

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR EM
DIFERENTES MEIOS SUPORTE PLÁSTICOS

Ana Silvia Pereira Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA EM ENGENHARIA
CIVIL

Aprovada por:

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Isaac Volschan Jr, D.Sc.

Prof. Eduardo Pacheco Jordão, Dr.Eng.

Prof. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Ph.D..

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2005

PEREIRA SANTOS, ANA SILVIA

Avaliação de Desempenho de um Filtro
Biológico Percolador em Diferentes Meios
Suporte Plásticos [Rio de Janeiro] 2005

IX, 81p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M. Sc., Engenharia Civil, 2005)

Dissertação – Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Tratamento de Esgotos Domésticos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Que Deus continue a iluminar-me...

Ao professor Isaac Volschan Júnior, pela orientação e amizade que conseguimos construir em meio a tantos desencontros que sempre acompanham a busca pelo título de Mestre, valeu Isaac.

Ao professor José Paulo Soares de Azevedo, por permitir que isso tudo se realizasse, aceitando orientar-me e sempre me fornecendo subsídios para o desenvolvimento do meu trabalho. Zé Paulo, você foi essencial.

Ao professor Eduardo Pacheco Jordão por ser professor, chefe, “orientador”, pai e amigo, em todos os momentos que de você precisei, sem me negar uma vez sequer, uma colaboração. Obrigada mesmo.

Aos demais professores do DRHIMA e da Área de Recursos Hídricos da COPPE e funcionários, em especial Vaninha, Ronildinha e Raulzito, pelo apoio e contribuição.

Aos técnicos do laboratório... Sem vocês nada disso estaria acontecendo. Valeu Crinstina, Darlize e Cláudia.

Às meninas do CETE-UFRJ, pelo companherismo em todos os momentos e colaboração em todos os sentidos. Especialmente Iene e Betina, valeu por tudo, amo vocês.

Ao Compadre Paulinho e ao amigo Marcelo, operadores do CETE Poli-UFRJ, pela mão estendida sempre, pelo carinho e pela amizade que construímos durante esse tempo.

Aos bolsistas de iniciação científica, Aline, Mônica, Matheus, Gustavo e Otávio, que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho

Aos colegas de mestrado, em especial Martinha, Muri e Carlinhos, pela convivência tão sadia e tão gostosa, regada a estudos que varavam madrugada e também pelos momentos de lazer. Obrigada... Vocês se tornaram grandes amigos.

À Mamãe, Papai e Jay, por uma existência com amor. Agradeço muito a vocês por me apoiarem sempre, acreditando em mim. Vocês são reponsáveis por tudo que sou hoje. Obrigada, por mesmo de longe, fazerem parte de minha vida de maneira tão intensa.

Ao Rafa, pelo amor, carinho e compreensão. Você foi fundamental em todos os momentos dessa trajetória. Obrigada por tudo e por estar sempre ao meu lado, somando momentos felizes, e compartilhando momentos difíceis. Te amo muito!

À “Pereirada”, simplesmente por existir. Valeu vovô Custódio e vovó Dulce por construirem essa família da qual tanto me orgulho. Amo muito todos vocês “Pereirada e Peregrados”. Sem vocês meu chão não existiria.

À Dudu, Lil, Lu, Ju, Monquinha e Kaka, constituintes da Família ACMME, por essa amizade maravilhosa, repleta de boas energias e sinceridade, que construímos ao longo de bem vividos 18 anos.

Às queridas amigas da “Quinta Feliz”, Kate, Ana e Iis, por incentivarem sempre, com muito carinho e permitirem momentos fantásticos nas nossas alegres “Quintas Felizes”. Valeu, vocês são demais!

Mimi, pra você amiga, nem sei o que dizer. Você foi amiga, pai, mãe... Você é aquela amiga que escolhi como irmã. Valeu pela convivência maravilhosa que tivemos nesses dois anos e meio. Vou sentir muita saudade desse tempo.

Aos meus sogros, Leda e Viana que me incorporaram à família como filha.

Ao meus queridos amigos, professores da UFMG, Carlos Chernicharo e Marcos von Sperling, por apostarem em mim, dando-me a força inicial. Por incentivo de vocês escolhi a área de saneamento. Obrigada por clarear meus objetivos.

Às empresas AMBIO e Veolia/TRA pelo fornecimento dos meios suporte utilizados na pesquisa.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado e ao PROSAB e ao CT-Hidro, por permitirem o desenvolvimento dessa pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

AValiação de desempenho de um filtro biológico percolador em diferentes meios suporte plásticos

Ana Silvia Pereira Santos

Agosto/2005

Orientadores: Isaac Volschan Júnior

José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho apresenta o estudo de um filtro biológico percolador, como tecnologia de tratamento de esgotos, utilizando dois diferentes meios suporte plásticos (anéis randômicos e bloco *cross flow*) segundo três diferentes cargas hidráulicas ($40\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e $80\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) e orgânicas ($0,9\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$, $1,5\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$ e $2,1\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$). A pesquisa foi realizada em escala real, para até 400 habitantes, com o esgoto gerado no Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Os resultados foram analisados em função dos parâmetros DQO, DBO e SST, segundo suas concentrações médias finais e em relação aos padrões indicados nas legislações ambientais vigentes nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TRICKLING FILTER PERFORMANCE AVALIATION USING DIFERENT
PLASTIC MEDIAS

Ana Silvia Pereira Santos

August/2005

Advisors: Isaac Volschan Júnior

José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

This work presents a study of a trickling filter, as a sewage treatment technology, in which two different plastic media (random and modular cross flow) have been used. To each plastic media were used three different hydraulic rates ($40\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e $80\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) and three organic rates ($0,9\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$, $1,5\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$ e $2,1\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$). The research was carried out in real scale, for 400 habitants, and the sewage used was generated at Universidade Federal do Rio de Janeiro. The results were analyzed based on COD, BOD and SS parameters, according to its final average concentrations; and also in accordance with the environmental standards of Rio de Janeiro, Minas Gerais and São Paulo states.

ABREVIATURAS

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo
CETE-UFRJ	Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Comissão de Política Ambiental de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/l)
DQO	Demanda Química de Oxigênio (mg/l)
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FBP	Filtro Biológico Percolador
FBP's	Filtros Biológicos Percoladores
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente do Rio de Janeiro
K	Coeficiente de remoção de DBO para o critério de Eckenfelder
LEMA	Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da UFRJ
Mín.	Mínimo
Máx.	Máximo
NRC	National Research Council
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PVC	Poli Vinil Clorado
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SLAP	Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento
SSF	Sólidos Suspensos Fixos (mg/l)
SST	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis (mg/l)
TAO	Taxa de Aplicação Orgânica (kg DBO/m ³ .d)
TAS	Taxa de Aplicação Superficial (m ³ /m ² .d)
UASB	Up flow Anaerobic Sludge Blanket
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VFC	Vertical Flow Corrugated
VSC	Vertical Semi Corrugated
XF	Cross Flow

ÍNDICE

<u>1. INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
<u>2. OBJETIVOS</u>	<u>3</u>
2.1 - OBJETIVO GERAL	3
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<u>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>4</u>
3.1 - LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	4
3.2 - BREVE HISTÓRICO DA TECNOLOGIA DE FBP	6
3.3 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO FBP	7
3.4 - ESTRUTURA FÍSICA DA UNIDADE	9
3.4.1 - DISPOSITIVO DE DISTRIBUIÇÃO	10
3.4.2 - MEIO SUPORTE	10
3.4.3 - SISTEMA DE DRENAGEM DE FUNDO	12
3.5 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO BIOFILME	12
3.6 - CLASSIFICAÇÃO E PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	15
3.6.1 - FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR DE BAIXA TAXA	17
3.6.2 - FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR DE TAXA INTERMEDIÁRIA	18
3.6.3 - FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR DE ALTA TAXA	18
3.7 - MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS	19
3.7.1 - FÓRMULA DO NRC – <i>NATIONAL RESEARCH COUNCIL</i>	20
3.7.2 - CRITÉRIO DE VELZ	21
3.7.3 - CRITÉRIO DE ECKENFELDER	21
<u>4. METODOLOGIA</u>	<u>23</u>
4.1 - O CENTRO EXPERIMENTAL DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DA UFRJ – CETE-UFRJ	23
4.2 - CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS	25
4.2.1 - TRATAMENTO PRELIMINAR	25
4.2.2 - FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR	27

4.2.3- DECANTADOR SECUNDÁRIO	29
4.3 - FASES EXPERIMENTAIS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA PESQUISA	32
4.4 - MONITORAMENTO DA UNIDADE	34
4.4.1- AMOSTRAGEM	34
4.4.2- PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	35
4.5 - TESTES ESTATÍSTICOS	35
<u>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>38</u>
5.1 - EM RELAÇÃO ÀS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS	42
5.1.1- FASE COMBINADA TOTAL	49
5.1.2- FASES COMBINADAS A TOTAL E B TOTAL	49
5.1.3- FASES COMBINADAS I, II E III	50
5.2 - EM RELAÇÃO AO ATENDIMENTO AOS PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS	52
5.2.1- FASE COMBINADA TOTAL	54
5.2.2- FASES COMBINADAS A TOTAL E B TOTAL	55
5.2.3- FASES COMBINADAS I, II E III	55
5.3 - DETERMINAÇÃO DO VALOR K DO MODELO DE ECKENFELDER	60
<u>6. CONCLUSÕES</u>	<u>62</u>
<u>7. RECOMENDAÇÕES</u>	<u>63</u>
<u>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>65</u>
<u>ANEXO A</u>	<u>70</u>
<u>ANEXO B</u>	<u>75</u>
<u>ANEXO C</u>	<u>79</u>

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2002 (SNIS/SNSA, 2002), 50,4% dos esgotos gerados no país são coletados e somente 27,3% são de alguma forma tratados. São indicadores que demonstram a clareza da precária situação do país em relação ao saneamento ambiental.

A aplicação da tecnologia anaeróbia para o tratamento de esgotos sanitários é crescente no Brasil. Considerando, no entanto, que os sistemas anaeróbios usualmente não são capazes de produzir efluentes que se adequem aos padrões ambientais de lançamento de efluentes, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas que tratem conjuntamente a questão do tratamento anaeróbio e do pós-tratamento de esgotos sanitários.

A aplicabilidade dos reatores anaeróbios é baseada em sua simplicidade operacional e baixo custo e nesse sentido é interessante que também as unidades de pós-tratamento apresentem as mesmas características. O sistema reator UASB seguido de filtração biológica aeróbia (FBP) pode se tornar uma alternativa muito promissora para o tratamento de esgotos sanitários no Brasil.

O filtro biológico percolador também é uma tecnologia compacta, operacionalmente simples, de baixos consumo de energia e custo operacional. Vários trabalhos têm sido realizados com o objetivo de contribuir para a avaliação do comportamento de reatores de manta de lodo (UASB) seguidos de filtros biológicos percoladores (FBP) tratando esgotos sanitários (NASCIMENTO, 2001).

A composição do sistema UASB + FBP dispensa as unidades de adensamento e digestão da fase sólida do tratamento e permite a estabilização do lodo secundário no próprio reator UASB. NASCIMENTO (2001) concluiu que filtros biológicos com meio suporte em escória de alto forno, atuando como unidades de pós-tratamento de reatores UASB, podem ser razoavelmente bem operados com cargas orgânicas volumétricas de até 1,5 KgDBO/m³.d e taxas de aplicação hidráulica de até 20 m³/m².d. AISSE *et al* (2001) reportam para o sistema UASB + FBP da ETE Caçadores, resultados de eficiências médias de remoção DQO e DBO de respectivamente 84% e 93%.

Os filtros biológicos de alta carga usualmente utilizam meios suporte plásticos. A indústria nacional atualmente oferece vários tipos de meios suporte plásticos, cada qual com suas

respectivas características físicas. A literatura, no entanto, não define muito claramente as recomendações relativas às taxas hidráulica e orgânica aplicáveis, na maioria das vezes apresentando valores compreendidos entre limites de grande amplitude.

O presente projeto de pesquisa tem como principal intenção contribuir para o esclarecimento do comportamento do processo de filtração biológica quando utilizados diferentes meios suporte plásticos e quando submetidos a diferentes cargas hidráulica e orgânica.

O presente trabalho constitui o primeiro projeto de pesquisa aplicado ao Filtro Biológico Percolador do CETE-UFRJ. Nesse sentido, o escopo do projeto teve também como objetivo a investigação preliminar do comportamento da unidade de tratamento em função de características próprias do CETE-UFRJ, ou seja: características do esgoto bruto afluente, condições ambientais locais e configuração do reator biológico.

Para efeito do presente trabalho as denominações “filtro biológico”, “filtro biológico aeróbio” e “filtro biológico percolador” serão utilizadas como sinônimos para referência da tecnologia estudada. A utilização da última denominação vem sendo bastante empregada no país, em função de pesquisas conduzidas nos últimos anos, no âmbito do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB).

2. OBJETIVOS

2.1 - Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de uma unidade de filtração biológica aeróbia em escala real, para atendimento de até 400 habitantes, utilizando 2 diferentes meios suporte plásticos, submetida a 3 diferentes cargas hidráulicas e orgânicas, caracterizando 6 distintas fases operacionais.

2.2 - Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho da unidade de filtração biológica aeróbia em relação a remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão, quando impostas as cargas hidráulicas superficiais de 40 m³/m².d, 65 m³/m².d, e 80 m³/m².d, e as cargas orgânicas volumétricas de 0,9 kgDBO/m³.d, 1,5 kgDBO/m³.d , e 2,1 kgDBO/m³.d;;
- Avaliar o desempenho da unidade em relação ao atendimento aos padrões de lançamento de efluentes, vigentes nos Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo;
- Avaliar o desempenho da unidade quando variados os meios suporte plásticos: anéis randômicos e bloco *cross flow*, e
- Determinar os coeficientes de remoção de DBO (K) associados aos meios suporte plásticos utilizados, previstos no modelo matemático baseado no critério de Eckenfelder;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Legislação Ambiental

Segundo a Lei Federal nº 6.938/81 que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, os recursos ambientais devem ser usados racionalmente, com vistas à preservação e melhoria da qualidade ambiental (JULIANO, 1996, citado por AISSE, 2002).

No âmbito do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) é estabelecido o arcabouço institucional e são definidos os instrumentos para o cumprimento dos objetivos da Política Nacional do Meio Ambiente. Dentre os instrumentos previstos, destacam-se os padrões de qualidade ambiental, e no caso aplicado às coleções de águas, a Resolução CONAMA nº 357 (2005), que substitui a CONAMA 20 (1986) estabelece a qualidade ambiental desejada em função dos usos preponderantes exercidos nas bacias hidrográficas.

Segundo VON SPERLING (1996), os padrões de qualidade dos corpos d'água e os padrões de lançamento de efluentes se relacionam no sentido de que um efluente, além de satisfazer os padrões de lançamento, deve proporcionar condições ao corpo receptor, de forma que a qualidade do mesmo se enquadre dentro dos padrões que classificam os corpos d'água.

As legislações ambientais dos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e de São Paulo incluem padrões de lançamento de efluentes visando o controle de poluição hídrica por esgotos sanitários, respectivamente: Diretriz FEEMA DZ 215.R-3, Deliberação Normativa COPAM nº 10 e Decreto nº 8.468 - CETESB.

No Estado do Rio de Janeiro, a Diretriz FEEMA DZ 215.R-3 – Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem não Industrial estabelece exigências de controle de poluição das águas que resultem na redução de carga orgânica biodegradável de origem não industrial, como parte integrante do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras – SLAP.

As exigências estabelecidas na DZ-215.R-3 são focadas principalmente nos níveis mínimos de remoção de carga orgânica considerando as tecnologias de tratamento existentes e em uso corrente no país, independente da capacidade assimilativa dos

corpos d'água receptores. A diretriz ainda prevê a possibilidade de exigências complementares e adicionais sempre que necessária a compatibilização entre critérios e padrões de lançamento de efluentes e de qualidade de água, estabelecidos para o corpo receptor, segundo seus usos benéficos ou segundo classes que agrupam determinados usos preponderantes.

A DZ-215.R-3 estabelece a eficiência mínima de remoção de DBO ou a concentração máxima permitida de DBO e SST para o lançamento de esgotos sanitários em corpos d'água receptores, em função da carga orgânica bruta gerada, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – DZ-215.R-3: Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem Não Industrial

Carga Orgânica Bruta (C) (KgDBO/dia)	Eficiência Mínima de Remoção (%)	Concentrações Máximas Permitidas (mg/l)	
		DBO	SST
$C \leq 5$	30	180	180
$5 < C \leq 25$	60	100	100
$25 < C \leq 80$	80	60	60
$C > 80$	85	40	40

Fonte: FEEMA DZ-215.R-3

O Estado de Minas Gerais é amparado pela Deliberação Normativa COPAM nº 10 que estabelece normas e padrões para qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de águas.

Neste último caso, define as concentrações máximas efluentes de 60mg/l de DBO e SST e de 90mg/l de DQO. Pode o valor máximo permissível de DBO ser ultrapassado desde que se promova, minimamente, a redução da carga poluidora em 60%.

Segundo a COPAM nº 10, nas águas das Classes 1 a 4 são tolerados lançamentos de despejos, desde que, além de atenderem às concentrações máximas permitidas para os diferentes poluentes, não venham a ultrapassar os limites estabelecidos para as respectivas classes de enquadramento dos cursos d'água.

No Estado de São Paulo, está vigente o Decreto nº 8.468 que aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.

Permite, para lançamento de efluentes em corpos d'água receptores, a concentração máxima de 60mg/l de DBO, podendo ser este valor ultrapassado somente no caso de efluentes de sistemas que promovam minimamente a redução da carga orgânica em 80%.

A Tabela 3.2 apresenta o quadro resumo das concentrações máximas de DQO, DBO e SST permitidas pelos padrões de lançamento de efluentes vigentes nos três estados da federação: Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo.

Tabela 3.2 – Concentrações máximas permitidas para DQO, DBO e SST, para diferentes estados brasileiros

Estado	Legislação	Concentrações Máximas Permitidas		
		DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	SST (mg/l)
RJ	DZ-215.R-3	-	40 – 180 (a)	40 – 180 (a)
MG	COPAM nº 10	90	60 (b)	60
SP	Decreto nº 8.468	-	60 (c)	-

(a) Valor variável de acordo com a carga orgânica bruta afluyente ao sistema de tratamento

(b) Concentração máxima permitida ou eficiência mínima de remoção de DBO de 60%

(c) Concentração máxima permitida ou eficiência mínima de remoção de DBO de 80%

Dentre os três padrões de lançamento discutidos anteriormente, a DZ-215.R-3 é aquela mais restritiva ao estabelecer a concentração máxima efluente de 40mg/l de DBO e SST para a carga orgânica bruta afluyente igual ou superior a 80kgDBO/d. A Deliberação Normativa COPAM nº 10 é também restritiva no sentido de indicar a DQO como mais um parâmetro de qualidade de água a ser atendido.

3.2 - Breve Histórico da Tecnologia de FBP

Segundo JORDÃO & PESSOA (1995), os primeiros filtros biológicos surgiram na Inglaterra, no final do século XIX. No Brasil, somente em 1910, foi construída a primeira estação de tratamento de esgotos utilizando a tecnologia da filtração biológica aeróbia – ETE Paquetá, no Rio de Janeiro.

Inicialmente a tecnologia era denominada “filtro de contato”. Constituíam-se em tanques de retenção cheios de areia ou pedregulhos, com os quais os esgotos eram mantidos em contato por períodos de 6 horas. Eram alimentados com esgotos pelo topo, até o completo preenchimento do seu volume, iniciando-se assim, o ciclo de operação. Após, o tanque era então esvaziado, assim permanecendo em repouso, por mais 6 horas, completando um ciclo de operação de 12 horas (METCALF & EDDY, 1991).

Segundo JORDÃO & PESSOA (1995), a capacidade de tratamento dessas unidades era limitada devido à operação descontínua, rápida colmatação dos espaços vazios e a necessidade de ciclos operacionais intermitentes.

O sistema evoluiu a partir da verificação de que a aplicação contínua de esgotos sobre o meio suporte possibilitava o desenvolvimento de condições favoráveis ao crescimento de uma flora e fauna mista de microrganismos, capazes de produzir limo, mantendo-se um equilíbrio biológico suficiente para decompor a matéria orgânica afluyente.

O meio suporte teve, então, sua granulometria aumentada, para permitir tanto a percolação do líquido quanto o livre escoamento de ar. A natureza dos materiais utilizados ao longo da história contribuiu para a evolução da tecnologia, dentre estes: pedra britada, escória de alto-forno, e de maneira mais eficiente, materiais sintéticos de plástico de diferentes formas e tamanhos.

Nesse sentido, trata-se de um processo de tratamento por oxidação biológica, no qual não ocorre o fenômeno físico de filtração ou peneiramento, e portanto impropriamente denominado de “filtração”, apesar de assim sê-lo usualmente reconhecido.

Os filtros biológicos percoladores não são muito utilizados quando comparados a outros sistemas de tratamento de esgotos, apesar da grande aplicabilidade que apresentam, principalmente devido à sua simplicidade operacional e baixos custos de operação e instalação.

3.3 - Princípio de Funcionamento do FBP

A tecnologia se baseia na aplicação contínua e uniforme dos esgotos por meio de distribuidores hidráulicos, que percolam pelo meio suporte em direção aos drenos de fundo. O filtro biológico percolador funciona em fluxo contínuo e sem inundação da unidade. São sistemas aeróbios, permanentemente sujeitos à renovação do ar, que

naturalmente circula nos espaços vazios do meio suporte, disponibilizando o oxigênio necessário para a respiração dos microrganismos.

Os filtros biológicos percoladores são sistemas de tratamento de esgotos baseados no princípio da oxidação bioquímica aeróbia do substrato orgânico presente nos esgotos. Por meio da transformação de substâncias coloidais e dissolvidas, em sólidos estáveis, a película que se desgarra do meio suporte sedimenta-se facilmente e é removida em uma unidade de decantação secundária.

A percolação dos esgotos permite o crescimento bacteriano na superfície do material de enchimento (meio suporte), formando uma película ativa (biofilme), constituída por colônias gelatinosas de microrganismos (zooglea) de espessura máxima de 2 a 3 mm (METCALF & EDDY, 1991).

Segundo JORDÃO & PESSOA (1995), a intensa atividade biológica favorece o desenvolvimento de bactérias aeróbias, facultativas e anaeróbias, predominando as bactérias facultativas. Os fungos também estão presentes nos biofilmes e competem com as bactérias na degradação do substrato orgânico.

Durante o processo, as placas de biofilme se desprendem do meio suporte devido ao grau de estabilização, à tensão de cisalhamento causada pelo gradiente de velocidade de escoamento do líquido entre os vazios, e à indisponibilidade de oxigênio para os microrganismos aeróbios mais próximos ao meio suporte.

O material desprendido é removido em unidade de decantação secundária, obtendo-se assim, um efluente final clarificado com baixas concentrações de matéria orgânica e sólidos em suspensão (VON SPERLING, 1996).

O tratamento de esgotos por filtração biológica convencional normalmente requer uma unidade de desinfecção para desativação de microrganismos causadores de doenças. O filtro biológico percolador geralmente consegue reduzir a concentração de coliformes em apenas 1 a 2 unidades logarítmicas, o que não satisfaz as exigências da legislação ambiental, dependendo do grau de diluição no corpo receptor.

Vários estudos foram e ainda são realizados, de forma a viabilizar a desinfecção de efluentes de filtro biológico, com unidades de radiação ultra-violeta, cloração, lagoas de maturação ou ainda ozonização.

A Figura 3.1 mostra o esquema básico do funcionamento de um filtro biológico percolador.

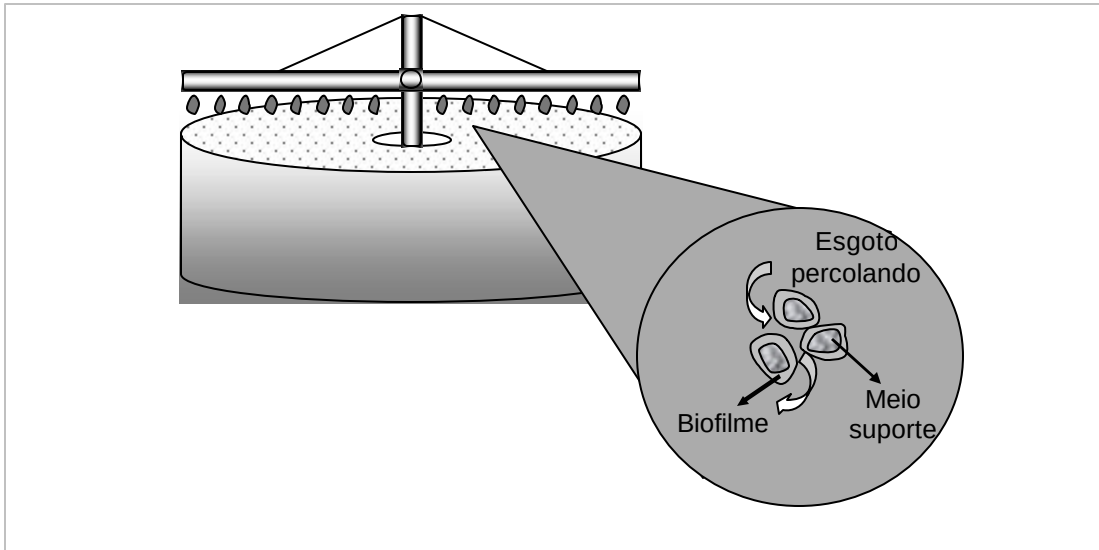


Figura 3.1 – Esquema de funcionamento de um filtro biológico
Fonte: GONÇALVES *et al* (2001)

3.4 - Estrutura Física da Unidade

Os componentes principais de um filtro biológico percolador são ilustrados na Figura 3.2 e podem ser divididos em três partes principais: dispositivo de distribuição, camada suporte e sistema de drenagem.

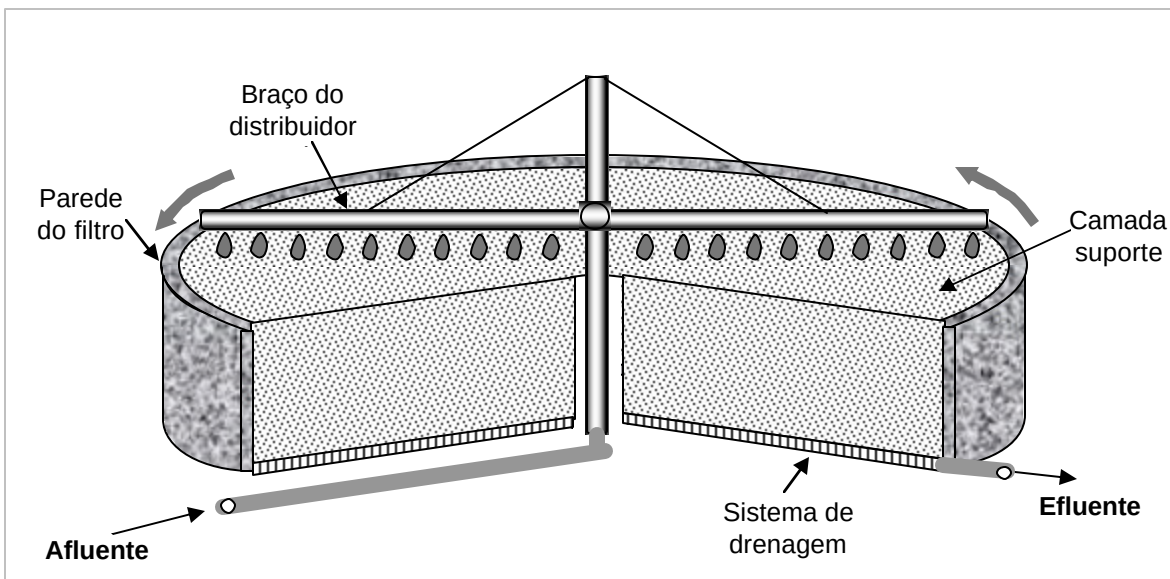


Figura 3.2 – Seção típica de um filtro biológico e seus componentes
Fonte: NASCIMENTO (2001)

3.4.1 - Dispositivo de Distribuição

O dispositivo de distribuição possibilita a aplicação uniforme da carga hidráulica de esgotos sobre a superfície do reator biológico, garantindo o contínuo crescimento e desprendimento do biofilme e a otimização do processo de filtração biológica aeróbia.

É sabido que da eficiência de molhamento da área superficial depende a performance da unidade; o meio suporte não contínua e uniformemente umedecido não permite um bom desempenho da unidade. Segundo WHEATLEY & WILLIAMS (1981) a obtenção de diferentes performances das unidades de filtração biológica utilizando meios suporte em plástico, pedra e cascalho, deveu-se além do tipo de meio suporte empregado, às condições de umedecimento da unidade.

Os dispositivos de distribuição mais comumente utilizados são os móveis rotativos – braços distribuidores rotativos engastados que giram em torno de uma coluna central. Constituem-se em condutos forçados sujeitos a carga hidráulica piezométrica; descrevem movimentação radial em função da energia da descarga gerada pelos jatos de esgotos que passam pelos orifícios existentes ao longo e lateralmente à tubulação.

3.4.2 - Meio Suporte

Os meios suporte são de fundamental importância para o desempenho do processo. Segundo JORDÃO & PESSOA (1995), existem diversos tipos de materiais que podem ser utilizados, tais como: pedra britada, escória de alto-forno, e de maneira mais eficiente, materiais sintéticos de plástico de várias formas e tamanhos. A Figura 3.3 ilustra os diferentes tipos de materiais de meio suporte, mais comumente utilizados.

O peso específico do meio suporte refere-se principalmente à questão estrutural do filtro biológico. A superfície específica do meio suporte está relacionada com a área de contato entre o líquido e o biofilme formado. O índice de vazios influencia a circulação dos esgotos e do ar, por entre a camada suporte, mantendo o ambiente nas condições aeróbias favoráveis ao equilíbrio da cultura biológica.

O quadro da Tabela 3.3 indica para os três diferentes tipos de materiais de meios suporte as suas principais características físicas.

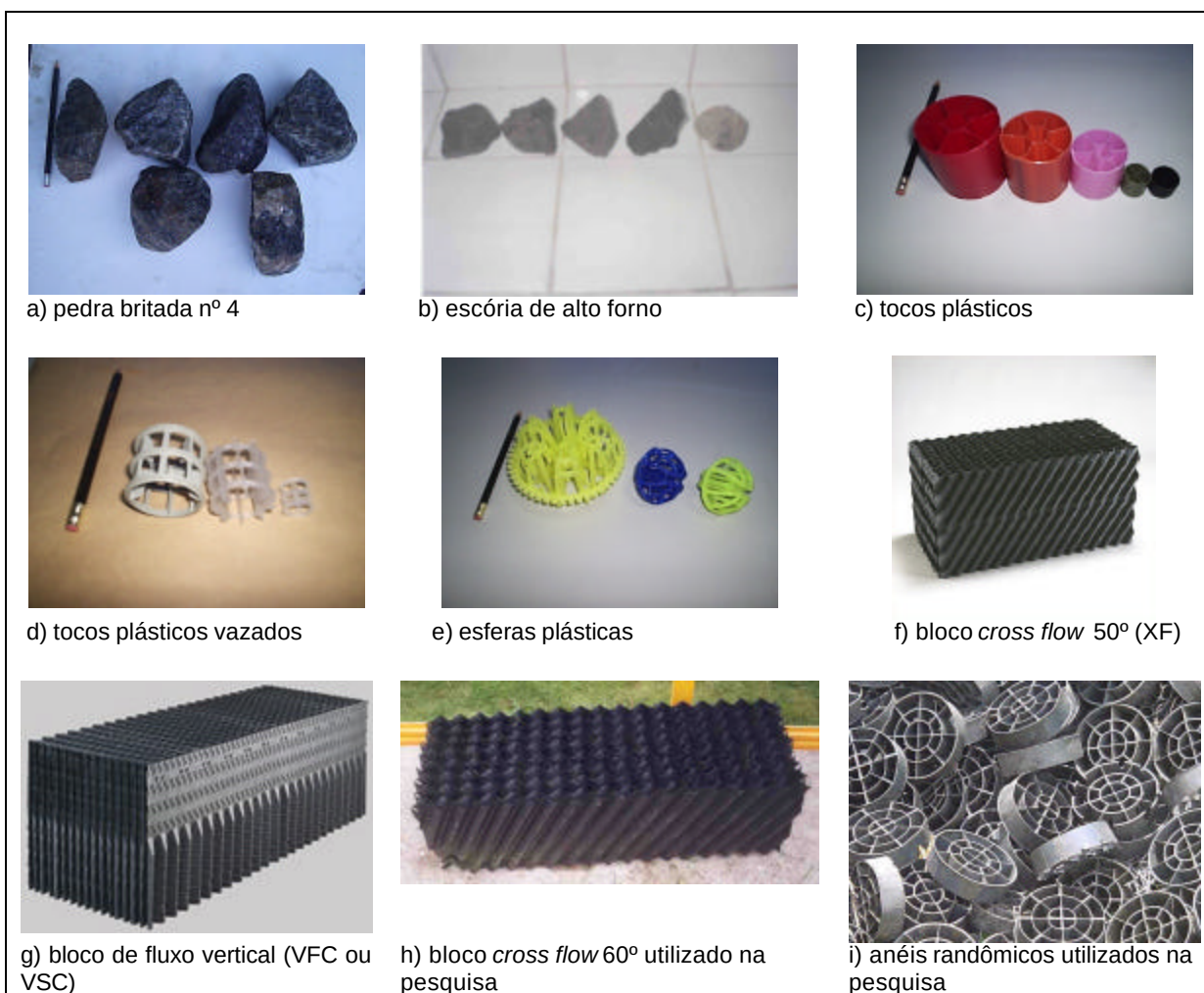


Figura 3.3 – Tipos de meios suporte utilizados em filtros biológicos percoladores

Tabela 3.3 – Principais características físicas dos meios suporte utilizados em filtros biológicos percoladores

Meio Suporte	Área Superficial Específica (m^2/m^3)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica (kg/m^3)
Pedra britada	50	50	800 a 1400
Escória de alto forno	~100	~54	1110
Plástico	80 a 500	> 90	30 a 80

Fonte: adaptado de JORDÃO & PESSOA (no prelo), METCALF & EDDY (2003) e PORTO (2002)

Dentre os materiais de meio suporte recomendados, os meios plásticos vêm gradativamente sendo mais empregados. Atendem às propriedades físicas requeridas pelo processo e admitem com menor área superficial, a aplicação de cargas orgânicas

mais elevadas. Cerca de 30 vezes mais leves do que os meios em pedras, possibilitam unidades de filtração mais altas e esbeltas e menos robustas, todavia o elevado custo tem limitado a sua aplicação (JORDÃO & PESSOA, *no prelo*).

Como também ilustra a Figura 3.3, o PVC é o material de referência na fabricação de módulos plásticos sintéticos. Os anéis, tocos e esferas em meio plástico, com dimensão variando entre 2 e 15 cm, são aleatoriamente lançados no interior do reator e perfazem um meio suporte “randômico”. Já os blocos são estruturalmente encaixados e sobrepostos uns aos outros e podem ser classificados como do tipo fluxo cruzado (*cross flow*) ou vertical.

Dentre as formas de meio plástico apresentadas, destacam-se no contexto da indústria nacional, aquelas utilizadas no presente projeto de pesquisa: anéis plásticos randômicos e blocos tipo *cross flow*.

3.4.3 - Sistema de Drenagem de Fundo

O sistema de drenagem de fundo de um filtro biológico consiste de uma laje perfurada, ou de grelhas confeccionadas em material resistente, e de um conjunto de calhas localizadas na parte inferior do filtro. O sistema possibilita a coleta do líquido percolado e dos sólidos desprendidos do meio suporte e ainda permite o escoamento do ar atmosférico e a transferência do oxigênio requerido pelo processo aeróbio.

O efluente coletado pelo sistema de drenagem, contendo os sólidos desprendidos do meio suporte é encaminhado para a unidade de decantação secundária, para a clarificação do efluente tratado.

Segundo GONÇALVES *et al* (2003), o filtro biológico percolador operado sob baixa taxa de carregamento orgânico, propicia sobre o meio suporte o crescimento de um biofilme fino, bastante mineralizado, capaz de produzir um efluente com qualidade satisfatória para o descarte direto, sem clarificação. Esta configuração contribui para a redução da área ocupada pelo sistema e para a minimização do gerenciamento do lodo secundário.

3.5 - Características Gerais do Biofilme

Segundo JORDÃO & PESSOA (*no prelo*), a comunidade biológica que forma o biofilme é constituída predominantemente pelas seguintes espécies: *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*. Na região mais interna do filme pode-se

encontrar formas filamentosas de *Sphaerotilus Natans* e *Beggiotoa*. As espécies identificadas de fungos têm sido: *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Geotrichum*, *Sporotrichum*. Já os protozoários predominantes são do grupo de ciliados, incluindo *Vorticella*, *Opercularia*, e *Epistylis*, que em particular se alimentam do próprio filme biológico, contribuindo assim para a formação de flocos de melhor sedimentabilidade e para a obtenção de um efluente de melhor qualidade.

O oxigênio é fator determinante no estabelecimento das camadas de biofilme. A síntese de novas células promove o aumento da biomassa, prejudicando a passagem de oxigênio até as camadas internas, junto à superfície do meio suporte, onde o processo de oxidação passa então a realizar-se anaerobiamente.

Nas camadas mais externas, onde a oxidação é aeróbia, há geração de gás carbônico (CO_2) como sub produto, o qual permanece em solução, se desprende para a atmosfera, ou em condições anóxicas, permite a redução de nitratos.

Já nas camadas anaeróbias, tem-se a formação de ácidos orgânicos, tais como ácido nítrico (HNO_3) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Nelas, ocorre a redução de sulfatos, nitratos e carbonatos, em função de substâncias alcalinas contidas nos esgotos, capazes de neutralizar os ácidos, transformando-os em sais solúveis em água.

A Figura 3.4 apresenta de forma esquemática o consumo de substrato e a geração de subprodutos decorrentes das reações bioquímicas do processo de filtração biológica aeróbia

De acordo com GONÇALVES *et al.* (2001), o processo metabólico de conversão sempre ocorre no interior do biofilme e o transporte do substrato orgânico se realiza por meio de processo de difusão, inicialmente na interface líquido/biofilme e, em seguida, no próprio biofilme.

Os subprodutos provenientes das reações de oxiredução são transportados no sentido inverso, da camada mais interna (anaeróbia) para a camada mais externa (aeróbia) do biofilme. Na Figura 3.5 estão representados os principais mecanismos envolvidos com o transporte e a degradação de substratos em biofilme.

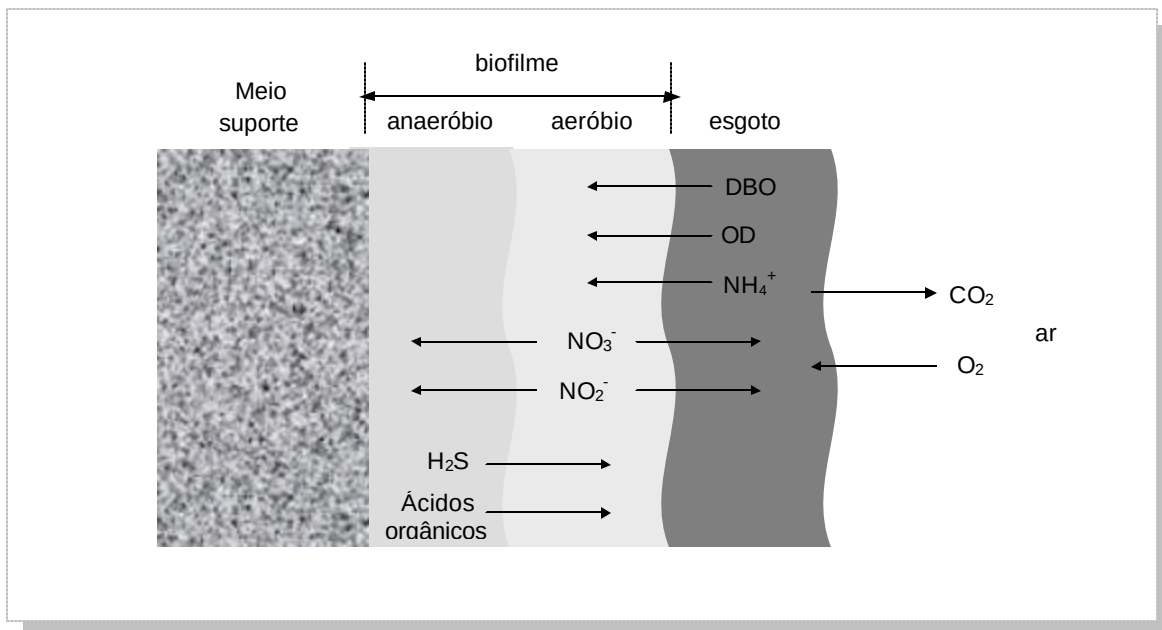


Figura 3.4 – Representação esquemática de um biofilme, adaptado de METCALF & EDDY (1991), VON SPERLING (1996)

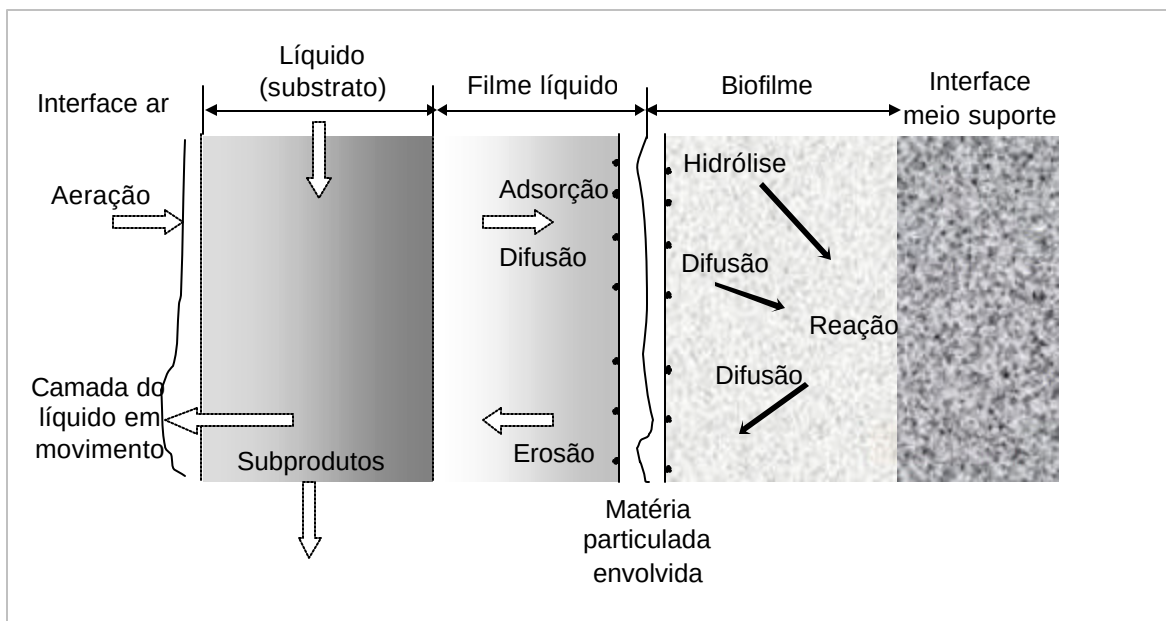


Figura 3.5 – Mecanismos e processos envolvidos com o transporte e degradação do substrato em biofilmes.

Fonte: GONÇALVES *et al.* (2001)

Quanto maior a espessura do biofilme, maior é a estabilização da matéria orgânica antes de alcançar as camadas mais internas. Neste caso, os microrganismos aí presentes passam a realizar atividade endógena para crescimento e assim perdem a sua

capacidade de adesão à superfície do meio. Segundo JORDÃO & PESSOA (1995), os gases acumulados produzidos na camada anaeróbia provocam a “explosão” de toda a massa biológica agregada ao meio suporte, desprendendo-a e facilitando o fluxo de arraste pelos esgotos.

O fenômeno de desprendimento dos flocos biológicos é função das cargas hidráulicas e orgânicas aplicadas ao filtro. Cargas hidráulicas originam a velocidade de passagem do esgoto pelo biofilme e cargas orgânicas são responsáveis diretas pela taxa do metabolismo da camada biológica.

De acordo com CHARACKLIS et al. (1991), citado por PORTO (2002), o desprendimento da película é o principal fator que influencia a performance de um sistema de biofilme e ainda distingue o desprendimento causado por erosão e por cisalhamento.

A erosão é caracterizada pela contínua remoção de pequenas partículas do biofilme e da interface biofilme-líquido. A erosão predomina quando há baixas concentrações de substrato e escoamento que gere turbulência.

O cisalhamento está relacionado a esporádicos desprendimentos de maiores fragmentos de película, resultante de alterações dentro do próprio biofilme. O cisalhamento é normalmente observado quando há grande concentração de substrato e escoamento não turbulento. CHARACKLIS et al. (1991) afirmam que o processo de cisalhamento está mais relacionado à performance dos FBPs do que a erosão, mas ressalta que os fenômenos de erosão e cisalhamento não são necessariamente excludentes. Quando o biofilme é espesso, as forças de erosão certamente atuarão com maior facilidade e o oposto também se verificará.

3.6 - Classificação e Parâmetros de Dimensionamento

Os parâmetros de dimensionamento de um filtro biológico percolador são a taxa de aplicação superficial hidráulica (TAS), também conhecida como carga hidráulica, e a taxa de aplicação orgânica volumétrica (TAO), também conhecida como carga orgânica volumétrica.

A TAS é definida a partir de uma determinada vazão, aplicada na área da seção superficial do filtro, expressa em termos de $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Já a TAO, é definida a partir da

carga orgânica aplicada em todo o volume do meio suporte, sendo expressa em termos de $\text{kgDBO}/\text{m}^3\cdot\text{dia}$.

Os filtros percoladores geralmente são classificados em função da carga hidráulica e da carga orgânica a que são submetidos. Esta classificação era normalmente dividida em 5 classes principais: baixa taxa, taxa intermediária, alta taxa, taxa super alta e grosseiro (METCALF & EDDY, 1991).

Filtros de taxa super alta eram relacionados aos meios suporte plásticos e à taxas de aplicação hoje em dia consideradas muito elevadas, de até $240 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ (JORDÃO & PESSOA, 1995). Filtros grosseiros, nos quais também aplicava-se taxas super altas, antecediam o tratamento secundário dos esgotos altamente concentrados. Segundo CHERNICHARO (coord.) *et al* (2001), o filtro grosseiro perdeu sua aplicação com o desenvolvimento dos reatores UASB.

A classificação mais moderna e atual apresenta somente 3 classes, denominadas baixa, intermediária e alta taxa, sendo a última classe ainda dividida em função dos meios suporte utilizados: plástico ou pedra (METCALF & EDDY, 2003). A Tabela 3.4 apresenta um resumo das principais características das 3 classes de filtros biológicos percoladores.

Existem duas configurações de filtros biológicos percoladores para a nitrificação. A configuração segundo um único estágio - estágio simples, onde a oxidação do carbono e a nitrificação acontecem em uma mesma unidade, e a configuração segundo duplo estágio, em duas unidades de filtração biológica em série, onde a oxidação de carbono ocorre em um primeiro estágio e a nitrificação ocorre somente no estágio seguinte, na 2ª. unidade de filtração biológica.

Nos filtros biológicos a remoção da DBO ocorre nas camadas superiores do reator biológico, enquanto o processo de nitrificação acontece nas camadas inferiores da unidade. Para o caso de nitrificação, o parâmetro de dimensionamento da unidade é expresso em termos da taxa de aplicação de carga orgânica por área superficial de contato, em $\text{kg DBO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, diferentemente do caso da remoção da matéria orgânica carbonácea. JORDÃO & PESSOA (*no prelo*) sugerem a indicação da taxa de aplicação de $2,4 \text{ gDBO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ para a obtenção de 90% de remoção de $\text{NH}_4\text{-N}$.

Tabela 3.4 – Características típicas dos diferentes tipos de filtros biológicos percoladores

Condições Operacionais	Baixa Taxa	Taxa Intermediária	Alta Taxa	
Meio Suporte	Pedra	Pedra	Pedra	Plástico
Taxa de Aplicação Superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	1,0 a 4,0	4,0 a 10,0	10,0 a 40,0	10,0 a 75,0
Taxa de Aplicação Orgânica ($\text{Kg DBO}/\text{m}^3.\text{d}$)	0,1 a 0,3	0,2 a 0,5	0,4 a 2,5	0,5 a 3,0
Moscas	Muitas	Médio	Pouca	Pouca
Arraste de Biofilme	Intermitente	Variável	Contínuo	Contínuo
Profundidade (m)	1,5 a 2,5	1,5 a 2,5	1,5 a 2,5	4,0 a 12,0
Remoção de DBO* (%)	80 a 90	80 a 85	80 a 90	80 a 90
Nitrificação	Intensa	Parcial	Parcial	Limitada

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (coord.) et al. (2001); JORDÃO & PESSOA (*no prelo*); METCALF & EDDY (2003)

* Faixas de Remoção de DBO típicas para alimentação do FBP com efluentes de decantadores primários. Para alimentação do FBP com efluentes de reatores anaeróbios são esperadas eficiências menores.

Segundo METCALF & EDDY (1991), filtros com meio suporte plástico têm 1,8 vezes maior superfície de contato por unidade de volume do que a pedra ou cascalho. Assim, submetidos a cargas orgânicas mais elevadas, podem alcançar o mesmo grau de nitrificação. Por exemplo, para 75 a 85% de nitrificação, são recomendadas as cargas de 0,09 a 0,16 $\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$ e 0,19 a 0,30 $\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$ para, respectivamente, os meios suporte em pedra e em plástico (JORDÃO & PESSOA, *no prelo*).

3.6.1 - Filtro Biológico Percolador de Baixa Taxa

O filtro biológico de baixa taxa apresenta eficiência de remoção de carga orgânica comparável à eficiência usualmente promovida pelo sistema de lodos ativados convencional. Apesar de requerer área superficial um pouco maior e de apresentar menor capacidade de ajuste às variações do afluente, quando comparadas ambas as tecnologias, o filtro biológico, de forma geral, pode ser considerado mais simples, além de não demandar consumo de energia elétrica.

O filtro de baixa taxa não necessita de recirculação do efluente para diluição de carga orgânica, porém esta prática pode se fazer necessária em algumas horas do dia, quando a vazão afluyente é reduzida, com o objetivo de assegurar o constante umedecimento do biofilme.

Segundo METCALF & EDDY (2003), dentre as modalidades de filtração biológica aeróbia, é a que além de apresentar a melhor eficiência na remoção de DBO, possibilita a nitrificação, caso a população nitrificante seja suficientemente bem estabilizada, e se as condições do clima e das características do afluyente forem favoráveis.

Nesta modalidade, a carga orgânica afluyente por unidade de volume é baixa, resultando em menor disponibilidade de substrato, e conseqüentemente elevada remoção de DBO, nitrificação e parcial estabilização do lodo.

A modalidade, quando comparada ao sistema de alta taxa, requer uma maior área superficial, devido à aplicação de menor carga hidráulica. A aplicação de baixa carga hidráulica permite o largo desenvolvimento e a intensa proliferação de moscas (*Psycoda*) na superfície do meio suporte. Odor também pode ocorrer em função de condições sépticas decorrentes da elevada permanência e do não desprendimento do biofilme aderido ao meio suporte (CHERNICHARO coord. *et al*, 2001).

3.6.2 - Filtro Biológico Percolador de Taxa Intermediária

Os filtros de taxa intermediária são projetados segundo carga superior aos filtros de baixa taxa. Considerando que o aumento da carga orgânica aplicada possa resultar em menor eficiência de remoção, é recomendada a recirculação do efluente tratado. Isso, para manter uniforme a vazão afluyente, criando novas oportunidades de estabilização, aumentando o tempo de contato e melhorando a eficiência do sistema. O efluente produzido nesta modalidade de filtração biológica é parcialmente nitrificado. Apesar da maior carga hidráulica aplicada, pode esta modalidade ainda propiciar o desenvolvimento de moscas (METCALF & EDDY, 1991).

3.6.3 - Filtro Biológico Percolador de Alta Taxa

Nesta modalidade são aplicadas taxas muito superiores, da ordem de até 10 vezes às cargas aplicadas nos filtros de baixa taxa, resultando em menor requisito de área superficial. No entanto, obtém-se um efluente tratado de qualidade inferior, assim como não obtém-se nitrificação e estabilização do lodo.

Nos filtros de alta taxa é que são utilizados os meios suporte plásticos, em função das características físicas potenciais que o material apresenta em relação aos princípios de funcionamento do processo. Não obstante, meios em pedra podem também ser utilizados, porém submetidos a taxas inferiores que aquelas aplicadas nos meios plásticos. Os filtros de alta taxa são capazes de suportar a aplicação de elevadas cargas e ainda assim propiciar eficiências de remoção similares às dos filtros de baixa taxa ou de taxa intermediária.

A profundidade das unidades que utilizam meio suporte plástico varia entre 4 e 12m, resultando em importante economia de área superficial ocupada.

Neste caso, a recirculação em razões elevadas é usualmente praticada. Segundo METCALF & EDDY (1991), a recirculação do efluente do filtro para o próprio filtro permite o retorno de organismos viáveis, tendo-se assim observado o aumento da eficiência do processo de tratamento.

O efluente produzido nesta modalidade de filtração biológica não é nitrificado e em função da elevada carga hidráulica, sólidos ainda não estabilizados desprendem-se do meio suporte. A carga hidráulica elevada também é responsável pelo não desenvolvimento de moscas METCALF & EDDY (1991).

O presente projeto de pesquisa é desenvolvido no âmbito de uma unidade de filtração biológica de alta taxa, utilizando meios suporte plásticos tipo anéis randômicos e blocos tipo *cross flow*

3.7 - Modelos Matemáticos Aplicados

São vários os modelos matemáticos existentes para o dimensionamento de filtros biológicos percoladores, muitos deles de caráter essencialmente empírico. Os mais utilizados são a Fórmula do NRC (*National Research Council*) e o critério de Velz, porém outros pesquisadores têm investigado mais profundamente os mecanismos do processo no sentido de determinar a interrelação das variáveis que afetam o desempenho e as características do filtro biológico percolador (WEF, 2000).

Outras formulações de dimensionamento baseadas em critérios racionais e não empíricos têm sido atualmente mais utilizadas, principalmente para os meios plásticos sintéticos (JORDÃO E PESSOA, 1995)

3.7.1 - Fórmula do NRC – *National Research Council*

Segundo WEF (2000), a fórmula do NRC é resultante de extensa análise de registros operacionais de 34 estações de tratamento de esgotos de instalações militares, que utilizavam a tecnologia da filtração biológica com meio suporte de pedra.

A análise de dados leva à conclusão de que a interação entre a biomassa e a matéria orgânica depende das dimensões do filtro e da recirculação do efluente, uma vez que do efetivo contato entre as partes, depende a maior eficiência do processo. Conclui também que a aplicação de maior carga orgânica resulta em menor eficiência, enfatizando como principal característica do processo a dependência do contato efetivo com a carga orgânica aplicada.

O dimensionamento de um filtro único, ou o primeiro filtro de um sistema com duplo estágio, recebendo esgoto decantado, pode ser realizado através das seguintes equações (1) e (2):

$$E = \frac{1}{1 + 0,433 \times (TAO/F)^{1/2}} \quad (1)$$

onde:

E = Eficiência de remoção de DBO₅ (%)

TAO = Taxa de Aplicação Orgânica (kgDBO/m³.d)

F = Fator de recirculação

$$F = \frac{1 + r}{(1 + r/10)^2} \quad (2)$$

sendo r a razão entre vazão de recirculação (Q_r) e vazão afluente (Q_a).

Segundo JORDÃO & PESSOA (*no prelo*), o modelo do NRC tem as seguintes principais limitações:

- As características dos esgotos de instalações militares, em que foram baseadas, são mais concentradas do que as dos esgotos domésticos;
- Não considera o efeito da temperatura;

- A fórmula estabelece maior influência da carga orgânica do que da carga hidráulica, provavelmente devido às características dos esgotos de unidades militares; e
- Não prevê esgotos com concentração diferente dos esgotos domésticos.

Para a utilização de filtros biológicos com meio suporte plástico, deve-se utilizar esta expressão com ressalvas, visto que não há ainda informações consolidadas para tal.

3.7.2 - Critério de Velz

Segundo JORDÃO e PESSOA (1991), a fórmula de Velz proposta em 1948 deve ter sido a primeira a incorporar o conceito da biodegradabilidade do processo. A fórmula ainda relaciona a eficiência do tratamento com a profundidade do meio suporte.

$$\frac{DBO_{rem}}{DBO_{apl}} = 10^{-K.H} \quad (3)$$

onde:

DBO_{rem} = concentração de DBO remanescente à profundidade H (mg/l)

DBO_{apl} = concentração de DBO afluente ao filtro (mg/l)

H = Profundidade do meio suporte (m)

K = constante de reação (função do tipo de filtro)

Como na fórmula empírica do modelo do NRC, apenas a carga orgânica é considerada, sendo desprezada a carga hidráulica. Da mesma forma, para a utilização de filtros biológicos com meio suporte plástico, deve-se utilizar esta expressão com ressalvas.

3.7.3 - Critério de Eckenfelder

Eckenfelder relacionou de maneira racional a remoção da DBO, expressa pela porcentagem da DBO remanescente (DBO_{efl}/DBO_{atf}) com a profundidade do meio suporte e com a carga hidráulica aplicada. No critério de Eckenfelder, a seguir apresentado, são incorporadas as seguintes considerações:

- Admitiu-se que a remoção de DBO segue a cinética de primeira ordem;

- O tempo de contato, a carga hidráulica e a profundidade se relacionam através da seguinte formulação: $t = C \cdot H / TAS^n$, onde C e n são constantes, função do meio suporte e de sua superfície específica; e
- A massa de sólidos biológicos ou voláteis é proporcional à superfície específica do meio suporte

$$\frac{DBO_{efl}}{DBO_{afl}} = e^{-K \frac{H}{TAS^n}} \quad (4)$$

onde:

DBO_{efl} = DBO afluyente ao filtro (mg/l)

DBO_{afl} = DBO efluente ao filtro (mg/l)

H = Profundidade do meio suporte (m)

K, n = constantes de reação, função do tipo de meio suporte e da superfície específica

TAS = Taxa de aplicação superficial ou carga hidráulica aplicada ($m^3/m^2.d$)

De acordo com o meio suporte utilizado, a constante n varia entre 0,2 e 1,1, sendo o valor médio de 0,5 razoavelmente aceito. Já o valor de K, depende do tipo de material suporte e da sua superfície específica. Pode ser determinado em laboratório ou em escala piloto; cada tipo de meio plástico industrializado apresenta especificamente seus respectivos coeficientes de remoção (JORDÃO & PESSOA, *no prelo*).

4. METODOLOGIA

4.1 - O Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ – CETE-UFRJ

A unidade experimental da pesquisa, objeto do presente trabalho, é uma das 13 unidades experimentais que compõem o Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ - CETE-UFRJ.

O CETE-UFRJ tem como missão atender aos objetivos acadêmicos de ensino e pesquisa dos cursos de graduação e pós-graduação da UFRJ voltados à engenharia de recursos hídricos, sanitária e ambiental. Consiste em uma central de operações, processos e tecnologias, dotada das seguintes unidades de tratamento de esgotos: grade de barras, desarenador por gravidade, decantação primária convencional, decantação primária quimicamente assistida, reator UASB, tanque séptico, filtro anaeróbio, filtro biológico percolador, lodos ativados, lagoa aerada, lagoa de sedimentação, lagoa facultativa e lagoa de maturação. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente a vista geral e o fluxograma esquemático do CETE-UFRJ.



Figura 4.1 – Vista geral do CETE-UFRJ

O CETE-UFRJ localiza-se na Cidade Universitária (Ilha do Fundão), próximo à estação elevatória de esgotos do Fundão, unidade responsável pela coleta e recalque para a ETE Penha, de todo o esgoto gerado no campus da UFRJ.

Através de uma bomba submersa instalada no canal de grades da estação elevatória do Fundão, parte dos esgotos gerados na Cidade Universitária - aproximadamente 5,0 l/s, é recalcada para o tratamento preliminar do CETE-UFRJ.

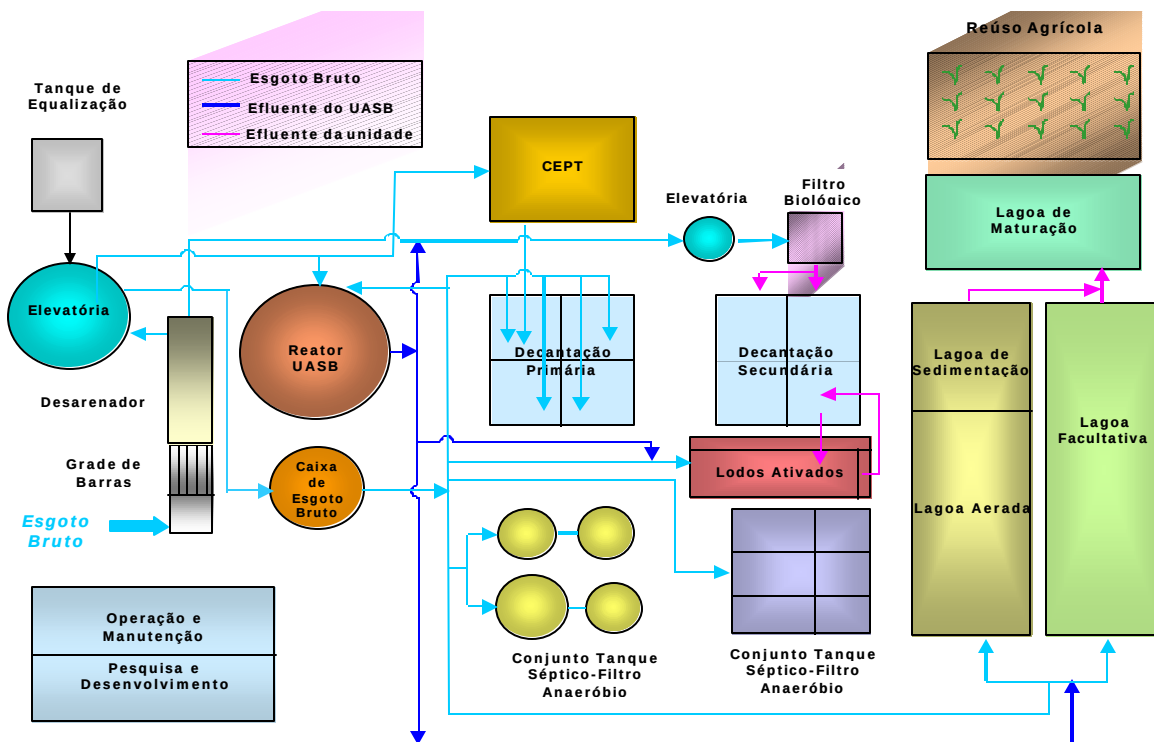


Figura 4.2 – Fluxograma esquemático do CETE/UFRJ.

O esgoto afluyente ao CETE-UFRJ é tratado preliminarmente através de uma grade de barras médias e de um desarenador por gravidade, ambas as unidades instaladas em um mesmo canal. O efluente do tratamento preliminar escoar por gravidade para o poço da estação elevatória de esgoto bruto, unidade responsável pelo recalque dos esgotos para a caixa de carga piezométrica do CETE-UFRJ. Desta, os esgotos são distribuídos às diferentes unidades de tratamento, com exceção da unidade de filtração biológica aeróbia.

O esgoto afluyente ao CETE-UFRJ é típico de campi universitários, apresentando composição físico-química diferenciada da composição usual dos esgotos sanitários, podendo ser classificando como um “esgoto fraco”. Na Tabela 4.1 são apresentadas as estatísticas básicas relativas à composição físico-química do esgoto afluyente ao CETE-UFRJ, segundo monitoramento rotineiro e frequente realizado pelo Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ (LEMA).

Tabela 4.1 – Composição físico-química (mg/l) do esgoto afluyente ao CETE-UFRJ

Estatística	DQO	DBO	SST
Quantidade de Dados	100	58	72
Média	167	82	64
Mínimo	39	29	18
Máximo	457	152	97
Desvio padrão	66	25	14

Considerando que as características do esgoto bruto afluyente ao CETE-UFRJ são similares às de efluentes primários, com valores médios de DQO, DBO e SST, respectivamente, da ordem de 167 mg/l, 82 mg/l e 64 mg/l, o processo de filtração biológica aeróbia da unidade experimental não é dotado de decantação primária, como usual.

4.2 - Características das Unidades Experimentais

A Figura 4.3 apresenta o fluxograma da unidade experimental utilizada durante a pesquisa.

4.2.1 - Tratamento Preliminar

Como anteriormente descrito, o tratamento preliminar é comum a todas as demais unidades do CETE-UFRJ. A grade de barras é do tipo média, estruturada em fibra de vidro, com barras de ¼" por 2", com espaçamento de 1". Já o desarenador, do tipo canal, apresenta as seguintes dimensões: 0,40m de largura e 2,5m de comprimento. A limpeza da grade de barras e do desarenador é realizada manualmente, segundo frequência semanal. O esgoto gradeado e desarenado escoar por gravidade ao poço da estação elevatória exclusiva do filtro biológico percolador.

A Figura 4.4 apresenta uma vista da unidade de tratamento preliminar utilizada durante a pesquisa.

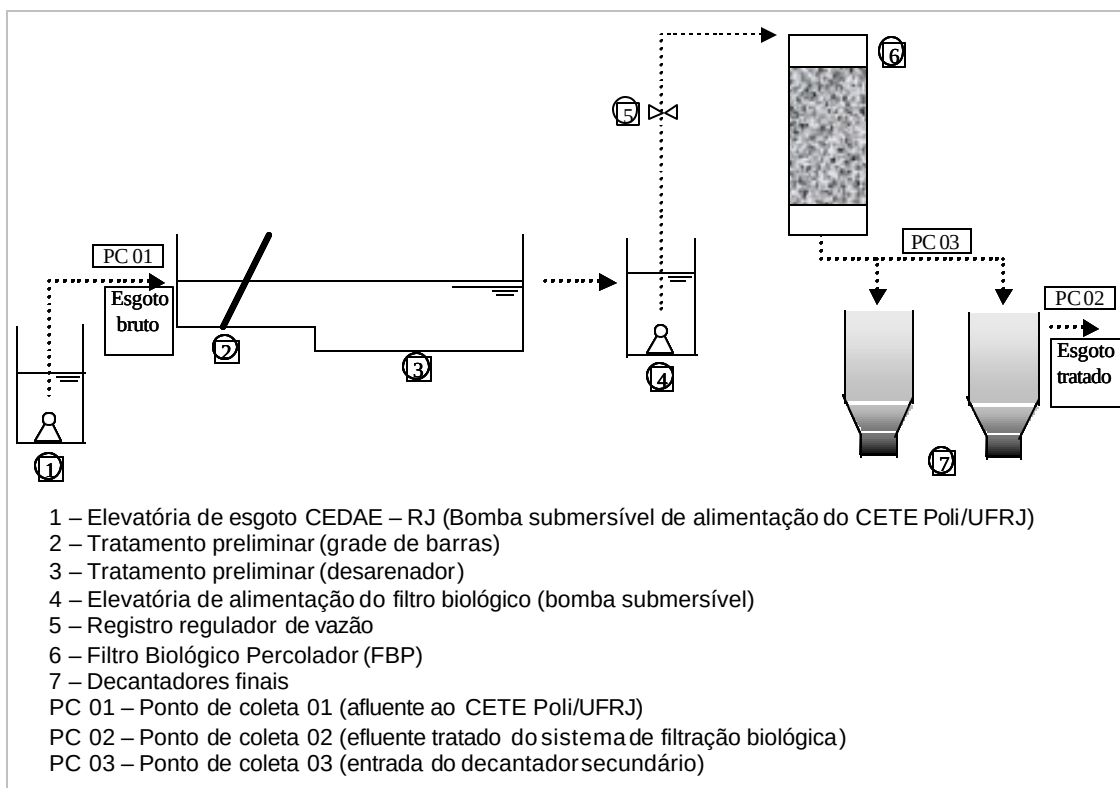


Figura 4.3 – Fluxograma da unidade experimental



Figura 4.4 – Tratamento preliminar: grade de barras e desarenador tipo canal

4.2.2 - Filtro Biológico Percolador

Os esgotos são recalcados para o topo da unidade de filtração biológica por meio de um conjunto motor-bomba instalado em uma elevatória do tipo submersa e uma tubulação de recalque de 50mm de diâmetro. Um registro instalado na tubulação de recalque permite o controle da vazão afluyente à unidade.

O filtro biológico percolador do CETE-UFRJ é estruturado em fibra de vidro. Apresenta área superficial quadrada de 1m^2 e altura total de 3,5m, sendo 3,0m a altura correspondente ao meio suporte. A Figura 4.5 ilustra os elementos componentes da unidade pesquisa.

Para aumentar a ventilação natural da unidade e a transferência de oxigênio requerida para o processo aeróbio, o reator é dotado de aberturas laterais, localizadas nas quatro arestas do filtro, em sua parte inferior.

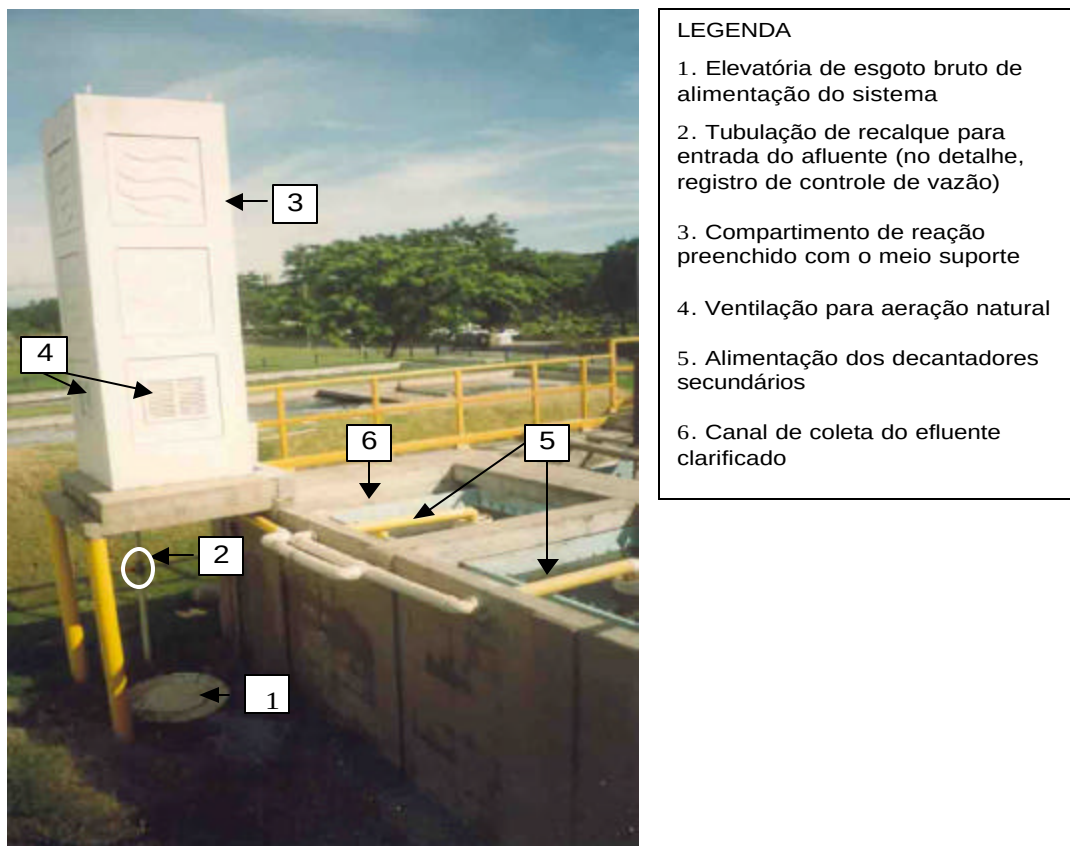


Figura 4.5– Filtro Biológico Percolador

O dispositivo de distribuição dos esgotos sobre a área superficial do reator foi desenvolvido e melhor adaptado à unidade durante a condução do projeto de pesquisa, tendo-se inicialmente trabalhado com um dispositivo tipo chuveiro único, e posteriormente com dois chuveiros e tubos perfurados. Por fim, a melhor distribuição dos esgotos sobre o meio suporte foi obtida por meio de uma bandeja perfurada. As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 ilustram dois dos sistemas de distribuição utilizados na fase de adaptação e a clara diferença na eficiência de molhamento dos dispositivos.



Figura 4.6 – Sistema de distribuição inicial (chuveiro único)

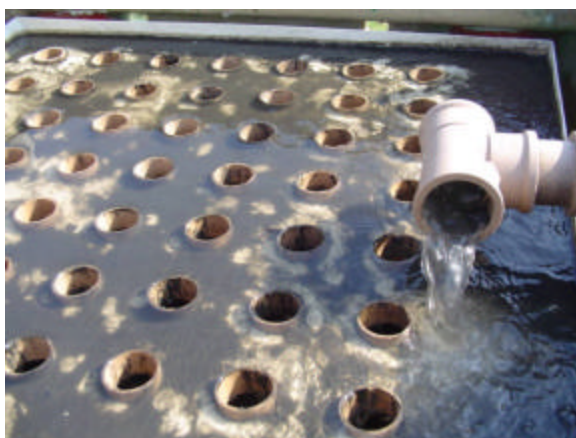


Figura 4.7 – Sistema de distribuição que atingiu melhor resultado (bandeja)



Figura 4.8 – Performance de molhamento da bandeja (utilizada na pesquisa)

O melhor dispositivo desenvolvido – a bandeja perfurada, tem uma altura de 5,0 cm, sendo de 3,0 cm a altura correspondente aos furos. Os esgotos afluem ao dispositivo de distribuição por meio da tubulação de recalque e quando atingem a borda superior dos furos, vertem uniformemente por todos eles e conseqüentemente alcançam toda a área superficial do meio suporte.

Durante a pesquisa foram utilizados dois diferentes meios suporte plásticos: anéis randômicos, marca AMBIO e modular *cross flow*, marca Veolia/TRA. Na Tabela 4.2 são apresentadas as principais características físicas de cada um dos meios suporte utilizados. A área superficial específica dos meios foi mensurada pela própria pesquisadora, enquanto o índice de vazios foi informado pelos seus fornecedores.

Para o cálculo da área superficial específica do meio suporte randômico foi utilizado uma caixa prismática com volume de $0,08\text{m}^3$. Dentro da caixa foram colocados 44 anéis randômicos, cada qual com área superficial de aproximadamente $0,15\text{m}^2$, contabilizando os dois lados de cada unidade, perfazendo a área superficial específica de $80\text{m}^2/\text{m}^3$.

Para o caso do meio suporte *cross flow*, considerando a área superficial de cada uma das 16 “folhas” que formam cada bloco, contabilizando os dois lados – $0,70\text{m}^2$ e o volume prismático do mesmo – $0,08\text{m}^3$, obteve-se a área superficial específica total de $140\text{m}^2/\text{m}^3$.

Tabela 4.2 – Características físicas dos meios suporte utilizados na pesquisa

Meio suporte	Figura	Área Superficial Específica (m^2/m^3)	Índice de Vazios (%)
Anéis randômicos		80	95
Modular <i>Cross Flow</i>		140	95

4.2.3 - Decantador Secundário

Durante todo o projeto de pesquisa o filtro biológico alimentou dois decantadores secundários, de idêntica configuração geométrica. A opção deveu-se à imposição de

condições operacionais para a unidade de tratamento que resultaria em taxa de aplicação hidráulica superior à $36\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$, valor limite preconizado pela Norma Técnica NB-570/1990 – Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário (ABNT, 1990).

Segundo JORDÃO & PESSOA (*no prelo*), para a obtenção de um efluente melhor clarificado, tem-se recomendado maior profundidade para a unidade de decantação final e a adoção de taxa de aplicação hidráulica limitada à $24\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d.}$ Este valor máximo recomendado equivaleu durante as diferentes fases da pesquisa ao valor limite aplicado nos decantadores.

Os decantadores secundários da unidade experimental são estruturados em fibra de vidro, de seção superficial quadrada com lado de 1,7m, de volume tronco-piramidal com profundidade total de 2,2m, sendo 0,40m correspondentes ao volume de sedimentação. A alimentação dos decantadores é realizada por gravidade, a partir da bandeja de recolhimento do esgoto percolado pelo meio suporte, situada na base da unidade de filtração biológica.

A entrada do esgoto se dá pela parte superior dos decantadores, sendo cada unidade dotada de uma tubulação central, de diâmetro de 100mm, e direcionada para o fundo. O trecho extremo da tubulação, por onde efetivamente os esgotos afluem às unidades, é concêntrico a um defletor com altura de 0,50m, que minimiza os efeitos de revolvimento do lodo sedimentado. Este detalhe está ilustrado no esquema da Figura 4.9.

O efluente clarificado verte para o canal de coleta através de vertedores triangulares, sendo a vazão de esgotos tratados medida em um Medidor Parshall, com garganta de 1", localizado na extremidade final do canal.

As unidades de decantação secundária do CETE-UFRJ e utilizadas no projeto de pesquisa são ilustradas nas Figuras 4.10 e 4.11.

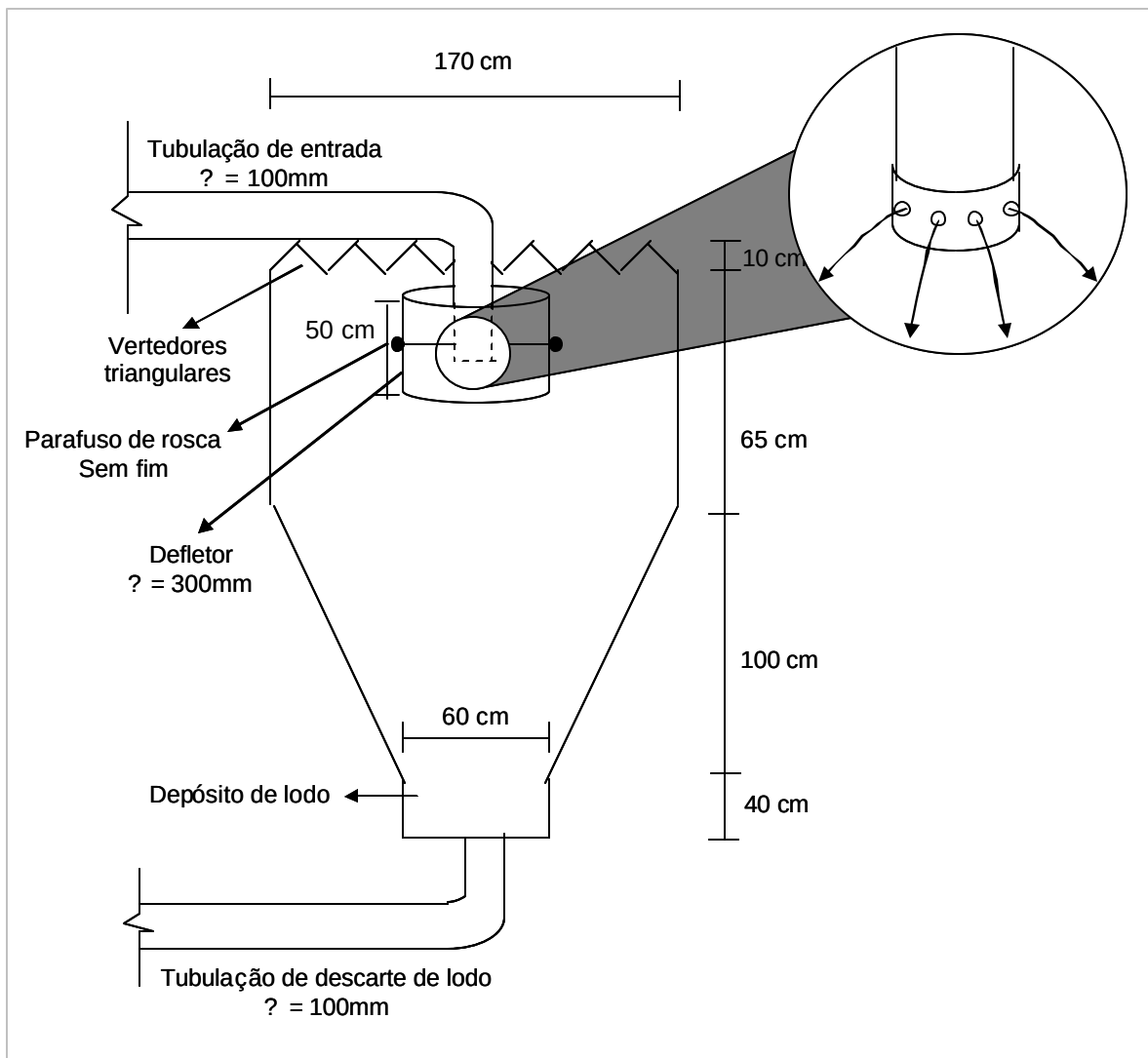


Figura 4.9 – Desenho esquemático do decantador secundário

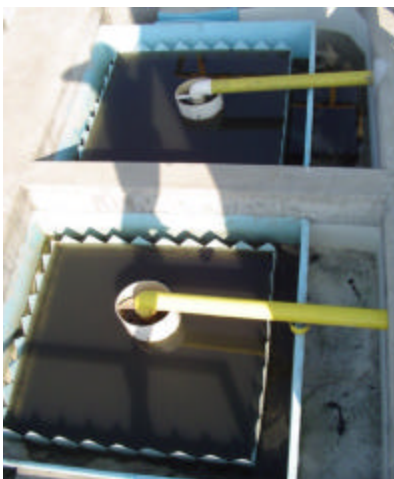


Figura 4.10 – Vista superior dos decantadores secundários



Figura 4.11 – Detalhe do dispositivo de alimentação da unidade de decantação.

Finalmente, a Tabela 4.3 resume as características físicas das unidades de filtração biológica e de decantação secundária.

Tabela 4.3 – Resumo das principais características das unidades experimentais

Descrição	Unidade	Filtro Biológico	Decantador Secundário
Material	-	Fibra de vidro	Fibra de vidro
Comprimento	m	1,0	1,7
Largura	m	1,0	1,7
Altura total	m	3,5	2,2
Altura do meio suporte	m	3,0	-
Volume	m ³	3,0	2,7

4.3 - Fases Experimentais e Condições Operacionais da Pesquisa

A unidade de filtração biológica do CETE-UFRJ teve sua operação iniciada em Maio de 2004. Durante aproximadamente 5 meses, houve intensa dedicação para adaptação e preparação da unidade para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, cujas atividades principalmente consistiram em: adequação do conjunto motor-bomba e da tubulação de recalque para atendimento às vazões desejadas; desenvolvimento de dispositivos mais eficientes para a distribuição dos esgotos sobre a superfície do meio suporte; e adaptação dos dispositivos de alimentação dos decantadores secundários.

O delineamento experimental é baseado nas condições operacionais do sistema de tratamento, se caracterizando pela discretização de 2 principais fases experimentais (A e B), que correspondem, respectivamente, aos meios suporte utilizados: tipo anéis randômicos e tipo modular *cross flow*.

As sub-fases experimentais I, II e III correspondem, respectivamente, às taxas de aplicação superficial e volumétrica de 40 m³/m².d e 0,9 kgDBO/m³.d, 65 m³/m².d e 1,5 kgDBO/m³.d, e 80 m³/m².d e 2,1 kgDBO/m³.d.

As 6 fases experimentais da pesquisa – AI, AII, AIII, BI, BII, e BIII foram conduzidas durante 8 meses, no período compreendido entre os meses de Setembro de 2004 a Abril de 2005. A Tabela 4.4 resume, para cada uma das fases experimentais, as respectivas condições operacionais.

Tabela 4.4 – Condições operacionais da unidade experimental da pesquisa

Fase	Sub Fase	Seqüência (dias)	Quantidade (dias)	Filtro Biológico Percolador			Decantador Secundário	
				Meio Suporte	TAS (m ³ /m ² .d)	TAO (KgDBO/m ³ .d)	TAS (m ³ /m ² .d)	T (h)
A	I	1 a 16	16	Randômico	40	0,9	12	3h21'
	II	17 a 44	28		65	1,5	19	2h24'
	III	45 a 79	35		80	2,1	24	1h41'
B	I	135 a 232	98	Cross Flow	40	0,9	12	3h21'
	II	80 a 126	47		65	1,5	19	2h24'
	III	127 a 134	8		80	2,1	24	1h41'

As 6 fases experimentais efetivas e anteriormente apresentadas puderam ainda ser combinadas e agrupadas umas às outras, ampliando o potencial de análise dos resultados alcançados pelo projeto de pesquisa. Por exemplo, a combinação e agrupamento das fases experimentais AI, AII e AIII geraram a fase combinada A Total, e assim sucessivamente, da seguinte forma:

- **Fase A Total:** reúne todos os resultados das fases experimentais AI, AII e AIII, quando utilizado meio suporte randômico, independente da carga hidráulica aplicada;
- **Fase B Total:** de maneira análoga à fase A Total, reúne os resultados das fases BI, BII e BIII, quando utilizado o meio suporte *cross flow*, independente da carga hidráulica aplicada;
- **Fase I Total:** abrange todos os resultados obtidos quando aplicada a carga hidráulica de 40m³/m².d, independente do tipo de meio suporte utilizado;
- **Fase II Total:** como a Fase I Total, abrange todos os resultados obtidos em função da aplicação da carga hidráulica de 65m³/m².d, independente do meio suporte utilizado;

- **Fase III Total:** da mesma forma, independente do meio suporte utilizado, reúne todos os resultados obtidos com a carga hidráulica de $80\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}.$;
- **Fase Total:** por fim, esta fase combinada, envolve todos os resultados do projeto de pesquisa, independente do meio suporte utilizado e das cargas hidráulicas aplicadas.

Assim, na Tabela 4.5 são apresentadas as características das 12 fases da pesquisa - 6 fases experimentais e 6 fases combinadas.

Tabela 4.5 – Resumo das 12 fases operacionais (6 fases experimentais + 6 fases combinadas)

Fases	Descrição	Quantidade de resultados
Experimentais	AI	Meio randômico, $40\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
	AII	Meio randômico, $65\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
	AIII	Meio randômico, $80\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
	BI	Meio <i>cross flow</i> , $40\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
	BII	Meio <i>cross flow</i> , $65\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
	BIII	Meio <i>cross flow</i> , $80\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
Combinadas	A Total	Meio randômico, as 3 taxas
	B Total	Meio <i>cross flow</i> , as 3 taxas
	I Total	$40\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, ambos os meios
	II Total	$65\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, ambos os meios
	III Total	$80\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, ambos os meios
	Total	Ambos os meios e as 3 taxas

4.4 - Monitoramento da Unidade

4.4.1 - Amostragem

O plano de monitoramento da unidade de tratamento definiu pontos de amostragem para avaliação da performance do sistema, como descritos na Tabela 4.6 e ilustrados no fluxograma da Figura 4.3 anteriormente apresentada.

Tabela 4.6 – Pontos de amostragem

Ponto	Amostra	Local de Coleta	Tipo de Amostra
PC 01	Esgoto bruto afluente	Canal de grades do CETE-UFRJ	- Composta horária (10h) de 8:00h às 17:00h, frequência de 3 a 4 vezes por semana; e - Pontual (1), eventual
PC 02	Efluente do decantador secundário	Canal de coleta do efluente clarificado	- Composta horária (10h) de 8:00h às 17:00h, frequência de 3 a 4 vezes por semana; e - Pontual (1), eventual
PC 03	Efluente do filtro biológico	Tubulação de entrada do decantador secundário	- Composta horária (10h) de 8:00h às 17:00h, frequência de 3 a 4 vezes por semana (2).

1) As coletas pontuais eram realizadas para medição de pH, temperatura e turbidez

2) Somente análise de SST

4.4.2 - Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos analisados durante a pesquisa foram DQO, DBO, SST, SSV, SSF, pH, temperatura e turbidez. Todas as análises foram processadas no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – LEMA, segundo o que preconiza o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998)

4.5 - Testes Estatísticos

Foram realizados testes estatísticos de hipóteses, paramétricos, do tipo t-student, para a investigação da existência de diferenças significativas, entre os resultados das diferentes fases da pesquisa. Foram realizados com o auxílio dos programas de computador *Microsoft Excel* e *SigmaPlot*.

Inicialmente verificou-se o ajuste dos dados – resultados obtidos – em relação à distribuição normal, utilizando o método “Kolmogorov-Smirnov”. Posteriormente, foram estabelecidas as hipóteses nula e alternativa, para aplicação dos testes t-student.

Foram realizadas três verificações de existência de diferenças significativas: entre as concentrações afluentes de DQO, DBO e SST nas Fases A (meio randômico) e B (meio cross flow); entre as eficiências de remoção de DQO, DBO e SST nas Fases A (meio randômico) e B (meio cross flow); e entre as concentrações efluentes de DQO, DBO e SST nas Fases I ($40\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$), II ($65\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) e III ($80\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$).

A verificação de existência de diferença significativa entre as concentrações afluentes de DQO, DBO e SST nas Fases A (meio randômico) e B (meio cross flow) deveu-se à observação de que as concentrações afluentes na Fase B foram inferiores às concentrações na Fase A, o que prejudicaria a avaliação de desempenho de ambas as fases em função das respectivas concentrações efluentes.

Assim é que procedeu-se a verificação de existência de diferença significativa entre as eficiências de remoção de DQO, DBO e SST em ambas as fases.

Já em relação às Fases I, II, e III, a verificação pode ser realizada em função das concentrações efluentes, uma vez que cada uma das fases abrange concentrações afluentes da Fase A e da Fase B.

Dessa forma, as seguintes hipóteses foram estabelecidas:

- 1º teste: entre as concentrações afluentes de DQO, DBO e SST nas Fases A (meio randômico) e B (meio cross flow):

- Hipótese nula: Concentração Média Afluente (Fase B) = Concentração Média Afluente (Fase A)
- Hipótese alternativa: Concentração Média Afluente (Fase B) $\leq$ Concentração Média Afluente (Fase A)

- 2º teste: entre as eficiências de remoção de DQO, DBO e SST nas Fases A (meio randômico) e B (meio cross flow):

- Hipótese nula: Eficiência Média Efluente (Fase B) = Eficiência Média Efluente (Fase A)
- Hipótese alternativa: Eficiência Média Efluente (Fase B) $\leq$ Eficiência Média Efluente (Fase A)

- 3º teste: entre as concentrações afluentes de DQO, DBO e SST nas Fases I ($40\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$), II ($65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$) e III ($80\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$):

- Hipótese nula: Concentração Média (Fase I) = Concentração Média (Fase II)
Concentração Média (Fase II) = Concentração Média (Fase III)
Concentração Média (Fase I) = Concentração Média (Fase III)
- Hipótese alternativa: Concentração Média (Fase I) $\leq$ Concentração Média (Fase II)
Concentração Média (Fase II) $\leq$ Concentração Média (Fase III)
Concentração Média (Fase I) $\leq$ Concentração Média (Fase III)

O teste tstudent gera resultados para um dado valor p, que corresponde ao nível de significância do objeto da análise. A hipótese nula é rejeitada quando o valor p calculado é menor do que o nível de significância desejado, estabelecido no presente caso como igual a 5%, e que corresponde ao nível de confiança de 95%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 6 Fases Experimentais e as 6 Fases Combinadas foram analisadas em relação às respectivas estatísticas descritivas das concentrações efluentes (Item 5.1) e em relação ao atendimento aos padrões de lançamento de efluentes líquidos em corpos d'água vigentes nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo (Item 5.2).

Ambos os casos têm como referência os resultados obtidos em relação às concentrações de DQO, DBO e SST, como apresentado na Tabela 5.1. Na Tabela 5.2, complementarmente, são apresentados os resultados obtidos em relação à turbidez, temperatura e pH, que foram analisadas eventualmente, devido às suas pequenas variações ao longo do desenvolvimento do projeto.

Os gráficos das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 ilustram as séries temporais dos resultados apresentados na Tabela 5.1.

Considerando que a unidade experimental da pesquisa não é precedida, como usual, de tratamento primário, é indevida a avaliação da eficiência global do processo, não sendo portanto analisada nesse sentido.

As análises realizadas tiveram como ferramenta de suporte a Planilha *Microsoft Excel* "Modelo_Planilha_Afluente_Efluente.xls" (VON SPERLING, 2005).

Tabela 5.1 – Concentrações afluentes e efluentes de DQO, DBO e SST

Concentrações anidantes e efluentes de DQO, DBO e SST									
Amostra		Fase	DQO (mg/l)		DBO (mg/l)		SST (mg/l)		
nº	Data		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
01	08/09/04	Randômico (40 m ³ /m ² .d)	AI	146	61	61	27	47	26
02	09/09/04			191	114	97	32	59	30
03	14/09/04			147	82	90	34	69	29
04	15/09/04			179	116	90	44	82	31
05	16/09/04			191	37	121	18	92	40
06	21/09/04			215	103	133	53	66	42
07	22/09/04			197	94	89	37	64	39
08	23/09/04			143	95	88	36	81	33
09	28/09/04	Randômico (65 m ³ /m ² .d)	AII	267	152	152	57	86	50
10	29/09/04			221	134	123	65	69	53
11	06/10/04			152	105	85	56	63	46
12	13/10/04			124	95	72	41	76	48
13	14/10/04			207	94	107	48	59	48
14	19/10/04			120	74	98	47	97	38
15	20/10/04			163	73	93	39	76	37
16	21/10/04			263	140	123	56	96	34
17	04/11/04	Randômico (80 m ³ /m ² .d)	AIII	138	138	90	56	69	50
18	09/11/04			135	84	130	64	51	39
19	10/11/04			225	105	69	42	68	50
20	17/11/04			457	286	110	79	72	44
21	18/11/04			184	53	88	45	71	40
22	22/11/04			222	140	51	37	67	43
23	24/11/04			216	81	61	26	59	31
24	25/11/04			270	135	91	72	79	40
25	03/01/05	Cross Flow (40 m3/m2.d)	BII	166	92	53	28	54	22
26	04/01/05			111	55	67	17	52	30
27	05/01/05			150	132	64	36	56	25
28	06/01/05			150	113	60	39	65	20
29	10/01/05			150	75	63	39	49	11
30	11/01/05			73	36	29	19	38	10
31	12/01/05	Cross Flow (65 m3/m2.d)	BIII	109	73	52	28	54	17
32	13/01/05			161	54	81	34	76	31
33	17/01/05			173	211	67	52	51	34
34	24/01/05	Cross Flow (80 m3/m2.d)	BI	78	96	53	28	62	33
35	25/01/05			115	77	68	47	70	21
36	26/01/05			192	115	83	66	77	35
37	27/01/05			151	57	61	20	65	30
38	07/03/05			203	185	88	53	57	29
39	09/03/05			132	95	74	43	54	25
40	14/03/05			182	127	82	38	62	27
41	16/03/05			140	35	107	27	64	31
42	30/03/05			175	35	89	27	59	13
43	04/04/05			150	67	70	30	56	9
44	06/04/05			109	36	77	28	58	28
45	11/04/05			55	54	47	36	46	18
46	25/04/05			123	36	62	18	35	18
47	27/04/05			164	66	66	20	63	24

Tabela 5.2 – Parâmetros Complementares de qualidade de água

Nº amostra	pH		Turbidez (FAU)		Temperatura (°C)	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
01	6,9	7,3	75	21	30,7	28,3
02	6,6	-	85	-	28,0	-
03	6,7	6,4	73	21	27,1	28,7
04	6,7	7,7	53	26	26,1	27,2
05	6,7	7,6	113	27	25,3	24,5
06	6,6	7,4	95	27	27,0	28,6
07	6,7	-	77	30	27,9	29,0
08	6,6	7,7	73	26	26,8	27,0
09	6,3	7,3	95	35	27,9	29,0
10	6,5	7,7	57	35	26,8	27,0
11						
12	6,6	7,8	70	43	26,9	28,5

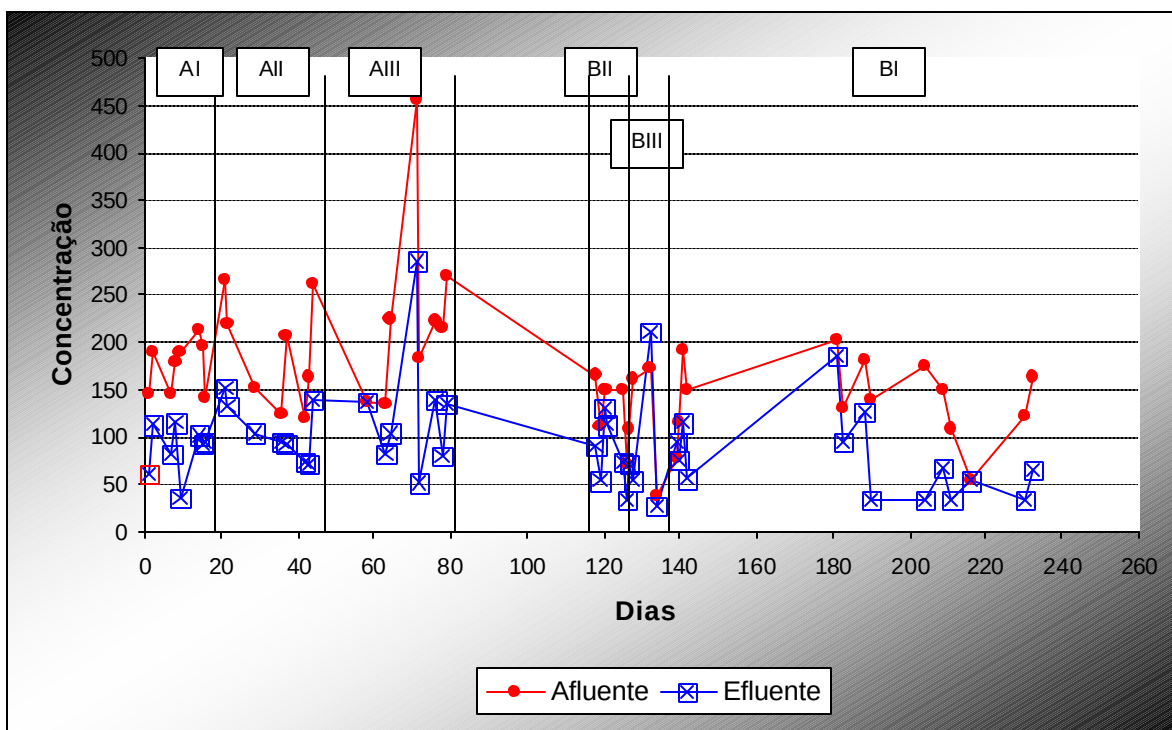


Figura 5.1 – Série temporal das concentrações afluente e efluente de DQO

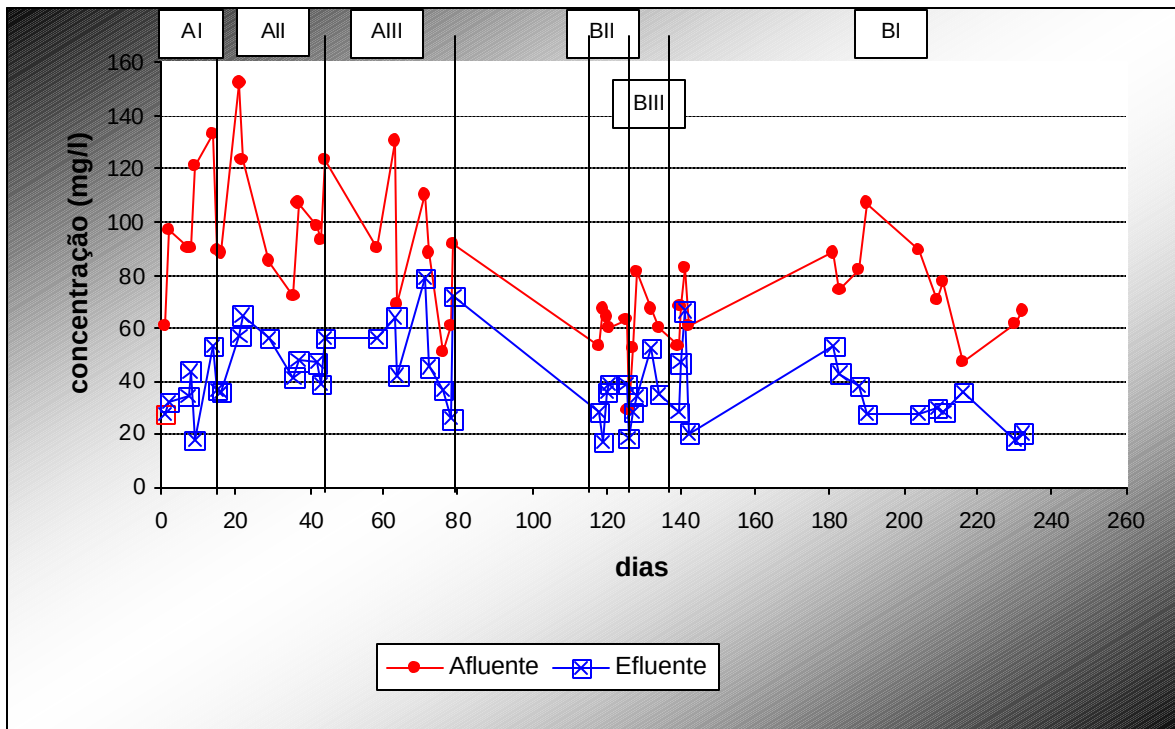


Figura 5.2 – Série temporal das concentrações afluente e efluente de DBO

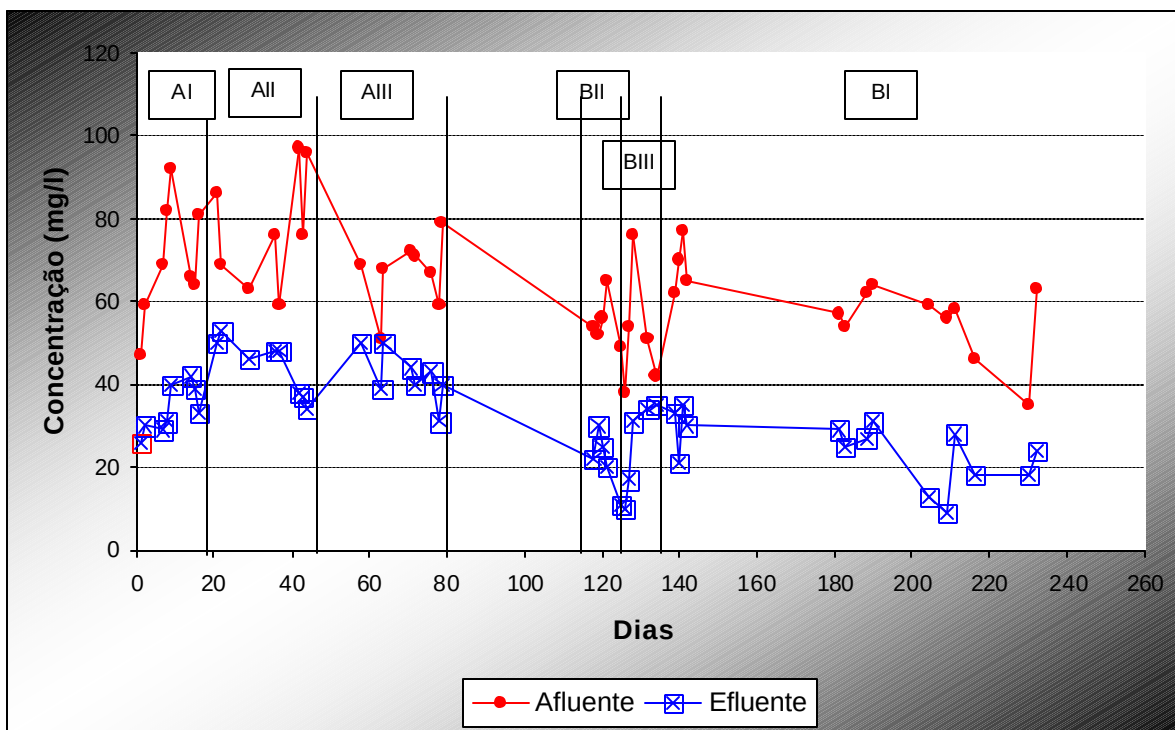


Figura 5.3 – Série temporal das concentrações afluente e efluente de SST

Observa-se que a distribuição das concentrações afluentes nas fases B (BI, BII e BIII) encontra-se em um patamar inferior ao das fases A (AI, AII e AIII). O fato é justificado em função do período de férias da Universidade e da conseqüente redução da geração de esgotos e das cargas orgânica e de sólidos afluentes ao CETE-UFRJ.

As tabelas e gráficos seguintes sobre as estatísticas descritivas das 6 fases operacionais + as 6 fases combinadas da pesquisa também demonstraram haver variação das características qualitativas do esgoto afluente ao CETE-UFRJ durante o período letivo e durante o recesso escolar.

5.1 - Em relação às Estatísticas Descritivas

As Tabelas 5.3.a a 5.3.f apresentam o resumo das estatísticas descritivas das concentrações afluentes e efluentes de DQO, DBO e SST das Fases Experimentais e respectivas Fases Combinadas. Em seguida as Figuras 5.4.a a 5.4.f, ilustram os respectivos gráficos Box and Whiskers.

Tabela 5.3.a – Estatísticas descritivas das concentrações afluentes de DQO

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de variância	Med. + d. padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	176	143	215	185	27	0,16	204	149	145	147	185	193	202
AII	8	190	120	267	185	58	0,31	248	131	123	145	185	232	264
AIII	8	231	135	457	219	102	0,44	333	129	137	173	219	236	326
A Total	24	199	120	457	191	71	0,36	270	128	136	147	191	221	266
BI	14	141	55	203	145	42	0,30	183	98	87	117	145	172	189
BII	6	133	73	166	150	35	0,26	168	99	92	121	150	150	158
BIII	3	148	104	173	161	34	0,23	182	114	119	135	161	176	171
B Total	23	140	55	203	150	38	0,27	178	101	84	113	150	165	181
I Total	22	154	55	215	151	41	0,27	194	113	110	134	151	189	197
II Total	14	166	73	267	151	56	0,34	222	109	114	131	151	197	250
III Total	11	208	109	457	184	95	0,46	303	113	135	150	184	224	270
Total	47	170	55	457	161	64	0,38	234	106	110	137	161	195	223

Tabela 5.3.b – Estatísticas descritivas das concentrações efluentes de DQO

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de Variância	Med. + d. padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	88	37	116	95	27	0,31	115	61	54	77	95	106	115
AII	8	108	73	152	100	30	0,28	139	78	74	89	100	136	144
AIII	8	128	53	286	120	71	0,56	199	56	73	83	120	139	184
A Total	24	108	37	286	99	48	0,45	156	60	65	82	99	134	140
BI	14	77	35	185	67	43	0,56	120	34	35	41	67	96	123
BII	6	84	36	132	84	36	0,43	120	48	46	60	84	108	123
BIII	3	113	54	211	73	86	0,76	198	27	58	64	73	142	173
B Total	23	84	35	211	73	47	0,56	131	34	36	54	73	105	131
I Total	22	81	35	185	80	38	0,47	119	43	36	55	80	101	116
II Total	14	98	36	152	95	34	0,35	132	64	60	74	95	127	138
III Total	11	124	53	286	105	71	0,58	195	52	54	77	105	139	211
Total	47	96	35	286	94	49	0,51	145	47	37	64	94	116	140

Tabela 5.3.c – Estatísticas descritivas das concentrações afluentes de DBO

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de variância	Med. + d. padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	96	61	133	90	22	0,23	118	74	80	89	90	103	125
AII	8	107	72	152	103	25	0,24	132	81	81	91	103	123	132
AIII	8	86	51	130	89	26	0,30	112	60	58	67	89	96	116
A Total	24	96	51	152	91	25	0,26	121	71	63	87	91	113	128
BI	14	73	47	107	72	16	0,22	89	58	55	63	72	83	89
BII	6	56	29	67	62	14	0,25	70	42	41	55	62	64	66
BIII	3	67	52	81	67	12	0,19	81	52	55	60	67	74	78
B Total	23	68	29	107	67	16	0,24	84	52	52	61	67	79	87
I Total	22	82	47	133	83	21	0,26	103	61	61	67	83	90	106
II Total	14	85	29	152	79	33	0,39	118	52	55	63	79	105	123
III Total	11	81	51	130	81	24	0,30	105	57	52	64	81	91	110
Total	47	82	29	152	82	25	0,31	107	57	53	63	82	92	122

Tabela 5.3.d – Estatísticas descritivas das concentrações efluente de DBO

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de Variância	Med. + d. Padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	35	18	53	35	11	0,30	46	25	24	31	35	39	47
AII	8	51	39	65	52	9	0,17	60	42	40	46	52	56	59
AIII	8	53	26	79	51	18	0,35	71	34	34	41	51	66	74
A Total	24	46	18	79	45	15	0,32	61	31	29	37	45	56	65
BI	14	34	18	66	29	14	0,40	48	21	20	27	29	42	51
BII	6	30	17	39	32	10	0,33	40	20	18	21	32	38	39
BIII	3	38	28	52	34	12	0,33	50	26	29	31	34	43	48
B Total	23	34	17	66	30	13	0,37	46	21	19	27	30	39	51
I Total	22	35	18	66	33	12	0,36	47	22	20	27	33	42	52
II Total	14	42	17	65	40	14	0,35	56	28	22	37	40	54	57
III Total	11	49	26	79	45	18	0,36	66	31	28	36	45	60	72
Total	47	40	17	79	38	15	0,38	55	25	20	28	38	50	60

Tabela 5.3.e – Estatísticas descritivas das concentrações afluentes de SST

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de Variância	Med. + d. padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	70	47	92	68	14	0,21	84	56	55	63	68	81	85
AII	8	78	59	97	76	14	0,18	92	63	62	68	76	89	96
AIII	8	67	51	79	69	9	0,13	76	58	57	65	69	71	74
A Total	24	72	47	97	69	13	0,18	85	59	59	64	69	80	90
BI	14	59	35	77	61	10	0,17	69	49	48	56	61	64	69
BII	6	52	38	65	50	9	0,17	61	43	44	50	53	56	61
BIII	3	60	51	76	54	14	0,23	74	47	52	53	54	65	72
B Total	23	58	35	77	57	10	0,18	68	47	47	53	57	64	69
I Total	22	63	35	92	63	13	0,20	76	50	48	57	63	68	81
II Total	14	67	38	97	64	18	0,26	84	49	50	55	64	76	93
III Total	11	65	51	79	68	10	0,15	75	55	51	57	68	72	76
Total	47	65	35	97	64	14	0,21	78	51	50	56	64	72	81

Tabela 5.3.f – Estatísticas descritivas das concentrações efluente de SST

Fase	Quantidade de dados (um)	Média (mg/l)	Mínimo (mg/l)	Máximo (mg/l)	Mediana (mg/l)	Desvio padrão	Coefficiente de Variância	Med. + d. padrão	Med. - d. padrão	Percentis 10% (mg/l)	Percentis 25% (mg/l)	Percentis 50% (mg/l)	Percentis 75% (mg/l)	Percentis 90% (mg/l)
AI	8	34	26	42	32	6	0,17	40	28	28	30	32	39	41
AII	8	44	34	53	47	7	0,16	51	37	36	38	47	49	51
AIII	8	42	31	50	42	6	0,15	48	36	37	40	42	46	50
A Total	24	40	26	53	40	8	0,19	48	32	30	34	40	47	50
BI	14	24	9	35	26	8	0,31	32	17	15	19	26	30	32
BII	6	20	10	30	21	8	0,40	28	12	11	13	21	24	28
BIII	3	27	17	34	31	9	0,33	36	18	20	24	31	33	33
B Total	23	24	9	35	25	8	0,34	31	16	11	18	25	30	33
I Total	22	28	9	42	29	8	0,30	36	19	18	24	29	33	39
II Total	14	34	10	53	36	14	0,43	48	19	14	23	36	48	49
III Total	11	38	17	50	40	10	0,25	48	29	31	30	40	44	50
Total	47	32	9	53	31	11	0,36	43	21	18	25	31	40	48

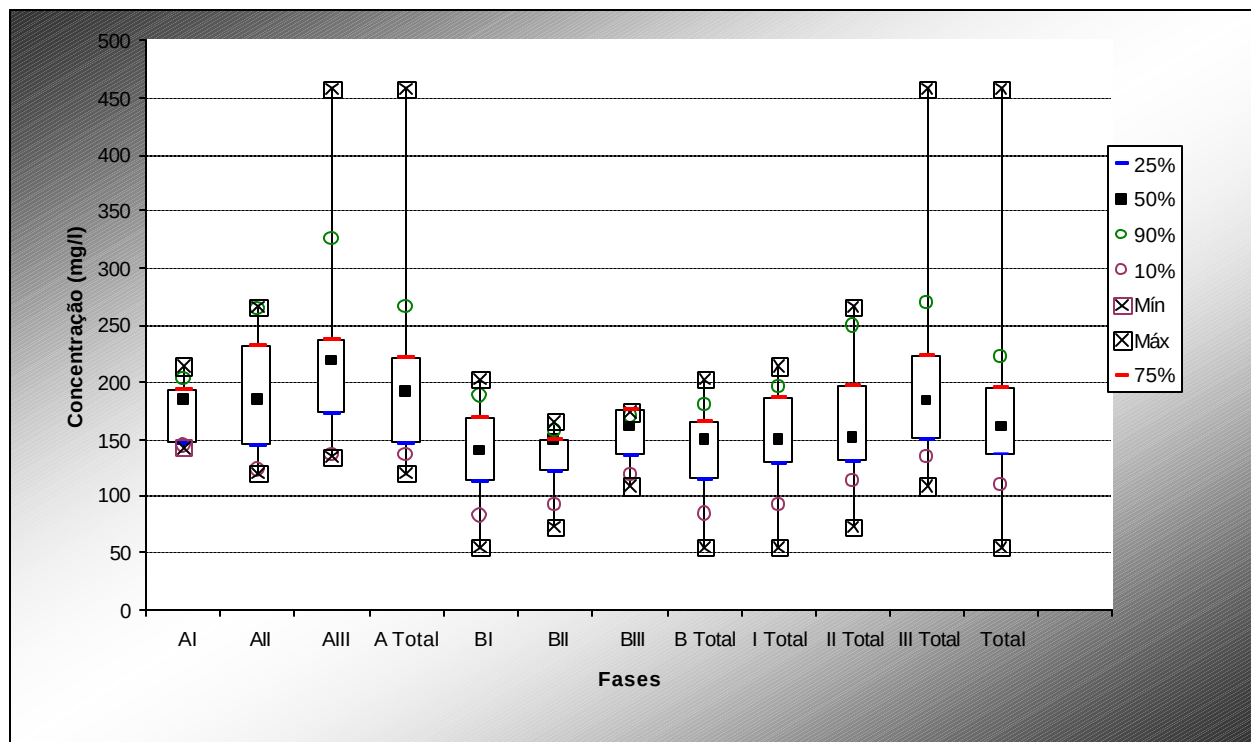


Figura 5.4.a – Gráfico Box-Whiskers da DQO afluente

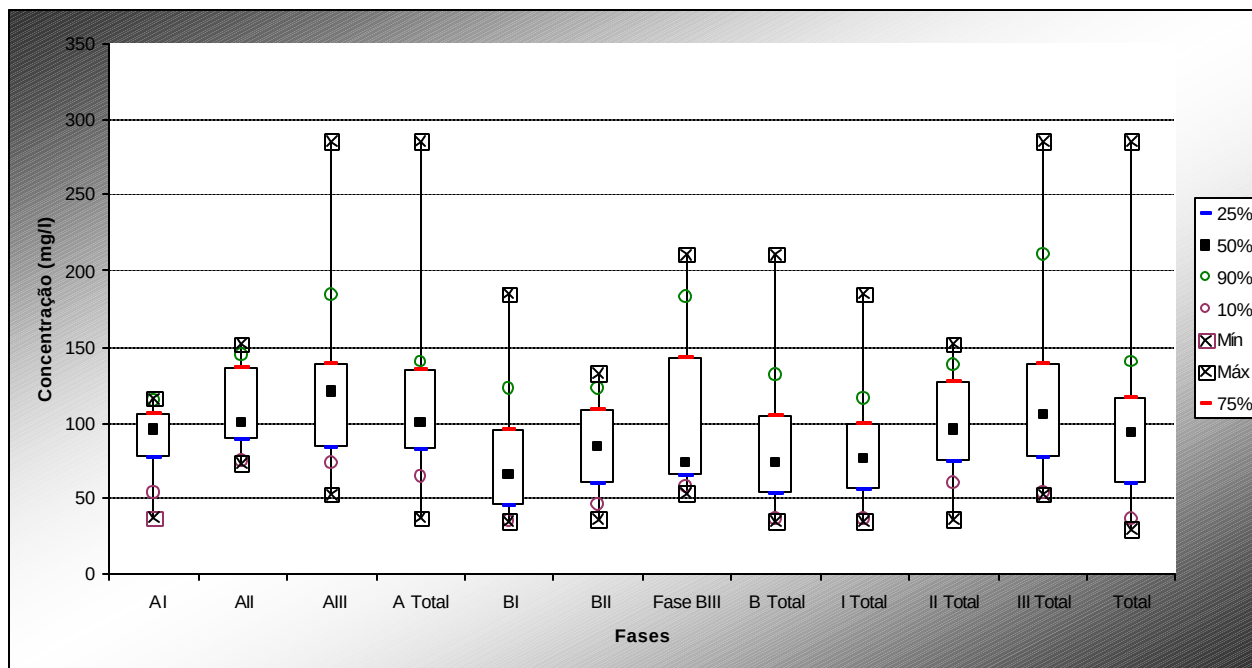


Figura 5.4.b – Gráfico Box-Whiskers da DQO efluente

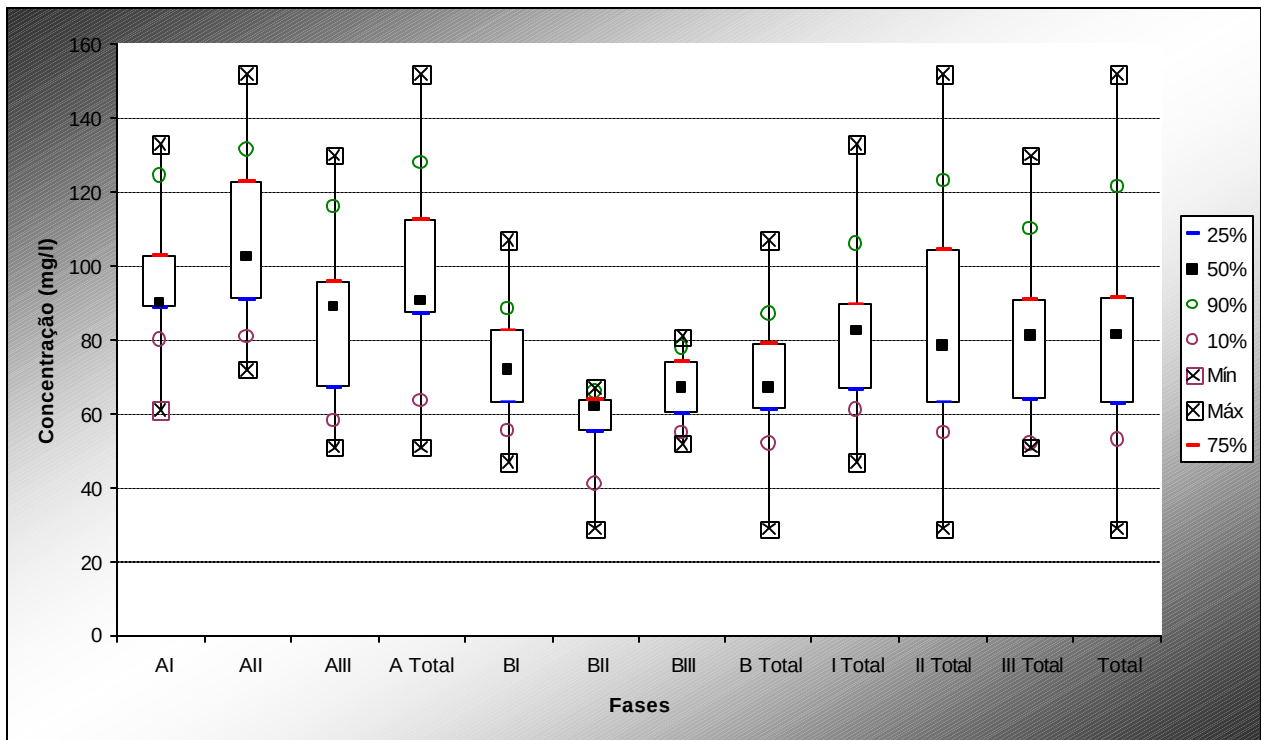


Figura 5.4.c – Gráfico Box-Whiskers da DBO afluente

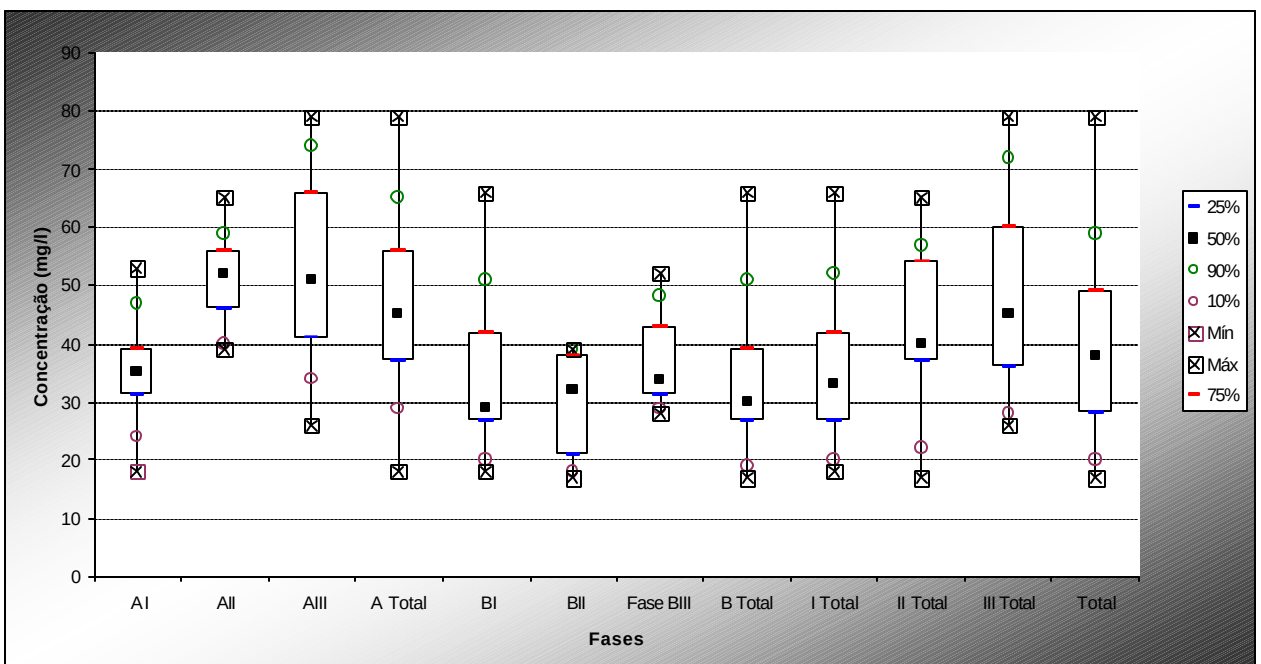


Figura 5.4.d – Gráfico Box-Whiskers da DBO efluente

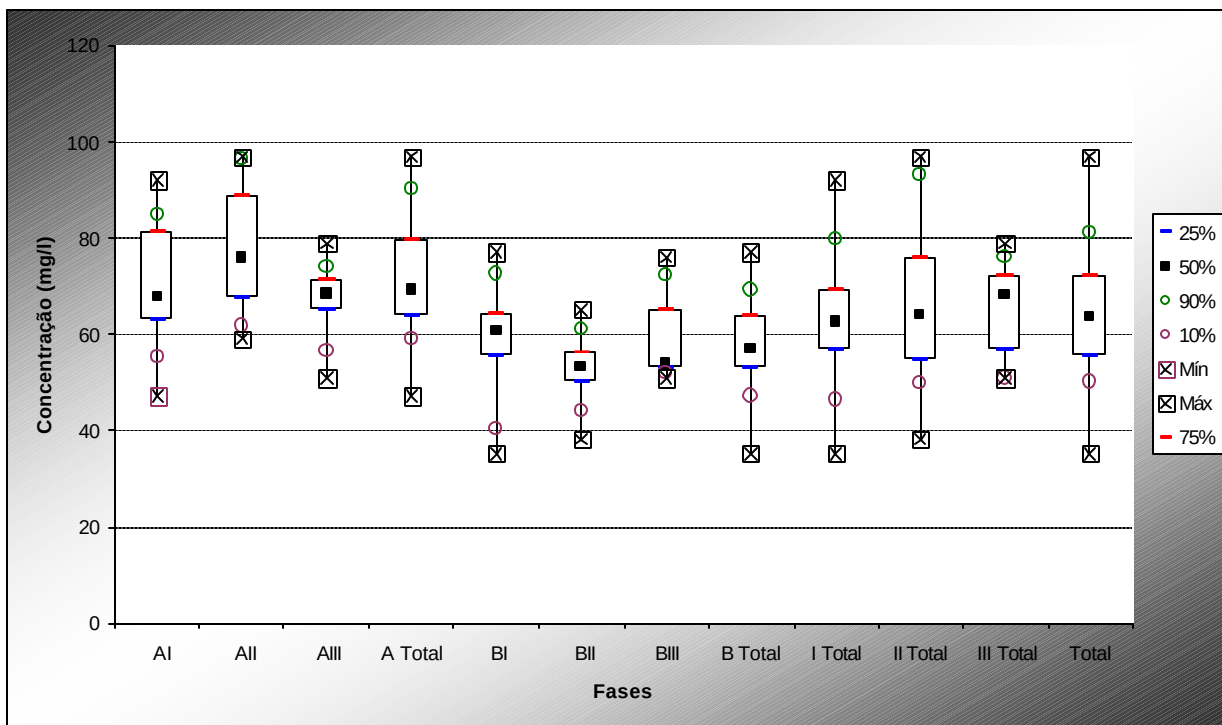


Figura 5.4.e – Gráfico Box-Whiskers de SST afluente

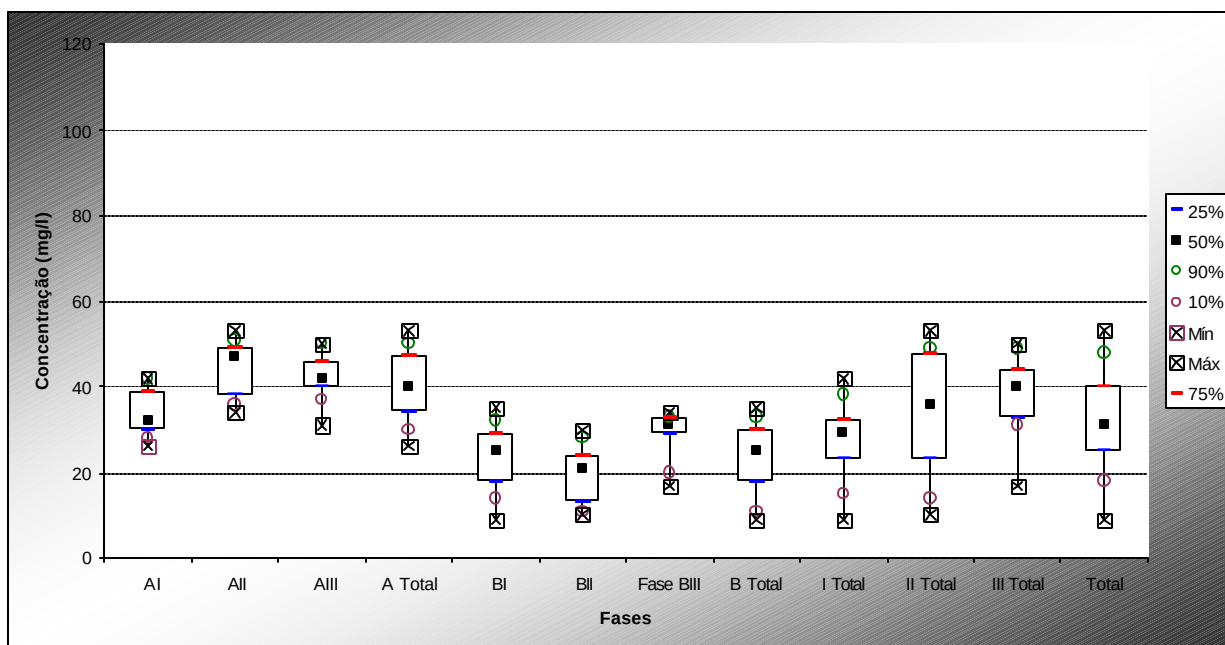


Figura 5.4.f – Gráfico Box-Whiskers de SST efluente

A análise dos resultados das estatísticas descritivas encontra-se organizada de acordo com as Fases Experimentais e suas respectivas combinações, da seguinte forma: Fases Combinadas Total; A Total e B Total; I Total, II Total e III Total.

5.1.1 - Fase Combinada Total

Analisando-se as tabelas e os gráficos anteriores, verifica-se que o efluente da unidade de filtração biológica utilizando meio suporte plástico, independente do tipo de meio e da taxa superficial aplicada, apresentou concentrações médias de DQO, DBO e SST, de respectivamente 96 mg/l, 40 mg/l e 32 mg/l. Observa-se ainda que 75% das concentrações efluentes de DQO, DBO e SST foram respectivamente inferiores a 116 mg/l, 50 mg/l e 40 mg/l e que 90% foram inferiores a 140mg/l, 60mg/l e 48mg/l.

Os valores indicam que durante os 232 dias de operação, a unidade de filtração biológica utilizando meio suporte plástico e submetida à taxas de aplicação superficial de até $80\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ apresentou bom desempenho. O fato deve ser destacado quando considerado que as taxas usualmente aplicadas em meio de pedra limitam-se a $30\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (GONÇALVES *et al*, 2001)

5.1.2 - Fases Combinadas A Total e B Total

Quando somente utilizado o meio suporte tipo randômico, ainda que independente da taxa de aplicação superficial, verificou-se a obtenção de concentrações médias efluentes de DQO, DBO e SST de, respectivamente, 108 mg/l, 46mg/l e 40mg/l, sendo neste caso 75% das concentrações efluentes inferiores à 134 mg/l, 56mg/l e 47mg/l e 90% inferiores à respectivamente 140mg/l, 65mg/l, 50mg/l.

Por outro lado, quando utilizado somente o meio suporte tipo *cross flow* e também independente da taxa de aplicação superficial, verificou-se a obtenção de concentrações médias efluentes de DQO, DBO e SST de, respectivamente, 84 mg/l, 34mg/l e 24mg/l. Verificou-se ainda 75% das concentrações efluentes de DQO, DBO e SST inferiores a 105mg/l, 39mg/l e 30mg/l e da mesma forma, 90% das concentrações efluentes inferiores à 131mg/l, 51mg/l e 33mg/l.

Os resultados sugerem que, em princípio, o meio suporte do tipo *cross flow*, independente da carga hidráulica aplicada, tenha gerado concentrações efluentes inferiores às do meio suporte tipo randômico e assim, melhor desempenho.

No entanto, observa-se que as concentrações afluentes na Fase B foram também inferiores às concentrações na Fase A, como comprovado pelo teste estatístico (Anexo A), o que impede a confirmação da sugestão anterior.

Por outro lado, considerando as eficiências de remoção de DQO, DBO e SST obtidas em função das concentrações afluentes e efluentes ao filtro biológico, e aplicando o mesmo teste estatístico t-student, não foi rejeitada a hipótese nula (eficiência Fase B = eficiência Fase A), concluindo-se não haver diferença significativa entre o desempenho da unidade em função dos diferentes meios plásticos utilizados.

5.1.3 - Fases Combinadas I, II e III

Tecnicamente compreende-se que o aumento das taxas de aplicação hidráulica superficial e orgânica volumétrica decorram, preliminarmente, em insatisfatório desempenho da unidade de filtração biológica. De fato, JORDÃO & PESSOA (*no prelo*) sugerem, para os meios suporte em pedra, taxas de aplicação superficial de até $40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e, para os meios suporte em plástico, taxas de aplicação superficial de até $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, classificados como filtros de alta capacidade.

Assim é que os resultados obtidos parecem também indicar, como demonstram os gráficos das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, uma tendência de elevação das concentrações efluentes em função do aumento das taxas de aplicação superficial.

No entanto, os testes estatísticos paramétricos do tipo t-student realizados e apresentados no Anexo B não confirmam esta hipótese. Em função da normalidade das amostras, quando comparadas as Fases Combinadas I e II e II e III, as hipóteses nulas (concentração média I = concentração média II e concentração média II = concentração média III) relativas às concentrações efluentes de DQO, DBO e SST não puderam ser rejeitadas, indicando não haver diferença significativa entre os resultados.

Somente em relação às concentrações efluentes de DBO e SST, quando comparadas as fases I e III obteve-se rejeição da hipótese nula, demonstrando haver diferença significativa das concentrações efluentes de DBO e SST, quando as taxas de aplicação superficial foram elevadas de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Este resultado corrobora com a compreensão de que a elevação da taxa de aplicação superficial compromete o desempenho do processo, embora não indique a partir de qual

valor o comprometimento efetivamente ocorra, como desejava a concepção da pesquisa ao sugerir, preliminarmente, a taxa intermediária de $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Por outro lado, destaca-se que o teste estatístico ao indicar não haver diferença significativa entre os resultados das fases combinadas I e II, serve como mais uma indicação para a admissão de taxas de aplicação superficial de até $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Os gráficos das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 ilustram a dispersão dos resultados das concentrações efluentes de respectivamente DQO, DBO e SST, para cada uma das fases totais I, II e III.

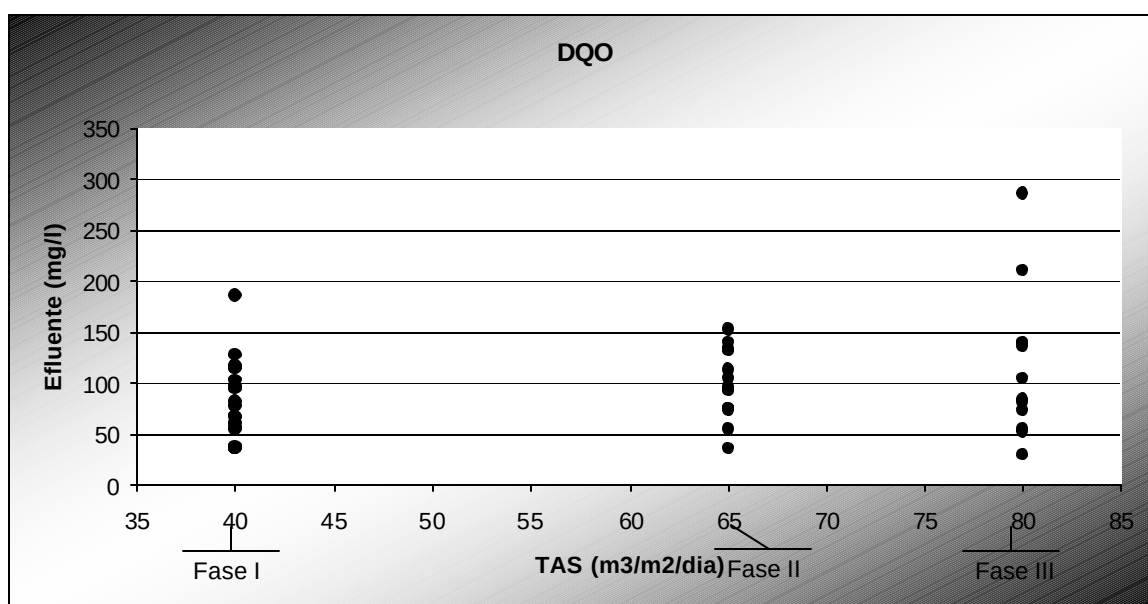


Figura 5.5 – Dispersão das concentrações efluentes de DQO nas Fases Combinadas I, II e III

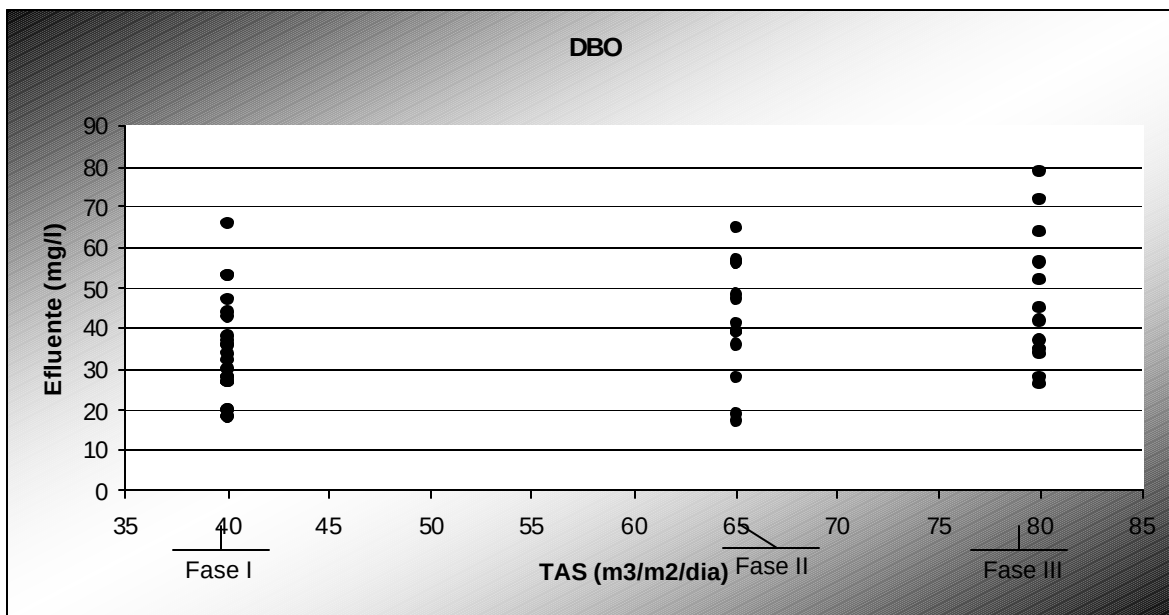


Figura 5.6 – Dispersão das concentrações efluentes de DBO nas Fases Combinadas I, II e III

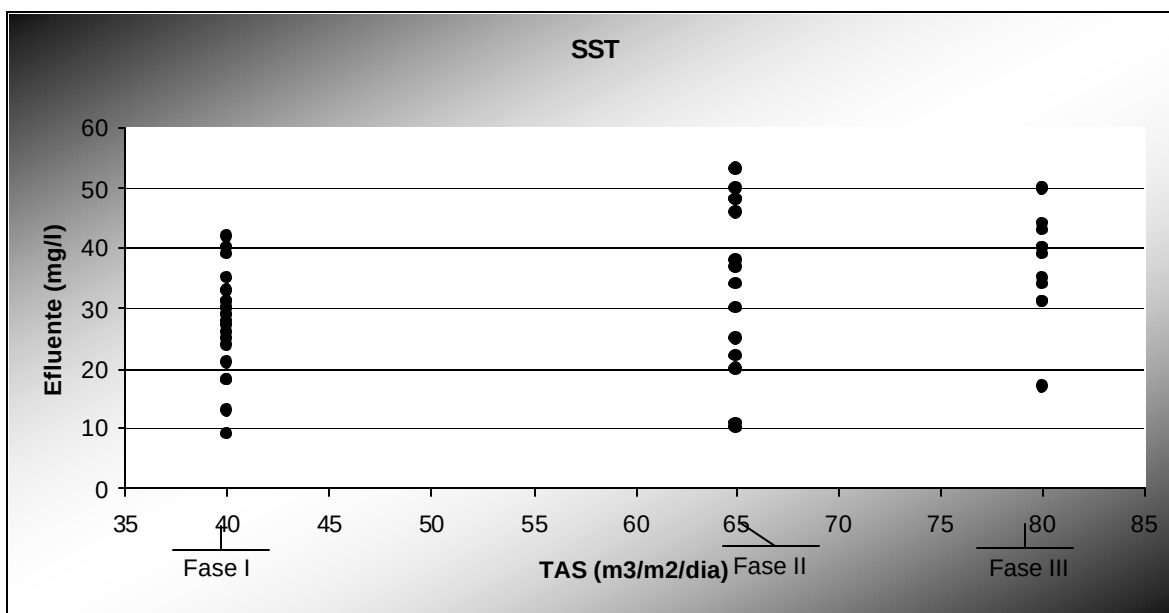


Figura 5.7 – Dispersão das concentrações efluentes de SST nas Fases Combinadas I, II e III

5.2 - Em relação ao Atendimento aos Padrões de Lançamento de Efluentes Líquidos

Para a análise em relação aos padrões de lançamento de efluentes líquidos foram considerados os instrumentos legais vigentes nos Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, respectivamente Diretriz FEEMA-RJ DZ.215-R.3, Deliberação FEAM-MG COPAM nº 10 e CETESB-SP Decreto nº 8.468

A diretriz FEEMA-RJ DZ.215-R.3 estabelece para o controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial, concentrações efluentes máximas e concomitantes de DBO e SST de 40mg/l, para carga orgânica afluyente superior a 80 kgDBO/dia; e concentrações efluentes máximas e concomitantes de DBO e SST de 60mg/l, para carga orgânica afluyente compreendida entre 25 kgDBO/dia e 80 kgDBO/dia.

A Deliberação Normativa FEAM-MG COPAM nº 10 estabelece normas e padrões para qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de água impondo concentrações efluentes máximas e concomitantes de DBO e SST de 60mg/l e de DQO de 90mg/l.

O Decreto nº 8.468 da CETESB-SP regulamenta a Lei nº 997 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente e prevê concentrações efluentes máximas de DBO de 60mg/l.

Embora as citadas legislações também abordem a questão da eficiência do processo em relação à remoção de poluentes, esta análise não será realizada uma vez que a unidade experimental não é precedida por tratamento primário, descaracterizando a compreensão do conceito de eficiência global do processo de tratamento.

A Tabela 5.4 apresenta, para cada uma das Fases Experimentais e Combinadas, a quantidade relativa de resultados que encontra-se de acordo com os padrões estabelecidos pelas diferentes legislações estaduais. Observa-se que a avaliação considera o atendimento aos valores máximos permissíveis, preconizados pelos padrões vigentes, sem considerar a obrigatoriedade do atendimento concomitante e considerando tal obrigatoriedade, quando for o caso.

A análise dos resultados em relação ao atendimento aos padrões de lançamento de efluentes líquidos encontra-se organizada de acordo com as Fases Experimentais e suas respectivas combinações, da seguinte forma: Fase Combinada Total, Fases Combinadas A Total e B Total e Fases Combinadas I Total, II Total e III Total.

Tabela 5.4 – Índice de atendimento (%) aos citados padrões estaduais de lançamento de efluentes

Fases	DBO	SST	DBO SST	DBO	SST	DBO SST	DQO	DBO SST	DQO
	40mg/l	40mg/l	40mg/l	60mg/l	60mg/l	60mg/l	90mg/l	60mg/l	90mg/l
			(RJ)	(SP)		(RJ)		(MG)	
AI	75	87	75	100	100	100	37	37	
AII	12	37	12	87	100	87	25	25	
AIII	25	25	12	62	100	62	37	25	
A Total	37	50	33	83	100	83	33	29	
BI	71	100	71	93	100	93	64	64	
BII	100	100	100	100	100	100	50	50	
BIII	75	100	75	100	100	100	75	75	
B Total	79	100	79	96	100	96	62	62	
I Total	73	95	73	95	100	95	59	59	
II Total	50	64	50	93	100	93	36	36	
III Total	42	67	33	75	100	75	50	50	
Total	58	75	56	90	100	90	48	42	

Obs.: As colunas de DBO e SST $\leq 40\text{mg/l}$ e DBO e SST $\leq 60\text{mg/l}$ dizem respeito à legislação vigente no estado do Rio de Janeiro, enquanto a coluna de DBO $\leq 60\text{mg/l}$ diz respeito à legislação de São Paulo e a de DBO e SST $\leq 60\text{mg/l}$ e DQO $\leq 90\text{mg/l}$, à de Minas Gerais.

5.2.1 - Fase Combinada Total

Analisando-se os resultados das concentrações efluentes frente aos padrões de lançamento vigentes, percebe-se o satisfatório atendimento àqueles cujos valores máximos permissíveis para DBO e SST limitam-se a 60 mg/l. De fato, a unidade satisfaz em 90% das amostras à DZ-215 e ao Decreto 8.468. Observa-se que quando o padrão de SST é considerado de forma independente, o índice de atendimento alcança 100% das amostras.

Por outro lado, verifica-se a dificuldade de enquadramento da tecnologia estudada, em relação aos outros padrões. De fato, em relação ao atendimento concomitante de 40 mg/l de DBO e SST, como preconiza também a DZ-215, o índice de atendimento alcançado foi

inferior à 60%. Neste caso, observa-se o padrão para DBO como o fator limitante ao atendimento à legislação (58%), uma vez que, exclusivamente em relação à concentração de SST, o atendimento foi alcançado em 75% das amostras.

É também possível refletir que o padrão de 90mg/l de DQO é o fator limitante para o atendimento à Deliberação Normativa COPAM nº 10, uma vez que a consideração concomitante entre este e as concentrações de DBO e SST reduz o índice de atendimento de 90% para 42%.

5.2.2 - Fases Combinadas A Total e B Total

Segundo o mesmo raciocínio anterior, quando analisadas ambas as Fases Combinadas A Total e B Total percebe-se também o satisfatório atendimento aos padrões que requerem concentrações de DBO e SST máximas de 60 mg/l. Em 83% das amostras da Fase Combinada A Total e em 96% das amostras da Fase Combinada B Total os padrões são atendidos.

Em relação aos padrões mais restritivos, percebe-se que na Fase Combinada B Total alcançou-se maior índice de atendimento que na Fase Combinada A Total. Enquanto para o padrão de 40 mg/l de DBO e SST, na Fase Combinada B Total alcançou-se índice de atendimento de 79%, na Fase Combinada A Total o valor foi de 33%. Para o atendimento à Deliberação Normativa COPAM 10, enquanto na Fase Combinada B Total alcançou-se índice de atendimento de 62%, na Fase Combinada A Total o valor não alcançou nem mesmo 30%.

No caso da DZ-215 a limitação do atendimento ao padrão deve-se ao parâmetro de DBO: 37% para a Fase Combinada A Total e 79% para a Fase Combinada B Total. Já em relação à Deliberação Normativa COPAM nº 10, a limitação do atendimento deve-se à DQO: 33% para a Fase Combinada A Total e 62% para a Fase Combinada B Total.

5.2.3 - Fases Combinadas I, II e III

Somente nas Fases Combinadas I Total e II Total percebe-se satisfatório atendimento aos padrões que requerem concentrações de DBO e SST máximas de 60 mg/l, respectivamente 95% e 93%. No caso da Fase III Total este índice limitou-se à 75%.

São mais limitados ainda os índices de atendimento aos padrões mais restritivos que estas fases alcançaram. Para o padrão de 40 mg/l de DBO e SST, enquanto na Fase I

Total alcançou-se 73% de atendimento, nas Fases II Total e III Total foram alcançados índices de respectivamente 50% e 33%. Para a Deliberação Normativa COPAM nº 10, em nenhuma das Fases Combinadas alcançou-se 60% de atendimento. Da mesma forma que nos casos anteriores, a DBO e a DQO são os parâmetros que limitam o enquadramento das amostras segundo o que preconizam os padrões mais restritivos.

A seguir, os gráficos *Box and Whiskers* das Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 ilustram a relação entre os índices de atendimento alcançados em relação às concentrações de DQO, DBO e SST e os padrões de lançamento de efluentes vigentes nos Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo.

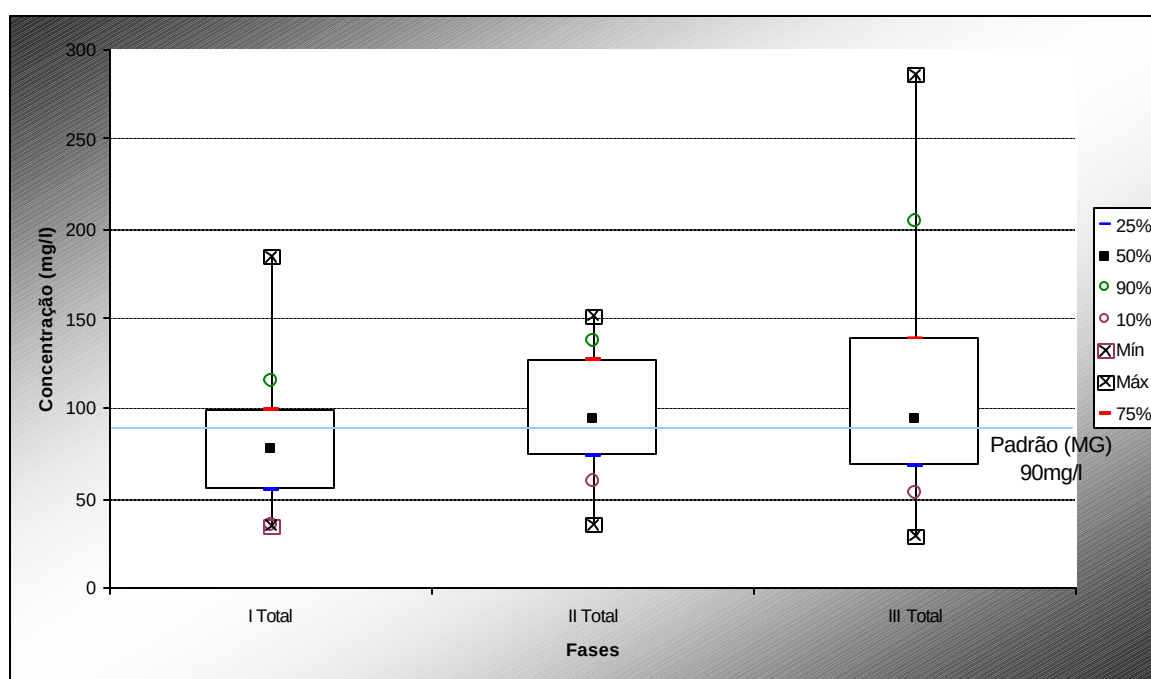


Figura 5.8 – Gráfico Box and Whiskers para concentrações efluentes de DQO para as fases I, II, III

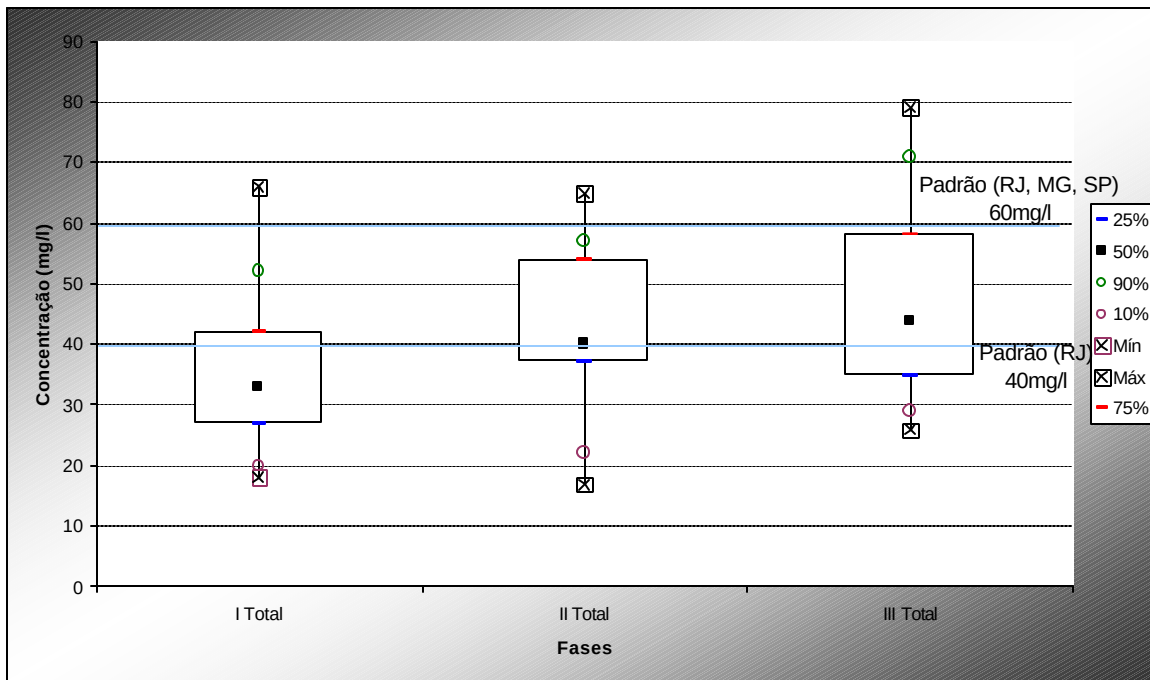


Figura 5.9 – Gráfico Box and Whiskers para concentrações efluentes de DBO para as fases I, II, III

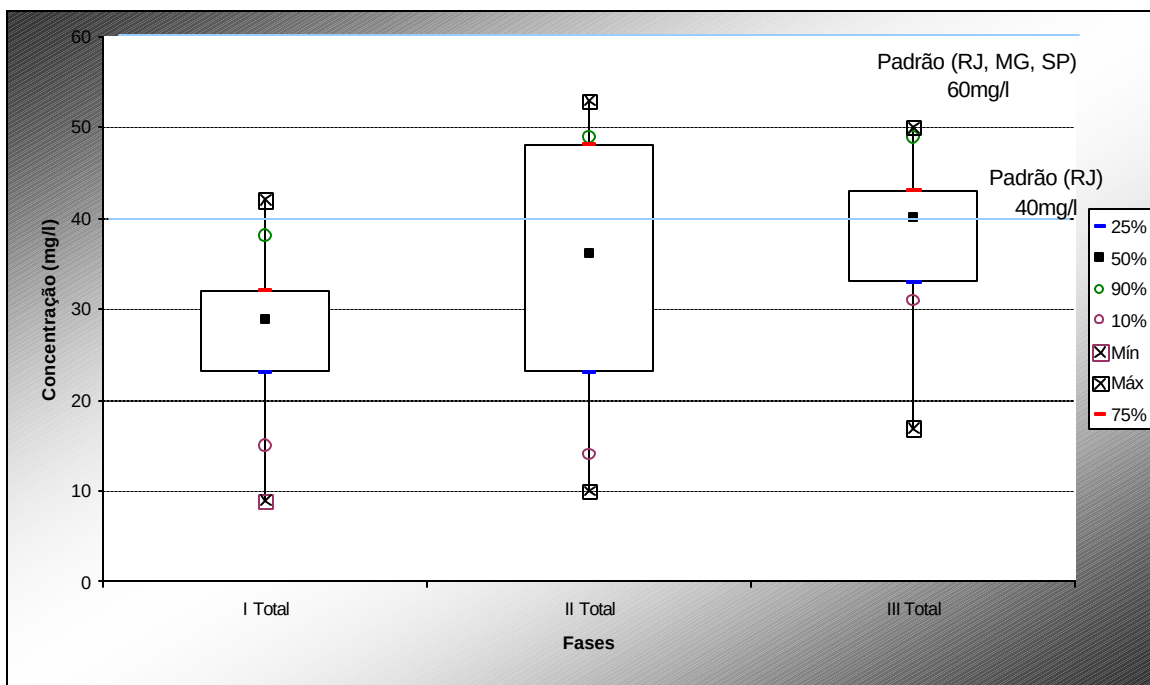


Figura 5.10 – Gráfico Box and Whiskers para concentrações efluentes de SST para as fases I, II, III

Baseadas no monitoramento efetuado durante os 232 dias de operação da unidade, quando sujeita a diferentes taxas de aplicação superficial, as Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram a frequência relativa da ocorrência das concentrações efluentes de DQO, DBO e SST.

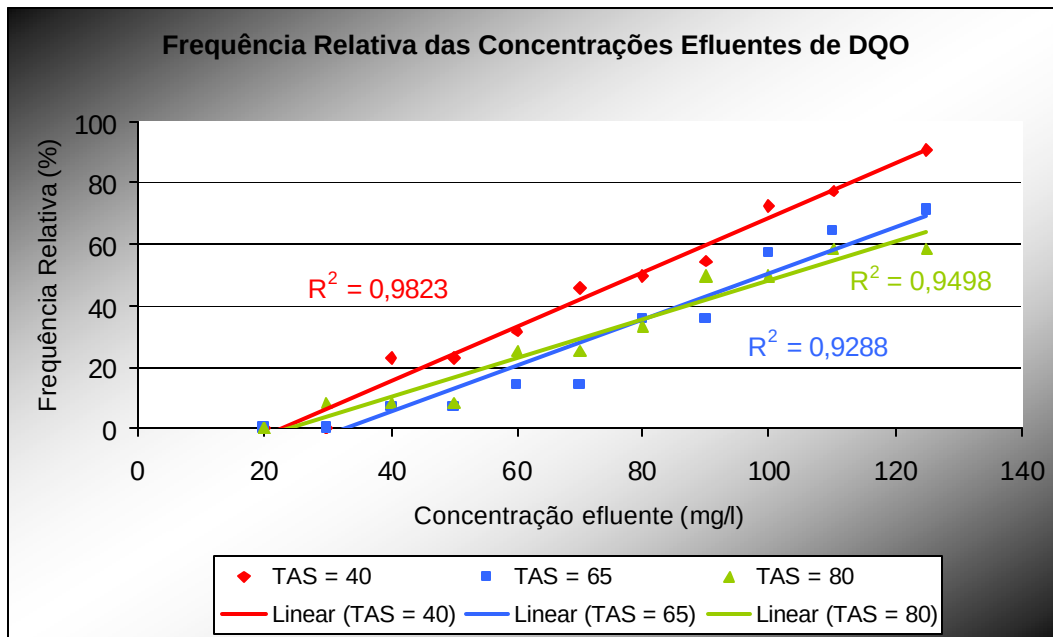


Figura 5.11 – Gráfico resumo do índice de atendimento para diversas concentrações máximas efluentes de DQO requeridas

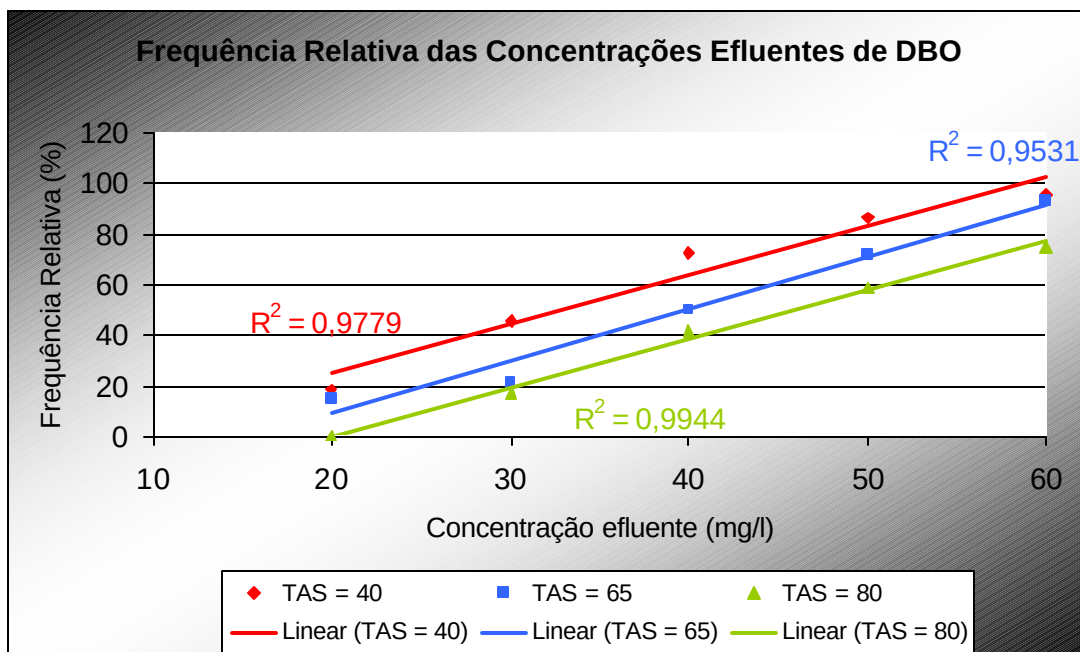


Figura 5.12 – Gráfico resumo do índice de atendimento para diversas concentrações máximas efluentes de DBO requeridas

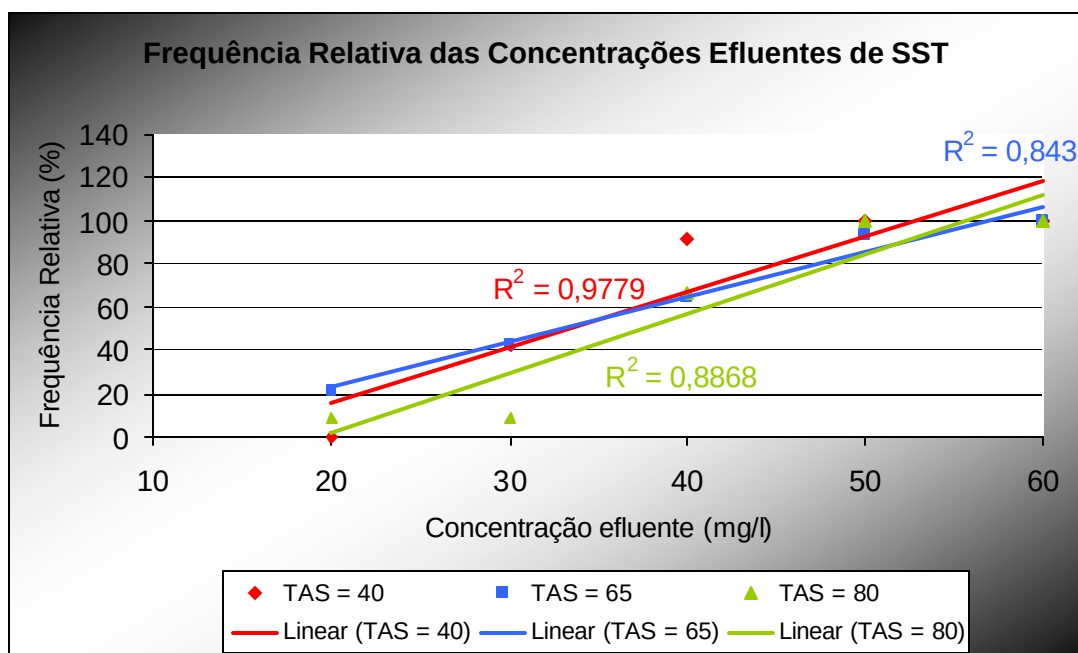


Figura 5.13 – Gráfico resumo do índice de atendimento para diversas concentrações máximas efluentes de SST requeridas

A unidade experimental da pesquisa encontra-se instalada em um centro de pesquisas da UFRJ (CETE-UFRJ) e esteve ao longo de 232 dias de operação amparada pelo contínuo acompanhamento da pesquisadora autora da presente dissertação, pelo apoio técnico dos operadores de campo, e pelo suporte do laboratório de qualidade de águas (LEMA-UFRJ).

Pode-se assim dizer, tratar-se de uma unidade de tratamento operada e mantida segundo adequado padrão técnico. Os índices de atendimento aos padrões menos restritivos foram bastante elevados, demonstrando excelente desempenho da unidade, mesmo para cargas hidráulica de até $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, como demonstrado graficamente nas Figuras 5.9 e 5.10.

No entanto, é oportuno refletir que para os padrões mais restritivos ($\text{DQO} < 90\text{mg/l}$ e $\text{DBO} < 40\text{mg/l}$), o índice de atendimento não satisfaz os valores preconizados sugerindo que estes, possam ser por demais rigorosos e que valores realmente factíveis possam ser aqueles extraídos das curvas estabelecidas nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13.

Os comentários efetuados anteriormente e relativos aos índices de atendimento aos padrões de lançamento, alcançados por cada uma das Fases Experimentais e Combinadas incorporaram o conceito de índice “satisfatório” de atendimento quando o valor obtido era igual ou superior a 80%. O valor atribuído pela autora teve como base aquele preconizado na Resolução CONAMA nº 274 (2000) que define as condições de balneabilidade das coleções de água em função das concentrações de parâmetros microbiológicos obtidas em amostras de águas.

Assim, segundo as curvas das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 percebe-se que para o atendimento à 80% das amostras, as concentrações de DQO, DBO e SST estariam respectivamente limitadas a 130 mg/l, 55 mg/l e 45 mg/l.

5.3 - Determinação do Valor K do Modelo de Eckenfelder

O modelo matemático baseado no critério de Eckenfelder considera o coeficiente de remoção de DBO (K), como função do tipo de material suporte e da superfície específica do meio. Considera também o parâmetros variando entre 0,2 e 1,1, sendo aceito o valor médio de 0,5.

Considerando diferentes valores do parâmetro n, na Tabela 5.5 são apresentados os valores dos coeficientes de remoção de DBO obtidos para os dois meios suporte utilizados e para as três diferentes taxas hidráulicas aplicadas durante a pesquisa.

Verifica-se que os valores calculados apresentam larga variação em função do valor do parâmetro n adotado. Verifica-se também que as variações de carga hidráulica impostas ao longo da pesquisa pouco influenciaram a variação dos resultados dos valores calculados e que os coeficientes K obtidos para o meio randômico foram superiores aos do meio *cross flow* para a taxa de até 65 m³/m².d.

Tabela 5.5 – Coeficiente de Remoção K – Critério de Eckenfelder

TAS m³/m².d	n = 0,2		n = 0,5		n = 1,1	
	Randômico	<i>Cross Flow</i>	Randômico	<i>Cross Flow</i>	Randômico	<i>Cross Flow</i>
40	0,72	0,56	2,16	1,70	19,79	15,56
65	0,56	0,50	1,95	1,75	23,81	21,48
80	0,42	0,46	1,52	1,70	21,13	23,55

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas 12 diferentes fases (6 Fases Experimentais + 6 Fases Combinadas) permitem as seguintes conclusões:

- Considerando os 232 dias de operação da unidade de filtração biológica aeróbia, independente do meio suporte plástico utilizado e independente das cargas hidráulica e orgânica aplicadas, obteve-se concentrações médias efluentes de DQO, DBO e SST muito satisfatórias, de respectivamente 96mg/l, 40mg/l e 32mg/l;
- Da mesma forma, conclui-se que os padrões de lançamento de efluentes, vigentes nos Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo foram satisfatoriamente atendidos, com exceção daqueles mais restritivos, para os quais a tecnologia de tratamento pesquisada, para as condições locais, não é capaz de satisfazer;
- Os testes estatísticos *t-student*, aplicados aos resultados obtidos nas fases A e B, não permitem conclusões sobre qual dos diferentes meios suporte plásticos apresenta melhor desempenho.
- Na fase em que se aplicou carga hidráulica de 40 m³/m².d e carga orgânica de 0,9 kgDBO/m³.d, obteve-se os melhores resultados.
- Na fase seguinte, onde se aumentou a carga hidráulica para 65 m³/m².d e carga orgânica para 1,5 kgDBO/m³.d, observou-se uma leve piora na qualidade do efluente, mas ainda assim os resultados foram satisfatórios, alcançando concentrações médias efluentes de DQO, DBO e SST de 98mg/l, 42mg/l e 34mg/l, próximas às concentrações limites dos padrões de lançamento de efluentes mais restritivos.
- O teste estatístico realizado demonstrou somente haver diferença significativa ao se dobrar a carga hidráulica inicial aplicada e assim, somente a taxa de 80m³/m².d passa a comprometer efetivamente a qualidade do efluente.

7. RECOMENDAÇÕES

- Considerando que foram satisfatórias as concentrações médias efluentes obtidas ao longo das fases operacionais em que a unidade esteve submetida às taxas de $40\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$; e que os testes estatísticos comparativos demonstraram não haver diferenças significativas entre ambas as fases; sugere-se que a unidade de filtração biológica possa ser submetida, em condições ambientais similares, a taxas de $65\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, valor próximo ao limite máximo recomendado pela literatura;
- Para o modelo matemático baseado no critério de Eckenfelder obteve-se variação muito ampla dos valores dos coeficientes de remoção de DBO (K). Ao se fixar o valor do parâmetro n em 0,5, pode-se recomendar, para o coeficiente k, valores compreendidos entre 1,5 e 2,0 para os dois diferentes meios suporte plásticos utilizados na pesquisa.
- Considerando o índice “satisfatório” de atendimento de 80% aos padrões de lançamento de efluentes, considerando as excelentes condições para o adequado controle e operação de uma unidade de tratamento secundário; e considerando a dificuldade de atendimento aos padrões mais restritivos de lançamento de efluentes; sugere-se que a tecnologia seja plenamente capaz de em 80% das amostras, satisfazer às concentrações efluentes de 130 mg/l de DQO, 55 mg/l de DBO e 45 mg/l de SST.
- Considerando a variedade de meios suporte plásticos existentes no mercado, recomenda-se a continuação da pesquisa, com outros meios suporte sintéticos, com diferentes características físicas, tais como superfície específica, peso específico e índice de vazios
- Recomenda-se a investigação da qualidade do efluente da unidade de filtração biológica, especificamente, desconsiderando a unidade de decantação secundária, de maneira similar à outras pesquisas realizadas com filtros biológicos com meio suporte em pedra.
- Para maior elucidação e melhor compreensão dos mecanismos e processos envolvidos com o transporte e a degradação do substrato em biofilmes, recomenda-se a realização de análises microbiológicas dos mesmos.

- Recomenda-se ainda a investigação do comportamento da unidade de filtração biológica operando com meio suporte plástico, em relação à remoção de nitrogênio, em função de modificações operacionais do processo, tais como: recirculação do efluente decantado para o reator biológico; utilização de estágio duplo de filtração, sendo o primeiro para remoção de matéria orgânica carbonácea e o segundo para remoção de matéria orgânica nitrogenada e; diminuição da carga hidráulica aplicada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISSE, M.M.; LOBATO, M.B.; BONA, A. *et al.* (2001). "Avaliação do Sistema Reator UASB e Filtro Biológico para o Tratamento de Esgoto Sanitário". In: *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre-RS: AIDIS, f108.
- AISSE, M.M.; LOBATO, M.B.; BONA, A. *et al.* (2001). "Avaliação do Sistema Reator UASB e Filtro Biológico Aerado Submerso para o Tratamento de Esgoto Sanitário". In: *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre-RS: AIDIS, f109.
- AISSE, M.M. (2002). *Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Tese de D.Sc. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, vol. 1. 284p.
- ALEM SOBRINHO, P. (1983). "Tratamento de Esgotos Domésticos Através de Filtros Biológicos de Alta Taxa. Comparação Experimental de Meios-Suportes de Biomassa". *Revista DAE, SABESP – São Paulo*. Ano XLIV nº 135, pp. 58-78.
- AMAL RAJ, S.; MURTHY D.V.S (1998). "Nitrification of Synthetic Wastewater in a Cross Flow Medium Trickling Filter". *Bioprocess Engineering*. Vol. 19 pp. 149-154.
- AVILA, R.O. (2005). *Avaliação do Desempenho do Sistema Tanque Séptico – Filtro Anaeróbio com Diferentes Meios Suportes*. Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 166p.
- AWWA/APHA/WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th edition. Washington.
- BIDONE, F.R.A.; SOUZA, L.P.; POVINELLI, J. (1999). "Serragens de Couro Curtido Tipo Wet Blue Utilizados como Meio Suporte em Filtro Biológicos Destinados ao Tratamento de Esgotos Sanitários". In: *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro: ABES, pp. 982-991.
- BRASIL (2005). Resolução CONAMA nº 357, 17 de março de 2005. *Estabelece a Classificação das Águas Doces, Salobras, e Salinas*. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Brasília/DF.

- BRASIL (2000). Resolução CONAMA nº 274, 29 de novembro de 2000. *Estabelece parâmetros para balneabilidade de corpos hídricos*. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Brasília/DF.
- CANLER, J.P.; PERRET, J.M.; LEGRAND, F. *et al.* (2003). "Nitrification in Biofilters under Variable Load and Low Temperature". *Water Science and Technology*, vol 47 nº 11 pp.129-136.
- CHARACKLIS, W.G. *et al* (1991). "Physiological Ecology in Biofilm Systems". *In.: Biofilms*. New York, John Wiley. Citado por PORTO, M.T.R. (2002). *Estudo de um Filtro Biológico Percolador Utilizado para o Pós-Tratamento de Efluentes de um Reator UASB, com Ênfase da Altura do Meio Suporte sobre a Estabilidade do Sistema*. Tese de M.Sc. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 129p.
- COPAM Nº 10 (1986). *Deliberação Normativa Para Qualidade das Águas e Lançamento de Efluentes nas Coleções de Águas*. Minas Gerais.
- DIRETRIZ Nº 215.R-3 (2002). *Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem Não Industrial*. Rio de Janeiro - FEEMA
- DECRETO 8.468 (1976) – *Decreto de Prevenção e Controle da Poluição do Meio Ambiente*. São Paulo.
- DURY,D.D.; CARMONA, J.; DELGADILLO, A. (1986). "Evaluation of High Density Cross Flow Media for Rehabilitating an Existing Trickling Filter". *Journal WPCF*, vol. 58 nº 5 pp. 364-367
- FALKENTOFT, C.; HERREMOES, P.; MOSBAEK, H. *et al.* (2001). "Stability of a Lab-Scale Biofilm for Simultaneous Removal of Phosphorus and Nitrate". *Water Science and Technology*, vol 43 nº 1 pp. 335-342.
- GONÇALVES, R.F. *et al.* (2001). *In: CHERNICHARO (coordenador). Pós Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. PROSAB 2 – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. 1ª ed. Belo Horizonte, 544p – Capítulo 4.

- GONÇALVES, R.F.; PASSAMANI, F.R.F.; SALIM, F.P. *et al.* (2000). “Associação de um Reator UASB e Biofiltros Aerados Submersos para o Tratamento de Esgoto Sanitário”. In: *Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Coletânea de Trabalhos Técnicos – PROSAB 2*, vol. 1, pp. 119 a 134.
- GONÇALVES, R.F. *et al.* (2003). “Influência da Carga Orgânica na Produção de Biomassa em Filtro Biológicos Percoladores Tratando Efluentes de UASB”. In: *Anais 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Joinville-SC: ABES, II-324.
- HOFFMANN, H.; PLTZER, C.; HEPPLER, D. *et al.* (2003). “Combinação de Tratamento Anaeróbio e Aeróbio com a Finalidade de Eliminação de Nutrientes”. In: *Anais 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Joinville-SC: ABES, II-056.
- JORDÃO, E.P & PESSÔA, C.A. (1995). *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 3ª ed. ABES-RJ, 682p.
- JORDÃO, E.P & PESSÔA, C.A. (no prelo). *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 4ª ed. ABES-RJ.
- LEKHLIF, B.; TOYE, D.; CRINE, M. (1994). “Interactions Between the Biofilm Growth and the Hydrodynamics in an Aerobic Trickling Filter”. *Water Science and Technology*, vol 29 nº 10-11 pp. 423-430.
- MATASCI, R.N. (1988) *et al.* “Trickling Filter / Solids Contact Performance With Rock Filters at High Organic Loadings”. *Journal WPCF*, vol. 60 nº1 pp. 68-76.
- METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3rd ed. New Delhi, McGraw-Hill Inc. 1334p.
- METCALF & EDDY (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 4th ed. New Delhi, McGraw-Hill Inc. 1500p.
- NASCIMENTO, M.C.P. (2001). *Filtro Biológico Percolador de Pequena Altura de Meio Suporte Aplicado ao Pós-Tratamento de Efluente de Reator UASB*. Tese de M.Sc.

Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 124p.

NASCIMENTO, M.C.P.; CHERNICHARO, C.A.L.; MOURA, J.C.R. *et al.* (2001). “Comportamento UASB/Filtro Biológico Aeróbio Quando Exposto a Choques de Carga Hidráulica”. *In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre-RS: AIDIS, I-049.

NASCIMENTO, M.C.P.; CHERNICHARO, C.A.L.; BEJAR, D.O. (2001). “Filtros Biológicos Aplicados ao Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores UASB”. *In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. João Pessoa-PB: ABES, II-194.

NB-570 (1990). *Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário*. Associação Brasileira de de Normas Técnicas - ABNT, 1990.

PORTO, M.T.R.; CHERNICHARO, C.A.L.; PONTES, P.P. *et al.* (2000). “Influência da Altura do Meio Suporte na Eficiência de um Filtro Biológico Percolador Utilizado para Pós-Tratamento de Efluentes de um Reator UASB”. *In: Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Coletânea de Trabalhos Técnicos – PROSAB 2*, vol. 1, pp. 119 a 129.

PORTO, M.T.R. (2002). *Estudo de um Filtro Biológico Percolador Utilizado para o Pós-Tratamento de Efluentes de um Reator UASB, com Ênfase da Altura do Meio Suporte sobre a Estabilidade do Sistema*. Tese de M.Sc. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 129p.

PARKER, D.; KRUGEL, S.; MC CONNELL, H. (1994). “Critical Process Design Issues in the Selection of the TF/SC Process for a Large Secondary Treatment Plant”. *Water Science and Technology*, vol 29 nº 10-11 pp. 209-215.

SNSA (2002). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2002/ Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS*. Ministério das Cidades, 386p.

SILVA, G.M.; FRASSON, R.; GONÇALVES, R.F. (2003).” Influência da Carga Orgânica na Produção de Biomassa em Filtros Biológicos Percoladores Tratando Efluentes de UASB”. *In: Anais 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Joinville-SC: ABES, II-324.

- VANHOOREN, H.; DE PAUW, D.; VANROLLEGHEM, P.A. (2003). "Induction of Denitrification in a Pilot-Scale Trickling Filter by Adding Nitrate at High Loading Rate". *Water Science Technology*, vol 47 nº 11 pp.61-68.
- VON SPERLING, M.(1995) *Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Vol 1. pp. 240 – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG – Belo Horizonte.
- VON SPERLING, M.(1996) *Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos*. Vol 2. pp. 211 – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG – Belo Horizonte.
- WEF- Water Environmental Federation (1992). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plant*. Manual of Practice nº 8.
- WEF- Water Environmental Federation (1992). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plant*. Manual of Practice nº11.
- WEF- Water Environmental Federation (2000). *Aerobic Fixed-Growth Reactors* .
- WHEATLEY, A.D.; WILLIAMS, I.L. (1981). "Some Comparative Studies on the Wetting and Stability Biological Filter Media". *Water Pollut. Control (G.B.)*, 433. Citado por WEF- Water Environmental Federation (2000). *Aerobic Fixed-Growth Reactors*.

ANEXO A

TESTES ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS TIPO T-STUDENT (A TOTAL X B TOTAL)

A.I) Verificação da normalidade das amostras para concentrações afluentes

a) Verificação DQO (Fase AI)

DQO			
AI	empirico	dist normal	D
143	0,13	0,11	0,01
146	0,25	0,14	0,11
147	0,38	0,14	0,23
179	0,50	0,54	-0,04
191	0,63	0,71	-0,08
191	0,75	0,71	0,04
197	0,88	0,78	0,10
215	1,00	0,92	0,08
88	média	D máximo	0,23
27	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

b) Verificação DQO (Fase BI)

DQO			
BI	empirico	dist normal	D
55	0,07	0,02	0,05
78	0,14	0,07	0,07
109	0,21	0,23	-0,01
115	0,29	0,27	0,01
123	0,36	0,34	0,02
132	0,43	0,42	0,01
140	0,50	0,49	0,01
150	0,57	0,59	-0,02
151	0,64	0,60	0,05
164	0,71	0,71	0,01
175	0,79	0,79	0,00
182	0,86	0,83	0,02
192	0,93	0,89	0,04
203	1,00	0,93	0,07
141	média	D máximo	0,16
42	desv. Padrão	D Crítico	0,35

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

c) Verificação DQO (Fase AII)

DQO			
AII	empirico	dist normal	D
120	0,13	0,12	0,01
124	0,25	0,13	0,12
152	0,38	0,26	0,12
163	0,50	0,32	0,18
207	0,63	0,62	0,01
221	0,75	0,70	0,05
263	0,88	0,90	-0,02
267	1,00	0,91	0,09
108	média	D máximo	0,18
30	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

d) Verificação DQO (Fase BII)

DQO			
BII	empirico	dist normal	D
73	0,17	0,04	0,13
111	0,33	0,26	0,07
150	0,50	0,68	-0,18
150	0,67	0,68	-0,02
150	0,83	0,68	0,15
166	1,00	0,83	0,17
84	média	D máximo	0,17
36	desv. Padrão	D Crítico	0,53

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

e) Verificação DQO (Fase AIII)

DQO			
AIII	empirico	dist normal	D
135	0,13	0,17	-0,05
138	0,25	0,18	0,07
184	0,38	0,32	0,05
216	0,50	0,44	0,06
222	0,63	0,47	0,16
225	0,75	0,48	0,27
270	0,88	0,65	0,23
457	1,00	0,99	0,01
127	média	D máximo	0,27
30	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

f) Verificação DQO (Fase BIII)

DQO			
BIII	empirico	dist normal	D
109	0,33	0,13	0,21
161	0,67	0,65	0,01
173	1,00	0,77	0,23
			0,23
92	média	D máximo	0,34
82	desv. Padrão	D Crítico	0,51

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

g) Verificação DBO (Fase AI)

DBO			
AI	empirico	dist normal	D
61	0,13	0,06	0,07
88	0,25	0,36	-0,11
89	0,38	0,37	0,00
90	0,50	0,39	0,11
90	0,63	0,39	0,23
97	0,75	0,52	0,23
121	0,88	0,87	0,00
133	1,00	0,95	0,05
35	média	D máximo	0,23
10	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

h) Verificação DBO (Fase BI)

DBO			
BI	empirico	dist normal	D
47	0,07	0,05	0,02
53	0,14	0,10	0,04
61	0,21	0,22	0,00
62	0,29	0,24	0,05
66	0,36	0,32	0,04
68	0,43	0,37	0,06
70	0,50	0,42	0,08
74	0,57	0,52	0,06
77	0,64	0,59	0,05
82	0,71	0,71	0,01
83	0,79	0,73	0,06
88	0,86	0,82	0,03
89	0,93	0,84	0,09
107	1,00	0,98	0,02
73	média	D máximo	0,09
16	desv. Padrão	D Crítico	0,35

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

i) Verificação DBO (Fase AII)

DBO			
AII	empirico	dist normal	D
72	0,13	0,09	0,04
85	0,25	0,20	0,05
93	0,38	0,30	0,08
98	0,50	0,37	0,13
107	0,63	0,51	0,12
123	0,75	0,74	0,01
123	0,88	0,74	0,13
152	1,00	0,96	0,04
51	média	D máximo	0,13
9	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

j) Verificação DBO (Fase BII)

DBO			
BII	empirico	dist normal	D
29	0,17	0,03	0,14
53	0,33	0,42	-0,08
60	0,50	0,61	-0,11
63	0,67	0,69	-0,02
64	0,83	0,72	0,12
67	1,00	0,78	0,22
30	média	D máximo	0,22
10	desv. Padrão	D Crítico	0,53

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

k) Verificação DBO (Fase AIII)

DBO			
AIII	empirico	dist normal	D
51	0,13	0,09	0,04
61	0,25	0,16	0,09
69	0,38	0,25	0,12
88	0,50	0,53	-0,03
90	0,63	0,56	0,07
91	0,75	0,57	0,18
110	0,88	0,82	0,05
130	1,00	0,95	0,05
53	média	D máximo	0,18
18	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

l) Verificação DBO (Fase BIII)

DBO			
BIII	empirico	dist normal	D
52	0,33	0,16	0,18
67	0,67	0,51	0,16
81	1,00	0,84	0,16
37	média	D máximo	0,18
10	desv. Padrão	D Crítico	0,51

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

m) Verificação SST (Fase AI)

SST			
AI	empirico	dist normal	D
47	0,13	0,06	0,07
59	0,25	0,22	0,03
64	0,38	0,34	0,04
66	0,50	0,39	0,11
69	0,63	0,47	0,15
81	0,75	0,78	-0,03
82	0,88	0,80	0,08
92	1,00	0,94	0,06
34	média	D máximo	0,15
6	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

n) Verificação SST (Fase BI)

SST			
BI	empirico	dist normal	D
35	0,07	0,01	0,06
46	0,14	0,10	0,05
54	0,21	0,31	-0,09
56	0,29	0,38	-0,09
57	0,36	0,42	-0,06
58	0,43	0,45	-0,03
59	0,50	0,49	0,01
62	0,57	0,61	-0,04
62	0,64	0,61	0,03
63	0,71	0,65	0,07
64	0,79	0,68	0,10
65	0,86	0,72	0,14
70	0,93	0,86	0,07
77	1,00	0,96	0,04
59	média	D máximo	0,14
10	desv. Padrão	D Crítico	0,35

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

o) Verificação SST (Fase AII)

SST			
AII	empirico	dist normal	D
59	0,13	0,09	0,03
63	0,25	0,15	0,10
69	0,38	0,27	0,11
76	0,50	0,45	0,05
76	0,63	0,45	0,17
86	0,75	0,72	0,03
96	0,88	0,90	-0,02
97	1,00	0,91	0,09
44	média	D máximo	0,17
7	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

p) Verificação SST (Fase BII)

SST			
BII	empirico	dist normal	D
38	0,17	0,05	0,11
49	0,33	0,35	-0,02
52	0,50	0,49	0,01
54	0,67	0,57	0,09
56	0,83	0,66	0,17
65	1,00	0,92	0,08
20	média	D máximo	0,17
8	desv. Padrão	D Crítico	0,53

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

q) Verificação SST (Fase AIII)

SST			
AIII	empirico	dist normal	D
51	0,13	0,03	0,09
59	0,25	0,17	0,08
67	0,38	0,50	-0,12
68	0,50	0,55	-0,05
69	0,63	0,59	0,03
71	0,75	0,68	0,07
72	0,88	0,72	0,15
79	1,00	0,92	0,08
42	média	D máximo	0,15
6	desv. Padrão	D Crítico	0,47

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

r) Verificação SST (Fase BIII)

SST			
BIII	empirico	dist normal	D
51	0,33	0,25	0,09
54	0,67	0,32	0,35
76	1,00	0,87	0,13
30	média	D máximo	0,35
6	desv. Padrão	D Crítico	0,51

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

A.II) Resultado do teste t-student para as concentrações afluentes

a) Resultados DQO

AI x BI
p valor 0,047372

AII x BII
p valor 0,059045

AIII x BIII
p valor 0,212017

A Total x B Total
p valor 0,000929

b) Resultados DBO

AI x BI
p valor 0,010704

AII x BII
p valor 0,000905

AIII x BIII
p valor 0,25592

A Total x B Total
p valor 3,58E-05

c) Resultados SST

AI x BI
p valor 0,050657

AII x BII
p valor 0,002418

AIII x BIII
p valor 0,346031

A Total x B Total
p valor 0,000166

Obs.: Para valor $p < 0,05$ (95% de confiança), rejeita a hipótese nula

A.III) Resultado do teste t-student para as eficiências de remoção

a) Resultados DQO

AI x BI
p valor 0.528502

AII x BII
p valor 0.715648

AIII x BIII
p valor 0.378589

A Total x B Total
p valor 0.396289

b) Resultados DBO

AI x BI
p valor 0.168177

AII x BII
p valor 0.428038

AIII x BIII
p valor 0.732662

A Total x B Total
p valor 0.742245

c) Resultados SST

AI x BI
p valor 0.1103764

AII x BII
p valor 0.0215215

AIII x BIII
p valor 0.0698694

A Total x B Total
p valor 0.0000799

Obs.: Para valor $p < 0,05$ (95% de confiança), rejeita a hipótese nula

ANEXO B

TESTES ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS TIPO T-STUDENT (I TOTAL X II TOTAL, II TOTAL X III TOTAL E I TOTAL X III TOTAL)

B.I) Verificação da normalidade das amostras

a) Verificação DQO (Fase I Total)

DQO			
AI+BI	empirico	dist normal	D
35	0.05	0.11	-0.07
35	0.09	0.11	-0.02
36	0.14	0.12	0.02
36	0.18	0.12	0.07
37	0.23	0.12	0.11
54	0.27	0.24	0.04
57	0.32	0.26	0.06
61	0.36	0.30	0.07
66	0.41	0.35	0.06
67	0.45	0.36	0.10
77	0.50	0.46	0.04
82	0.55	0.51	0.04
94	0.59	0.63	-0.04
95	0.64	0.64	-0.01
95	0.68	0.64	0.04
96	0.73	0.65	0.07
103	0.77	0.72	0.05
114	0.82	0.81	0.01
115	0.86	0.82	0.05
116	0.91	0.82	0.09
127	0.95	0.89	0.07
185	1.00	1.00	0.00
81	média	D máximo	0.11
38	desv. Padrão	D Crítico	0.27

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

b) Verificação DQO (Fase II Total)

DQO			
All+BII	empirico	dist normal	D
36	0.07	0.03	0.04
55	0.14	0.10	0.04
73	0.21	0.23	-0.02
74	0.29	0.24	0.05
75	0.36	0.25	0.11
92	0.43	0.43	0.00
94	0.50	0.45	0.05
95	0.57	0.47	0.11
105	0.64	0.58	0.06
113	0.71	0.67	0.04
132	0.79	0.84	-0.06
134	0.86	0.86	0.00
140	0.93	0.89	0.04
152	1.00	0.95	0.05
98	média	D máximo	0.11
34	desv. Padrão	D Crítico	0.34

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

c) Verificação DQO (Fase III Total)

DQO			
AIII+BIII	empirico	dist normal	D
29	0.08	0.12	-0.03
53	0.17	0.20	-0.03
54	0.25	0.20	0.05
73	0.33	0.28	0.05
81	0.42	0.32	0.10
84	0.50	0.33	0.17
105	0.58	0.44	0.14
135	0.67	0.60	0.06
138	0.75	0.62	0.13
140	0.83	0.63	0.20
211	0.92	0.90	0.01
286	1.00	0.99	0.01
116	média	D máximo	0.20
73	desv. Padrão	D Crítico	0.37

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

d) Verificação DBO (Fase I Total)

DBO			
AI+BI	empirico	dist normal	D
18	0.05	0.09	-0.05
18	0.09	0.09	0.00
20	0.14	0.12	0.02
20	0.18	0.12	0.06
27	0.23	0.27	-0.04
27	0.27	0.27	0.00
27	0.32	0.27	0.05
28	0.36	0.30	0.07
28	0.41	0.30	0.11
30	0.45	0.35	0.10
32	0.50	0.42	0.08
34	0.55	0.48	0.07
36	0.59	0.54	0.05
36	0.64	0.54	0.09
37	0.68	0.58	0.11
38	0.73	0.61	0.12
43	0.77	0.75	0.02
44	0.82	0.77	0.04
47	0.86	0.84	0.02
53	0.91	0.93	-0.02
53	0.95	0.93	0.02
66	1.00	0.99	0.01
35	média	D máximo	0.12
13	desv. Padrão	D Crítico	0.27

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

e) Verificação DBO (Fase II Total)

DBO			
All+BII	empirico	dist normal	D
17	0.07	0.04	0.03
19	0.14	0.05	0.09
28	0.21	0.16	0.05
36	0.29	0.34	-0.05
39	0.36	0.42	-0.06
39	0.43	0.42	0.01
39	0.50	0.42	0.08
41	0.57	0.47	0.10
47	0.64	0.64	0.00
48	0.71	0.67	0.05
56	0.79	0.84	-0.05
56	0.86	0.84	0.02
57	0.93	0.86	0.07
65	1.00	0.95	0.05
42	média	D máximo	0.10
14	desv. Padrão	D Crítico	0.34

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

f) Verificação DBO (Fase III Total)

DBO			
AIII+BIII	empirico	dist normal	D
26	0.08	0.11	-0.02
28	0.17	0.13	0.04
34	0.25	0.22	0.03
35	0.33	0.23	0.10
37	0.42	0.27	0.14
42	0.50	0.38	0.12
45	0.58	0.44	0.14
52	0.67	0.60	0.06
56	0.75	0.69	0.06
64	0.83	0.83	0.00
72	0.92	0.92	-0.01
79	1.00	0.97	0.03
48	média	D máximo	0.14
17	desv. Padrão	D Crítico	0.37

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

g) Verificação SST (Fase I Total)

SST			
AI+BI	empirico	dist normal	D
9	0.05	0.01	0.03
13	0.09	0.04	0.05
18	0.14	0.12	0.02
18	0.18	0.12	0.06
21	0.23	0.21	0.02
24	0.27	0.33	-0.05
25	0.32	0.37	-0.05
26	0.36	0.42	-0.05
27	0.41	0.46	-0.05
28	0.45	0.51	-0.06
29	0.50	0.56	-0.06
29	0.55	0.56	-0.01
30	0.59	0.61	-0.01
30	0.64	0.61	0.03
31	0.68	0.65	0.03
31	0.73	0.65	0.08
33	0.77	0.74	0.04
33	0.82	0.74	0.08
35	0.86	0.81	0.06
39	0.91	0.91	0.00
40	0.95	0.93	0.03
42	1.00	0.96	0.04
28	média	D máximo	0.08
8	desv. Padrão	D Crítico	0.27

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

h) Verificação SST (Fase II Total)

SST			
All+BII	empirico	dist normal	D
10	0.07	0.05	0.02
11	0.14	0.06	0.08
20	0.21	0.17	0.04
22	0.29	0.21	0.08
25	0.36	0.27	0.08
30	0.43	0.40	0.03
34	0.50	0.51	-0.01
37	0.57	0.59	-0.02
38	0.64	0.62	0.03
46	0.71	0.80	-0.09
48	0.79	0.84	-0.05
48	0.86	0.84	0.02
50	0.93	0.87	0.06
53	1.00	0.91	0.09
34	média	D máximo	0.09
15	desv. Padrão	D Crítico	0.34

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

i) Verificação SST (Fase III Total)

SST			
AIII+BIII	empirico	dist normal	D
17	0.08	0.01	0.07
31	0.17	0.23	-0.06
31	0.25	0.23	0.02
34	0.33	0.34	0.00
35	0.42	0.38	0.04
39	0.50	0.55	-0.05
40	0.58	0.59	-0.01
40	0.67	0.59	0.07
43	0.75	0.71	0.04
44	0.83	0.75	0.08
50	0.92	0.91	0.01
50	1.00	0.91	0.09
38	média	D máximo	0.09
9	desv. Padrão	D Crítico	0.37

Obs.: D máximo calculado < D Crítico;
Distribuição normal da amostra

B.II) Resultados do teste t-student para concentrações efluentes

a) Resultados DQO

AI x AII	
Valor T	-1.437674
Valor P	0.172502
Graus de Liberdade	14

AII x AIII	
Valor T	-0.707935
Valor P	0.490604
Graus de Liberdade	14

BI x BII	
Valor T	-0.328105
Valor P	0.746618
Graus de Liberdade	18

BII x BIII	
Valor T	-0.21362
Valor P	0.836187
Graus de Liberdade	8

I TOTAL x II TOTAL	
Valor T	-1.352827
Valor P	0.185039
Graus de Liberdade	34

II TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-0.82001
Valor P	0.42028
Graus de Liberdade	24

I TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-1.833917
Valor P	0.075981
Graus de Liberdade	32

b) Resultados DBO

AI x AII	
Valor T	-3.290872
Valor P	0.005359
Graus de Liberdade	14

AII x AIII	
Valor T	-0.20892
Valor P	0.83752
Graus de Liberdade	14

BI x BII	
Valor T	0.747267
Valor P	0.464553
Graus de Liberdade	18

BII x BIII	
Valor T	-1.16747
Valor P	0.276636
Graus de Liberdade	8

I TOTAL x II TOTAL	
Valor T	-1.621383
Valor P	0.114174
Graus de Liberdade	34

II TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-0.902809
Valor P	0.375599
Graus de Liberdade	24

I TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-2.505786
Valor P	0.017498
Graus de Liberdade	32

c) Resultados SST

AI x AII	
Valor T	-3.271112
Valor P	0.005574
Graus de Liberdade	14

AII x AIII	
Valor T	0.644714
Valor P	0.529536
Graus de Liberdade	14

BI x BII	
Valor T	1.245287
Valor P	0.228994
Graus de Liberdade	18

BII x BIII	
Valor T	-3.855959
Valor P	0.002285
Graus de Liberdade	12

I TOTAL x II TOTAL	
Valor T	-1.569128
Valor P	0.125879
Graus de Liberdade	34

II TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-0.850136
Valor P	0.403651
Graus de Liberdade	24

I TOTAL x III TOTAL	
Valor T	-3.255099
Valor P	0.002679
Graus de Liberdade	32

Obs.: Para valor $p < 0,05$ (95% de confiança), descarta a hipótese nula

ANEXO C

RESULTADOS DO COEFICIENTE DE REMOÇÃO DE DBO (K) PARA O MODELO MATEMÁTICO BASEADO NO CRITÉRIO DE ECKENFELDER

Os resultados estão apresentados em três tabelas, cada uma com um valor adotado para o coeficiente n.

a) Valor n = 0,5

Fase	DBO (mg/l)		H (m)	TAS (m ³ /m ² .d)	DBOe/DBOa	ln (DBOe/DBOa)	H/TAS ⁿ	K	média por fase
	Afluente	Efluente							
AI	61	27	3	40	0,44	-0,82	0,47	1,72	2,16
	97	32	3	40	0,33	-1,11	0,47	2,34	
	90	34	3	40	0,38	-0,97	0,47	2,05	
	90	44	3	40	0,49	-0,72	0,47	1,51	
	121	18	3	40	0,15	-1,91	0,47	4,02	
	133	53	3	40	0,40	-0,92	0,47	1,94	
	89	37	3	40	0,42	-0,88	0,47	1,85	
	88	36	3	40	0,41	-0,89	0,47	1,88	
AII	152	57	3	65	0,38	-0,98	0,37	2,64	1,95
	123	65	3	65	0,53	-0,64	0,37	1,71	
	85	56	3	65	0,66	-0,42	0,37	1,12	
	72	41	3	65	0,57	-0,56	0,37	1,51	
	107	48	3	65	0,45	-0,80	0,37	2,15	
	98	47	3	65	0,48	-0,73	0,37	1,97	
	93	39	3	65	0,42	-0,87	0,37	2,34	
	123	56	3	65	0,46	-0,79	0,37	2,11	
AIII	90	56	3	80	0,62	-0,47	0,34	1,41	1,52
	130	64	3	80	0,49	-0,71	0,34	2,11	
	69	42	3	80	0,61	-0,50	0,34	1,48	
	110	79	3	80	0,72	-0,33	0,34	0,99	
	88	45	3	80	0,51	-0,67	0,34	2,00	
	51	37	3	80	0,73	-0,32	0,34	0,96	
	61	26	3	80	0,43	-0,85	0,34	2,54	
	91	72	3	80	0,79	-0,23	0,34	0,70	
BII	53	28	3	65	0,53	-0,64	0,37	1,71	1,75
	67	17	3	65	0,25	-1,37	0,37	3,69	
	64	36	3	65	0,56	-0,58	0,37	1,55	
	60	39	3	65	0,65	-0,43	0,37	1,16	
	63	39	3	65	0,62	-0,48	0,37	1,29	
	29	19	3	65	0,66	-0,42	0,37	1,14	
BIII	52	28	3	80	0,54	-0,62	0,34	1,85	1,7
	81	34	3	80	0,42	-0,87	0,34	2,59	
	67	52	3	80	0,78	-0,25	0,34	0,76	
	60	35	3	80	0,58	-0,54	0,34	1,61	
BI	53	28	3	40	0,53	-0,64	0,47	1,35	1,7
	68	47	3	40	0,69	-0,37	0,47	0,78	
	83	66	3	40	0,80	-0,23	0,47	0,48	
	61	20	3	40	0,33	-1,12	0,47	2,35	
	88	53	3	40	0,60	-0,51	0,47	1,07	
	74	43	3	40	0,58	-0,54	0,47	1,14	
	82	38	3	40	0,46	-0,77	0,47	1,62	
	107	27	3	40	0,25	-1,38	0,47	2,90	
	89	27	3	40	0,30	-1,19	0,47	2,51	
	70	30	3	40	0,43	-0,85	0,47	1,79	
	77	28	3	40	0,36	-1,01	0,47	2,13	
	47	36	3	40	0,77	-0,27	0,47	0,56	
	62	18	3	40	0,29	-1,24	0,47	2,61	
	66	20	3	40	0,30	-1,19	0,47	2,52	
Valor médio de K para todo o período de operação								1,80	

b) Valor $n = 0,2$

Fase	DBO (mg/l)		H (m)	TAS (m ³ /m ² .d)	DBOe/DBOa	ln (DBOe/DBOa)	H/TAS ⁿ	K	média por fase
	Afluente	Efluente							
AI	61	27	3	40	0,44	-0,82	1,43	0,57	0,72
	97	32	3	40	0,33	-1,11	1,43	0,77	
	90	34	3	40	0,38	-0,97	1,43	0,68	
	90	44	3	40	0,49	-0,72	1,43	0,50	
	121	18	3	40	0,15	-1,91	1,43	1,33	
	133	53	3	40	0,40	-0,92	1,43	0,64	
	89	37	3	40	0,42	-0,88	1,43	0,61	
	88	36	3	40	0,41	-0,89	1,43	0,62	
AII	152	57	3	65	0,38	-0,98	1,30	0,75	0,56
	123	65	3	65	0,53	-0,64	1,30	0,49	
	85	56	3	65	0,66	-0,42	1,30	0,32	
	72	41	3	65	0,57	-0,56	1,30	0,43	
	107	48	3	65	0,45	-0,80	1,30	0,62	
	98	47	3	65	0,48	-0,73	1,30	0,56	
	93	39	3	65	0,42	-0,87	1,30	0,67	
	123	56	3	65	0,46	-0,79	1,30	0,60	
AIII	90	56	3	80	0,62	-0,47	1,25	0,38	0,41
	130	64	3	80	0,49	-0,71	1,25	0,57	
	69	42	3	80	0,61	-0,50	1,25	0,40	
	110	79	3	80	0,72	-0,33	1,25	0,27	
	88	45	3	80	0,51	-0,67	1,25	0,54	
	51	37	3	80	0,73	-0,32	1,25	0,26	
	61	26	3	80	0,43	-0,85	1,25	0,68	
	91	72	3	80	0,79	-0,23	1,25	0,19	
BII	53	28	3	65	0,53	-0,64	1,30	0,49	0,50
	67	17	3	65	0,25	-1,37	1,30	1,05	
	64	36	3	65	0,56	-0,58	1,30	0,44	
	60	39	3	65	0,65	-0,43	1,30	0,33	
	63	39	3	65	0,62	-0,48	1,30	0,37	
	29	19	3	65	0,66	-0,42	1,30	0,32	
BIII	52	28	3	80	0,54	-0,62	1,25	0,50	0,46
	81	34	3	80	0,42	-0,87	1,25	0,70	
	67	52	3	80	0,78	-0,25	1,25	0,20	
	60	35	3	80	0,58	-0,54	1,25	0,43	
BI	53	28	3	40	0,53	-0,64	1,43	0,44	0,56
	68	47	3	40	0,69	-0,37	1,43	0,26	
	83	66	3	40	0,80	-0,23	1,43	0,16	
	61	20	3	40	0,33	-1,12	1,43	0,78	
	88	53	3	40	0,60	-0,51	1,43	0,35	
	74	43	3	40	0,58	-0,54	1,43	0,38	
	82	38	3	40	0,46	-0,77	1,43	0,54	
	107	27	3	40	0,25	-1,38	1,43	0,96	
	89	27	3	40	0,30	-1,19	1,43	0,83	
	70	30	3	40	0,43	-0,85	1,43	0,59	
	77	28	3	40	0,36	-1,01	1,43	0,71	
	47	36	3	40	0,77	-0,27	1,43	0,19	
	62	18	3	40	0,29	-1,24	1,43	0,86	
	66	20	3	40	0,30	-1,19	1,43	0,83	
Valor médio de K para todo o período de operação								0,54	

c) Valor $n = 1,1$

Fase	DBO (mg/l)		H (m)	TAS (m ³ /m ² .d)	DBOe/DBOa	ln (DBOe/DBOa)	H/TAS ⁿ	K	média por fase
	Afluente	Efluente							
AI	61	27	3	40	0,44	-0,82	0,05	15,72	19,79
	97	32	3	40	0,33	-1,11	0,05	21,38	
	90	34	3	40	0,38	-0,97	0,05	18,77	
	90	44	3	40	0,49	-0,72	0,05	13,80	
	121	18	3	40	0,15	-1,91	0,05	36,74	
	133	53	3	40	0,40	-0,92	0,05	17,74	
	89	37	3	40	0,42	-0,88	0,05	16,92	
	88	36	3	40	0,41	-0,89	0,05	17,23	
AII	152	57	3	65	0,38	-0,98	0,03	32,26	23,81
	123	65	3	65	0,53	-0,64	0,03	20,98	
	85	56	3	65	0,66	-0,42	0,03	13,73	
	72	41	3	65	0,57	-0,56	0,03	18,52	
	107	48	3	65	0,45	-0,80	0,03	26,37	
	98	47	3	65	0,48	-0,73	0,03	24,17	
	93	39	3	65	0,42	-0,87	0,03	28,58	
	123	56	3	65	0,46	-0,79	0,03	25,88	
AIII	90	56	3	80	0,62	-0,47	0,02	19,61	21,13
	130	64	3	80	0,49	-0,71	0,02	29,29	
	69	42	3	80	0,61	-0,50	0,02	20,52	
	110	79	3	80	0,72	-0,33	0,02	13,68	
	88	45	3	80	0,51	-0,67	0,02	27,72	
	51	37	3	80	0,73	-0,32	0,02	13,26	
	61	26	3	80	0,43	-0,85	0,02	35,25	
	91	72	3	80	0,79	-0,23	0,02	9,68	
BII	53	28	3	65	0,53	-0,64	0,03	20,99	21,48
	67	17	3	65	0,25	-1,37	0,03	45,11	
	64	36	3	65	0,56	-0,58	0,03	18,92	
	60	39	3	65	0,65	-0,43	0,03	14,17	
	63	39	3	65	0,62	-0,48	0,03	15,77	
	29	19	3	65	0,66	-0,42	0,03	13,91	
BIII	52	28	3	80	0,54	-0,62	0,02	25,59	23,55
	81	34	3	80	0,42	-0,87	0,02	35,88	
	67	52	3	80	0,78	-0,25	0,02	10,48	
	60	35	3	80	0,58	-0,54	0,02	22,28	
BI	53	28	3	40	0,53	-0,64	0,05	12,30	15,56
	68	47	3	40	0,69	-0,37	0,05	7,12	
	83	66	3	40	0,80	-0,23	0,05	4,42	
	61	20	3	40	0,33	-1,12	0,05	21,50	
	88	53	3	40	0,60	-0,51	0,05	9,78	
	74	43	3	40	0,58	-0,54	0,05	10,47	
	82	38	3	40	0,46	-0,77	0,05	14,83	
	107	27	3	40	0,25	-1,38	0,05	26,55	
	89	27	3	40	0,30	-1,19	0,05	23,00	
	70	30	3	40	0,43	-0,85	0,05	16,34	
	77	28	3	40	0,36	-1,01	0,05	19,51	
	47	36	3	40	0,77	-0,27	0,05	5,14	
	62	18	3	40	0,29	-1,24	0,05	23,85	
	66	20	3	40	0,30	-1,19	0,05	23,02	
Valor médio de K para todo o período de operação								19,97	