínima	3,1	191,31	512	33	2,68
	Máxima	5,3	327,08	557	158	1,70
55°	Mínima	3,1	191,31	519	32	2,72
	Máxima	5,3	327,08	566	154	1,73
60°	Mínima	3,1	191,31	574	150	1,76
	Máxima	5,3	327,08	552	74	2,18
65°	Mínima	3,1	191,31	534	29	1,76
	Máxima	5,3	327,08	583	145	1,78

Analisando-se a tabela 5.25, observa-se que, para as vazões que ocorrem na ETA-RD, não é recomendado o uso de ângulos menores que 30°, quando se tem quatorze filtros em funcionamento, pois o valor obtido da relação entre as taxas máxima e média é de 1,34, para a vazão mínima da estação (3,1 m³/s). A utilização desse ângulo produziria pequena duração na carreiras de filtração.

Conforme os resultados obtidos nos ensaios com água coagulada no FP2, poder-se-iam utilizar taxas máximas de até 580 m³/m².dia. Isso indica que seria viável trabalhar com ângulos de até 60 graus.

Porém, os ensaios com taxa máxima de filtração de 515 m³/m².dia (T_{max}/T_{med} = 1,64) demonstraram melhores resultados, em termos de turbidez da água filtrada e de duração dos ensaios, que os ensaios com taxa máxima de 580 m³/m².dia. Portanto os ângulos mais indicados para trabalhar com vazões entre 3,1 e 5,5 m³/s seriam os ângulos entre 30 e 35 graus, uma vez que as taxas máximas produzidas com a sua utilização não ultrapassariam 513 m³/m².dia.

Dados detalhados das simulações realizadas com quatorze filtros em funcionamento, considerando-se as vazões de trabalho da ETA-RD (3,1, 4,1, 5,1 e 5,3) e os ângulos de 30 e 35 graus, estão contidos no Anexo H.

No “*Horário de Ponta*” (18:00 h à 22:00 h), o procedimento operacional da CAESB consistia em trabalhar com apenas oito filtros, mantendo-se a abertura do ângulo das válvulas borboleta em 20°. Os filtros retirados de operação sempre eram os quatro mais limpos e os dois mais sujos.

Além disso, a retirada de oito filtros no horário de ponta conforme os procedimento da CAESB, faz com que o sistema deixe de funcionar como um verdadeiro SFTD, no qual as taxas de filtração reduzem na forma de degraus ao longo da carreira. O comportamento repetitivo, que é característica básica do SFTD, é diariamente interrompido a partir do “*Horário de Ponta*”.

Em relação a vazão do horário de ponta (1,7 m³/s), duas hipóteses podem ser consideradas:

1. Trabalhar com uma bateria de sete filtros mantendo-se a válvula borboleta com a abertura do ângulo fixa, em um valor compreendido entre 30 e 35 graus, como aconteceria fora do horário de ponta;
2. Trabalhar com uma bateria de quatorze filtros e um ângulo de dez graus na válvula borboleta.

A primeira hipótese foi simulada para os ângulos de 30° e 35° e os resultados desta simulação estão contidos na tabela 5.26.

TABELA 5.26 - Taxas média, máxima, mínima, e relação entre as taxas média e máxima obtidas em simulações, para a vazão (1,7 m³/s), típica do “*Horário de ponta*” na estação.

Angulo Graus	Vazão m ³ /s	Área de filtração (m ²)	Filtros N ⁰	T _{med} m ³ /m ² .d	T _{max} m ³ /m ² .d	T _{min} m ³ /m ² .d	T _{max} /T _{med}
30°	1,7	700	7	209,83	376	89	1,79
35°	1,7	700	7	209,83	429	67	2,04

O período do horário de ponta (4 horas) é relativamente curto e a turbidez da água afluyente aos filtros é menor que 6 uT, na maior parte do ano. Assim, seria viável retirar de operação uma bateria de 7 filtros, os filtros ímpares, conforme esquema da figura 4.1, e no horário de ponta do dia posterior retirar-se-iam os filtros pares e,

assim, sucessivamente.

Dados detalhados das simulações realizadas com sete filtros em funcionamento, considerando-se as vazões do “Horário de ponta” estão contidos no Anexo I.

Como não foi possível obter dados para o ângulo de 10 graus, não seria recomendado interpolar o coeficiente de perda de carga turbulenta para o ângulo de 10 graus; porém objetivando-se testar o funcionamento da estação no “Horário de ponta”, investigaram-se o nível de água nos filtros e a carga hidráulica mínima obtida, para a vazão de $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$, típica deste horário, considerando-se 13 filtros em funcionamento e um fora de operação.

Assim, o filtro mais sujo da bateria foi retirado de operação e a abertura dos ângulos das válvulas borboleta dos outros treze filtros, em operação, foram ajustados manualmente em 10° , utilizando-se o gabarito de ângulos.

O nível de água do filtro ao final dos testes também foi medido no filtro 9 através de uma régua colocada no ponto da passarela cuja cota é de 1254,025 m. O nível de água registrado foi de 1,164 m em relação à cota da passarela.

A figura 5.54 mostra esquematicamente as cotas da passarela (1254,025 m), do nível de água ao final do teste (1252,861 m), da calha de coleta de água de lavagem (1252,29 m), bem como a cota do vertedor da caixa de efluentes (1250,863 m). A lâmina d’água sobre o vertedor foi de 0,1381 m, considerando-se a vazão de $1,727 \text{ m}^3/\text{s}$.

FIGURA 5.54 - Esquema que mostra a carga hidráulica disponível (H_d), para a vazão ($1,73 \text{ m}^3/\text{s}$) ao final do dia do teste.

Sobre o teste realizado no horário de ponta, conclui-se que, para a vazão de $1,727 \text{ m}^3/\text{s}$, o nível de água no filtro 9 ficou, ao final do teste, acima da calha de coleta de água de lavagem, e a carga hidráulica (diferença entre o nível de água no filtro e do nível de água no vertedor da caixa de efluentes) foi de 1,86 m. A turbidez da água filtrada registrada no turbidímetro de escoamento contínuo do filtro 9 resultou menor que 1 uT.

Dentre as hipóteses colocadas para se operar com a vazão do horário de ponta, a primeira pode parecer mais prática a princípio, uma vez que não é preciso ficar ajustando diariamente o ângulo da válvula borboleta. Esse fato torna-se relevante devido à dificuldade encontrada, no momento, pela CAESB, para que as válvulas borboleta sejam reguladas e operadas pelo CLP.

No caso de ajuste dos ângulos, a segunda hipótese pareceria mais adequada, em se tratando de um sistema com taxa declinate variável, pois proporcionaria ao sistema funcionar como um sistema típico de taxa declinante variável, no qual, ao longo da carreira de filtração, cada filtro tem sua taxa reduzida na forma de degraus.

É válido, portanto, investigar experimentalmente as duas hipóteses dentro do contexto operacional atual da ETA-RD para se ter respostas mais embasadas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dos estudos realizados no sistema de filtração direta descendente com taxa declinante variável em escala real e em escala piloto, pode-se concluir que;

➤ **Sobre a metodologia desenvolvida:**

1. As curvas de perda de carga total no filtro limpo, ajustadas conforme metodologia, demonstram representar o que realmente ocorre nos filtros da estação;
2. As equações das curvas de perda de carga total no filtro limpo, obtidas conforme metodologia, permitiram a realização de simulações que visam conseguir as condições mais adequadas de operação do sistema;
3. A válvula tipo esfera instalada na tubulação de saída do Filtro Piloto (FP2), devidamente ajustada, simulou adequadamente a perda de carga total dos filtros da ETA-RD;
4. É possível obter coeficientes que correlacionam a perda de carga na tubulação com os ângulos de abertura das válvulas borboleta dos filtros da ETA-RD, a partir das equações obtidas de perda de carga na tubulação.
5. É possível calcular a perda de carga total para qualquer ângulo de abertura da válvula borboleta e fazer várias simulações para se obter as condições de variação de vazão da estação, a partir dos coeficientes que correlacionam a perda de carga na tubulação e os ângulos de abertura das válvulas borboleta ;

6. A metodologia desenvolvida neste trabalho permite estudar o sistema com taxa declinante variável da estação do Rio Descoberto obtendo parâmetros de projeto, a partir de uma Instalação Piloto com características similares de armazenamento a montante dos filtros e de perda de carga;

➤ **Sobre os resultados obtidos na Instalação Piloto**

1. De maneira geral, os ensaios demonstram que, para a turbidez obtida durante os ensaios com água coagulada na estação, as taxas máximas de filtração compreendidas entre 347 e 580 m³/m².dia podem ser operadas com eficiência no filtro piloto. O filtro piloto simula o filtro mais limpo da bateria do SFTD da ETA-RD, portanto, no sistema de filtração em questão, taxas máximas de filtração de até 580 m³/m².dia, podem ser viáveis quando a turbidez da água afluyente ao filtro atingir valores de até 6 uT, aproximadamente;

2. Em todos os ensaios realizados na Instalação Piloto com água coagulada, utilizando-se a taxa máxima de filtração de acordo com o modelo, a turbidez da água filtrada precisou de um período inicial para atingir um valor menor que 1uT. Esse período foi mais curto para os ensaios com taxa máxima de 515 m³/m².dia ($T_{\max}/T_{\text{med}}=1,64$), cerca de 20 minutos;

3. De todos os ensaios, os que apresentaram melhor desempenho foram os realizados com taxa máxima de filtração de 515 m³/m².dia ($T_{\max}/T_{\text{med}}=1,64$) tanto em termos qualidade da água filtrada quanto em termos do tempo de duração;

4. A duração máxima da carreira de filtração, registrada atualmente, na ETA-RD (30 horas) poderia ser maior se os ângulos das válvulas borboleta fossem devidamente ajustados e se a lavagem fosse realizada quando o nível N2 obtido pelo modelo fosse atingido. Esta conclusão baseia-se na metodologia desenvolvida por TEIXEIRA (1991) e nos dados experimentais obtidos.

5. A previsão da carreira de filtração pode ser, no mínimo, dobrada desde que a água bruta possua valores de turbidez menor que 6 uT. É válido ressaltar que esse valor de turbidez acontece em oito dos doze meses do ano na ETA-RD. Tal conclusão também está baseada na metodologia de TEIXEIRA (1991) e nos dados experimentais obtidos;

6. Nos ensaios com água coagulada na Instalação Piloto, utilizando-se a taxa máxima de filtração obtida pelo modelo, as impurezas ficaram retidas acima da camada onde o piezômetro P7 foi instalado. Tal camada situa-se a uma distância menor que 0,16 m em relação ao topo do meio filtrante, que possui espessura de 1,2 m;

7. O armazenamento a montante do filtro demonstrou influenciar bastante sobre a taxa de filtração no FP2, portanto ele deve ser sempre considerado e analisado.

➤ **Sobre a relação entre as taxas máxima e média do SFTD**

1. O valor da taxa máxima deve ser obtido experimentalmente em filtro piloto com características similares à da estação em questão, não devendo nunca ser condicionado ao valor da taxa média. Tal recomendação se deve ao fato de que a taxa de filtração máxima depende do tipo do meio filtrante, da carga hidráulica disponível, do mecanismo de coagulação, do tipo de coagulante empregado e da utilização ou não de auxiliares de coagulação ou filtração, da qualidade da água a ser filtrada e do tipo de tratamento (filtração direta com ou sem pré-floculação, ou ciclo completo);

2. o limite inferior (1,3) para a relação entre taxas máxima e média seja respeitado para que se possa ter durações razoáveis da carreira de filtração;

➤ **Sobre a aplicação do trabalho à ETA-RD**

1. Com base em dados experimentais e em simulações numéricas realizadas nesta pesquisa, é possível obter sugestões para a melhoria do desempenho do sistema real com taxa declinante variável em questão, em qualquer época do ano;

2. Os ângulos mais indicados para trabalhar com vazões entre 3,1 e 5,5 m³/s e turbidez afluente aos filtros menor que 6 uT, estariam compreendidos entre 30 e 35 graus, aproximadamente, uma vez que as taxas máximas que produziram bons resultados de turbidez da água filtrada não ultrapassam 513 m³/m².dia;

3. A partir das equações de perda de carga total determinadas para vários ângulos de abertura da válvula borboleta e de ensaios com água coagulada na ETA-RD na Instalação Piloto modificada, pode-se determinar para quaisquer condições (qualidade da água bruta, tipo de coagulante e auxiliares de coagulação), taxas máximas de trabalho e, por conseguinte, os ângulos mais adequados de trabalho da válvula borboleta.

RECOMENDAÇÕES

A qualidade na operação pode ser obtida com pequenos ajustes, soluções simples que podem diminuir os custos e aumentar o rendimento. Com base nisso, recomenda-se que:

1. Se ajustem as 28 válvulas borboleta de forma que o ângulo adequado corresponda ao mesmo registrado no controlador lógico programável;
2. Se utilize de gabaritos com ângulos, embaixo do ponteiro de ajuste das válvulas borboleta, enquanto não for possível solucionar o problema no ajuste das válvulas;
3. Se opere todas as válvulas borboleta com o mesmo ângulo de abertura, de forma que o sistema funcione como um verdadeiro sistema de filtração com taxa declinante variável, no qual as taxas de filtração reduzam na forma de degraus ao longo da carreira;
4. Se façam testes fixando-se os ângulos das 28 válvulas borboleta em 30° e 35° , verificando-se, durante os mesmos, a turbidez e as vazões em cada filtro;
5. Se testem as duas hipóteses colocadas para se operar com a vazão do “*Horário de Ponta*”, verificando qual delas seria a mais vantajosa;

ANEXO

ANEXO A

Resultados dos ensaios com água tratada, no FP2 com dez vazões distintas para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação

TABELA 1A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,029 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
2,3	300	105,0	105,2	106,0	107,0	107,5	108,4	109,4	112,1	114,8	105,0	9,8	0,0	9,8	290	88,23

TABELA 2A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,037 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
2,5	380	105,0	105,5	106,8	107,5	108,5	109,5	110,5	114,4	115,9	105,0	10,9	0,0	10,9	370	112,56

TABELA 3A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT , vazão de saída do FP2 =0,053 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
2,9	530	105,1	106,0	107,9	109,2	110,2	111,9	113,6	118,6	121,9	105,1	16,8	0,0	16,8	530	161,24

TABELA 4A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,074 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
3,3	740	105,5	106,5	109,2	111,4	113,0	115,2	118,0	125,3	130,3	105,5	24,8	0,0	24,8	740	225,13

TABELA 5A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,093 L/s)

H No vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
3,7	940	105,9	107,0	110,5	113,0	115,0	118,0	121,0	130,5	136,2	105,8	30,3	0,1	30,4	930	282,93

TABELA 6A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:29/04/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,108 L/s)

H No vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
3,9	1090	106,1	107,5	112,0	115,0	117,5	120,0	124,5	135,9	143,0	106,0	36,9	0,1	37,0	1080	328,56

TABELA 7A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:02/05/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,124 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
4,1	1250	106,1	107,9	112,5	117,0	117,6	120,5	124,5	137,2	147,0	106,0	40,9	0,1	41,0	1240	337,24

TABELA 8A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:02/05/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,140 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
4,3	1400	106,3	108,0	113,5	117,5	119,5	123,0	127,0	142,0	153,0	106,1	46,7	0,2	46,9	1400	425,92

TABELA 9A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:02/05/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,152 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
4,5	1530	106,6	108,5	114,5	118,5	121,3	125,3	130,5	145,3	159,0	106,3	52,4	0,3	52,7	1520	462,42

TABELA 10A - Resultados dos ensaios com água tratada para determinação das perdas de carga total, no meio filtrante e na tubulação
(Data:02/05/2000, temperatura da água durante o ensaio 25⁰C, turbidez da água tratada <1 uT, vazão de saída do FP2 =0,190 L/s)

H no vertedor (cm)	Vazão entrada do FP2 (ml/10s)	Leituras Piezométricas (cm)										Perda de carga (cm)			Vazão saída do FP2 (ml/10s)	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Meio P9-P1	Tub P1-P10	Total P9-P10		
4,8	1910	106,8	109,2	117,2	122,0	125,5	130,2	136,3	149,0	170,0	106,5	63,2	0,3	63,5	1900	578,03

ANEXO B

**Resultados dos ensaios com água tratada nos filtros 3 e 9
da ETA-RD, para determinação da perda de carga total
considerando seis ângulos de abertura da válvula
borboleta diferentes**

TABELA B1 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD (Abertura da válvula borboleta = 20⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula borboleta = 52" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.339 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,9 uT; Temperatura 25 °C
- Área total do filtro: $A_t = 11,82 \times 10,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 10,2 = 51,4 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor) = 1252,116 m; Cota (vertedor) = 1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor = 1,055 m

Intervalo Δt min	H na régua cm	ΔH m	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_r \cdot \Delta H}{\Delta t}$ m ³ /s	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$ m ³ /m ² .dia	altura da lâmina no vertedor m	cota da lâmina d'água no vertedor m	Cota da lâmina d'água no filtro 3 m	Hd m
-	30+1	-	-	-	0,198	1251,051	1253,73	2,678
0-1	4	0,04	0,08	135,10	0,198	1251,051	1253,69	2,628
1-2	8	0,11	0,221	371,53	0,198	1251,051	1253,65	2,588
2-3	19	0,10	0,201	337,76	0,198	1251,051	1253,63	2,568
3-4	29	0,10	0,201	337,76	0,198	1251,051	1253,44	2,378
4-5	39	0,095	0,191	320,87	0,198	1251,051	1253,34	2,278
5-6	48,5	0,095	0,191	320,87	0,198	1251,051	1253,24	2,183
6-7	58	0,09	0,181	303,98	0,198	1251,051	1253,15	2,088
7-8	67	0,09	0,181	303,98	0,198	1251,051	1253,06	1,998
8-9	76	0,085	0,171	287,09	0,198	1251,051	1252,97	1,908
9-10	84,5	0,085	0,171	287,09	0,198	1251,051	1252,88	1,823
10-11	93	0,08	0,161	270,20	0,198	1251,051	1252,80	1,738
11-12	101	0,08	0,161	270,20	0,198	1251,051	1252,72	1,658
12-13	109	0,07	0,141	236,43	0,198	1251,051	1252,64	1,578
13-14	116	0,07	0,141	236,43	0,198	1251,051	1252,57	1,508
14-15	123	0,06	0,121	202,65	0,198	1251,051	1252,50	1,438
15-16	129	0,06	0,121	202,65	0,198	1251,051	1252,44	1,378
16-17	135							

TABELA B2 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 26⁰)

<ul style="list-style-type: none"> • Tempo gasto para abertura da válvula =1' (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo) • Vazão da ETA-RD = 4.235 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,8 uT ; Temperatura 25 °C • Área total do filtro: $A_t = 11,82 \times 10,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 10,2 = 51,4 \text{ m}^2$; • Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m; • Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,055 m 								
Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_r \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	Cota da lâmina d'água no filtro 3	Hd
min	cm	m	m ³ /s	m ³ /m ² .dia	m	m	m	m
-	30+1		-	-	0,198	1251,061	1254,74	2,678
0-1	3	0,09	-	-	0,198	1251,061	1253,70	2,638
1-2	12	0,12	0,241	405,31	0,198	1251,061	1253,61	2,548
2-3	24	0,12	0,241	405,31	0,198	1251,061	1253,49	2,428
3-4	36	0,11	0,221	371,53	0,198	1251,061	1253,37	2,308
4-5	47	0,11	0,221	371,53	0,198	1251,061	1253,26	2,198
5-6	58	0,10	0,201	337,76	0,198	1251,061	1253,15	2,088
6-7	68	0,10	0,201	337,76	0,198	1251,061	1253,05	1,988
7-8	78	0,10	0,201	337,76	0,198	1251,061	1252,95	1,888
8-9	88	0,09	0,181	303,98	0,198	1251,061	1252,85	1,788
9-10	97	0,09	0,181	303,98	0,198	1251,061	1252,76	1,698
10-11	106	0,08	0,161	270,24	0,198	1251,061	1252,67	1,608
11-12	114	0,08	0,161	270,24	0,198	1251,061	1252,59	1,528
12-13	122	0,07	0,141	236,43	0,198	1251,061	1252,51	1,448
13-14	129							

TABELA B3 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 30°)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 1' (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.261 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,6; Temperatura 25 °C
- Área total do filtro: $A_t = 11,82 \times 10,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 10,2 = 51,4 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor) = 1252,116 m; Cota (vertedor) = 1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor = 1,065 m

Intervalo Δt min	H na régua cm	ΔH (m)	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	Altura da lâmina no vertedor m	cota da lâmina d'água no vertedor m	Cota da lâmina d'água no filtro 3 m	Hd m
-	30+1	-	-	-	0,188	1251,051	1253,74	2,689
0-1	8	0,08	-	-	0,188	1251,051	1253,66	2,609
1-2	21	0,13	0,261	439,08	0,188	1251,051	1253,53	2,479
2-3	34	0,13	0,261	439,08	0,188	1251,051	1253,40	2,349
3-4	47	0,13	0,261	439,08	0,188	1251,051	1253,27	2,219
4-5	59	0,12	0,241	405,31	0,188	1251,051	1253,15	2,099
5-6	70	0,11	0,221	371,53	0,188	1251,051	1253,04	1,989
6-7	80	0,10	0,201	337,75	0,188	1251,051	1252,94	1,889
7-8	90	0,10	0,201	337,75	0,188	1251,051	1252,84	1,789
8-9	100	0,10	0,201	337,75	0,188	1251,051	1252,74	1,689
9-10	109	0,09	0,181	303,98	0,188	1251,051	1252,65	1,599
10-11	117	0,08	0,161	270,20	0,188	1251,051	1252,57	1,519
11-12	127							

TABELA B4 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 36⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 1' 18" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.261 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,6; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,82 \times 10,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 10,2 = 51,4 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor) = 1252,116 m; Cota (vertedor) = 1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor = 1,087 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	Altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	Cota da lâmina d'água no filtro 3 M	Hd
min	cm	m	m ³ /s	m ³ /m ² .dia	m	m		m
-	30	-	-		0,193	1251,056	1253,73	2,673
0-1	4	0,04	-	-	0,193	1251,056	1253,69	2,633
1-2	15	0,15	-	-	0,193	1251,056	1253,58	2,523
2-3	30	0,16	0,322	540,41	0,193	1251,056	1253,43	2,373
3-4	46	0,15	0,301	506,63	0,193	1251,056	1253,27	2,213
4-5	61	0,14	0,281	472,86	0,193	1251,056	1253,12	2,063
5-6	75	0,13	0,261	439,08	0,193	1251,056	1252,98	1,923
6-7	88	0,12	0,241	405,31	0,193	1251,056	1252,85	1,793
7-8	100	0,11	0,221	371,53	0,193	1251,056	1252,72	1,673
8-9	111	0,10	0,201	337,75	0,193	1251,056	1252,62	1,563
9-10	121	0,10	0,201	337,75	0,193	1251,056	1252,52	1,463
10-11	131							

TABELA B5 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 50⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 2' 34" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.261 l/s; Turbidez da água tratada no filtro < 1 uT ; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,82 \times 10,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 10,2 = 51,4 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,06 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	Altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m ³ /s	m ³ /m ² .dia	M	m	m	m
-	30	-			0,193	1251,056	1253,74	2,683
0-1	4	0,14	0,281	472,86	0,193	1251,056	1253,69	2,634
1-2	18	0,17	0,342	574,18	0,193	1251,056	1253,54	2,493
2-3	35	0,16	0,322	540,41	0,193	1251,056	1253,38	2,323
3-4	51	0,16	0,322	540,41	0,193	1251,056	1253,23	2,163
4-5	67	0,15	0,301	506,63	0,193	1251,056	1253,06	2,003
5-6	82	0,14	0,281	472,83	0,193	1251,056	1252,91	1,853
6-7	96	0,13	0,261	439,08	0,193	1251,056	1252,77	1,713
7-8	109	0,12	0,241	405,31	0,193	1251,056	1252,64	1,583
8-9	121	0,11	0,221	371,53	0,193	1251,056	1252,52	1,463
9-10	132

TABELA B6 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 3 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 90°)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 2' 50 (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.262 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,9 uT; Temperatura 25 ° C
- $A_t = 11,82 \times 0,2 = 120,56 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 3 = $5,04 \times 0,2 = 51,4 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,029 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor) = 1252,116 m; Cota (vertedor) = 1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor = 1,06 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	Altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m^3/s	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$	m	m	m	m
-	30+1	-	-	-	0,193	1251,056	1253,43	2,683
0-1	4	0,15	0,301	506,63	0,193	1251,056	1253,69	2,633
1-2	19	0,19	0,382	641,74	0,193	1251,056	1253,54	2,483
2-3	38	0,18	0,362	607,96	0,193	1251,056	1253,34	2,293
3-4	56	0,18	0,362	607,96	0,193	1251,056	1253,17	2,113
4-5	74	0,17	0,342	574,18	0,193	1251,056	1252,99	1,933
5-6	91	0,16	0,322	540,41	0,193	1251,056	1252,82	1,763
6-7	107	0,15	0,302	506,63	0,193	1251,056	1252,66	1,603
7-8	122	0,13	0,361	439,08	0,193	1251,056	1252,51	1,453
8-9	135							

TABELA B7 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 20⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula =58'' (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.295 l/s; Turbidez da água tratada no filtro <1uT; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,060 m

Intervalo Δt min	H na régua cm	ΔH m	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_t \cdot \Delta H}{\Delta t}$ m ³ /s	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$ m ³ /m ² .dia	altura da lâmina no vertedor m	cota da lâmina d'água no vertedor m	Cota da lâmina d'água no filtro 9 m	Hd m
-	30+1	-	-	-	0,193	1251,056	1253,74	2,683
0-1	4	0,035	0,069	118,16	0,193	1251,056	1253,69	2,633
1-2	7,5	0,100	0,199	337,60	0,193	1251,056	1253,65	2,598
2-3	17,5	0,095	0,189	320,72	0,193	1251,056	1253,55	2,498
3-4	27	0,095	0,189	320,72	0,193	1251,056	1253,46	2,403
4-5	36	0,090	0,179	303,83	0,193	1251,056	1253,37	2,313
5-6	45	0,090	0,179	303,83	0,193	1251,056	1253,28	2,223
6-7	53,5	0,085	0,169	286,96	0,193	1251,056	1253,19	2,138
7-8	62	0,085	0,169	286,96	0,193	1251,056	1253,11	2,053
8-9	70	0,080	0,159	270,08	0,193	1251,056	1253,03	1,973
9-10	78	0,080	0,159	270,08	0,193	1251,056	1252,95	1,893
10-11	86	0,080	0,159	270,08	0,193	1251,056	1252,89	1,813
11-12	94	0,080	0,159	270,08	0,193	1251,056	1252,79	1,733
12-13	102	0,075	0,149	253,20	0,193	1251,056	1252,70	1,653
13-14	109,5	0,075	0,149	253,20	0,193	1251,056	1252,63	1,578
14-15	117	0,07	0,139	236,38	0,193	1251,056	1252,56	1,503
15-16	124	0,060	0,119	202,62	0,193	1251,056	1252,49	1,433
16-17	130							

TABELA B8 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 26⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 1' 3" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.238 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,72; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,062 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m ³ /s	m ³ /m ² .dia	m	m	m	m
-	30+2		-		0,191	1251,054	1254,01	2,956
0-1	1	0,09	0,179	303,92	0,191	1251,054	1253,98	2,926
1-2	10	0,12	0,239	405,23	0,191	1251,054	1253,89	2,836
2-3	22	0,12	0,239	405,23	0,191	1251,054	1253,77	2,716
3-4	34	0,12	0,239	405,23	0,191	1251,054	1253,65	2,596
4-5	46	0,11	0,219	371,46	0,191	1251,054	1253,53	2,476
5-6	57	0,11	0,219	371,46	0,191	1251,054	1253,42	2,366
6-7	68	0,10	0,199	337,69	0,191	1251,054	1253,31	2,256
7-8	78	0,10	0,199	337,69	0,191	1251,054	1253,21	2,156
8-9	88	0,09	0,179	303,92	0,191	1251,054	1253,11	2,056
9-10	97	0,09	0,179	303,92	0,191	1251,054	1253,02	1,966
10-11	106	0,09	0,179	303,92	0,191	1251,054	1252,93	1,876
11-12	115	0,08	0,159	270,15	0,191	1251,054	1252,84	1,786
12-13	123							

TABELA B9 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 30⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 1'16" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.357 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,85; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,065 m

Intervalo Δt min	H na régua cm	ΔH (m)	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_r \cdot \Delta H}{\Delta t}$ m ³ /s	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$ m ³ /m ² .dia	altura da lâmina no vertedor m	cota da lâmina d'água no vertedor m	cota da lâmina d'água no filtro 9 m	Hd m
-	30	-	-	-	0,191	1251,054	1253,73	2,676
0-1	10	0,09	-	-	0,191	1251,054	1253,60	2,546
1-2	19	0,13	0,2586	438,99	0,191	1251,054	1253,47	2,416
2-3	32	0,13	0,2586	438,99	0,191	1251,054	1253,35	2,296
3-4	45	0,12	0,2380	405,23	0,191	1251,054	1253,23	2,176
4-5	57	0,12	0,2380	405,23	0,191	1251,054	1253,12	2,066
5-6	69	0,11	0,2188	371,45	0,191	1251,054	1253,01	1,956
6-7	80	0,11	0,2188	371,45	0,191	1251,054	1252,91	1,856
7-8	91	0,10	0,1989	337,68	0,191	1251,054	1252,82	1,766
8-9	101	0,09	0,1790	303,92	0,191	1251,054	1252,73	1,676
9-10	110	0,09	0,1790	303,92	0,191	1251,054	1252,65	1,596
10-11	119	0,08	0,1591	270,15	0,191	1251,054	1252,57	1,516
11-12	127							

TABELA B10 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 36°)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 1' 18" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.357 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,85; Temperatura 25 ° C
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,065 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m^3/s	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$	m	m	m	m
-	30	-	-	-	-	-	1253,73	2,678
0-1	4	0,10	0,1989	337,68	0,188	1251,051	1253,60	2,538
1-2	14	0,15	0,2984	506,53	0,188	1251,051	1253,44	2,388
2-3	29	0,16	0,3182	540,30	0,188	1251,051	1253,43	2,378
3-4	45	0,15	0,2984	506,53	0,188	1251,051	1253,28	2,228
4-5	60	0,15	0,2984	506,53	0,188	1251,051	1253,13	2,078
5-6	75	0,14	0,2785	472,76	0,188	1251,051	1252,98	1,928
6-7	89	0,13	0,2586	438,99	0,188	1251,051	1252,84	1,788
7-8	102	0,12	0,2387	405,23	0,188	1251,051	1252,71	1,658
8-9	114	0,11	0,2188	371,46	0,188	1251,051	1252,59	1,538
9-10	125	0,10	0,1989	337,68	0,188	1251,051	1252,48	1,428
10-11	135							

TABELA B11 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 50⁰)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 2' 38" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Vazão da ETA-RD = 4.289 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo <1; aparente 3 uH; Temperatura 25⁰ C
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor) =1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor =1,06 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_r \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	Altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m ³ /s	m ³ /m ² .dia	m	m	m	m
-	30+2	-			-	1251,056	1253,75	2,693
0-1	3	0,14	0,2785	472,76	0,193	1251,056	1253,69	2,643
1-2	17	0,18	0,3580	607,84	0,193	1251,056	1253,56	2,503
2-3	35	0,17	0,3381	574,07	0,193	1251,056	1253,38	2,323
3-4	52	0,16	0,3182	540,30	0,193	1251,056	1253,21	2,153
4-5	68	0,15	0,2984	506,53	0,193	1251,056	1253,05	1,993
5-6	83	0,14	0,2785	472,74	0,193	1251,056	1252,89	1,830
6-7	97	0,13	0,2586	438,99	0,193	1251,056	1252,75	1,703
7-8	110	0,12	0,2387	405,23	0,193	1251,056	1252,63	1,573
8-9	122	0,11	0,2188	371,46	0,193	1251,056	1252,50	1,430
9-10	133							

TABELA B12 - Resultado do ensaio com água tratada no filtro 9 da ETA-RD. (Abertura da válvula borboleta 90°)

- Tempo gasto para abertura da válvula = 2' 50" (as células em amarelo contêm os dados medidos neste tempo)
- Área total do filtro: $A_t = 11,7 \times 10,2 = 119,34 \text{ m}^2$; Área da câmara B do filtro 9 = $4,99 \times 10,2 = 50,89 \text{ m}^2$;
- Vazão da ETA-RD = 4.238 l/s; Turbidez da água tratada no filtro limpo < 0,67; Temperatura 25° C
- Cota da passarela 1254,025 m; Cota (topo da caixa de inspeção do vertedor)=1252,116 m; Cota (vertedor)=1250,863 m;
- Medida da lâmina d'água sob o vertedor em relação ao topo da caixa de inspeção do vertedor = 1,063 m

Intervalo Δt	H na régua	ΔH	Vazão $Q_{med} = \frac{vol}{\Delta t} = \frac{A_t \cdot \Delta H}{\Delta t}$	Taxa de filtração $T = \frac{Q}{A_f}$	altura da lâmina no vertedor	cota da lâmina d'água no vertedor	cota da lâmina d'água no filtro 9	Hd
min	cm	(m)	m³/s	m³/m².dia	m	m	m	m
-	30	-	-	-	-	-	1253,73	2,676
0-1	5	0,15	0,2984	506,53	0,190	1251,053	1253,67	2,626
1-2	20	0,16	0,3182	540,30	0,190	1251,053	1253,53	2,476
2-3	36	0,19	0,3779	641,61	0,190	1251,053	1253,36	2,316
3-4	55	0,18	0,3580	607,84	0,190	1251,053	1253,18	2,126
4-5	73	0,17	0,3381	574,07	0,190	1251,053	1253,00	1,946
5-6	90	0,16	0,3182	540,30	0,190	1251,053	1252,83	1,776
6-7	106	0,15	0,2984	506,53	0,190	1251,053	1252,67	1,616
7-8	120	0,13	0,2590	439,00	0,190	1251,053	1252,53	1,476
8-9	133							

ANEXO C

**Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da
ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e
da perda de carga total em F3 e F9 para vários ângulos de
abertura da válvula borboleta.**

TABELA 1C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 20^o de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 <i>Hd</i>	Meio filtrante do FP2 <i>hL_{FP}</i>	Tubulação dos filtros 3 e 9 <i>H_{Tub} = Hd - hL_{FP2}</i>
371.53	2.59	0,41	2.18
337.76	2.57	0,37	2.20
337.76	2.38	0,37	2.01
337.60	2.60	0,37	2.23
320.87	2.28	0,35	1.93
320.87	2.18	0,35	1.83
320.72	2.50	0,35	2.15
320.72	2.40	0,35	2.05
303.98	2.09	0,33	1.75
303.98	2.00	0,33	1.66
303.83	2.31	0,33	1.98
303.83	2.22	0,33	1.89
287.09	1.91	0,32	1.59
287.09	1.82	0,32	1.51
286.96	2.14	0,32	1.82
286.96	2.05	0,32	1.74
270.20	1.74	0,30	1.44
270.20	1.66	0,30	1.36
270.08	1.97	0,30	1.68
270.08	1.89	0,30	1.60
270.08	1.81	0,30	1.52
270.08	1.73	0,30	1.44
253.20	1.65	0,28	1.37
253.20	1.58	0,28	1.30
236.43	1.58	0,26	1.32
236.43	1.51	0,26	1.25
236.38	1.50	0,26	1.24
202.65	1.44	0,22	1.22
202.65	1.38	0,22	1.16
202.62	1.43	0,22	1.21

TABELA 2C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 26⁰ de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 Hd	Meio filtrante do FP2 hL_{FP}	Tubulação dos filtros 3 e 9 $H_{Tub} = Hd - hL_{FP2}$
403,23	2,60	0,44	2,15
371,53	2,31	0,41	1,90
371,53	2,20	0,41	1,79
371,46	2,48	0,41	2,07
371,46	2,34	0,41	1,93
337,76	2,09	0,37	1,72
337,76	1,99	0,37	1,62
337,76	1,89	0,37	1,52
337,69	2,26	0,37	1,88
337,69	2,16	0,37	1,78
303,98	1,79	0,33	1,45
303,98	1,70	0,33	1,36
303,92	2,06	0,33	1,72
303,92	1,97	0,33	1,63
303,92	1,88	0,33	1,54
270,24	1,61	0,30	1,31
270,24	1,53	0,30	1,23
270,15	1,79	0,30	1,49
236,43	1,45	0,26	1,19
236,30	1,71	0,26	1,45

TABELA 3C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 30° de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 H_d	Meio filtrante do FP2 hL_{FP}	Tubulação dos filtros 3 e 9 $H_{Tub} = H_d - hL_{FP2}$
439,08	2,48	0,48	2,00
439,08	2,35	0,48	1,87
439,08	2,22	0,48	1,74
438,99	2,42	0,48	1,93
438,99	2,30	0,48	1,81
405,31	2,10	0,45	1,65
405,23	2,18	0,45	1,73
405,23	2,07	0,45	1,62
371,53	1,99	0,41	1,58
371,45	1,96	0,41	1,55
371,45	1,86	0,41	1,45
337,75	1,89	0,37	1,52
337,75	1,79	0,37	1,42
337,75	1,69	0,37	1,32
337,68	1,77	0,37	1,39
303,98	1,60	0,33	1,26
303,92	1,68	0,33	1,34
303,92	1,60	0,33	1,26
270,20	1,52	0,30	1,22
270,15	1,52	0,30	1,22

TABELA 4C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 36⁰ de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 H_d	Meio filtrante do FP2 hL_{FP}	Tubulação dos filtros 3 e 9 $H_{Tub} = H_d - hL_{FP2}$
540,41	2,37	0,59	1,78
540,30	2,38	0,59	1,78
506,63	2,21	0,56	1,66
506,53	2,23	0,56	1,67
506,53	2,08	0,56	1,52
472,83	2,06	0,52	1,54
472,76	1,93	0,52	1,41
439,08	1,92	0,48	1,44
438,99	1,79	0,48	1,31
405,31	1,79	0,45	1,35
405,23	1,66	0,45	1,21
371,53	1,67	0,41	1,26
371,46	1,54	0,41	1,13
337,75	1,56	0,37	1,19
337,75	1,46	0,37	1,09
337,68	1,43	0,37	1,06

TABELA 5C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 50^o de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m/m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 Hd	Meio filtrante do FP2 hL_{FP}	Tubulação dos filtros 3 e 9 $H_{Tub} = Hd - hL_{FP2}$
574,07	2,32	0,63	1,69
540,41	2,32	0,59	1,73
540,41	2,16	0,59	1,57
540,30	2,15	0,59	1,56
506,63	2,00	0,56	1,45
506,53	1,99	0,56	1,44
472,83	1,85	0,52	1,33
472,74	1,83	0,52	1,31
439,08	1,71	0,48	1,23
438,99	1,70	0,48	1,22
405,31	1,58	0,45	1,14
405,25	1,57	0,45	1,13
371,53	1,46	0,41	1,05
371,46	1,43	0,41	1,02

TABELA 6C - Cálculo da perda de carga turbulenta nos filtros da ETA-RD a partir da perda de carga meio filtrante do FP2 e da perda de carga total em F3 e F9 para cada taxa de filtração obtida nos ensaios, com 90° de abertura da válvula borboleta.

Taxa de filtração (m/m ² .dia)	Perda de carga (m)		
	Total nos filtros 3 e 9 Hd	Meio filtrante do FP2 hL_{FP}	Tubulação dos filtros 3 e 9 $H_{Tub} = Hd - hL_{FP2}$
607,96	2,11	0,67	1,44
607,84	2,13	0,67	1,46
574,18	1,93	0,63	1,30
574,07	1,95	0,63	1,31
540,41	1,76	0,59	1,17
540,30	1,78	0,59	1,18
506,63	1,60	0,56	1,05
506,53	1,62	0,56	1,06
439,08	1,45	0,48	0,97
439,00	1,48	0,48	0,99

ANEXO D

**Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação
em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos
ensaios realizados nos filtros 3 e 9 para as várias aberturas da
válvula borboleta investigadas**

TABELA 1D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 20^0 .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20^0 <i>Eq(5.25)</i> H_v (m)	Tubulação em geral (H_t) $H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
371,53	1,52	0,93
337,76	1,26	0,87
337,76	1,26	0,87
337,60	1,26	0,87
320,87	1,14	0,83
320,87	1,14	0,83
320,72	1,13	0,83
320,72	1,13	0,83
303,98	1,02	0,80
303,98	1,02	0,80
303,83	1,02	0,80
303,83	1,02	0,80
287,09	0,91	0,76
287,09	0,91	0,76
286,96	0,91	0,76
286,96	0,91	0,76
270,20	0,81	0,72
270,20	0,81	0,72
270,08	0,80	0,72
270,08	0,80	0,72
270,08	0,80	0,72
270,08	0,80	0,72
270,08	0,80	0,72
253,20	0,71	0,67
253,20	0,71	0,67
236,43	0,62	0,63
236,43	0,62	0,63
236,38	0,62	0,63
202,65	0,45	0,54
202,65	0,45	0,54
202,62	0,45	0,54

TABELA 2D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 26^0 .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20^0	Tubulação em geral (H_t)
	$Eq(5.25)$ H_v (m)	$H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
403,23	1,36	0,91
371,53	1,16	0,85
371,53	1,16	0,85
371,46	1,16	0,85
371,46	1,16	0,85
337,76	0,96	0,79
337,76	0,96	0,79
337,76	0,96	0,79
337,69	0,96	0,79
337,69	0,96	0,79
303,98	0,78	0,71
303,98	0,78	0,71
303,92	0,78	0,71
303,92	0,78	0,71
303,92	0,78	0,71
303,92	0,78	0,71
270,24	0,61	0,64
270,24	0,61	0,64
270,15	0,61	0,63
236,43	0,47	0,55
236,30	0,47	0,55

TABELA 3D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 30^0 .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20^0 <i>Eq(5.25)</i> H_v (m)	Tubulação em geral (H_t) $H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
439,08	0,81	1,19
439,08	0,81	1,06
439,08	0,81	0,93
438,99	0,81	1,12
438,99	0,81	1,00
405,31	0,69	0,96
405,23	0,69	1,04
405,23	0,69	0,93
371,53	0,58	1,00
371,45	0,58	0,97
371,45	0,58	0,87
337,75	0,48	1,04
337,75	0,48	0,94
337,75	0,48	0,84
337,68	0,48	0,92
303,98	0,39	0,88
303,92	0,39	0,95
303,92	0,39	0,87
270,20	0,31	0,92
270,15	0,31	0,91

TABELA 4D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 36^0 .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20^0 <i>Eq(5.25)</i> H_v (m)	Tubulação em geral (H_t) $H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
540,41	0,77	1,10
540,30	0,77	1,10
506,63	0,68	1,02
506,53	0,68	1,02
506,53	0,68	1,02
472,83	0,59	0,94
472,76	0,59	0,94
439,08	0,51	0,86
438,99	0,51	0,86
405,31	0,43	0,78
405,23	0,43	0,78
371,53	0,36	0,70
371,46	0,36	0,70
337,75	0,30	0,62
337,75	0,30	0,62
337,68	0,30	0,62

TABELA 5D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 50° .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20° <i>Eq(5.25)</i> H_v (m)	Tubulação em geral (H_t) $H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
574,07	0,24	1,55
540,41	0,21	1,42
540,41	0,21	1,42
540,30	0,21	1,42
506,63	0,18	1,30
506,53	0,18	1,30
472,83	0,16	1,18
472,74	0,16	1,18
439,08	0,14	1,06
438,99	0,14	1,06
405,31	0,12	0,94
405,25	0,12	0,94
371,53	0,10	0,83
371,46	0,10	0,83

TABELA 6D - Cálculo da perda de carga na válvula borboleta e na tubulação em geral considerando-se as taxas de filtração obtidas nos ensaios nos filtros 3 e 9 com ângulo de abertura de 90° .

Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	Calculo da perda de carga (m)	
	Válvula borboleta aberta 20° <i>Eq(5.25)</i> H_v (m)	Tubulação em geral (H_t) $H_{Tub}-H_v$ H_t (m)
607,96	0,01	1,42
607,84	0,01	1,42
574,18	0,01	1,30
574,07	0,01	1,30
540,41	0,01	1,19
540,30	0,01	1,19
506,63	0,01	1,08
506,53	0,01	1,08
439,08	0,01	0,87
439,00	0,01	0,87

ANEXO E

Resultados da simulação do comportamento SFTD em computador segundo modelo matemático

TABELA E1 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=20°)

$Hd= 0,000343 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 253,03 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	313	0,106	0,00034
2	303	0,208	0,00069
3	293	0,307	0,00105
4	284	0,402	0,00142
5	274	0,494	0,00180
6	265	0,583	0,00220
7	256	0,669	0,00261
8	247	0,751	0,00304
9	238	0,830	0,00348
10	230	0,906	0,00394
11	222	0,979	0,00442
12	213	1,050	0,00492
13	206	1,117	0,00543
14	198	1,181	0,00596
$T_{max}= 313 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1.239$		$N_1 \text{ teórico} = 2,494 \text{ m}$ $N_2= 2,6 \text{ m}$ $N_2 -N_{1teórico} = 0,106 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	331	0,111	0,00034
2	320	0,219	0,00069
3	310	0,324	0,00105
4	300	0,425	0,00142
5	290	0,523	0,00180
6	280	0,617	0,00220
7	271	0,708	0,00261
8	262	0,796	0,00304
9	253	0,881	0,00348
10	244	0,962	0,00394
11	235	1,040	0,00442
12	227	1,115	0,00492
13	219	1,187	0,00543
$T_{max}= 331 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 272 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1.307$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,782 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,182 \text{ m}$	

TABELA E2 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 26°)

$Hd= 0,000281T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 253,03 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	347	0,153	0,00044
2	331	0,299	0,00090
3	315	0,438	0,00139
4	299	0,570	0,00190
5	284	0,695	0,00244
6	270	0,813	0,00301
7	256	0,924	0,00361
8	242	1,028	0,00424
9	229	1,126	0,00491
10	217	1,219	0,00562
11	205	1,305	0,00637
12	193	1,385	0,00716
13	183	1,461	0,00800
14	172	1,530	0,00889
$T_{max}= 347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1.373$		$N_1 \text{ teórico} = 2,447 \text{ m}$ $N_2= 2,6 \text{ m}$ $N_2-N_1 \text{ teórico} = 0.153 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	363	0,160	0,00044
2	346	0,313	0,00090
3	330	0,459	0,00139
4	314	0,598	0,00190
5	298	0,729	0,00244
6	283	0,853	0,00301
7	269	0,971	0,00361
8	255	1,082	0,00424
9	241	1,186	0,00491
10	228	1,284	0,00562
11	216	1,376	0,00637
12	204	1,462	0,00716
13	193	1,542	0,00800
$T_{max}= 363 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 272 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1.435$		$N_2= 2,6 \text{ m}$ $N_3= 2,751 \text{ m}$ $N_3-N_2=0.151 \text{ m}$	

TABELA E3 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 30°)

Hd=0,000214 T ^{1,5} + 0,0011 T			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração..... = 253,03 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	398	0,216	0,00054
2	371	0,417	0,00112
3	345	0,604	0,00175
4	320	0,776	0,00242
5	297	0,935	0,00315
6	274	1,080	0,00394
7	253	1,213	0,00479
8	233	1,334	0,00572
9	215	1,444	0,00672
10	197	1,543	0,00781
11	181	1,633	0,00901
12	166	1,713	0,01030
13	152	1,785	0,01172
14	139	1,849	0,01327
T _{max} =398 m³/m².dia T _{med} = 253 m³/m².dia T _{max} /T _{med} =1,574		N _I teórico =2.384 m N ₂ = 2.6 m N ₂ -N _I teórico = 0.216 m	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	413	0,224	0,00054
2	385	0,432	0,00112
3	358	0,626	0,00175
4	333	0,806	0,00242
5	308	0,972	0,00315
6	285	1,124	0,00394
7	264	1,264	0,00479
8	343	1,391	0,00572
9	224	1,506	0,00672
10	206	1,611	0,00781
11	189	1,705	0,00901
12	174	1,790	0,01030
13	159	1,866	0,01172
T _{max} = 413 m³/m².dia T _{med} = 272 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,630		N ₂ =2.6 m N ₃ = 2.716 m N ₃ -N ₂ = 0.116 m	

TABELA E4 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 36°)

$Hd= 0,000149 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 314,70 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	474	0,296	0,00062
2	428	0,563	0,00131
3	386	0,803	0,00208
4	346	1,016	0,00294
5	309	1,204	0,00389
6	276	1,369	0,00497
7	245	1,513	0,00617
8	217	1,637	0,00753
9	192	1,745	0,00907
10	170	1,837	0,01081
11	150	1,916	0,01278
12	132	1,983	0,01502
13	116	2,040	0,01757
14	102	2,088	0,02047
$T_{max}= 474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}=1,873$		$N_1 \text{ teórico} = 2,304\text{m}$ $N_2=2,6 \text{ m}$ $N_2 -N_1 \text{ teórico} =0,296 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	486	0,303	0,00062
2	440	0,578	0,00131
3	396	0,824	0,00208
4	356	1,044	0,00294
5	318	1,239	0,00389
6	294	1,410	0,00497
7	253	1,559	0,00617
8	224	1,689	0,00753
9	198	1,800	0,00907
10	175	1,896	0,01081
11	155	1,978	0,01278
12	136	2,049	0,01502
13	120	2,108	0,01757
$T_{max}=486 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}=272 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}=1,921$		$N_2=2,6 \text{ m}$ $N_3=2,680 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,080 \text{ m}$	

TABELA E5 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 30°)

Hd=0,000214 T ^{1,5} + 0,0011 T			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 314,70 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25,00• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	406	0,121	0,00030
2	390	0,237	0,00061
3	375	0,349	0,00093
4	360	0,456	0,00126
5	346	0,558	0,00161
6	332	0,656	0,00198
7	318	0,750	0,00236
8	305	0,840	0,00275
9	292	0,925	0,00317
10	280	1,007	0,00360
11	268	1,084	0,00405
12	256	1,157	0,00452
13	245	1,227	0,00501
14	234	1,293	0,00553
T _{max} = 406 m³/m².dia T _{med} =315 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,289		N ₁ teórico =2.479 m N ₂ =2.6 m N ₂ -N ₁ teórico = 0.121m	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	426	0,127	0,00030
2	411	0,249	0,00061
3	395	0,367	0,00093
4	380	0,480	0,00126
5	365	0,589	0,00161
6	350	0,693	0,00198
7	336	0,792	0,00236
8	322	0,888	0,00275
9	309	0,979	0,00317
10	296	1,065	0,00360
11	283	1,148	0,00405
12	271	1,227	0,00452
13	259	1,301	0,00501
T _{max} = 426 m³/m².dia T _{med} = 339 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,355		N ₂ = 2.6 m N ₃ = 2,765 m N ₃ -N ₂ = 0,165 m	

TABELA E6 -: Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 36°)

$Hd= 0,000149 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 314,70 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25,00• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	484	0,199	0,00041
2	452	0,385	0,00085
3	422	0,559	0,00132
4	393	0,720	0,00183
5	366	0,869	0,00237
6	340	1,007	0,00296
7	316	1,133	0,00359
8	292	1,249	0,00427
9	271	1,355	0,00501
10	250	1,452	0,00580
11	231	1,539	0,00667
12	213	1,619	0,00760
13	196	1,691	0,00862
14	181	1,756	0,00972
$T_{max}= 484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,537$		$N_1 \text{ teórico} = 2,401 \text{ m}$ $N_2= 2,6\text{m}$ $N_2-N_1 \text{ teórico} = 0,199 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	502	0,207	0,00041
2	470	0,400	0,00085
3	439	0,581	0,00132
4	409	0,749	0,00183
5	381	0,905	0,00237
6	355	1,050	0,00296
7	329	1,182	0,00359
8	305	1,304	0,00427
9	283	1,416	0,00501
10	261	1,518	0,00580
11	242	1,610	0,00667
12	223	1,694	0,00760
13	205	1,771	0,00862
$T_{max}=502 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}=339 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,595$		$N_2=2,6 \text{ m}$ $N_3= 2,719 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,119 \text{ m}$	

TABELA E7 -: Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 50°)

$Hd=0,00013 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,1(m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 314,70 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25,00• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	515	0,227	0,00044
2	477	0,438	0,00092
3	440	0,631	0,00143
4	405	0,809	0,00200
5	373	0,971	0,00261
6	342	1,118	0,00327
7	313	1,251	0,00400
8	286	1,371	0,00479
9	261	1,479	0,00566
10	238	1,576	0,00661
11	217	1,662	0,00766
12	197	1,739	0,00882
13	179	1,807	0,01008
14	163	1,867	0,01148
$T_{max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,638$		$N_1 \text{ teórico} = 2,373\text{m}$ $N_2= 2,6\text{m}$ $N_2-N_1 \text{ teórico} = 0,227 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	533	0,235	0,00044
2	493	0,453	0,00092
3	456	0,654	0,00143
4	420	0,838	0,00200
5	387	1,007	0,00261
6	355	1,161	0,00327
7	325	1,300	0,00400
8	298	1,426	0,00479
9	272	1,539	0,00566
10	248	1,640	0,00661
11	226	1,731	0,00766
12	205	1,811	0,00882
13	187	1,883	0,01008
$T_{max}=533 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}=339 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}=1,693$		$N_2=2,6\text{m}$ $N_3=2,704 \text{ m}$ $N_3-N_2=0,104 \text{ m}$	

TABELA E8 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb = 90°)

$$Hd = 0,0001 T^{1,5} + 0,0011 T$$

- Vazão.....= 5,1(m³/s)
- Número de unidades filtrantes= 14
- Taxa média de filtração.....= 314,70 (m³/m².dia)
- Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m
- Área total de armazenamento (f(A)).....= 25,00
- Operação de lavagem.....= 20 min

TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO

FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	580	0,280	0,00048
2	525	0,533	0,00102
3	474	0,761	0,00161
4	427	0,965	0,00226
5	383	1,145	0,00299
6	343	1,305	0,00381
7	306	1,445	0,00472
8	272	1,567	0,00575
9	242	1,673	0,00691
10	215	1,764	0,00821
11	190	1,843	0,00968
12	169	1,911	0,01134
13	149	1,970	0,01322
14	132	2,020	0,01534
T _{max} = 580 m³/m².dia T _{med} = 315 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,844		N ₁ teórico = 2,320m N ₂ = 2,6m N ₂ - N ₁ teórico = 0,28m	

TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM

FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	596	0,287	0,00048
2	540	0,548	0,00102
3	488	0,783	0,00161
4	439	0,993	0,00226
5	394	1,180	0,00299
6	353	1,345	0,00381
7	315	1,490	0,00472
8	281	1,617	0,00575
9	250	1,727	0,00691
10	222	1,822	0,00821
11	197	1,905	0,00968
12	174	1,976	0,01134
13	154	2,038	0,01322
T _{max} = 596 m³/m².dia T _{med} = 339 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,893		N ₂ = 2,6m N ₃ = 2,682 m N ₃ - N ₂ = 0,082 m	

Anexo F

Ensaaios na IP com água coagulada na ETA-RD com taxa máxima de filtração, referentes às duas vazões mais frequentes na ETA-RD, conforme os dados obtidos pelo modelo matemático

TABELA F1 - Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}} = 1,54$. Turbidez da água bruta durante o ensaio (5,39 à 6,04 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$. (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=36^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap uH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	0,99	2	6,71	1700	3,020	3,050	3,120	3,170	3,200	3,250	3,310	3,480	3,600	2,062
10	2,31	5	6,73	1700	3,010	3,040	3,110	3,160	3,195	3,240	3,300	3,470	3,590	2,062
15	2,04	4	6,85	1680	3,005	3,035	3,100	3,150	3,180	3,225	3,285	3,460	3,575	2,062
20	1,84	4	6,87	1660	3,000	3,025	3,090	3,135	3,170	3,215	3,270	3,445	3,555	2,062
25	1,69	4	6,85	1660	2,980	3,010	3,075	3,120	3,155	3,200	3,260	3,430	3,555	2,062
30	1,55	3	6,85	1660	2,975	3,000	3,060	3,110	3,140	3,190	3,250	3,420	3,545	2,062
45	1,38	2	6,87	1640	2,950	2,980	3,040	3,090	3,120	3,145	3,220	3,395	3,530	2,062
60	1,30	2	6,85	1640	2,930	2,950	3,020	3,050	3,090	3,130	3,190	3,370	3,515	2,062
75	1,14	2	7,17	1620	2,900	2,930	2,990	3,040	3,070	3,115	3,170	3,350	3,515	2,062
90	1,12	2	7,01	1620	2,880	2,910	2,970	3,020	3,050	3,090	3,150	3,330	3,515	2,062
120	0,94	1	7,09	1600	2,845	2,870	2,930	2,975	3,010	3,050	3,110	3,290	3,495	2,062
150	0,96	1	6,49	1600	2,825	2,850	2,910	2,955	2,985	3,030	3,090	3,280	3,495	2,062
180	0,90	1	6,89	1580	2,800	2,820	2,885	2,925	2,960	3,000	3,055	3,250	3,515	2,062
210	0,90	1	7,06	1580	2,770	2,800	2,860	2,900	2,935	2,980	3,045	3,225	3,530	2,062
240	0,82	1	6,76	1580	2,740	2,755	2,820	2,870	2,900	2,945	3,000	3,205	3,550	2,062
270	1,00	1	6,67	1560	2,715	2,740	2,800	2,845	2,870	2,915	2,975	3,180	3,585	2,062
285	1,12	1	6,97	1540	2,700	2,725	2,785	2,830	2,860	2,900	2,960	3,170	3,600	2,062
290	1,18	1	7,16	1540										
295	1,33	1	7,10	1540										
300	1,33	1	7,10	1540	2,690	2,715	2,775	2,815	2,845	2,890	2,945	3,160	3,610	2,062
305	1,30	1	7,16	1540										
310	1,34	1	7,17	1540										
315	1,34	1	7,16	1540	2,680	2,705	2,765	2,800	2,840	2,880	2,940	3,155	3,635	2,062
* $N_{1\text{teórico}}=2,401 \text{ m}$ $\Delta H=0$		* $N_{1\text{exp real}}=2,46 \text{ m}$ $\Delta H_{\text{exp}}=0,059$		* $N_{1\text{real mod}}=2,419$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$			*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=120 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=3\text{h e } 15'$							

Data: 21/09/2000

TABELA F2 - Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ referente à $T_{\text{med}} = 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}} = 1,87$. Turbidez da água bruta durante o ensaio ($4,61$ à $5,14 \text{ uT}$); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio $= 1,6 \text{ mg/l}$. (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=36^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		PH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap uH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,92	4	7,42	1680	3,015	3,040	3,105	3,155	3,200	3,255	3,320	3,500	3,575	2,062
10	2,13	4	7,23	1660	3,010	3,030	3,100	3,150	3,185	3,240	3,310	3,480	3,565	2,062
15	1,48	4	7,25	1660	2,995	3,020	3,080	3,130	3,170	3,230	3,295	3,460	3,550	2,062
20	2,02	3	7,25	1660	2,985	3,010	3,070	3,120	3,160	3,220	3,285	3,450	3,545	2,062
25	1,09	2	7,18	1660	2,975	3,000	3,060	3,110	3,150	3,205	3,270	3,440	3,535	2,062
30	1,07	1	7,17	1640	2,965	2,990	3,050	3,100	3,140	3,195	3,260	3,430	3,530	2,062
45	0,76	1	7,14	1630	2,940	2,960	3,025	3,060	3,110	3,165	3,230	3,405	3,515	2,062
60	0,80	1	7,14	1610	2,895	2,920	2,985	3,030	3,070	3,120	3,185	3,365	3,485	2,062
75	0,61	1	6,99	1600	2,865	2,890	2,950	2,995	3,040	3,090	3,150	3,330	3,470	2,062
90	0,54	1	7,14	1580	2,820	2,845	2,900	2,950	2,990	3,050	3,105	3,290	3,430	2,062
120	0,49	1	7,14	1570	2,740	2,765	2,820	2,865	2,900	2,955	3,020	3,200	3,390	2,062
150	0,45	1	7,15	1560	2,670	2,695	2,750	2,795	2,830	2,885	2,950	3,135	3,355	2,062
180	0,60	1	7,15	1530	2,620	2,640	2,700	2,740	2,780	2,830	2,895	3,080	3,355	2,062
210	0,69	1	7,12	1510	2,580	2,600	2,660	2,700	2,740	2,790	2,850	3,050	3,355	2,062
240	0,68	1	6,99	1500	2,560	2,580	2,635	2,680	2,715	2,765	2,830	3,045	3,360	2,062
270	0,65	1	7,04	1470	2,540	2,560	2,610	2,655	2,690	2,745	2,805	3,020	3,390	2,062
300	0,53	1	7,15	1460	2,510	2,530	2,580	2,620	2,660	2,710	2,770	2,995	3,400	2,062
330	0,55	1	7,18	1450	2,490	2,510	2,560	2,600	2,640	2,690	2,730	2,980	3,430	2,062
360	0,61	1	7,19	1450	2,460	2,480	2,540	2,570	2,610	2,660	2,720	2,960	3,445	2,062
390	0,50	1	7,16	1450	2,440	2,460	2,520	2,560	2,590	2,640	2,700	2,950	3,465	2,062
420	0,67	1	7,17	1440	2,425	2,445	2,500	2,540	2,570	2,615	2,680	2,935	3,490	2,062
450	0,49	1	7,25	1440	2,400	2,420	2,475	2,520	2,560	2,600	2,660	2,925	3,515	2,062
480	0,49	1	7,18	1420	2,410	2,430	2,485	2,530	2,560	2,605	2,670	2,945	3,540	2,062
505	0,45	1	7,07	1400	2,410	2,430	2,485	2,530	2,560	2,605	2,670	2,955	3,615	2,062
509	0,46	1	7,19	1400	2,410	2,430	2,485	2,525	2,560	2,600	2,670	2,950	3,635	2,062
* $N_{1\text{teórico}}=2,304 \text{ m}$ $\Delta H=0$		* $N_{1\text{exp real}}=2,32 \text{ m}$ $\Delta H \text{ exp}=0,016$		* $N_{1\text{real mod}}=2,32$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$		*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=150 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=5 \text{ h e } 59'$								

Data: 24/09/2000

TABELA F3 - Ensaio com a $T_{\text{máx}} = 515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}} = 1,64$. Turbidez da água bruta durante o ensaio (4,13 à 4,54 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$. (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $V_b = 50^\circ$).

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap uH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,27	2	7,74	1820	2,930	2,945	3,040	3,100	3,140	3,205	3,275	3,470	3,560	1,063
10	1,52	2	7,31	1790	2,920	2,950	3,030	3,080	3,125	3,185	3,260	3,450	3,540	1,063
15	1,47	2	7,18	1790	2,900	2,930	3,010	3,060	3,100	3,165	3,235	3,430	3,525	1,063
20	1,12	2	7,20	1790	2,880	2,915	2,990	3,050	3,090	3,150	3,220	3,410	3,510	1,063
25	0,98	2	7,22	1790	2,875	2,900	2,975	3,030	3,070	3,150	3,205	3,395	3,495	1,063
30	0,76	1	6,99	1780	2,850	2,885	2,960	3,010	3,040	3,115	3,190	3,380	3,485	1,063
45	0,65	1	6,99	1760	2,825	2,850	2,930	2,980	3,025	3,080	3,155	3,350	3,470	1,063
60	0,61	1	6,98	1740	2,795	2,825	2,900	2,950	2,995	3,050	3,125	3,320	3,450	1,063
75	0,40	1	6,97	1740	2,760	2,790	2,865	2,915	2,960	3,020	3,085	3,280	3,435	1,063
90	0,29	1	6,99	1720	2,730	2,760	2,830	2,880	2,925	2,980	3,050	3,250	3,430	1,063
120	0,29	1	6,91	1700	2,690	2,720	2,790	2,840	2,880	2,940	3,005	3,210	3,425	1,063
150	0,38	1	6,98	1690	2,650	2,680	2,750	2,800	2,840	2,900	2,965	3,170	3,427	1,063
180	0,34	1	7,01	1680	2,625	2,655	2,725	2,770	2,810	2,870	2,940	3,150	3,428	1,063
210	0,35	1	7,00	1660	2,605	2,630	2,700	2,750	2,790	2,845	2,910	3,130	3,430	1,063
240	0,39	1	7,08	1620	2,570	2,600	2,670	2,715	2,755	2,815	2,880	3,100	3,440	1,063
270	0,29	1	7,07	1600	2,550	2,580	2,645	2,690	2,730	2,785	2,855	3,080	3,445	1,063
300	0,32	1	6,93	1600	2,530	2,550	2,620	2,660	2,700	2,760	2,825	3,060	3,450	1,063
330	0,34	1	6,94	1600	2,495	2,520	2,580	2,630	2,665	2,720	2,790	3,030	3,455	1,063
360	0,33	1	7,08	1580	2,470	2,495	2,560	2,600	2,640	2,695	2,765	3,010	3,460	1,063
390	0,47	1	7,11	1560	2,445	2,475	2,535	2,580	2,615	2,670	2,740	2,995	3,480	1,063
420	0,26	1	7,10	1540	2,435	2,460	2,525	2,570	2,605	2,660	2,730	2,990	3,500	1,063
450	0,35	1	7,08	1540	2,420	2,445	2,510	2,550	2,590	2,650	2,710	2,985	3,505	1,063
480	0,36	1	7,09	1520	2,375	2,400	2,460	2,505	2,540	2,590	2,660	2,940	3,510	1,063
510	0,26	1	7,05	1500	2,330	2,355	2,405	2,455	2,495	2,550	2,610	2,895	3,515	1,063
540	0,29	1	7,02	1480	2,300	2,325	2,385	2,425	2,460	2,515	2,575	2,870	3,510	1,063
600	0,34	1	7,11	1480	2,240	2,270	2,340	2,380	2,415	2,470	2,540	2,840	3,540	1,063
660	0,31	1	7,08	1460	2,220	2,240	2,300	2,340	2,370	2,425	2,490	2,820	3,585	1,063
690	0,32	1	7,05	1440	2,200	2,220	2,280	2,315	2,350	2,400	2,470	2,810	3,635	1,063
* $N_{\text{teórico}} = 2,373 \text{ m}$ $\Delta H = 0$					* $N_{\text{exp real}} = 2,39 \text{ m}$ $\Delta H_{\text{exp}} = 0,017$					* $N_{\text{real mod}} = 2,391$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$				
										*Tempo gasto para atingir $N_{\text{exp real}} = 120 \text{ min}$ *Tempo para $N_{\text{exp real}}$ chegar a $N_2 = 9 \text{ h e } 30'$				

Data: 29/09/2000

TABELA F4 - Ensaio com a $T_{\max} = 580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\max}/T_{\text{med}} = 1,84$. Turbidez da água bruta durante o ensaio ($3,57$ à $5,44 \text{ uT}$); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio $= 1,6 \text{ mg/l}$. (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=90^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap UH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	2,88	6	7,57	2050	2,745	2,775	2,890	2,975	3,050	3,110	3,190	3,410	3,550	1,063
10	3,31	6	7,34	2050	2,740	2,770	2,885	2,960	3,020	3,095	3,175	3,390	3,530	1,063
15	2,24	5	7,41	2040	2,740	2,770	2,885	2,955	3,015	3,085	3,165	3,380	3,515	1,063
20	1,96	5	7,33	2040	2,740	2,765	2,875	2,950	3,001	3,075	3,150	3,370	3,505	1,063
25	1,97	5	7,32	2030	2,735	2,755	2,870	2,940	2,995	3,060	3,140	3,360	3,500	1,063
30	1,64	5	7,30	2030	2,725	2,750	2,860	2,930	2,985	3,050	3,130	3,350	3,490	1,063
45	1,22	3	7,20	2020	2,705	2,730	2,840	2,905	2,960	3,035	3,100	3,325	3,470	1,063
60	1,16	2	7,28	2010	2,685	2,705	2,815	2,875	2,930	2,995	3,070	3,295	3,450	1,063
75	0,97	1	7,22	2010	2,655	2,675	2,785	2,850	2,895	2,960	3,050	3,270	3,440	1,063
90	0,92	1	7,24	2000	2,630	2,650	2,760	2,820	2,870	2,930	3,010	3,240	3,425	1,063
120	0,81	1	7,24	2000	2,590	2,610	2,720	2,780	2,830	2,890	2,970	3,210	3,420	1,063
150	0,73	1	7,22	1980	2,550	2,570	2,675	2,735	2,780	2,845	2,925	3,175	3,415	1,063
180	0,80	1	7,16	1980	2,500	2,520	2,620	2,680	2,720	2,795	2,870	3,130	3,400	1,063
210	0,68	1	7,25	1960	2,450	2,470	2,570	2,630	2,675	2,740	2,820	3,080	3,385	1,063
240	0,56	1	7,24	1860	2,410	2,430	2,530	2,585	2,630	2,695	2,770	3,050	3,39	1,063
270	0,44	1	7,23	1820	2,370	2,385	2,482	2,540	2,580	2,645	2,725	3,000	3,405	1,063
300	0,36	1	7,28	1780	2,345	2,360	2,460	2,515	2,560	2,620	2,700	2,985	3,430	1,063
330	0,46	1	7,27	1780	2,330	2,345	2,440	2,495	2,540	2,600	2,680	2,980	3,475	1,063
360	0,39	1	7,12	1780	2,290	2,310	2,405	2,460	2,505	2,560	2,640	2,950	3,480	1,063
390	0,36	1	7,07	1760	2,265	2,280	2,375	2,430	2,475	2,540	2,610	2,930	3,520	1,063
420	0,33	1	7,15	1740	2,250	2,260	2,360	2,410	2,455	2,520	2,595	2,920	3,550	1,063
450	0,34	1	7,12	1720	2,230	2,245	2,335	2,390	2,430	2,495	2,570	2,910	3,580	1,063
480	0,35	1	7,11	1720	2,210	2,225	2,320	2,375	2,415	2,475	2,555	2,905	3,620	1,063
484	0,32	1	7,21	1720	2,210	2,225	2,320	2,370	2,415	2,475	2,555	2,905	3,635	1,063

* $N_{\text{teorico}} = 2,32 \text{ m}$

* $N_{\text{teorico}} = 2,35 \text{ m}$

* $N_{\text{teorico}} = 2,329$

*Tempo gasto para atingir $N_{\text{teorico}} = 210 \text{ min}$

*Tempo para N_{teorico} chegar a $N_c = 4 \text{ h e } 34'$

Data: 04/10/2000

TABELA F5 - Ensaio com a $T_{\max} = 347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}} = 253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\max}/T_{\text{med}} = 1,37$. Turbidez da água bruta durante o ensaio (3,10 à $4,20 \text{ uT}$); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$. (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=26^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap UH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,76	3	7,43	1300	3,065	3,095	3,160	3,220	3,265	3,330	3,395	3,525	3,590	1,060
10	1,55	3	7,13	1280	3,060	3,090	3,155	3,210	3,260	3,325	3,385	3,515	3,575	1,060
15	1,61	3	7,23	1270	3,055	3,085	3,150	3,205	3,250	3,315	3,375	3,505	3,570	1,060
20	1,17	2	7,27	1270	3,050	3,080	3,145	3,200	3,245	3,305	3,370	3,500	3,565	1,060
25	1,12	2	7,21	1260	3,045	3,075	3,140	3,195	3,240	3,300	3,360	3,490	3,555	1,060
30	1,01	1	7,27	1260	3,040	3,060	3,130	3,185	3,230	3,290	3,350	3,480	3,550	1,060
45	0,94	1	7,16	1240	3,035	3,050	3,115	3,170	3,205	3,270	3,330	3,460	3,535	1,060
60	0,86	1	7,20	1240	3,015	3,045	3,095	3,145	3,185	3,245	3,305	3,445	3,520	1,060
75	0,76	1	7,01	1230	2,995	3,015	3,070	3,120	3,160	3,215	3,280	3,410	3,510	1,060
90	0,81	1	7,11	1230	2,970	2,985	3,050	3,090	3,130	3,185	3,250	3,385	3,507	1,060
120	0,77	1	6,99	1220	2,890	2,910	2,965	3,010	3,040	3,105	3,170	3,300	3,504	1,060
150	0,64	1	7,20	1200	2,850	2,870	2,920	2,970	3,010	3,060	3,120	3,265	3,501	1,060
180	0,50	1	7,08	1180	2,835	2,845	2,900	2,940	2,980	3,035	3,095	3,240	3,498	1,060
210	0,43	1	7,20	1160	2,800	2,810	2,860	2,910	2,950	3,000	3,060	3,210	3,495	1,060
240	0,30	1	7,24	1160	2,770	2,790	2,840	2,885	2,920	2,980	3,050	3,190	3,496	1,060
270	0,30	1	7,19	1160	2,765	2,780	2,835	2,880	2,915	2,970	3,030	3,185	3,496	1,060
300	0,27	1	7,18	1150	2,755	2,770	2,825	2,865	2,915	2,960	3,020	3,180	3,497	1,060
330	0,30	1	7,21	1140	2,730	2,750	2,800	2,840	2,885	2,935	2,995	3,155	3,499	1,060
360	0,35	1	7,20	1130	2,715	2,735	2,785	2,830	2,865	2,920	2,980	3,145	3,500	1,060
390	0,34	1	7,20	1120	2,705	2,720	2,775	2,820	2,850	2,910	2,970	3,140	3,502	1,060
420	0,40	1	7,23	1110	2,695	2,710	2,760	2,805	2,840	2,895	2,955	3,130	3,505	1,060
450	0,31	1	7,24	1110	2,680	2,695	2,745	2,790	2,825	2,880	2,940	3,120	3,507	1,060
480	0,35	1	7,23	1080	2,665	2,680	2,730	2,775	2,810	2,865	2,930	3,115	3,510	1,060
510	0,34	1	7,21	1070	2,655	2,670	2,720	2,765	2,800	2,855	2,920	3,110	3,530	1,060
540	0,33	1	7,19	1060	2,635	2,650	2,700	2,740	2,780	2,830	2,900	3,100	3,550	1,060
570	0,39	1	7,20	1050	2,610	2,625	2,675	2,720	2,750	2,810	2,870	3,075	3,575	1,060
630	0,28	1	7,19	1040	2,565	2,580	2,630	2,710	2,740	2,782	2,830	3,050	3,625	1,060
633	0,27	1	7,22	1030	2,560	2,575	2,625	2,705	2,735	2,780	2,825	3,045	3,635	1,060
* $N_{1\text{teórico}}=2,46 \text{ m}$ $\Delta H=0$					* $N_{1\text{exp real}}=2,46 \text{ m}$ $\Delta H_{\text{exp}}=0$					* $N_{1\text{real mod}}=2,465$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$				
										*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=210 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=7 \text{ h e } 3'$				

Data: 10/10/2000

TABELA F6 - Réplica do ensaio com $T_{\max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}}=314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\max}/T_{\text{med}}=1,54$.
Turbidez da água bruta durante o ensaio (5,10 à 5,01 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio $=1,7 \text{ mg/l}$.
(curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $V_b=36^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		PH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap uH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,20	3	7,37	1700	3,035	3,060	3,140	3,180	3,220	3,270	3,330	3,490	3,600	1,060
10	2,00	5	7,32	1680	3,010	3,050	3,110	3,160	3,200	3,250	3,310	3,470	3,585	1,060
15	1,88	4	7,25	1680	3,000	3,030	3,100	3,145	3,185	3,235	3,295	3,460	3,575	1,060
20	1,70	4	7,26	1660	2,990	3,015	3,090	3,130	3,170	3,220	3,280	3,445	3,565	1,060
25	1,50	3	7,24	1660	2,970	3,000	3,080	3,120	3,160	3,210	3,270	3,430	3,555	1,060
30	1,40	3	7,25	1660	2,965	2,995	3,070	3,110	3,150	3,200	3,260	3,425	3,550	1,060
45	1,30	2	7,23	1650	2,935	2,960	3,040	3,080	3,120	3,170	3,230	3,395	3,535	1,060
60	1,00	2	7,23	1630	2,905	2,935	3,010	3,050	3,090	3,140	3,200	3,370	3,525	1,060
75	0,88	1	7,24	1620	2,880	2,910	2,985	3,025	3,060	3,115	3,175	3,345	3,515	1,060
90	0,67	1	7,25	1590	2,860	2,885	2,960	3,000	3,040	3,090	3,150	3,322	3,510	1,060
120	0,68	1	7,29	1580	2,820	2,850	2,920	2,955	3,000	3,050	3,110	3,290	3,505	1,060
150	0,78	1	7,24	1560	2,795	2,820	2,895	2,935	2,975	3,025	3,075	3,270	3,515	1,060
180	0,65	1	7,21	1530	2,765	2,790	2,865	2,905	2,945	3,000	3,060	3,245	3,528	1,060
210	0,61	1	7,24	1510	2,740	2,765	2,840	2,880	2,920	2,970	3,030	3,225	3,540	1,060
240	0,66	1	7,25	1500	2,710	2,735	2,810	2,850	2,890	2,940	3,000	3,205	3,560	1,060
270	0,68	1	7,24	1470	2,695	2,720	2,795	2,835	2,875	2,925	2,990	3,200	3,595	1,060
300	0,77	1	7,24	1460	2,680	2,705	2,780	2,820	2,860	2,910	2,975	3,195	3,625	1,060
305	0,80	1	7,25	1450	2,680	2,705	2,780	2,820	2,860	2,910	2,975	3,195	3,625	1,060
310	0,87	1	7,24	1450	2,675	2,704	2,775	2,805	2,855	2,905	2,970	3,190	3,630	1,060
313	0,87	1	7,21	1450	2,675	2,704	2,775	2,805	2,855	2,905	2,970	3,190	3,635	1,060
* $N_{\text{teórico}}=2,401 \text{ m}$ $\Delta H=0$		* $N_{\text{exp real}}=2,47 \text{ m}$ $\Delta H_{\text{exp}}=0,069$		* $N_{\text{real mod}}=2,419$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$			*Tempo gasto para atingir $N_{1 \text{ exp real}}=120 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1 \text{ exp real}}$ chegar a $N_2=3 \text{ h } 15'$							

Data: 22/09/2000

TABELA F7 - Réplica do ensaio com $T_{\text{máx}} = 474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ referente à $T_{\text{med}}=253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,87$.
 Turbidez da água bruta durante o ensaio (3,71 à 5,14 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$.
 (curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $V_b=36^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap UH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	0,86	3	7,42	1660	3,010	3,030	3,080	3,130	3,185	3,245	3,310	3,485	3,590	2,062
10	2,40	4	7,23	1650	3,005	3,025	3,075	3,120	3,170	3,230	3,300	3,465	3,570	2,062
15	1,90	4	7,25	1640	2,980	3,015	3,070	3,110	3,160	3,215	3,285	3,455	3,560	2,062
20	1,78	4	7,25	1640	2,970	3,010	3,060	3,107	3,150	3,205	3,270	3,445	3,520	2,062
25	0,87	3	7,25	1640	2,960	2,995	3,050	3,102	3,140	3,190	3,260	3,435	3,500	2,062
30	0,80	1	7,18	1630	2,950	2,985	3,040	3,080	3,130	3,180	3,255	3,405	3,490	2,062
45	0,70	1	7,17	1620	2,930	2,965	3,020	3,060	3,090	3,140	3,200	3,365	3,470	2,062
60	0,70	1	7,14	1600	2,885	2,910	2,980	3,010	3,050	3,100	3,165	3,345	3,460	2,062
75	0,57	1	7,14	1580	2,830	2,870	2,920	2,970	3,020	3,065	3,135	3,300	3,445	2,062
90	0,43	1	6,99	1580	2,800	2,830	2,880	2,940	2,990	3,030	3,100	3,260	3,430	2,062
120	0,45	1	7,14	1560	2,725	2,750	2,810	2,850	2,880	2,945	3,010	3,190	3,400	2,062
150	0,40	1	7,14	1550	2,655	2,680	2,750	2,780	2,820	2,875	2,940	3,125	3,360	2,062
180	0,52	1	7,15	1550	2,605	2,640	2,700	2,730	2,770	2,820	2,880	3,080	3,360	2,062
210	0,50	1	7,15	1520	2,570	2,605	2,655	2,690	2,730	2,770	2,830	3,035	3,375	2,062
240	0,63	1	7,12	1500	2,555	2,578	2,635	2,660	2,710	2,745	2,800	3,020	3,385	2,062
270	0,62	1	6,84	1450	2,530	2,560	2,615	2,650	2,680	2,725	2,785	3,005	3,390	2,062
300	0,48	1	7,04	1450	2,500	2,525	2,590	2,630	2,650	2,700	2,760	2,970	3,400	2,062
330	0,50	1	7,15	1430	2,480	2,515	2,570	2,600	2,630	2,680	2,720	2,960	3,420	2,062
360	0,52	1	7,18	1430	2,425	2,480	2,520	2,565	2,600	2,655	2,700	2,945	3,445	2,062
390	0,49	1	7,19	1420	2,400	2,445	2,500	2,555	2,585	2,635	2,690	2,930	3,470	2,062
420	0,60	1	7,16	1420	2,390	2,425	2,480	2,535	2,565	2,605	2,670	2,915	3,495	2,062
450	0,42	1	7,17	1420	2,380	2,410	2,460	2,520	2,550	2,605	2,655	2,900	3,520	2,062
480	0,42	1	7,25	1380	2,375	2,405	2,455	2,510	2,540	2,600	2,660	2,895	3,550	2,062
510	0,46	1	7,07	1370	2,365	2,400	2,460	2,505	2,535	2,598	2,660	2,895	3,620	2,062
524	0,40	1	7,19	1370	2,360	2,399	2,455	2,499	2,530	2,597	2,667	2,890	3,635	2,062
* $N_{1\text{teórico}}=2,304 \text{ m}$ $\Delta H=0$		* $N_{1\text{exp real}}=2,325$ $\Delta H_{\text{exp}}=0,021$		* $N_{1\text{real med}}=2,32$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$		*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=150 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=6 \text{ h } 14'$								

Data: 26/09/2000

TABELA F8 - Réplica do ensaio com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}}=314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\max}/T_{\text{med}}=1,64$.
Turbidez da água bruta durante o ensaio (3,32 à 4,13 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$.
(curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=50^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap uH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,10	2	7,16	1800	2,920	2,960	3,035	3,085	3,140	3,190	3,260	3,455	3,550	1,063
10	1,40	3	7,20	1770	2,910	2,950	3,025	3,070	3,130	3,170	3,245	3,435	3,535	1,063
15	1,38	3	7,01	1770	2,900	2,925	3,005	3,055	3,110	3,150	3,230	3,415	3,525	1,063
20	1,10	2	7,11	1770	2,875	2,910	2,990	3,040	3,090	3,140	3,210	3,395	3,505	1,063
25	0,80	2	6,99	1770	2,860	2,890	2,960	3,020	3,080	3,120	3,190	3,380	3,480	1,063
30	0,68	1	7,20	1770	2,850	2,885	2,950	3,000	3,055	3,110	3,175	3,355	3,470	1,063
45	0,62	1	7,08	1740	2,815	2,850	2,910	2,965	3,015	3,070	3,140	3,315	3,465	1,063
60	0,56	1	7,20	1740	2,780	2,830	2,888	2,940	2,980	3,045	3,110	3,308	3,440	1,063
75	0,49	1	7,24	1720	2,745	2,800	2,850	2,900	2,945	3,010	3,080	3,270	3,435	1,063
90	0,26	1	7,19	1720	2,715	2,760	2,820	2,860	2,910	2,970	3,050	3,240	3,433	1,063
120	0,32	1	7,18	1710	2,660	2,710	2,770	2,825	2,870	2,925	3,000	3,200	3,430	1,063
150	0,34	1	7,21	1710	2,620	2,660	2,730	2,795	2,835	2,890	2,950	3,170	3,430	1,063
180	0,28	1	7,20	1670	2,605	2,640	2,705	2,755	2,800	2,850	2,920	3,140	3,432	1,063
210	0,25	1	7,20	1670	2,590	2,620	2,690	2,735	2,770	2,825	2,890	3,120	3,435	1,063
240	0,27	1	7,23	1610	2,555	2,590	2,650	2,705	2,750	2,805	2,870	3,100	3,440	1,063
270	0,27	1	7,20	1590	2,530	2,550	2,625	2,670	2,715	2,770	2,840	3,070	3,443	1,063
300	0,29	1	7,20	1590	2,510	2,540	2,600	2,640	2,695	2,750	2,821	3,045	3,450	1,063
330	0,26	1	7,23	1580	2,490	2,520	2,570	2,610	2,660	2,710	2,790	3,025	3,458	1,063
360	0,29	1	7,24	1570	2,450	2,480	2,540	2,590	2,620	2,680	2,750	3,000	3,463	1,063
390	0,25	1	7,23	1540	2,430	2,460	2,520	2,570	2,610	2,650	2,730	2,980	3,500	1,063
420	0,25	1	7,21	1520	2,420	2,450	2,495	2,550	2,590	2,640	2,720	2,960	3,505	1,063
450	0,27	1	7,19	1500	2,405	2,440	2,490	2,545	2,580	2,650	2,720	2,950	3,515	1,063
480	0,28	1	7,20	1480	2,360	2,390	2,440	2,495	2,540	2,590	2,650	2,930	3,525	1,063
510	0,24	1	7,19	1480	2,320	2,340	2,390	2,460	2,490	2,550	2,600	2,880	3,520	1,063
540	0,24	1	7,22	1460	2,290	2,310	2,355	2,415	2,450	2,515	2,560	2,860	3,525	1,063
600	0,26	1	7,11	1450	2,223	2,255	2,300	2,355	2,390	2,470	2,530	2,850	3,550	1,063
660	0,29	1	7,08	1420	2,200	2,230	2,290	2,325	2,370	2,425	2,480	2,815	3,600	1,063
670	0,27	1	7,05	1420	2,202	2,230	2,285	2,320	2,375	2,420	2,470	2,810	3,635	1,063
* $N_{1\text{teórico}}=2,373 \text{ m}$ $\Delta H=0$					* $N_{1\text{exp real}}=2,395$ $\Delta H_{\text{exp}}=0,02$					* $N_{1\text{real mod}}=2,391$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$				
										*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=120 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=9 \text{ h e } 10'$				

Data: 02/10/2000

TABELA F9 - Réplica do ensaio com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}}=314,7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\max}/T_{\text{med}}=1,84$.
Turbidez da água bruta durante o ensaio (3,57 à $5,44 \text{ uT}$); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$.
(curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $Vb=90^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		PH	Vazão na saída de FP2	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap UH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	3.30	6	7.57	2070	2.760	2.789	2.900	2.990	3.070	3.125	3.210	3.425	3.560	1.063
10	3.41	6	7.34	2060	2.755	2.785	2.890	2.980	3.060	3.110	3.195	3.405	3.555	1.063
15	2.90	5	7.41	2050	2.745	2.780	2.880	2.970	3.050	3.100	3.180	3.390	3.540	1.063
20	2.50	5	7.33	2040	2.740	2.770	2.870	2.960	3.040	3.090	3.170	3.380	3.530	1.063
25	1.80	5	7.32	2030	2.735	2.765	2.865	2.950	3.030	3.080	3.160	3.370	3.520	1.063
30	1.72	4	7.30	2020	2.730	2.760	2.860	2.940	3.020	3.070	3.150	3.360	3.510	1.063
45	1.52	4	7.20	2020	2.715	2.740	2.840	2.915	2.980	3.045	3.120	3.330	3.490	1.063
60	1.20	3	7.74	2020	2.690	2.715	2.820	2.890	2.950	3.005	3.090	3.310	3.470	1.063
75	0.99	2	7.31	2010	2.665	2.695	2.790	2.860	2.925	2.980	3.070	3.290	3.460	1.063
90	0.98	2	7.18	2000	2.645	2.670	2.770	2.835	2.885	2.950	3.030	3.270	3.450	1.063
120	0.96	1	7.20	1990	2.600	2.630	2.733	2.800	2.830	2.910	2.995	3.220	3.430	1.063
150	0.84	1	7.22	1990	2.560	2.590	2.690	2.750	2.795	2.860	2.940	3.190	3.415	1.063
180	0.81	1	6.99	1980	2.510	2.540	2.635	2.690	2.735	2.800	2.890	3.150	3.405	1.063
210	0.75	1	6.99	1970	2.450	2.490	2.580	2.640	2.690	2.760	2.845	3.100	3.380	1.063
240	0.62	1	6.99	1860	2.425	2.455	2.545	2.600	2.650	2.710	2.780	3.070	3.410	1.063
270	0.68	1	6.97	1840	2.385	2.420	2.490	2.550	2.600	2.660	2.750	3.030	3.420	1.063
300	0.52	1	6.99	1810	2.350	2.380	2.475	2.520	2.580	2.640	2.720	3.010	3.450	1.063
330	0.56	1	6.91	1800	2.345	2.370	2.460	2.505	2.560	2.620	2.700	2.990	3.470	1.063
360	0.53	1	6.98	1790	2.300	2.335	2.420	2.475	2.520	2.580	2.660	2.975	3.500	1.063
390	0.60	1	7.01	1780	2.270	2.300	2.390	2.440	2.490	2.560	2.635	2.950	3.540	1.063
420	0.60	1	7.00	1760	2.265	2.290	2.370	2.420	2.470	2.540	2.620	2.945	3.580	1.063
450	0.51	1	7.08	1750	2.245	2.270	2.350	2.400	2.450	2.510	2.595	2.925	3.610	1.063
480	0.42	1	7.07	1740	2.220	2.250	2.335	2.390	2.430	2.490	2.570	2.899	3.630	1.063
498	0.45	1	7.21	1740	2.215	2.240	2.325	2.385	2.420	2.480	2.560	2.885	3.635	1.063
*N _{1teórico} =2,32 m ΔH=0		*N _{1exp real} =2,35 m ΔH exp=0,03		*N _{1real mod} =2,329 ΔH _{MACHADO}		*Tempo gasto para atingir N _{1exp real} =210 min *Tempo para N _{1exp real} chegar a N ₂ =4 h e 48'								

Data: 06/10/2000

TABELA F10 - Réplica do ensaio com $T_{\text{máx}}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, referente à $T_{\text{med}}=253,03 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (vazão de $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$); $T_{\text{máx}}/T_{\text{med}}=1,37$.
Turbidez da água bruta durante o ensaio (3,80 à 6,10 uT); Temperatura da água $\approx 26^\circ\text{C}$; Dos. sulfato de alumínio = $1,6 \text{ mg/l}$.
(curva de perda de carga total no FP2 equiparada à curva de perda de carga total referente ao ângulo de abertura da $V_b=26^\circ$)

Tempo (min)	Água filtrada		pH	Vazão na saída de FP2 (ml/10s)	LEITURAS PIEZOMÉTRICAS (m)									
	Turb UT	Cor ap UH			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
5	1,82	4	7,43	1320	3,080	3,120	3,180	3,240	3,290	3,355	3,410	3,545	3,610	1,060
10	1,71	3	7,13	1290	3,075	3,110	3,170	3,230	3,285	3,345	3,400	3,530	3,600	1,060
15	1,65	3	7,23	1280	3,065	3,100	3,160	3,215	3,280	3,335	3,390	3,515	3,580	1,060
20	1,22	3	7,27	1270	3,055	3,090	3,150	3,210	3,270	3,325	3,380	3,505	3,570	1,060
25	1,16	2	7,21	1260	3,045	3,080	3,140	3,200	3,265	3,315	3,370	3,495	3,565	1,060
30	1,10	2	7,27	1250	3,035	3,065	3,130	3,190	3,260	3,305	3,365	3,490	3,560	1,060
45	0,91	1	7,16	1250	3,025	3,050	3,117	3,170	3,220	3,290	3,350	3,480	3,550	1,060
60	0,90	1	7,20	1240	3,020	3,045	3,100	3,140	3,200	3,260	3,325	3,460	3,535	1,060
75	0,86	1	7,01	1240	2,997	3,030	3,090	3,120	3,185	3,230	3,300	3,430	3,525	1,060
90	0,85	1	7,11	1230	2,975	3,000	3,060	3,100	3,150	3,200	3,275	3,400	3,509	1,060
120	0,79	1	6,99	1230	2,905	2,930	2,980	3,010	3,060	3,110	3,195	3,335	3,506	1,060
150	0,68	1	7,20	1210	2,880	2,900	2,945	2,980	3,030	3,080	3,140	3,285	3,498	1,060
180	0,59	1	7,08	1180	2,845	2,870	2,920	2,950	3,000	3,050	3,110	3,250	3,497	1,060
210	0,48	1	7,20	1170	2,830	2,850	2,890	2,920	2,970	3,020	3,090	3,220	3,493	1,060
240	0,33	1	7,24	1170	2,800	2,820	2,870	2,895	2,950	3,000	3,060	3,200	3,495	1,060
270	0,42	1	7,19	1160	2,770	2,795	2,850	2,880	2,930	2,990	3,040	3,190	3,500	1,060
300	0,33	1	7,18	1160	2,760	2,785	2,830	2,865	2,915	2,975	3,030	3,180	3,510	1,060
330	0,38	1	7,21	1150	2,740	2,765	2,810	2,845	2,890	2,950	3,010	3,170	3,515	1,060
360	0,40	1	7,20	1140	2,730	2,750	2,795	2,835	2,880	2,930	2,990	3,150	3,520	1,060
390	0,35	1	7,20	1130	2,720	2,735	2,785	2,825	2,865	2,925	2,980	3,145	3,530	1,060
420	0,30	1	7,23	1130	2,700	2,725	2,775	2,805	2,855	2,910	2,975	3,135	3,554	1,060
450	0,39	1	7,24	1120	2,690	2,710	2,760	2,790	2,840	2,895	2,955	3,125	3,568	1,060
480	0,38	1	7,23	1100	2,680	2,695	2,745	2,775	2,830	2,880	2,945	3,110	3,580	1,060
510	0,40	1	7,21	1090	2,670	2,690	2,735	2,765	2,820	2,860	2,925	3,105	3,600	1,060
540	0,43	1	7,19	1080	2,650	2,670	2,720	2,740	2,795	2,845	2,915	3,080	3,613	1,060
570	0,43	1	7,20	1070	2,620	2,640	2,685	2,720	2,770	2,830	2,890	3,065	3,630	1,060
613	0,52	1	7,15	1070	2,610	2,630	2,660	2,700	2,760	2,810	2,870	3,050	3,635	1,060
* $N_{1\text{teórico}}=2,46 \text{ m}$ $\Delta H=0$		* $N_{1\text{exp real}}=2,46 \text{ m}$ $\Delta H_{\text{exp}}=0,039$		* $N_{1\text{real mod}}=2,465$ $\Delta H_{\text{MACHADO}}$		*Tempo gasto para atingir $N_{1\text{exp real}}=210 \text{ min}$ *Tempo para $N_{1\text{exp real}}$ chegar a $N_2=7 \text{ h e } 3'$								

Data: 12/10/2000

Anexo G

Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem, após ensaios na Instalação Piloto com taxa máxima de filtração, conforme modelo matemático

TABELA G1 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Tempo (min)	Valor registrado no hidrômetro (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	899,9	x	0
5	900,1	2,9	0,2
10	900,4	1,9	0,5
15	900,7	1,3	0,8
20	901,0	1,2	1,1
25	901,3	1,2	1,4
30	901,5	1,0	1,6

TABELA G2 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	901,5	x	0
5	901,8	1,42	0,3
10	902,1	0,98	0,6
15	902,4	0,78	0,9
20	902,7	0,70	1,2
25	903,0	0,70	1,5
30	903,3	0,51	1,8

TABELA G3 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	903,5	x	0
5	903,8	1,89	0,3
10	904,0	1,20	0,5
15	904,2	1,01	0,7
20	904,4	0,99	0,9
25	904,7	0,96	1,2
30	904,8	0,80	1,3

TABELA G4 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	906,1	x	0
5	906,3	2,2	0,2
10	906,6	0,8	0,5
15	906,9	0,7	0,8
20	907,1	0,7	1,0
25	907,4	0,5	1,3
30	907,6	0,5	1,5

TABELA G5 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	908,3	x	0
5	908,5	1,0	0,2
10	908,8	0,8	0,5
15	909,0	0,7	0,7
20	909,2	0,7	0,9
25	909,4	0,5	1,1
30	909,6	0,4	1,3

TABELA G6 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=484 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	910,0	x	0
5	910,2	2,70	0,2
10	910,5	1,80	0,5
15	910,7	1,20	0,7
20	911,0	1,19	1,0
25	911,3	1,10	1,3
30	911,5	0,95	1,5

TABELA G7 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=474 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	911,5	x	0
5	911,8	1,50	0,3
10	912,1	1,00	0,6
15	912,4	0,86	0,9
20	912,7	0,68	1,2
25	913,0	0,65	1,5
30	913,3	0,50	1,8

TABELA G8 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=515 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	903,3	x	0
5	903,6	2,00	0,3
10	903,9	1,50	0,6
15	904,2	1,02	0,9
20	904,5	0,85	1,2
25	904,8	0,76	1,5
30	905,1	0,70	1,8

TABELA G9 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=580 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m^3)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m^3)
0	905,1	x	0
5	905,4	2,3	0,3
10	905,7	1,0	0,6
15	906,0	0,8	0,9
20	906,3	0,7	1,2
25	906,6	0,6	1,5
30	906,9	0,5	1,8

TABELA G10 - Turbidez da água de lavagem e volume gasto de água para lavagem (registrado no hidrômetro), após ensaios na IP com $T_{\max}=347 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Tempo (min)	Volume de água registrado (m ³)	Turbidez da água de lavagem (uT)	volume gasto com água de lavagem (m ³)
0	906,9	x	0
5	907,2	1,35	0,3
10	907,5	0,99	0,6
15	907,8	0,86	0,9
20	908,1	0,79	1,2
25	908,4	0,56	1,5
30	908,7	0,49	1,8

ANEXO H

Resultados da simulação do comportamento SFTD em computador segundo modelo matemático para os ângulos mais adequados considerando 14 filtros em funcionamento e as vazões mais comuns da ETA-RD

TABELA H1 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=30°)

$Hd= 0,000214 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 3,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 191,31 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	407	0,399	0,00098
2	359	0,751	0,00209
3	315	1,058	0,00336
4	275	1,322	0,00481
5	239	1,547	0,00648
6	207	1,737	0,00841
7	178	1,896	0,01065
8	153	2,027	0,01325
9	131	2,135	0,01630
10	112	2,223	0,01986
11	95	2,295	0,02403
12	81	2,354	0,02894
13	69	2,401	0,03470
14	59	2,439	0,04148
$T_{max}= 407m^3/m^2.dia$ $T_{med}= 191 m^3/m^2.dia$ $T_{max}/T_{med}= 2,13$		$N_1 \text{ teórico} = 2.20 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_{1teórico}=0,40 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	414	0,406	0,00098
2	366	0,765	0,00209
3	321	1,079	0,00336
4	281	1,350	0,00481
5	244	1,581	0,00648
6	211	1,777	0,00841
7	182	1,939	0,01065
8	156	2,074	0,01325
9	134	2,185	0,01630
10	115	2,276	0,01986
11	98	2,353	0,02403
12	83	2,413	0,02894
13	71	2,462	0,03470
$T_{max}= 414 m^3/m^2.dia$ $T_{med}= 206 m^3/m^2.dia$ $T_{max}/T_{med}= 2,17$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,67 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,07 \text{ m}$	

TABELA H2 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=30°)

$Hd= 0,000214 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 253,03 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	423	0,271	0,00064
2	390	0,520	0,00133
3	359	0,749	0,00209
4	330	0,958	0,00291
5	302	1,147	0,00380
6	276	1,318	0,00478
7	251	1,472	0,00586
8	228	1,610	0,00705
9	207	1,732	0,00835
10	188	1,841	0,00979
11	170	1,937	0,01138
12	154	2,022	0,01313
13	139	2,096	0,01508
14	125	2,162	0,01724
$T_{max}= 423 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,67$		$N_1 \text{ teórico} = 2,33 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 - N_{1\text{teórico}} = 0,27\text{m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	437	0,279	0,00064
2	403	0,537	0,00133
3	371	0,774	0,00209
4	341	0,991	0,00291
5	312	1,188	0,00380
6	286	1,367	0,00478
7	261	1,527	0,00586
8	237	1,671	0,00705
9	216	1,800	0,00835
10	196	1,914	0,00979
11	177	2,014	0,01138
12	160	2,103	0,01313
13	145	2,182	0,01508
$T_{max}= 437 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 272 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,73$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,71 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,11 \text{ m}$	

TABELA H3 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=30°)

$Hd= 0,000214 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração..... = 314,74 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	436	0,173	0,00040
2	415	0,337	0,00081
3	394	0,493	0,00125
4	374	0,641	0,00171
5	355	0,781	0,00220
6	336	0,913	0,00272
7	318	1,037	0,00326
8	301	1,154	0,00384
9	284	1,263	0,00444
10	268	1,365	0,00509
11	253	1,460	0,00577
12	238	1,549	0,00605
13	225	1,632	0,00727
14	211	1,709	0,00808
$T_{max}= 436 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 315 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,39$		$N_1 \text{ teórico} = 2,43 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_{1teórico} = 0,17 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	456	0,181	0,00040
2	434	0,353	0,00081
3	412	0,517	0,00125
4	392	0,672	0,00171
5	372	0,819	0,00220
6	353	0,958	0,00272
7	334	1,089	0,00326
8	316	1,213	0,00384
9	299	1,329	0,00444
10	282	1,437	0,00509
11	267	1,539	0,00577
12	251	1,634	0,00605
13	237	1,722	0,00727
$T_{max}= 456 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 339 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,45$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,76 \text{ m}$ $- N_3-N_2= 0,16 \text{ m}$	

TABELA H4 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=30°)

$Hd= 0,000214 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,3 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 327,08 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	438	0,156	0,00036
2	419	0,305	0,00073
3	400	0,447	0,00112
4	382	0,582	0,00152
5	364	0,711	0,00195
6	347	0,833	0,00240
7	331	0,949	0,00287
8	315	1,059	0,00336
9	299	1,163	0,00388
10	284	1,261	0,00443
11	270	1,353	0,00501
12	256	1,440	0,00562
13	243	1,521	0,00626
14	231	1,598	0,00693
$T_{max}= 438 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 327 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,34$		$N_1 \text{ teórico} = 2,44 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_1\text{teórico} = 0,06\text{m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	459	0,163	0,00036
2	439	0,319	0,00073
3	420	0,469	0,00112
4	401	0,611	0,00152
5	383	0,747	0,00195
6	365	0,877	0,00240
7	348	0,999	0,00287
8	332	1,116	0,00336
9	316	1,226	0,00388
10	300	1,330	0,00443
11	285	1,429	0,00501
12	271	1,521	0,00562
13	257	1,609	0,00626
$T_{max}= 459 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 352 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,40$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,77 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0.017 \text{ m}$	

TABELA H5 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=35°)

$Hd= 0,000155 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 3,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 191,31 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	473	0,483	0,00102
2	404	0,896	0,00222
3	342	1,242	0,00363
4	288	1,527	0,00530
5	240	1,758	0,00731
6	200	1,943	0,00973
7	165	2,090	0,01266
8	136	2,205	0,01621
9	112	2,294	0,02054
10	92	2,363	0,02581
11	75	2,417	0,03226
12	61	2,458	0,04015
13	40	2,490	0,04981
14	41	2,515	0,06165
$T_{max}= 473m^3/m^2.dia$ $T_{med}= 191 m^3/m^2.dia$ $T_{max}/T_{med}= 2,47$		$N_1 \text{ teórico} = 2,18 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_1\text{teórico} = 0,48m$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	479	0,489	0,00102
2	410	0,908	0,00222
3	347	1,259	0,00363
4	292	1,549	0,00530
5	244	1,785	0,00731
6	203	1,973	0,00973
7	168	2,123	0,01266
8	138	2,240	0,01621
9	114	2,333	0,02054
10	93	2,404	0,02581
11	76	2,459	0,03226
12	62	2,501	0,04015
13	51	2,533	0,04981
$T_{max}= 479 m^3/m^2.dia$ $T_{med}= 206 m^3/m^2.dia$ $T_{max}/T_{med}= 2,51$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,64 \text{ m}$ $- N_3-N_2= 0,04 \text{ m}$	

TABELA H6 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=35°)

Hd= 0,000155 T ^{1,5} + 0,0011 T			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 4,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração..... = 253,03 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	495	0,350	0,00071
2	444	0,664	0,00150
3	396	0,944	0,00238
4	352	1,189	0,00338
5	312	1,404	0,00450
6	275	1,589	0,00577
7	242	1,749	0,00722
8	213	1,886	0,00887
9	186	2,001	0,01075
10	163	2,099	0,01290
11	142	2,182	0,01537
12	124	2,251	0,01821
13	108	2,309	0,02146
14	93	2,357	0,02521
T _{max} = 495 m³/m².dia T _{med} = 253 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,96		N ₁ teórico = 2,25 m N ₂ = 2,60 m N ₂ -N ₁ teórico = 0,35m	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	506	0,358	0,00071
2	454	0,680	0,00150
3	406	0,967	0,00238
4	361	1,220	0,00338
5	320	1,441	0,00450
6	283	1,633	0,00577
7	249	1,798	0,00722
8	219	1,939	0,00887
9	192	2,059	0,01075
10	157	2,161	0,01290
11	146	2,246	0,01537
12	127	2,318	0,01821
13	111	2,380	0,02146
T _{max} = 506 m³/m².dia T _{med} = 272 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 2,00		N ₂ = 2,60 m N ₃ = 2,68 m N ₃ -N ₂ = 0,08 m	

TABELA H7 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=35°)

Hd= 0,000155 T ^{1,5} + 0,0011 T			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,1 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração.....= 314,74 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	510	0,252	0,00049
2	473	0,485	0,00103
3	437	0,701	0,00160
4	404	0,899	0,00223
5	372	1,080	0,00290
6	342	1,244	0,00364
7	314	1,394	0,00444
8	287	1,529	0,00532
9	263	1,650	0,00628
10	240	1,759	0,00733
11	219	1,857	0,00848
12	200	1,944	0,00974
13	182	2,021	0,01113
14	165	2,089	0,01265
T _{max} = 510 m³/m².dia T _{med} = 315 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,62		N ₁ teórico = 1,35 m N ₂ = 2,60 m N ₂ -N ₁ teórico = 0,25m	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	528	0,261	0,00049
2	490	0,502	0,00103
3	453	0,726	0,00160
4	419	0,932	0,00223
5	386	1,121	0,00290
6	355	1,293	0,00364
7	326	1,449	0,00444
8	299	1,591	0,00532
9	274	1,718	0,00628
10	250	1,833	0,00733
11	228	1,935	0,00848
12	208	2,026	0,00974
13	189	2,108	0,01113
T _{max} = 528 m³/m².dia T _{med} = 339 m³/m².dia T _{max} /T _{med} = 1,68		N ₂ = 2,60 m N ₃ = 2,72 m N ₃ -N ₂ = 0,12 m	

TABELA H8 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=35°)

$Hd= 0,000155 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 5,3 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 14• Taxa média de filtração..... = 327,08 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	513	0,235	0,00046
2	478	0,254	0,00095
3	445	0,657	0,00148
4	413	0,845	0,00205
5	383	1,018	0,00266
6	354	1,177	0,00332
7	327	1,322	0,00404
8	302	1,454	0,00482
9	278	1,575	0,00566
10	256	1,684	0,00658
11	235	1,782	0,00758
12	216	1,871	0,00866
13	198	1,950	0,00985
14	181	2,022	0,01114
$T_{max}= 513 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 327 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,57$		$N_1 \text{ teórico} = 2,37 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_{1teórico} = 0,23\text{m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	532	0,243	0,00046
2	496	0,471	0,00095
3	462	0,682	0,00148
4	429	0,878	0,00205
5	398	1,059	0,00266
6	369	1,225	0,00332
7	341	1,377	0,00404
8	315	1,517	0,00482
9	290	1,643	0,00566
10	267	1,758	0,00658
11	246	1,862	0,00758
12	226	1,955	0,00866
13	207	2,039	0,00985
$T_{max}= 532 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 352 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,63$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,73 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,13 \text{ m}$	

ANEXO I

Resultados da simulação do comportamento SFTD em computador segundo modelo matemático para os ângulos mais adequados considerando 7 filtros em funcionamento e a vazão no “*Horário de ponta*”

TABELA I1 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da Vb=30°)

$Hd= 0,000214 T^{1,5} + 0,0011 T$			
<ul style="list-style-type: none">• Vazão.....= 1,7 (m³/s)• Número de unidades filtrantes= 7• Taxa média de filtração.....= 209,83 (m³/m².dia)• Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m• Área total de armazenamento (f(A)).....= 25• Operação de lavagem.....= 20 min			
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	376	0,623	0,00166
2	305	1,128	0,00370
3	243	1,523	0,00627
4	191	1,823	0,00953
5	149	2,045	0,01370
6	116	2,207	0,01909
7	89	2,323	0,02610
$T_{max}= 376 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 210 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,80$		$N_1 \text{ teórico} = 1,98 \text{ m}$ $N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_2 -N_{1\text{teórico}} = 0,62 \text{ m}$	
TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM			
FILTRO	TAXA m³/m².dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	387	0,641	0,00166
2	314	1,162	0,00370
3	251	1,572	0,00627
4	198	1,885	0,00953
5	155	2,117	0,01370
6	120	2,286	0,01909
$T_{max}= 387 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{med}= 237 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ $T_{max}/T_{med}= 1,85$		$N_2= 2,60 \text{ m}$ $N_3= 2,70 \text{ m}$ $N_3-N_2= 0,10 \text{ m}$	

TABELA I2 - Resultados da simulação em computador (ângulo de abertura da $V_b=35^\circ$)

$$Hd = 0,000155 T^{1,5} + 0,0011 T$$

- Vazão.....= 1,7 (m³/s)
- Número de unidades filtrantes= 7
- Taxa média de filtração.....= 209,83 (m³/m².dia)
- Carga hidráulica disponível.....= 2,60 m
- Área total de armazenamento (f(A)).....= 25
- Operação de lavagem.....= 20 min

TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO

FILTRO	TAXA m ³ /m ² .dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	429	0,752	0,00175
2	327	1,325	0,00406
3	244	1,741	0,00714
4	179	2,031	0,01134
5	130	2,227	0,01712
6	94	2,356	0,02515
7	67	2,441	0,03635
T _{max} = 429 m ³ /m ² .dia T _{med} = 210 m ³ /m ² .dia T _{max} /T _{med} = 2,04		N ₁ teórico = 1,85 m N ₂ = 2,60 m N ₂ - N ₁ teórico = 0,75m	

TAXAS DE FILTRAÇÃO E NÍVEIS DURANTE A LAVAGEM

FILTRO	TAXA m ³ /m ² .dia	PERDA DE CARGA RET.IMP(m)	COEF.REST(d)
1	435	0,763	0,00175
2	332	1,346	0,00406
3	248	1,769	0,00714
4	182	2,065	0,01134
5	132	2,265	0,01712
6	95	2,399	0,02515
T _{max} = 435 m ³ /m ² .dia T _{med} = 237 m ³ /m ² .dia T _{max} /T _{med} = 2,07		N ₂ = 2,60 m N ₃ = 2,65 m N ₃ - N ₂ = 0,05 m	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAM WALTER WORKS ASSOCIATION. Filtration Committee report. (1984) Comparison of alternative system for controlling flow through filters. *Journal AWWA*, Denver, v.76, n.1, p.91-95, jan.
- AMITHARAJAH, A & WETSTEIN, D.P. (1980) Initial degradation of Effluent Quality, *journal AWWA*, p518-524. Sep.
- ARBOLEDA, J.V. et al. (1985) Hydraulic behavior of declining-rate filtration. *Journal AWWA*, Denver, v. 77. n.12, p.67-74, dec.
- ARBOLEDA, J.V. (1991) *Teoria Y Practica de la Purificacion del Agua*. Colômbia. ACODAL.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR 12216- *Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro.
- AZEVEDO NETTO, J.M. de (1998). *Manual de hidráulica*. 8 ed. São Paulo, Edgard Bücher.
- CLEASBY , J.L. Filter rate control without rate controllers. *Journal AWWA*, Denver, v.61,n.4,p.181-185,apr.1969.
- _____. New ideas in filter control systems. In: SYMPOSIUM ON NEW METHODS OF WATER TREATMENT, 1972, Asuncion: CEPIS/OPS/OMS, 1972a.
- _____. Case history V: variable declining rate filtration. In: SYMPOSIUM ON NEW METHODS OF WATER TREATMENT, 1972, Asuncion. Anais... Asuncion: CEPIS/OPS/OMS, 1972b.
- CLEASBY , J.L. & DI BERNARDO, L. (1980) Hydraulic considerations in declining-rate filtration. *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, New York, v.106, n.EE6, p.1043-1055, dec.
- CLEASBY , J.L. (1989) Declining rate filtration. *Fluid/Particle separation Journal* , v.2, n.1, p.1-4, mar.

- CORNWELL, D.A et al. (1984) Declining-rate filters: regulatory aspects and operating results. *Journal AWWA*, Denver, v.76, n.12, p.55-61, dec.
- DI BERNARDO, L. (1985) Proposição de um modelo matemático para projeto de sistemas de filtração com taxa declinante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 13°. , Maceió, 1985. *Anais*. Alagoas, ABES.
- _____. (1986a) A rational method to the design of declining-rate filters. In: WORLD FILTRATION CONGRESS IV, *Anais*, Ostend, apr.
- DI BERNARDO, L. (1986b) Hidráulica da filtração com taxa declinante . *Revista DAE*, São Paulo, v.46, n.146, p.259-267, set.
- _____. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 1.ed. Rio de Janeiro, ABES.
- DI BERNARDO, L & CLEASBY J.L (1980) Declining-rate versus constant-rate filtration, *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, New York, v.106, n.EE6, p.1023-1041, dec.
- DI BERNARDO, L & TEIXEIRA, B.A.N. (1992) Previsão da duração da carreira de filtração em sistemas de filtração com taxa declinante. In: XXIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA y AMBIENTAL, *Anais*, Havana, nov.
- FRANCISCO, W. (1995). *Estatística básica*. 2 ed. São Paulo, UNIMEP.
- GABRIEL, J.C (2000). *Proposição de novo método gráfico e modelo matemático para determinação das condições de funcionamento de sistemas de filtração rápida com taxa declinante*. Campinas. 144 p. Tese (mestrado)- Faculdade de engenharia civil, UNICAMP.
- IVES, K.J. & GREGORY, J (1969) basic concepts of filtration proceedings of the society for wather treatment and examination v.16, part.3, p.147-169, England.
- MENDES, C.G.M. (1999) Solução gráfica alternativa para determinação de taxas de filtração e níveis de água em sistemas de taxas de filtração e níveis de água em sistemas de filtração com taxa declinante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20°. , Rio de Janeiro, 1999. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES.
- MACHADO, R. (1995). *Proposição de modelação matemática para sistemas de filtração com taxa declinante variável incluindo armazenamento a montante dos filtros*. São Carlos. v.1, 103 p. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PREZOTTI, J.C.S (1991). *Influência da taxa de filtração no desempenho de filtros rápidos e areia uniforme*. São Carlos. 186 p. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PROJETO EXECUTIVO DE AMPLIAÇÃO E MELHORIAS DA ETA-RD (1992)-
v. 2 tomo 1-Memorias. Companhia de Água e Esgoto-CAESB.

PROJETO EXECUTIVO DE AMPLIAÇÃO E MELHORIAS DA ETA-RD (1993)
v. 3 tomo 1-Memorias. Companhia de Água e Esgoto-CAESB.

SOUZA, P.R (1990). *Influência do posicionamento do vertedor de saída nos sistemas de filtração com taxa declinante e taxa constante com nível variável*. São Carlos. v.1, 253 p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TEIXEIRA, B.A.N (1991). *Proposição de um método para obtenção e operação de sistemas de filtração com taxa decliante*. São Carlos 208 p. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VIANNA, M.R. (1997). *Hidráulica Aplicada às estações de tratamento de água*. 3 ed. Belo Horizonte, Imprimatur.