

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE DESEMPENHO E
CONFIABILIDADE DE ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS

Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte

2006

ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONFIABILIDADE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONFIABILIDADE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Avaliação, modelagem e controle de processos de tratamento de esgotos

Orientador: Marcos von Sperling

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2006

Ficha catalográfica elaborada pelo Processamento Técnico BEE/UFMG

O48a Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa
Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos [manuscrito] /
Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira. — 2006.
231 f., enc. : il.

Orientador: Marcos von Sperling

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia
Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos.
Bibliografia: f. 210-215.

1 Água – Estações de tratamento – Teses. 2. Estatística - Análise – Teses. 3. Meio ambiente -
Teses. 4. Águas residuais – Purificação – Teses. I. Sperling, Marcos von. II. Universidade Federal de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Universidade Federal de Minas
Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. IV. Título.

CDU: 628.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL
Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br
www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise de Desempenho e Confiabilidade de Estações de Tratamento de Esgotos

SÍLVIA MARIA ALVES CORREA OLIVEIRA

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. MARCOS VON SPERLING

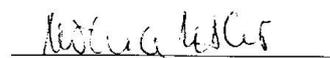

Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO


Prof. MAURO DA CUNHA NAGHETTINI


Prof. PEDRO ALEM SOBRINHO


Prof. RAFAEL KOBSCITZ XAVIER BASTOS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH


Profa. Mônica Maria Diniz Leão
Coordenadora

Versão Final aprovada por


Prof. Marcos von Sperling
Orientador

Belo Horizonte, 08 de março de 2006.

*Ao Simão, Felipe
e Paulinha (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcos von Sperling, profissional admirável e ser humano excepcional, não apenas pelo conhecimento e experiência compartilhados, mas também pelas manifestações de sincera amizade, incentivo, apoio e confiança, nestes anos de rica convivência.

Ao professor Mauro Naghettini, sempre tão gentil e prestativo, pelo apoio na parte estatística.

Ao Guta, amigo de muitos anos, pelo apoio e incentivo na retomada do doutorado e pela solidariedade nos bons e maus momentos.

À Izabel Souki, bolsista de Iniciação Científica, sempre tão dedicada e competente, pela ajuda no tratamento dos dados e nos inúmeros testes estatísticos efetuados.

Às queridas amigas Vanessa, Carlota, Valéria, Adriana, Lenora e Deneb, pelo carinho e apoio em todos os momentos.

À Iara, boa amiga mais que secretária do Program de Pós-Graduação, por tantos favores e gentilezas dispensados ao longo de tantos anos de convivência.

A todos os funcionários do DESA, em especial, Dona Chica, Deyse e Cláudia.

Ao CNPq, Capes e Fapemig, pela disponibilização das bolsas, em momentos distintos da pesquisa.

À COPASA, FEAM, SABESP e prestadores de serviços municipais, pela disponibilização dos dados analisados no trabalho.

À USP e, em especial, ao professor Pedro Alem Sobrinho, pela parceria na elaboração do banco de dados.

Aos meus familiares, pela dedicação e compreensão em todos os momentos.

Ao Simão, pelo apoio incondicional em todas as circunstâncias e por ter tornado possível a realização de um antigo projeto de vida.

Ao Felipe, razão de tudo, pelo carinho, paciência e momentos de descontração e alegria, que tornaram estes anos ainda mais agradáveis.

À Lu, minha querida sobrinha, pelo carinho e amizade ao longo de tantos anos de estreita convivência.

À Mariana, artista que se formou dentista, pela ajuda na elaboração das apresentações em Power Point.

A todas as pessoas que, de alguma forma, participaram e contribuíram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Nesta pesquisa foram avaliados, de forma abrangente e aprofundada, cerca de 50.000 dados operacionais de 208 ETEs dos estados de Minas Gerais e São Paulo, compreendendo 21 processos de tratamentos. A avaliação teve como enfoque principal o desempenho das tecnologias de tratamento de esgotos, considerando o alcance a diversas metas de qualidade para o efluente, a influência de condições operacionais e a confiabilidade.

A qualidade geral do monitoramento foi muito variada, considerando o número de parâmetros analisados, a frequência de amostragem, o período abrangido e o número de dados disponibilizado pelas diversas ETEs. O porte das estações de tratamento também variou muito, com vazões tratadas na faixa de 0,05 L/s a 6.838 L/s. Uma extensa caracterização dos esgotos brutos foi efetuada, buscando comparar as concentrações de DBO, DQO, SST, NT, PT e Coliformes com os valores considerados típicos pela literatura especializada, para despejos predominantemente domésticos. Os resultados mostraram que os esgotos brutos apresentaram, em geral, uma concentração mais elevada do que o considerado usual. Os esgotos tratados foram avaliados, mais detalhadamente, para seis processos de tratamento mais usualmente utilizados no país, e para os quais havia uma maior disponibilidade de dados: fossas-filtro, lagoas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lodos ativados, reatores UASB operando isoladamente e reatores UASB seguidos de pós-tratamento. Para estas tecnologias de tratamento, foram efetuadas avaliações acerca da qualidade do efluente gerado, em termos de concentrações e eficiências de remoção observadas, do atendimento a padrões de lançamento e metas de qualidade para o efluente e da influência de condições operacionais no desempenho das ETEs. Foram determinados, ainda, o modelo distributivo que melhor descreve o comportamento dos dados afluentes e efluentes e a confiabilidade dos sistemas, medida pela probabilidade de desempenho satisfatório de uma ETE, considerando o atendimento a padrões de lançamento de efluentes.

Em geral, o desempenho médio observado ficou aquém do esperado para as tecnologias de tratamento, considerando todas as abordagens de análise utilizadas. No entanto, bons resultados foram obtidos por ETEs individuais de todas as tecnologias, mostrando que as limitações não podem ser atribuídas aos processos de tratamento mas, possivelmente, a eventuais problemas de projeto, operação e manutenção das unidades.

ABSTRACT

The research presents results from a comprehensive evaluation of 208 full-scale WWTPs, located in Southeast Brazil (latitudes 20 to 22° South), comprising 21 treatment processes. The evaluation focused on the performance of these treatment technologies, in terms of achieving compliance with several effluent standards, and the influence of operational conditions and the reliability of the systems.

Over 50000 plant operational data were analyzed and the results showed a great variability in terms of sampling frequency, monitoring period and measured parameters. The influent flow range varied from 0.05 Ls⁻¹ to 6,838 Ls⁻¹. The descriptive statistics of the influent concentration data for BOD, COD, TSS, TN, TP and FC (thermotolerant coliforms) were determined, and a comparison was made between the observed concentrations and the typical values reported by the literature on prevalingly domestic raw wastewater. The results showed that, in general, the raw wastewater presented higher concentrations than usually reported by the literature. The treated wastewaters were evaluated for six frequently used treatment processes, and for which there was a higher data availability: septic tank + anaerobic filter, facultative pond, anaerobic pond + facultative pond, activated sludge, UASB reactors alone, UASB reactors followed by post-treatment. For these treatment technologies, the effluent quality was evaluated, in terms of effluent concentration and removal efficiencies, compliance with discharge standards, and influence of operational conditions. The best theoretical probability distribution to describe the behavior of the variables present in raw and treated wastewater was investigated, and by this investigation the coefficients of reliability were determined, in terms of the compliance of effluent BOD, COD, TSS, TN, TP and FC with discharge standards or targets.

In general, the average performance of the treatment technologies, in terms of all statistical analyses used, was lower than expected. However, good performances were obtained by individual plants from all technologies, showing that the poor results could not be attributed to the treatment processes per se but possibly to design, operational and maintenance problems.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | VIII |
| LISTA DE TABELAS..... | X |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | XIII |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVOS..... | 6 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 6 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 6 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA..... | 7 |
| 3.1 PADRÕES DE LANÇAMENTO E DE QUALIDADE DE CORPOS D'ÁGUA..... | 7 |
| 3.1.1 <i>Avaliação do atendimento aos padrões de lançamento</i> | 12 |
| 3.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS..... | 17 |
| 4 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS..... | 23 |
| 4.1 INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 4.2 METODOLOGIA..... | 24 |
| 4.2.1 <i>Levantamento e sistematização dos dados</i> | 24 |
| 4.2.2 <i>Estatística descritiva dos dados</i> | 25 |
| 4.2.2.1 Descrição geral dos dados..... | 25 |
| 4.2.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento..... | 25 |
| 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 27 |
| 4.3.1 <i>Levantamento e sistematização dos dados</i> | 27 |
| 4.3.1.1 Dados coletados..... | 27 |
| 4.3.1.2 Identificação das dificuldades encontradas..... | 28 |
| 4.3.2 <i>Estatística descritiva dos dados</i> | 30 |
| 4.3.2.1 Descrição geral dos dados..... | 30 |
| 4.3.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento..... | 38 |
| 4.4 CONCLUSÕES..... | 55 |
| 4.4.1 <i>Levantamento e sistematização dos dados</i> | 55 |
| 4.4.1.1 Dados coletados..... | 55 |
| 4.4.1.2 Identificação das dificuldades encontradas..... | 55 |
| 4.4.2 <i>Estatística descritiva dos dados</i> | 56 |
| 4.4.2.1 Descrição geral dos dados..... | 56 |
| 4.4.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento..... | 56 |
| 5 AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS ADOTADOS PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA)..... | 59 |
| 5.1 INTRODUÇÃO..... | 59 |
| 5.2 PRODES – PROGRAMA DE DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS..... | 60 |
| 5.3 METODOLOGIA..... | 65 |
| 5.3.1 <i>Avaliação individual das ETEs</i> | 65 |
| 5.3.2 <i>Avaliação das modalidades de tratamento</i> | 68 |
| 5.3.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência..... | 69 |
| 5.3.2.2 Processo de auto-avaliação..... | 69 |
| 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 71 |
| 5.4.1 <i>Avaliação individual das ETEs</i> | 72 |
| 5.4.2 <i>Avaliação das modalidades de tratamento</i> | 72 |
| 5.4.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência..... | 72 |
| 5.4.2.2 Processo de auto-avaliação..... | 77 |
| 5.5 CONCLUSÕES..... | 79 |
| 5.5.1 <i>Avaliação individual das ETEs</i> | 79 |
| 5.5.2 <i>Avaliação das modalidades de tratamento</i> | 79 |
| 5.5.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência..... | 79 |
| 5.5.2.2 Processo de auto-avaliação..... | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO A LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS..... | 81 |
| 6.1 | INTRODUÇÃO | 81 |
| 6.2 | METODOLOGIA..... | 82 |
| 6.2.1 | <i>Avaliação do atendimento aos três critérios</i> | 82 |
| 6.2.2 | <i>Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas</i> | 83 |
| 6.2.2.1 | Legislações pesquisadas para elaboração das novas metas | 83 |
| 6.2.2.2 | Metas de qualidade adotadas | 86 |
| 6.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 87 |
| 6.3.1 | <i>Avaliação do atendimento aos três critérios</i> | 87 |
| 6.3.2 | <i>Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas</i> | 90 |
| 6.4 | CONCLUSÕES | 100 |
| 6.4.1 | <i>Avaliação do atendimento aos três critérios</i> | 100 |
| 6.4.2 | <i>Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas</i> | 101 |
| 7 | INFLUÊNCIA DE FATORES DE PROJETO E OPERAÇÃO NA QUALIDADE DO EFLUENTE... | 103 |
| 7.1 | INTRODUÇÃO | 103 |
| 7.2 | METODOLOGIA..... | 104 |
| 7.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 108 |
| 7.3.1 | <i>Lagoas facultativas primárias</i> | 109 |
| 7.3.2 | <i>Lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas</i> | 115 |
| 7.3.2.1 | Lagoas anaeróbias | 115 |
| 7.3.2.2 | Lagoas facultativas secundárias | 120 |
| 7.3.3 | <i>Lodos ativados</i> | 125 |
| 7.3.4 | <i>Reatores UASB</i> | 132 |
| 7.4 | CONCLUSÕES | 136 |
| 8 | CARACTERIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DOS CONSTITUINTES | 138 |
| 8.1 | INTRODUÇÃO | 138 |
| 8.2 | METODOLOGIA..... | 141 |
| 8.2.1 | <i>Estatísticas preliminares para verificação das distribuições dos dados</i> | 141 |
| 8.2.2 | <i>Critérios estatísticos para a análise de frequência</i> | 141 |
| 8.2.3 | <i>Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição</i> | 144 |
| 8.2.4 | <i>Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições</i> | 147 |
| 8.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 148 |
| 8.3.1 | <i>Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados</i> | 148 |
| 8.3.2 | <i>Critérios estatísticos para a análise de frequência</i> | 152 |
| 8.3.2.1 | Teste da hipótese de independência | 152 |
| 8.3.2.2 | Teste da hipótese de aleatoriedade | 155 |
| 8.3.2.3 | Teste da hipótese de homogeneidade | 157 |
| 8.3.2.4 | Teste da hipótese de estacionariedade | 158 |
| 8.3.2.5 | Síntese dos resultados dos testes | 159 |
| 8.3.3 | <i>Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição</i> | 161 |
| 8.3.4 | <i>Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições</i> | 171 |
| 8.4 | CONCLUSÕES | 177 |
| 8.4.1 | <i>Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados</i> | 177 |
| 8.4.2 | <i>Critérios estatísticos para a análise de frequência</i> | 177 |
| 8.4.2.1 | Teste da hipótese de independência | 177 |
| 8.4.2.2 | Teste da hipótese de aleatoriedade | 177 |
| 8.4.2.3 | Teste da hipótese de homogeneidade | 177 |
| 8.4.2.4 | Teste da hipótese de estacionariedade | 177 |
| 8.4.2.5 | Síntese dos resultados dos testes | 178 |
| 8.4.3 | <i>Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição</i> | 178 |
| 8.4.4 | <i>Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições</i> | 179 |
| 9 | CONFIABILIDADE DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO | 180 |
| 9.1 | INTRODUÇÃO | 180 |
| 9.2 | METODOLOGIA..... | 181 |
| 9.2.1 | <i>Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)</i> | 181 |
| 9.2.2 | <i>Cálculo das concentrações de projeto e operação para diversas metas de lançamento</i> | 185 |
| 9.2.3 | <i>Cálculo do percentual esperado de atendimento às diversas metas de lançamento</i> | 186 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 188 |
| 9.3.1 | <i>Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC).....</i> | <i>188</i> |
| 9.3.2 | <i>Cálculo das concentrações de projeto para diversas metas de lançamento.....</i> | <i>193</i> |
| 9.3.3 | <i>Cálculo do percentual esperado de atendimento às diversas metas de lançamento</i> | <i>196</i> |
| 9.4 | CONCLUSÕES | 202 |
| 9.4.1 | <i>Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC).....</i> | <i>202</i> |
| 9.4.2 | <i>Cálculo das concentrações de projeto para diversas metas de lançamento.....</i> | <i>202</i> |
| 9.4.3 | <i>Cálculo do percentual esperado de atendimento a diversas metas de lançamento.....</i> | <i>203</i> |
| 10 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 204 |
| 11 | RECOMENDAÇÕES | 208 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 209 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 4.1 - Número de dados por ETE, considerando os diversos constituintes..... | 32 |
| Figura 4.2 – Concentrações médias e desvios padrão, afluentes e efluentes, dos constituintes..... | 33 |
| Figura 4.3 - Comparação entre concentrações afluentes dos constituintes e os valores típicos expressos na literatura | 35 |
| Figura 4.4 – Coeficientes de variação dos constituintes afluentes e efluentes e eficiência de remoção | 37 |
| Figura 4.5 – Concentrações médias afluentes e efluentes dos diversos constituintes..... | 42 |
| Figura 4.6 - Comparação entre concentrações afluentes dos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura | 45 |
| Figura 4.7 - Comparação entre concentrações efluentes dos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura | 48 |
| Figura 4.8 - Eficiências médias de remoção dos diversos constituintes | 52 |
| Figura 4.9 - Comparação entre eficiências de remoção obtidas pelos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura | 54 |
| Figura 5.1- Fluxograma das etapas envolvidas na avaliação dos dados..... | 66 |
| Figura 5.2- Etapas de avaliação do procedimento de auto-avaliação..... | 70 |
| Figura 5.3 - Média dos atendimentos cumulativos aos padrões de eficiência ANA, considerando as seis tecnologias de tratamento | 73 |
| Figura 5.4 - Atendimentos cumulativos médios aos padrões A, B, C, D e F, por modalidade de tratamento | 75 |
| Figura 5.5 - Avaliação comparativa do atendimento aos diversos padrões de eficiência ANA | 76 |
| Figura 5.6 - Resultado do processo de auto-avaliação ANA, por modalidade (% de ETEs)..... | 78 |
| Figura 6.1 – Média dos atendimentos aos três critérios de atendimento | 88 |
| Figura 6.2 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de DBO (conjunto de 166 ETEs)..... | 91 |
| Figura 6.3 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de DQO (conjunto de 166 ETEs)..... | 93 |
| Figura 6.4 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de SST (conjunto de 166 ETEs)..... | 95 |
| Figura 6.5 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de NT (conjunto de 166 ETEs)..... | 96 |
| Figura 6.6 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de PT (conjunto de 166 ETEs)..... | 97 |
| Figura 6.7 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de CF (conjunto de 166 ETEs)..... | 98 |
| Figura 7.1 – Relação entre L_s , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LFs primárias | 110 |
| Figura 7.2 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LFs primárias..... | 112 |
| Figura 7.3 – Relação entre L_v , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LANs | 116 |
| Figura 7.4 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LANs..... | 118 |
| Figura 7.5 – Relação entre L_s , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção – LFs secundárias | 121 |
| Figura 7.6 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção – LFs secundárias..... | 122 |
| Figura 7.7 – Relação entre rel. A/M, TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Tanques de aeração dos LA | 126 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.8 – Relação entre TES, TAS e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Decantadores secundários dos LA | 127 |
| Figura 7.9 - Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LA..... | 128 |
| Figura 7.10 - Relação entre TDH, Vel. Ascensional e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Reatores UASB | 133 |
| Figura 7.11 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Reatores UASB | 134 |
| Figura 8.1 – Seqüência de testes utilizados para verificação do modelo distributivo dos dados amostrais..... | 143 |
| Figura 8.2 – Gráfico dos coeficientes de assimetria versus curtose dos diversos constituintes..... | 150 |
| Figura 8.3 - Resultados percentuais dos testes de independência, considerando as freqüências de monitoramento | 154 |
| Figura 8.4 – Percentual de dados independentes, considerando as freqüências de monitoramento | 154 |
| Figura 8.5 - Resultados percentuais dos testes de aleatoriedade, considerando as freqüências de monitoramento | 156 |
| Figura 8.6 - Percentual de dados aleatórios, considerando as freqüências de monitoramento | 157 |
| Figura 8.7 - Resultados percentuais dos testes de estacionariedade, considerando as freqüências de monitoramento..... | 159 |
| Figura 8.8 - Percentual de dados estacionários, considerando as freqüências de monitoramento | 159 |
| Figura 8.9 – Exemplos de gráficos gerados nos testes de verificação de normalidade dos dados..... | 162 |
| Figura 8.10 – Exemplos de gráficos “Probability - Probability” utilizados para a verificação das distribuições mais adequadas | 164 |
| Figura 8.11 - Histogramas categorizados relativos aos constituintes da ETE LA 05 | 173 |
| Figura 9.1 – Etapas para cálculo das concentrações de projeto | 185 |
| Figura 9.2 – Coeficientes de variação (CV) das modalidades de tratamento | 191 |
| Figura 9.3 - Coeficientes de confiabilidade (CDC) das modalidades de tratamento | 191 |
| Figura 9.4 – Valores de CDC em função do CV, considerando diferentes níveis de confiabilidade | 192 |
| Figura 9.5 - Concentrações de projeto necessárias para o alcance de diversas metas de lançamento de constituintes efluentes (nível de confiabilidade de 95%) | 193 |
| Figura 9.6 - Concentrações médias de projeto necessárias para o alcance das diversas metas de lançamento de DBO efluente..... | 194 |
| Figura 9.7 - % de ETEs com concentrações efluentes médias de DBO \leq às concentrações de projeto necessárias para alcance das metas..... | 195 |
| Figura 9.8 - Concentrações de projeto necessárias para atendimento à meta de lançamento de 60 mg/L de DBO, para diferentes níveis de confiabilidade | 196 |
| Figura 9.9 - Percentual de valores iguais ou menores ao atendimento esperado a metas de lançamento de DBO efluente (nível de confiabilidade de 95%)..... | 197 |
| Figura 9.10 - Percentual de valores iguais ou menores ao atendimento esperado a metas de lançamento de constituintes efluentes | 198 |
| Figura 9.11 – Percentual esperado de violação às metas estabelecidas para DBO efluente | 199 |
| Figura 9.12 – Comparação dos resultados esperados e efetivamente obtidos para o padrão de 60 mg/L para DBO efluente | 200 |
| Figura 9.13 - Resultados observados e previstos pelo modelo para atendimento a metas de lançamento de efluentes | 201 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1 – Origem dos dados de monitoramento das ETEs | 27 |
| Tabela 4.2 - Sistemas de tratamento de esgotos inventariados | 28 |
| Tabela 4.3 - Frequência de amostragem de DBO, praticada pelas 208 ETEs investigadas..... | 29 |
| Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas referentes ao número de dados dos constituintes..... | 31 |
| Tabela 4.5 – Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes | 32 |
| Tabela 4.6 – Comparação entre concentrações afluentes usuais e reais dos constituintes..... | 34 |
| Tabela 4.7 - Número de ETEs descritas em cada modalidade, por constituinte..... | 39 |
| Tabela 4.8 - Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes afluentes, considerando seis tecnologias de tratamento | 40 |
| Tabela 4.9 - Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes efluentes, considerando seis tecnologias de tratamento | 41 |
| Tabela 4.10 – Resultados dos testes de comparação entre as concentrações dos esgotos brutos das diversas modalidades de tratamento | 46 |
| Tabela 4.11 - Concentrações efluentes usuais reportadas pela literatura e concentrações médias efetivamente observadas | 47 |
| Tabela 4.12 - Estatísticas descritivas referentes às eficiências de remoção dos constituintes afluentes, considerando seis tecnologias de tratamento | 51 |
| Tabela 4.13 - Eficiências típicas de remoção dos constituintes de interesse nos esgotos domésticos | 53 |
| Tabela 5.1 - Tabela de valores de referência – ANA..... | 61 |
| Tabela 5.2 - Amostragem para análise laboratorial | 63 |
| Tabela 5.3 - Eficiência de remoção das cargas poluidoras afluentes necessária para o atendimento aos diversos padrões ANA | 67 |
| Tabela 5.4 - Relação de sistemas de tratamento avaliados quanto ao atendimento aos padrões de eficiência ANA | 71 |
| Tabela 5.5 - Porcentagem de ETEs que praticavam as diversas frequências de amostragem | 72 |
| Tabela 6.1 – Legislações estaduais que tratam de lançamento de efluentes domésticos em corpos d’água..... | 84 |
| Tabela 6.2 - Padrões de emissão para concentrações e eficiências de remoção segundo algumas legislações estaduais brasileiras e Comunidade Européia..... | 85 |
| Tabela 6.3 – Faixas de concentrações e eficiências de remoção preconizadas pelas legislações estaduais brasileiras e Comunidade Européia | 86 |
| Tabela 6.4 – Metas de emissão adotadas para avaliação das tecnologias de tratamento | 86 |
| Tabela 6.5 – Desempenho das tecnologias de tratamento, a partir da interpretação dos testes estatísticos..... | 89 |
| Tabela 6.6 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para DBO | 92 |
| Tabela 6.7 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para DQO | 94 |
| Tabela 6.8 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para SST | 95 |
| Tabela 6.9 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para NT 96 | 96 |
| Tabela 6.10 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para PT | 97 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 6.11 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para CF | 99 |
| Tabela 6.12 - Metas de qualidade alcançadas pelas ETEs de melhor desempenho (95% de atendimento), dentro das modalidades | 99 |
| Tabela 7.1 - Parâmetros de projeto e operação utilizados na avaliação das condições de carga | 109 |
| Tabela 7.2 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LFs primárias | 111 |
| Tabela 7.3 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LFs primárias..... | 111 |
| Tabela 7.4 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LFs primárias | 112 |
| Tabela 7.5 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs primárias | 114 |
| Tabela 7.6 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs primárias | 114 |
| Tabela 7.7 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LANs..... | 117 |
| Tabela 7.8 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LANs e LFs secundárias..... | 117 |
| Tabela 7.9 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LANs..... | 118 |
| Tabela 7.10 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LANs..... | 119 |
| Tabela 7.11 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LANs..... | 120 |
| Tabela 7.12 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LFs secundárias..... | 121 |
| Tabela 7.13 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LFs secundárias..... | 123 |
| Tabela 7.14 – Condições de operação adotadas pelos sistemas LAN+LF com comportamento diferenciado | 123 |
| Tabela 7.15 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs secundárias..... | 124 |
| Tabela 7.16 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs secundárias | 125 |
| Tabela 7.17 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - Tanques de aeração, LA..... | 126 |
| Tabela 7.18 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - Decantadores secundários, LA..... | 127 |
| Tabela 7.19 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LA..... | 128 |
| Tabela 7.20 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LA | 129 |
| Tabela 7.21 – Condições de operação adotadas pelos sistemas de lodos ativados (LA) com comportamento diferenciado | 130 |
| Tabela 7.22 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LA (Parâmetros Relação A/M e TDH) | 130 |
| Tabela 7.23 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LA (Parâmetros TES e TAS) | 131 |
| Tabela 7.24 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LA | 132 |
| Tabela 7.25 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - reatores UASB | 133 |
| Tabela 7.26 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – Reatores UASB | 133 |
| Tabela 7.27 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - reatores UASB | 134 |
| Tabela 7.28 - Resultados dos testes estatísticos para DQO e SST - reatores UASB | 135 |
| Tabela 7.29 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO e SST - reatores UASB | 136 |
| Tabela 8.1 – Exemplo de testes efetuados para determinação da distribuição de probabilidade dos dados amostrais..... | 146 |
| Tabela 8.2 – Seleção da distribuição candidata que melhor se ajustou aos dados..... | 146 |
| Tabela 8.3 – Sistemas de esgotos analisados para a caracterização da distribuição de frequência dos constituintes | 149 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 8.4 – Número e percentual de ETEs com dados considerados independentes pelo teste Wald-Wolfowitz | 153 |
| Tabela 8.5 - Percentual de ETEs com coeficientes de determinação $R^2 < 20\%$ | 155 |
| Tabela 8.6 – Número e percentual de ETEs com dados considerados aleatórios pelos testes | 155 |
| Tabela 8.7 - Número e percentual de ETEs com dados considerados homogêneos pelos testes | 158 |
| Tabela 8.8 - Número e percentual de ETEs com dados considerados estacionários pelo teste | 158 |
| Tabela 8.9 - Resultados dos diversos testes para verificação dos pressupostos para a análise de frequência | 160 |
| Tabela 8.10 - Número e percentual de ETEs cujos dados atenderam às hipóteses fundamentais da análise de frequência | 160 |
| Tabela 8.11 - Número e percentual de ETEs que atenderam às hipóteses fundamentais da análise de frequência, desconsiderando as de frequência não definida de monitoramento | 161 |
| Tabela 8.12 – Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição efetuados | 163 |
| Tabela 8.13 – Resultados dos diversos testes de normalidade (em % de ETEs) | 163 |
| Tabela 8.14 - Resultados obtidos nos testes de aderência às distribuições | 165 |
| Tabela 8.15 - Resultados percentuais e distribuição adotada para os constituintes analisados..... | 166 |
| Tabela 8.16 - Distribuições que, predominantemente, se ajustaram aos dados dos diversos constituintes, por modalidade de tratamento..... | 167 |
| Tabela 8.17 – ETEs sem ajuste a uma distribuição específica e com frequências não definidas de monitoramento | 168 |
| Tabela 8.18 - Resultados dos testes de aderência às distribuições, considerando o cumprimento dos pressupostos básicos para análise de frequência..... | 169 |
| Tabela 8.19 - Relações entre as distribuições normal e lognormal..... | 170 |
| Tabela 8.20 - Número de dados e frequência de amostragem dos parâmetros monitorados | 171 |
| Tabela 8.21 – Resultados dos testes para avaliação da frequência de monitoramento nas distribuições..... | 175 |
| Tabela 8.22 – Percentual de ocorrência de alterações nas distribuições, considerando os diversos constituintes..... | 176 |
| Tabela 9.1 – Concentrações médias de DBO de projeto/operação para diversas metas ou padrões ($\alpha = 95\%$) | 185 |
| Tabela 9.2 - Metas de emissão adotadas para os diversos constituintes | 186 |
| Tabela 9.3 – Estatísticas descritivas referentes aos valores de CV efluentes | 189 |
| Tabela 9.4 – Estatísticas descritivas referentes aos valores de CDC | 190 |
| Tabela 9.5 – Valores de CDC em função do CV, considerando diferentes níveis de confiabilidade | 192 |
| Tabela 9.6 – Concentrações de projeto necessárias para atendimento à meta de lançamento de 60 mg/L de DBO (mg/L)..... | 195 |
| Tabela 9.7 – Resultados reais e previstos pelo modelo para atendimento a metas de lançamento de efluentes.. | 200 |
| Tabela 9.8 - Resultados dos testes de verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência e de aderência a uma distribuição | 201 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------------|---|
| Afl. | Afluente |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| CETESB | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (São Paulo) |
| CF | Coliformes Termotolerantes |
| COPASA | Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais |
| DBO | Demanda bioquímica de oxigênio |
| Dec. | Decreto |
| DN | Deliberação normativa |
| DS | Decantador secundário |
| Efic. | Eficiência |
| Efl | Efluente |
| ES | Escoamento superficial |
| ETE | Estação de tratamento de esgotos |
| FA | Filtro anaeróbio |
| FAE | Filtro aerado |
| FBP | Filtro biológico percolador |
| FEAM | Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais |
| FLOT | Flotação |
| FS | Fossa séptica |
| LA | Lodos ativados |
| LAC | Lodos ativados convencional |
| LAF | Lagoa aerada facultativa |
| LAMC | Lagoa aerada de mistura completa |
| LAN | Lagoa anaeróbia |
| LAP | Lodos ativados aeração prolongada |
| LF | Lagoa facultativa |
| LM | Lagoa de maturação |
| LP | Lagoa de polimento |
| Ls | Taxa de aplicação superficial |
| Lv | Taxa de aplicação volumétrica |
| NT | Nitrogênio total |
| NTK | Nitrogênio total Kjeldahl |
| PO ₄ ³⁻ | Fosfato |
| PRODES | Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas |
| PT | Fósforo total |
| SA | Sistema australiano |
| SABESP | Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo |
| SST | Sólidos suspensos totais |
| TA | Tanque de aeração |
| TES | Taxa de escoamento superficial |
| TAS | Taxa de aplicação de sólidos |
| TDH | Tempo de detenção hidráulica |
| UASB | Upflow anaerobic sludge blanket |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| USP | Universidade de São Paulo |

1 INTRODUÇÃO

O impacto do lançamento de efluentes de estações de tratamento de esgotos - ETEs – em corpos d'água é motivo de grande preocupação para a maioria dos países. Uma série de legislações ambientais, critérios e políticas procuram influir tanto nas condições de descarga quanto no nível de tratamento exigido para garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição destes efluentes tratados sejam aceitáveis.

O estabelecimento de uma legislação para proteção da qualidade dos corpos d'água, que seja adequada às realidades dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, tem sido motivo de discussões nacionais e internacionais por vários pesquisadores da área (Johnstone e Horan, 1994, 1996, Nascimento e von Sperling, 1998, von Sperling, 1998, 1999b, Johnstone e Norton, 2000, von Sperling e Fattal, 2001, von Sperling e Chernicharo, 2000, 2002).

A maioria das nações desenvolvidas já conseguiu superar problemas básicos de poluição aquática e encontra-se em fase de refinamento quanto ao controle de micro poluentes ou do impacto de poluentes em ecossistemas sensíveis. A situação é bastante diferente na maioria dos países em desenvolvimento, onde, em geral, os esgotos domésticos não recebem sequer tratamento primário antes de serem lançados nos corpos d'água, e não existe um efetivo controle dos efluentes industriais, o que dificulta o atendimento aos padrões adotados. A falta de recursos financeiros, de legislação adequada, de capacidade institucional instalada para regulação e controle e a falta de vontade política tornam a situação ainda mais complicada.

Apesar desta enorme diferença existente, o que se observa é uma tendência dos países em desenvolvimento de importar os padrões de qualidade adotados pelos países desenvolvidos sem levar em conta aspectos regionais, tais como situações econômicas, sociais e culturais, prevalência de certas doenças, riscos aceitáveis e desenvolvimento tecnológico. A adoção destes padrões, se feita de maneira adequada, consciente e gradativa, pode ser uma ferramenta valiosa para a melhoria da saúde da população e desenvolvimento ambiental de países em desenvolvimento. Caso contrário, pode levar a descrédito, frustração, gasto desnecessário de dinheiro público e a instalação de sistemas de tratamento que não são sustentáveis.

O atendimento aos padrões de lançamento, de uma maneira geral, é quantificado por meio de medições de concentração de DBO, DQO, sólidos suspensos, nitrogênio total e fósforo total.

No entanto, como comentam Johnstone e Norton (2000), algumas definições e indefinições dificultam a interpretação do cumprimento ou não dos padrões. Definições adequadas dos padrões a serem alcançados e vários esclarecimentos se tornam necessários, dentre os quais: (a) se o desempenho deve ser baseado em valores absolutos ou em uma porcentagem de remoção, (b) se os parâmetros usados como medidas de controle devem estar incluídos nas licenças para lançamento, (c) se o regime de amostragem deve ser baseado em amostras simples ou compostas, (d) se os padrões devem ser baseados em valores absolutos ou em uma avaliação estatística do atendimento, (e) se deve existir uma frequência requerida de amostragens e análises, (f) qual deve ser o período de julgamento do cumprimento (se deve ser considerada a amostra diária, a média mensal, a média anual ou um valor percentual medido em um certo período de tempo). Outros questionamentos usualmente presentes dizem respeito aos erros na amostragem e análises, bem como à definição do que se constitui uma falha.

As dificuldades advindas destas indefinições são discutidas em outras publicações (von Sperling, 1998a, von Sperling e Chernicharo, 2000, 2002) e os autores alertam para a necessidade de revisão dos padrões vigentes que devem culminar com uma combinação entre tecnologias economicamente viáveis e padrões concretamente praticáveis.

Este tipo de discussão já acontecia nos Estados Unidos há algumas décadas e vários autores (Dean & Forsythe, 1976a, 1976b, Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex e Hunter, 1981, 1983, Vaughan e Russel, 1983, Smith et al. 2001, Borsuk et al. 2002, Charles et al., 2005) publicaram estudos sobre a verificação do atendimento aos padrões de lançamento e sobre o desempenho de processos de tratamento, considerando a qualidade dos efluentes. Todos estes trabalhos procuraram dar subsídios às agências ambientais para uma definição adequada dos padrões de lançamento e padrões dos corpos d'água.

No Brasil, apesar de estudos e avaliações em escala piloto ou em ETEs individuais (sumariadas em Andrade Neto, 1997, von Sperling, 1998a, Campos, 1999, Chernicharo, 2001, von Sperling e Chernicharo, 2000, 2002), o conhecimento sobre o desempenho das tecnologias de tratamento de esgotos em operação no país é relativamente esparso, havendo poucas consolidações estruturadas em termos de uma avaliação global. Neste sentido, este trabalho é inédito e, acredita-se, de grande relevância para a área de tratamento de esgotos, já que avalia o comportamento de ETEs em operação no país, fornecendo informações reais do

desempenho de diversos processos de tratamento, em termos da qualidade do efluente gerado e da eficiência de remoção alcançada.

Para isto, foram utilizados os dados coletados no âmbito do projeto URBAGUA, estudo contratado com a Agência Nacional de Águas (ANA), concluído em outubro de 2003. Este projeto, de caráter técnico e em nível nacional, foi proposto para a criação de instrumentos para a gestão integrada da água em áreas urbanas, para fornecer subsídios ao Programa Nacional de Despoluição das Bacias Hidrográficas (PRODES) e como um estudo exploratório de um programa nacional de apoio à gestão (Convênio FINEP CT-HIDRO 23.01.0547.00).

No presente trabalho, houve ampliação de objetivos e aprofundamento na avaliação de desempenho de processos de tratamento de esgotos, considerando o alcance de diversas metas de qualidade, a variabilidade e a confiabilidade dos sistemas. Foi avaliada, ainda, a influência de condições operacionais das estações de tratamento na qualidade do efluente gerado, o modelo distributivo que melhor descreve o comportamento dos dados afluentes e efluentes e o cumprimento dos padrões ou metas de lançamento baseadas em diversas legislações ambientais.

O trabalho apresenta, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre padrões ambientais e critérios de avaliação de desempenho de estações de tratamento de esgotos. No entanto, a tese foi estruturada de tal forma que alguns capítulos possuem revisões específicas dos temas e, em todos, são incluídos os itens introdução, metodologia, resultados, discussão e conclusões.

O capítulo 4, “Levantamento e caracterização dos dados”, apresenta toda a metodologia de aquisição dos dados: origem, quantidade, tipos de tecnologias de tratamento, número de ETEs inseridas em cada modalidade, assim como as análises estatísticas preliminares utilizadas para sua caracterização. Foi feita, ainda, uma avaliação comparativa entre algumas modalidades de tratamento que possuíam um número de ETEs e um número suficiente de dados coletados para análise, buscando a identificação de sistemas que apresentassem melhor desempenho.

O capítulo 5, “Avaliação do atendimento aos critérios adotados pela ANA”, descreve inicialmente o Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES), criado pela ANA – Agência Nacional de Águas, que serve de referencial para as várias análises efetuadas. Nesta parte do trabalho, é dado destaque para os itens de interesse direto para o programa,

vinculados à avaliação do desempenho das estações e ao atendimento aos padrões das diversas classes de tratamento.

No capítulo 6, “Avaliação do atendimento a legislações ambientais”, foram efetuadas análises de desempenho de 166 ETEs em termos do cumprimento de padrões de lançamento. Duas abordagens são empregadas, (1) avaliação do atendimento a três critérios, elaborados a partir da composição das legislações vigentes nos estados de Minas Gerais e de São Paulo e, (2) avaliação do atendimento a metas hipotéticas de lançamento, baseadas em legislações vigentes em outros estados brasileiros e na Comunidade Européia. Estes padrões estipulados procuraram considerar limites mais usuais nas legislações e que retratassem condições mais realistas, abrangentes e variadas de concentrações e eficiências de remoção, considerando os resultados apresentados pelas ETEs avaliadas na primeira etapa.

A influência de fatores de projeto e operação na qualidade do efluente foi analisada no capítulo 7, onde foi verificada a existência de melhores resultados de desempenho das diversas tecnologias de tratamento quando os sistemas trabalhavam numa faixa recomendada para os parâmetros de projeto e operação. Procurou-se checar ainda se eventuais bons ou maus desempenhos estariam relacionados a condições de subcarga ou sobrecarga, respectivamente.

O capítulo 8 descreve a caracterização das distribuições de frequência dos principais constituintes, etapa essencial para processos de inferência estatística e para a obtenção de estimativas de medidas de tendência central e de variabilidade das populações, baseadas nos dados amostrais. É importante, ainda, para o desenvolvimento de modelos que permitam a predição de desempenhos futuros de processos, considerando sua variabilidade e confiabilidade.

No capítulo 9, “Confiabilidade das tecnologias de tratamento”, foi utilizado um método desenvolvido por Niku et al. (1979) para determinação dos coeficientes de confiabilidade de alguns processos de tratamento de esgotos, baseado no modelo distributivo determinado no capítulo 8. A partir destes coeficientes, foram calculadas as concentrações efluentes de projeto necessárias para cumprimento de várias metas hipotéticas de lançamento e foram determinados os percentuais de atendimento e de violação esperados, considerando as condições de operação efetivamente praticadas pelas ETEs.

O capítulo 10, “Considerações finais”, apresenta uma avaliação global de todo o trabalho, assim como uma síntese de todas as conclusões obtidas nos capítulos específicos.

O capítulo 11, “Recomendações”, lista algumas sugestões para continuidade do trabalho, uma vez que existem diversas possibilidades de análises que ainda podem ser efetuadas, considerando o grande número de dados disponibilizados. A relação das referências bibliográficas é apresentada no último capítulo.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Analisar, estatisticamente, o desempenho de 208 estações de tratamento de esgotos situadas nos estados de Minas Gerais e São Paulo.

2.2 *Objetivos específicos*

- Avaliar o desempenho individual das diversas estações de tratamento e das ETEs agrupadas por processo de tratamento, considerando o atendimento a padrões de lançamento e metas de qualidade para o efluente;
- Efetuar um estudo comparativo do desempenho dos diversos processos de tratamento analisados;
- Avaliar a influência de condições operacionais no desempenho das estações de tratamento;
- Caracterizar a distribuição de probabilidade dos parâmetros DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, dos esgotos brutos e tratados, e da vazão;
- Efetuar a análise de confiabilidade das estações de tratamento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão de conceitos relacionados ao estabelecimento de padrões de proteção a corpos d'água e critérios de avaliação de desempenho de estações de tratamento de esgotos. As revisões de literatura relacionadas a temas específicos estão inseridas nos respectivos capítulos.

3.1 Padrões de lançamento e de qualidade de corpos d'água

Os efluentes originados em estações de tratamento de esgotos - ETEs - podem ter duas destinações: reutilização ou disposição no ambiente, através de descarga e diluição em ambientes aquáticos ou aplicação no solo. Uma série de legislações ambientais, critérios e políticas procuram influir tanto na seleção dos locais de descarga quanto no nível de tratamento exigido para garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição desses efluentes tratados sejam aceitáveis.

No Brasil, as legislações federal e estaduais classificam seus corpos d'água em função dos seus usos preponderantes e estabelecem, para cada classe de água, os padrões de qualidade a serem obedecidos. Estes padrões de qualidade são utilizados principalmente para a proteção da qualidade da água, de forma a assegurar os usos previstos.

Para proporcionar melhores condições para que os padrões de qualidade de um corpo d'água não sejam excedidos e para facilitar o controle dos focos de poluição e dos agentes poluidores pelo órgão ambiental, são geralmente estabelecidos limites para o lançamento de efluentes. Estes padrões de lançamento são constituídos da mesma forma que os padrões de qualidade, considerando um conjunto de parâmetros e os respectivos limites que devem ser atendidos pelos efluentes lançados por qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente, nos corpos d'água, para não prejudicar o seu uso.

Em termos gerais, duas abordagens são normalmente consideradas quando da implementação de padrões de lançamento de efluentes. A primeira considera a implementação de padrões que levam em conta o risco ambiental ocasionado pelo lançamento dos efluentes. Os padrões de emissão são estabelecidos para resguardar os padrões de qualidade dos corpos d'água receptores, de forma a assegurar que as condições ambientais existentes serão mantidas. A segunda incorpora a fixação de limites baseados nas melhores tecnologias de tratamento

disponíveis, considerando a remoção de constituintes mais convencionais, tais como DBO e SST. No primeiro caso, os padrões podem ter uma maior flexibilidade, não sendo mais restritivos que o necessário, mas existe a necessidade de uma avaliação individual de cada situação e maior experiência e conhecimento por parte órgãos ambientais competentes. A segunda abordagem reconhece que diferentes tipos de sistemas de tratamento acarretam diferentes níveis de impacto ambiental e, apesar de mais simples de administrar, requer que a situação econômica dos países seja capaz de arcar com os custos de instalação das melhores tecnologias existentes, para que seja assegurada a qualidade do ambiente receptor (Canadian Council of Minister of the Environment, 2005).

Jonhstone e Horan (1994) comentam que esta segunda abordagem era considerada na Europa, por meio das diretrizes para tratamento de esgotos urbanos (91/271/EEC), agregando o conceito de “melhor tecnologia disponível que não incorpora custos excessivos”.

Ambas as abordagens apresentam vantagens e desvantagens e o ideal é sempre a adoção de uma abordagem híbrida, que utiliza a combinação dos dois métodos. Vários países em todo o mundo já utilizam este conceito, podendo ser citados os Estados Unidos, que já em 1977, por meio da Seção 301 do “U. S. Clean Water Act”, exigia o alcance a padrões de lançamento de efluentes baseados em tratamento secundário de esgotos, sob a alegação de que é inaceitável poluir quando existe tecnologia disponível para reduzir a carga poluidora.

No Canadá, a maioria dos estados também tem adotado abordagens híbridas, com padrões mais genéricos ou limites regulatórios para alguns parâmetros mais convencionais, como DBO, SST e coliformes termotolerantes, e mecanismos que permitem a imposição de padrões mais restritivos ou monitoramento de um maior número de parâmetros, quando necessário (Canadian Council of Minister of the Environment, 2005).

Na Europa, todos os membros da União Européia devem cumprir algumas condições estabelecidas nas diretrizes para tratamento de esgotos urbanos (Council of the European Communities, 1991), que incluem a instalação de, pelo menos, tratamento secundário dos esgotos. De acordo com o equivalente populacional, a data limite para implementação das unidades de tratamento variou de dezembro de 2000 a dezembro de 2005. Os padrões de lançamento podem se tornar mais restritivos, dependendo da qualidade dos corpos d’água receptores.

No Brasil, a Resolução CONAMA n° 20 de 1986, recentemente revogada pela Resolução CONAMA n° 357 de 2005, foi criada com o objetivo de assegurar os usos preponderantes previstos dos corpos d'água e nortear o controle dos efluentes líquidos. Os órgãos ambientais estaduais usualmente baseiam-se nos padrões desta Resolução, mantendo-os, complementando-os ou eventualmente aplicando padrões mais restritivos.

O estabelecimento de uma legislação para a proteção da qualidade dos corpos d'água, que seja adequada às realidades dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, tem sido motivo de discussões nacionais e internacionais por vários pesquisadores da área (Johnstone e Horan, 1994, 1996, Mara, 1996, Johnstone e Norton, 2000, Von Sperling, 1998, Nascimento e Von Sperling, 1998, 1999a, 1999b, Von Sperling e Nascimento, 1999, Von Sperling e Fattal, 2001, Von Sperling e Chernicharo, 2000, 2002).

O que se observa é uma tendência dos países em desenvolvimento de importar os padrões de qualidade adotados pelos países desenvolvidos, que se encontram em um estágio muito diferenciado quanto aos problemas ambientais. A maioria das nações desenvolvidas já conseguiu superar problemas básicos de poluição aquática e encontra-se em fase de refinamento quanto ao controle de micro poluentes ou ao impacto de poluentes em ecossistemas sensíveis. A situação é bastante diferente na maioria dos países em desenvolvimento, onde em geral, os esgotos domésticos não recebem nenhuma forma de tratamento antes de serem lançados nos corpos d'água, e não existe um efetivo controle dos efluentes industriais, o que dificulta o atendimento aos padrões adotados. A falta de recursos financeiros, de legislação adequada, de capacidade institucional instalada para regulação e controle, bem como a falta de vontade política tornam a situação ainda mais complicada.

Vários aspectos discutidos nos trabalhos citados serão apresentados e comentados a seguir, buscando-se analisar a adequação da legislação vigente à realidade brasileira e comparar a situação existente entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Johnstone e Horan (1994, 1996) comentam que a adoção de padrões de qualidade de países desenvolvidos por nações em desenvolvimento tem sido efetuada sem uma análise das conseqüências econômicas ou da estimativa dos benefícios reais obtidos com a sua implementação. Geralmente, não se considera o longo período de investimentos em projetos de infra-estrutura, durante o qual os padrões foram aperfeiçoados gradativamente, à medida

em que a sociedade alcançava melhores níveis econômicos. A adoção de padrões demasiado exigentes para a realidade vigente pode levar ao uso de tecnologias inadequadas para atingir objetivos inacessíveis e inviáveis economicamente, produzindo um sistema insustentável. Alertam para o risco de tais padrões serem ignorados, se os países não possuem uma estrutura regulatória adequada ou capacidade institucional necessária para forçar o seu cumprimento. Um outro componente a ser observado diz respeito aos custos de monitoramento, controle, regulamentação e imposição de cumprimento dos padrões.

Von Sperling (1998) analisou os padrões de qualidade das águas de corpos receptores e os padrões de lançamento de efluentes líquidos, preconizados pela Resolução CONAMA nº 20/86. Foi efetuada uma análise retrospectiva, concluindo-se que, apesar da sua indiscutível importância, a legislação não foi suficiente para promover o controle da poluição hídrica. A dificuldade na implementação da Resolução CONAMA não tem sido apenas por parte dos poluidores, mas também por parte dos órgãos ambientais, que requerem uma estrutura mais ampla e ágil para acompanhar as etapas de licenciamento e fiscalização dos diversos poluidores e de monitoramento dos corpos receptores.

Nascimento e von Sperling (1998) compararam os padrões brasileiros de qualidade para as águas doces com os critérios científicos para proteção das comunidades aquáticas, saúde humana e animal. Concluíram que a Resolução CONAMA 20/86 não está integralmente em conformidade com o uso “proteção das comunidades aquáticas”, quando comparada com os critérios canadenses e norte-americanos, necessitando que sejam elaborados estudos mais aprofundados para adequar os limites dos parâmetros em desacordo com o respectivo uso.

Os mesmos autores (1999a) compararam os limites de detecção dos métodos analíticos e os padrões de qualidade das águas e de lançamento de efluentes da Resolução CONAMA. Esse procedimento apontou que alguns parâmetros possuem limite de detecção analítico superior ao limite estabelecido pela referida Resolução, demonstrando a necessidade de se investigar os sedimentos e/ou a biota aquática, quanto à presença desses parâmetros e de se investir no desenvolvimento de técnicas laboratoriais com menor limiar de detecção.

Em outro trabalho (1999b), os autores compararam os padrões de lançamentos de efluentes líquidos em corpos d'água especificados pela Resolução CONAMA com os limites de lançamento de diversas legislações estaduais brasileiras e com as recomendações do Banco

Mundial e da Comunidade Européia. Demonstraram que, em nível federal, o Brasil possui ferramentas para agilizar e operacionalizar a gestão dos recursos hídricos e que os padrões de lançamento nacional não são excessivamente restritivos, pelo menos ao se comparar com legislações internacionais.

Johnstone e Norton (2000) analisaram o desenvolvimento de padrões e seu alcance econômico, assim como a regulamentação a ser adotada no século 21, comparando países desenvolvidos e em desenvolvimento. Os problemas ambientais inaceitáveis vividos por países pobres e os riscos para a saúde da população foram levantados e, diante das dificuldades verificadas, os autores sugeriram que os países em desenvolvimento se concentrem, a princípio, em introduzir tratamentos primários de esgotos para redução da poluição encontrada. Para isto, os padrões de lançamento hoje vigentes teriam que ser revistos e uma introdução de padrões mais exigentes deveria ser feita de modo gradativo.

Von Sperling comentava, já em 1998, que uma solução prática para viabilizar um atendimento gradativo aos padrões ambientais seria o escalonamento da qualidade do efluente, evitando a inadimplência quase que sistemática dos poluidores. Este escalonamento, executado dentro de uma programação bem estabelecida, com amplo envolvimento do órgão ambiental e total compromisso por parte do poluidor, poderia ser mais efetivo do que o objetivo de se atender os padrões em uma única etapa.

Em 2000 e 2002, von Sperling e Chernicharo, ao compararem processos de tratamento de esgotos em função do atendimento aos padrões de lançamento de efluentes concluíram, de maneira semelhante, que uma melhor qualidade de efluente obtida gradativamente, de maneira bem planejada, é a melhor opção para países em desenvolvimento, quando comparada à tentativa de se tentar obter a melhor qualidade de uma só vez.

Este ponto de vista, retratando um posicionamento da Organização Mundial de Saúde, é adotado, também, por von Sperling e Fattal (2001) e por Johnstone e Horan (1996), que observaram que os países desenvolvidos, de uma maneira geral, implementaram seus padrões de forma gradual e que estes foram se tornando progressivamente mais restritivos. No entanto, os países em desenvolvimento tentam alcançar este níveis mais exigentes de uma só vez. Os autores discutiram, ainda, a natureza complexa da adoção de padrões em nível nacional e sugeriram que esses devem ser adaptados às especificidades regionais.

3.1.1 Avaliação do atendimento aos padrões de lançamento

Tradicionalmente, o alcance dos padrões de lançamento é quantificado por meio de medições de concentração de DBO, DQO, sólidos suspensos, nitrogênio total e fósforo total. No entanto, em alguns países desenvolvidos, esses limites para lançamento já estão atingindo níveis de exigência que incluem, também, a remoção de microrganismos patogênicos, odor, uma larga variedade de antibióticos veterinários e humanos, drogas, etc.

Metcalf & Eddy (2003) comentam que valores limites extremamente exigentes para lançamento de DBO, SST e Trihalometanos (THMs) foram divulgados na publicação de 2001 do NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System - EPA), e deverão ser adotados até o ano 2006 no estado da Califórnia. Como exemplo, os padrões de lançamento médios mensais para DBO e SST, considerando amostragem diária composta, deverão ser de 10 e 15 mg/L, respectivamente. Já os THMs, cujo limite para água potável em 2001 era de 100 µg/L, terão os seus valores médios mensais de lançamento fixados em 0,41 µg/L, para Dibromoclorometano, em 5,7 µg/L para clorofórmio e em 0,56 µg/L para Bromodiclorometano, considerando amostras mensais simples.

Franz et al. (1996) relatam que a discussão acerca do cumprimento dos restritivos padrões de lançamento austríacos vai além da confiabilidade e eficiência das estações de tratamento de esgotos, compreendendo ainda uma avaliação global das condições dos corpos d'água receptores. As taxas de diluição de corpos d'água e os índices de saprobidade previamente definidos devem ser avaliados para que a eutrofização seja evitada.

Johnstone e Norton (2000) comentam que algumas definições e, às vezes indefinições, dificultam a interpretação do cumprimento ou não dos padrões. É necessário que sejam feitas definições adequadas dos padrões a serem alcançados e que se esclareça:

- (a) se o desempenho é baseado em valores absolutos ou em uma porcentagem de remoção;
- (b) se os parâmetros usados como medidas de controle estão incluídos nas licenças para lançamento;
- (c) se o regime de amostragem é baseado em amostras simples ou compostas;
- (d) se os padrões são baseados em valores absolutos ou em uma avaliação estatística do atendimento;

(e) se existe uma frequência requerida de amostragens e análises;

(f) qual o período de julgamento do cumprimento (se deve ser considerada a amostra diária, a média mensal, a média anual ou um valor percentual medido em um certo período de tempo).

Outros questionamentos usualmente presentes dizem respeito aos erros na amostragem e análises, bem como à definição do que se constitui uma falha.

Para a situação brasileira específica, von Sperling (1998) comenta mais alguns aspectos com relação aos padrões constantes na Resolução CONAMA n° 20, tais como:

- O elenco de análises é bastante extenso e a maior parte das cidades brasileiras não tem condições para a sua realização;
- Concentrações de fundo (*background*) em diversos corpos d'água já se aproximam dos padrões de alguns parâmetros;
- Elevadíssimas razões de diluição rio/efluente são necessárias para o atendimento aos padrões dos corpos receptores, no que diz respeito a coliformes;
- As razões de diluição rio/efluente para as substâncias potencialmente perigosas variam bastante entre si, dificultando, para o órgão ambiental, a prática de monitorar o corpo d'água por meio do controle dos lançamentos.

Essas indefinições acarretam uma dificuldade extra à interpretação e avaliação de desempenho dos diversos processos de tratamento de esgotos existentes, considerando o atendimento aos padrões de qualidade para os efluentes. Von Sperling e Chernicharo (2000), ao fazerem um paralelo entre os processos de tratamento disponíveis e a conseqüente qualidade do efluente obtida, comentam que, embora os padrões de qualidade da água devam ser baseados no critério de qualidade para os seus usos preponderantes, os padrões de lançamento devem ser associados também a tecnologias de tratamento apropriadas e economicamente viáveis. De outro modo, os padrões de lançamento não cumprirão o seu papel de ferramenta para proteção ambiental, especialmente em países em desenvolvimento.

Da mesma forma, o conceito de “melhor tecnologia disponível” pode ser adaptado, em países em desenvolvimento, para o processo de tratamento que forneça a melhor qualidade do efluente, considerando os custos que podem ser arcados pela comunidade e as condições dos corpos d'água receptores. Desta maneira, fica preservada a viabilidade dos sistemas

simplificados, normalmente adotados para tratamento de menores vazões de esgotos e situados em locais mais distantes dos grandes centros urbanos, situação que, de modo geral, já confere melhor qualidade e maior capacidade de assimilação aos corpos d'água receptores.

Esta opinião é expressa também no “Guidelines on Municipal Wastewater Management” (UNEP/WHO/HABITAT/WSSCC, 2004), onde é comentado que o foco para solucionar problemas de saneamento deve estar na tecnologia de tratamento a ser utilizada. A tecnologia mais apropriada para uma dada situação é aquela que garante uma qualidade aceitável do corpo d'água receptor. Muitas vezes, sistemas de baixo custo, como lagoas de estabilização, que usam processos naturais, mais fáceis de operar e manter, são soluções satisfatórias para países em desenvolvimento e carentes de recursos econômicos, mas que possuem grande quantidade de área disponível a preços mais reduzidos.

Von Sperling (1998a) investigou algumas tecnologias de tratamento de esgotos potencialmente aplicáveis, considerando a sua capacidade de remover os principais poluentes incluídos na legislação brasileira. Uma série de análises de lançamentos em rios com distintas razões de diluição (vazão do rio / vazão de esgotos) foi efetuada, para determinação das concentrações máximas de DBO, amônia, fosfato e coliformes permissíveis no efluente, que possibilitassem o atendimento aos padrões do corpo receptor. O trabalho concluiu que uma ampla gama de tecnologias de tratamento utilizadas no país não é capaz de garantir o atendimento aos padrões do corpo d'água vigentes. Desta forma, acredita-se que, ao invés de se revisar a capacidade dos processos de tratamento, uma revisão dos padrões seria uma etapa necessária, eventualmente culminando com uma combinação entre tecnologias economicamente viáveis e padrões concretamente praticáveis.

Esse tipo de discussão já era conduzida em 1983, nos Estados Unidos, por Vaughan e Russel, que alertavam para as dificuldades do monitoramento ambiental para verificação do atendimento aos padrões de lançamento. Alguns problemas complicadores foram discutidos, tais como: a definição correta de um padrão de lançamento, a medição dos benefícios da redução da emissão e a possibilidade do poluidor tentar burlar a legislação ou apostar no fato de não ser flagrado em falta. Um esquema de controle estatístico de qualidade bastante complexo foi sugerido, considerando a minimização de custos e danos ocasionados por violações dos padrões.

Outros estudos sobre avaliação e predição de violações dos padrões de qualidade da água têm sido elaborados a partir de diferentes abordagens estatísticas. No estudo de Smith et al. (2001) a possibilidade de erros do tipo I (uma declaração falsa de violação aos padrões) e do tipo II (uma declaração falsa de não violação) foi avaliada, considerando o critério adotado pela EPA para consideração de águas impróprias para uso. Dois métodos estatísticos, teste binomial e abordagem binomial “bayesiana”, foram sugeridos para o reconhecimento dos dois tipos de erros no processo de avaliação da qualidade das águas. Os autores concluíram que o procedimento binomial seria mais facilmente aplicável, permitindo a seleção de taxas de violação aceitáveis e inaceitáveis e/ou a escolha de valores limites para declaração de impropriedade das águas para uso. Já a abordagem “bayesiana” alteraria o enfoque até então utilizado, sendo necessário que o órgão fiscalizador estabelecesse expectativas “a priori” acerca do curso d’água.

Borsuk et al. (2002) desenvolveram um modelo de eutrofização para um estuário da Carolina do Norte, nos Estados Unidos, para avaliação do cumprimento do padrão estabelecido para clorofila *a*. A principal contribuição do estudo foi fornecer subsídios para a EPA para a adoção de cargas máximas totais diárias de poluentes que incluíssem uma margem de segurança. Neste modelo, os autores incorporaram variabilidade residual e incerteza aos parâmetros para estimar e propagar os efeitos dos erros nas predições de cumprimento ou violação. Na avaliação da propagação do erro foi utilizada a simulação de Monte Carlo para estimar o efeito coletivo dos erros individuais na predição do erro e descrever estatisticamente a natureza das diferenças entre predições e observações.

Ainda neste enfoque, outros estudos analisando o cumprimento dos padrões ambientais foram elaborados por McBride e Ellis (2001) e McBride (2003), considerando diferentes abordagens estatísticas. No primeiro, foi utilizada um método “bayesiano” em substituição à regra clássica utilizada para avaliação de cumprimento dos padrões percentuais que limitam o número de violações permitidas em um período definido. Esta abordagem foi utilizada para a construção de gráficos de “confiança de cumprimento” que permitem a identificação do risco do consumidor (quando ocorre declaração falsa de não violação) e do risco do fornecedor do serviço (declaração falsa de violação aos padrões), quando se adotam, por suposição, diferentes tipos de distribuição.

No outro trabalho, as regras de avaliação de cumprimento dos padrões, utilizando análises clássicas e “bayesiana”, são comparadas com as abordagens que assumem a normalidade dos dados analisados. O número de amostras e o número máximo de violações permissível para manter o risco do consumidor abaixo de 5%, quando se considera o cumprimento de um padrão de percentil 95%, foi calculado, e as curvas de “confiança de cumprimento” foram estimadas. O autor concluiu que as regras de cumprimento baseadas em abordagens não paramétricas foram sempre mais robustas, ocorrendo apenas uma exceção quando um grande número de amostras foi disponibilizado e os testes de aderência demonstraram a normalidade dos dados.

Todos estes estudos procuram dar subsídios às agências ambientais para uma definição adequada dos padrões de lançamento e padrões dos corpos d’água. O objetivo deve ser sempre a implantação de regras que são aceitas pela sociedade e que são possíveis de serem cumpridas. Padrões ambientais excessivamente restritivos não conduzem, por si só, a um meio ambiente saudável. Para áreas que apresentem condições ambientais favoráveis, os padrões de lançamento podem ser menos exigentes, desde que mantenham a integridade ambiental.

Porto (2002) comenta, em nota técnica sobre a nova estruturação normativa na área de gestão da qualidade dos corpos d’água superficiais no Brasil, que é necessário rever a forma de planejamento e execução das atividades de controle e redução da poluição à luz da integração entre a gestão da quantidade e da qualidade da água. No entanto, o controle da poluição da água é um programa que requer massivos investimentos e é obrigação do sistema de gestão de qualidade da água trabalhar para minimizar esse custo e otimizar sua implantação, de modo a atender áreas mais críticas e conseguir um nível adequado de controle para as demais áreas.

3.2 Critérios de avaliação de desempenho das estações de tratamento de esgotos

Muitos trabalhos têm sido elaborados sobre o projeto e a operação de estações de tratamento de esgotos, envolvendo operações físicas unitárias e processos químicos e biológicos unitários. Apesar da importância incontestável do tema, estudos ligados à avaliação de desempenho de ETEs se mostram, hoje, tão ou mais importantes no planejamento e projeto de sistemas de tratamento, uma vez que a definição de bom desempenho envolve o alcance dos padrões de lançamento, que se tornam cada vez mais restritivos.

Assim, novas considerações devem estar presentes ao se operar e projetar estações de tratamento de esgotos, conforme Metcalf e Eddy (2003): (a) necessidade de otimização de desempenho das estações; (b) confiabilidade de processos de tratamento e seleção de parâmetros adequados de projeto; (c) controle de odor; (d) estratégias de controle de processo; (e) expansão da capacidade de tratamento e (f) eficiência energética nos processos de tratamentos de esgotos.

Estudos envolvendo análises estatísticas de desempenho de processos de tratamento e desenvolvimento de métodos e procedimentos para a introdução de conceitos de confiabilidade e estabilidade no projeto e operação de estações de tratamento de esgotos têm sido efetuados há algumas décadas em vários países.

Alguns deles versam sobre o comportamento das variáveis efluentes de ETEs, visando estimar a qualidade esperada do efluente e suas variações para uma dada tecnologia de tratamento. As incertezas inerentes aos processos e sua influência no desempenho das estações de tratamento têm sido analisadas sistematicamente por meio da teoria de probabilidades.

Desta forma, é essencial o conhecimento da distribuição de freqüência dos dados efluentes e uma série de estudos efetuados na área partiram de sua determinação (Dean & Forsythe, 1976a, 1976b; Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex e Hunter, 1981, 1983, Charles et al., 2005).

Os autores comentam sobre as dificuldades de se utilizar distribuições tradicionalmente adotadas, como a normal, uma vez que a análise de freqüência por meio desse modelo distributivo requer que os dados sejam aleatórios, independentes e simetricamente

distribuídos. No entanto, os dados ambientais geralmente violam estas condições, apresentando características que requerem tratamento especial, tais como:

- presença de valores atípicos;
- vários erros de medições;
- variância não constante;
- períodos com ausência de dados;
- distribuição assimétrica;
- correlação serial (dados não independentes);
- relações complexas de causa e efeito;
- variáveis não medidas;
- mudanças nos métodos de medição, causando eventual heterogeneidade nos dados amostrais;
- alteração nos pontos de monitoramento;
- alteração nos procedimentos de amostragem.

Diante destas dificuldades, Berthouex e Hunter (1983) e Berthouex e Fan (1986) sugeriram construir uma distribuição de referência que descreva o desempenho de estações de tratamento de esgotos, em termos de qualidade do efluente. Esta distribuição seria baseada em conjuntos de dados efluentes observados em cada ETE ou seria criada a partir de cálculos estatísticos, como média móvel, taxas ou porcentagens ou ainda médias mensais, semanais, etc. A distribuição de referência seria apresentada na forma de um histograma, fornecendo um quadro claro do que é esperado e do que é incomum em termos de comportamento do processo para cada ETE específica. Este tipo de abordagem, ainda que interessante para o conhecimento do desempenho individual de cada unidade, não permitiria a extrapolação das conclusões para outras estações de tratamento.

Várias análises de variáveis efluentes de estações de tratamento de esgotos, comentadas nos parágrafos que se seguem, têm mostrado que, para a maioria dos processos, grande parte dos constituintes pode ser modelada pela distribuição lognormal já que os dados, geralmente, apresentam assimetria positiva.

Metcalf & Eddy (2003) comentam que, em geral, o desempenho de processos de tratamento biológicos convencionais, considerando variáveis efluentes de esgotos que podem ser modificadas pelo tratamento, como DBO, carbono orgânico total, etc. podem ser descritas mais freqüentemente pela distribuição lognormal. Nos casos de substâncias inorgânicas e quando a variabilidade do desempenho não é grande, outros tipos de distribuição podem ser utilizadas para modelar o desempenho do processo.

O mesmo comportamento é observado para os constituintes dissolvidos e particulados de efluentes de sistemas de drenagem urbana (U.S. EPA, 1983, ASCE/EPA, 2000 e Van Buren et al., 1997). Mas no relatório final de exploração e avaliação de dados de drenagem urbana, elaborado pela ASCE/EPA (2000) é comentado que alguns parâmetros não se ajustam bem à distribuição lognormal, como pH, oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes e turbidez. No entanto, a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou a dados de “déficit” de OD, investigada em um trabalho desenvolvido por Tung e Hathhorn (1988), foi a distribuição lognormal.

Dean e Forsythe (1976a, 1976b) também chegaram a resultados discordantes dos usuais, ao considerarem, em seus trabalhos sobre avaliação de confiabilidade de sistemas avançados de tratamento de esgotos, que dados relativos a coliformes termotolerantes e turbidez se ajustaram bem à distribuição lognormal. Neste trabalho foi efetuado, ainda, um estudo sobre a probabilidade de um dado processo de tratamento exceder um padrão de lançamento estabelecido. Os autores concluíram que os padrões deveriam levar em conta considerações estatísticas, uma vez que, quando o desempenho de estações de tratamento segue uma distribuição normal ou lognormal, existe uma probabilidade real, ainda que pequena para ETEs bem operadas e projetadas, de exceder qualquer valor limite de lançamento.

Niku et al. (1981b) compartilham as opiniões acima mencionadas alegando que, em vista da natureza lognormal dos dados e das incertezas presentes no projeto e operação dos sistemas de tratamento, o caráter estocástico dos processos deveria ser levado em conta quando do estabelecimento dos padrões de emissão. Dada a natural variabilidade de desempenho das ETEs, os padrões de lançamento de efluentes deveriam permitir que o limite de um determinado parâmetro fosse excedido, por exemplo, uma vez a cada três ou dez anos. Uma boa analogia, conforme os autores, seria o cálculo de período de retorno de cheias, utilizado na Hidrologia. Valores de cheias de 100, 200 ou 1000 anos são geralmente previstas a partir

de dados que incluem informações de poucos anos, mas assume-se que grandes vazões podem ocorrer.

O conceito de confiabilidade tem estado presente em vários trabalhos na área e uma definição bastante aceita para o termo, desenvolvida por Chorafas (1960) e citada por Niku et al. (1981b), é que a confiabilidade de um sistema é a probabilidade de se obter um desempenho adequado por, pelo menos, um período específico de tempo sob determinadas condições. Em termos de desempenho de uma ETE, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se consegue cumprir os padrões de lançamento de efluentes. Por conseguinte, ocorrerá uma falha de um processo de tratamento sempre que um dado padrão de lançamento de efluente for excedido.

Alguns estudos efetuados por Niku et al. (1979, 1981b, 1981c), empregando essa definição, avaliaram a confiabilidade de processos de lodos ativados, analisando 43 estações de tratamento em operação nos Estados Unidos. No primeiro trabalho, foi desenvolvido um coeficiente de confiabilidade, onde a concentração média do constituinte (valor de projeto) se relaciona aos valores limites a serem cumpridos em uma análise de probabilidade. A partir do modelo de confiabilidade obtido, os autores concluíram que é possível a utilização da distribuição lognormal para prever tanto a qualidade do efluente em termos de concentrações de DBO e SST quanto à confiabilidade e ao desempenho de estações de tratamento de esgotos.

Em 1982 esta mesma análise foi efetuada por Niku e colaboradores para avaliação de onze filtros biológicos percoladores, localizados em seis diferentes estados americanos. O modelo de confiabilidade previamente desenvolvido para o processo de lodos ativados foi utilizado para previsão da qualidade dos efluentes de DBO e SS dos filtros biológicos percoladores, mostrando um bom ajuste aos resultados reais obtidos.

Este coeficiente tem sido empregado e recomendado, desde então, por vários autores para avaliação de processos de tratamento (Crites & Tchobanoglous, 2000, Naval e Wanderley, 2000, Metcalf & Eddy, 2003).

Os fatores que afetam a variabilidade do efluente de processos de lodos ativados foram estudados por Niku et al. (1981a), utilizando análises estatísticas de dados operacionais.

Foram identificados vários fatores que contribuem para perturbações na qualidade do efluente, dentre os quais:

- variáveis afluentes: vazão, DBO, SST;
- Condições ambientais: temperatura do esgoto, vento;
- Parâmetros operacionais e biológicos: idade do lodo, sólidos suspensos na mistura líquida, relação A/M, vazão e concentração de lodo de retorno, razão de recirculação;
- Características do decantador: índice volumétrico do lodo, sólidos sedimentáveis;
- Porte da ETE e tipo de processo;
- Fatores humanos; e
- Variabilidade inerente ao processo.

Alguns conceitos estatísticos foram utilizados para análise e entendimento das flutuações e das relações existentes entre diferentes variáveis. A determinação da distribuição dos dados foi efetuada, segundo os autores, através de várias estatísticas, mas foram apresentados apenas resultados do coeficiente de variação – CV, de todas as ETEs estudadas. As relações entre a qualidade do efluente e outras variáveis foram investigadas pela utilização de análises de correlação e de regressão dos dados. Os resultados mostraram que não existe uma relação consistente entre concentração efluente e cargas afluentes ou variáveis biológicas e operacionais. A contribuição e influência de cada variável difere de ETE para ETE e pode ser resultado de projeto, operação ou ambos.

Num outro trabalho, Niku e colaboradores (1981c) expandiram o estudo, desenvolvendo métodos e procedimentos para a introdução de conceitos de estabilidade e confiabilidade na operação e projeto de estações de tratamento de esgotos. Nesse estudo, a estabilidade foi definida como a capacidade de ajuste a uma referência ou norma e o valor utilizado para análise foi a concentração média anual do constituinte. As variações diárias foram comparadas à média anual e o desvio padrão foi considerado como o melhor indicador de estabilidade. Os resultados mostraram que, em geral, os sólidos suspensos efluentes tiveram maior variação que a DBO efluente, levando a maiores instabilidades nos sistemas. A conclusão obtida foi que, para atingir o mesmo nível de estabilidade para ambos, as ETEs devem ser projetadas para produzir concentrações efluentes de SS menores que as de DBO efluente.

Von Sperling e Chernicharo (2000) analisaram os 32 processos de tratamento mais comumente utilizados em todo o mundo e concluíram que a maioria deles é capaz de atingir valores razoáveis de qualidade de efluente, considerando DBO, DQO e, algumas vezes, SS, compatíveis com a maioria de padrões de lançamento existentes para efluentes. No entanto, para amônia, nitrogênio, coliformes termotolerantes e especialmente fósforo, somente uma faixa limitada de tecnologias de tratamento consegue gerar um efluente compatível com eventuais padrões existentes.

4 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS

4.1 Introdução

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no âmbito do projeto URBAGUA, estudo contratado com a FINEP, de interesse para a Agência Nacional de Águas (ANA), concluído em outubro de 2003 (Convênio FINEP CT-HIDRO 23.01.0547.00).

O URBAGUA foi um projeto de pesquisa interdisciplinar executado em colaboração entre unidades de pesquisa da Universidade de São Paulo e da Universidade Federal de Minas Gerais. O projeto de pesquisa realizado teve por objetivo geral promover o desenvolvimento de instrumentos técnicos e gerenciais de apoio à racionalização do uso urbano da água, a partir de uma abordagem integrada de ações de preservação dos mananciais, de controle de inundações e de saneamento básico, em articulação com os instrumentos de política urbana aplicáveis nas diferentes esferas da gestão regional e urbana.

Os dados coletados foram utilizados para a elaboração do módulo Esgotamento Sanitário, que buscou o desenvolvimento de instrumentos específicos de apoio ao Programa Nacional de Despoluição das Bacias Hidrográficas – PRODES.

Ao todo, foram obtidos dados de 208 estações de tratamento de esgotos em operação nos estados de São Paulo e de Minas Gerais, cobrindo 21 diferentes processos de tratamento de esgotos. Considerando-se a ampla diversidade climática e econômica da região abrangida, acredita-se que os dados coletados para este estudo sejam representativos de processos de tratamento em operação em grande parte do país.

O item 4.2, “Metodologia”, apresenta uma breve descrição da origem dos dados coletados e das análises estatísticas preliminares utilizadas para a sua caracterização.

O item 4.3, “Resultados e Discussão”, traz inicialmente a relação das entidades que disponibilizaram os dados, os tipos de tecnologias de tratamento abrangidas no estudo e o número de ETEs inseridas em cada modalidade. Em seguida, é feita uma avaliação crítica das dificuldades encontradas, que se constituem em uma reflexão sobre a realidade do monitoramento de estações de tratamento de esgotos em nosso país.

As estatísticas descritivas preliminares foram apresentadas na forma de gráficos “box-whisker”, onde se buscou mostrar a variabilidade do comportamento das diversas estações de tratamento, expressas em termos do número de dados disponibilizados, das concentrações afluentes e efluentes, e de eficiências de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos em Suspensão Totais (SST), Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (PT) e Coliformes termotolerantes (CF, Coliformes fecais).

Além da análise descritiva, algumas tecnologias de tratamento usualmente utilizadas no Brasil e que possuíam um número de ETEs e de dados coletados suficientes para a análise foram descritas e avaliadas, de forma comparativa, buscando a identificação de sistemas que apresentassem melhor desempenho. Para isto, os resultados de concentrações efluentes e eficiência de remoção dos constituintes citados foram comparados com os dados de desempenho esperado, publicados pela literatura especializada.

4.2 Metodologia

4.2.1 Levantamento e sistematização dos dados

Como o projeto foi desenvolvido em parceria entre a USP e a UFMG, foram coletados dados de ETEs em operação nos estados de São Paulo e Minas Gerais. As séries históricas de dados de monitoramento das ETEs, utilizadas no trabalho, foram obtidas de entidades estaduais de controle ambiental, de prestadores de serviços de saneamento, estaduais e municipais, e de projetos de pesquisas da UFMG.

No estado de Minas Gerais os dados foram fornecidos pelas seguintes entidades: Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais - COPASA MG; Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM; Prestadores de serviços municipais e ETEs pesquisadas pela UFMG

Os órgãos que disponibilizaram os dados do estado de São Paulo foram a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP e alguns prestadores de serviços municipais.

O período de abrangência dos dados experimentais de monitoramento das ETEs variou de janeiro de 1995 a agosto de 2003.

Conforme acordado com as entidades que forneceram os dados, as estações de tratamento de esgotos não seriam identificadas pelo seu nome, mas sim por um código. Este acordo é preservado no presente trabalho.

A apresentação dos dados das diversas ETEs avaliadas foi padronizada de forma a facilitar sua utilização e consulta. Os dados adquiridos foram organizados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel), em ordem cronológica de monitoramento.

4.2.2 Estatística descritiva dos dados

4.2.2.1 Descrição geral dos dados

Os dados experimentais de monitoramento das ETEs foram analisados por meio de estudos estatísticos preliminares, visando o conhecimento e caracterização dos diversos sistemas inventariados. Para todos os constituintes de interesse, DBO, DQO, SST, NT, PT, e CF, afluentes e efluentes de todas as ETEs, foram calculadas as estatísticas básicas relativas ao número de dados, médias aritmética e geométrica, mediana, moda, valores máximos e mínimos, amplitude (máximo – mínimo), quartis inferior e superior, percentis de 10 e de 90%, variância, desvio padrão, assimetria e curtose.

Nesta etapa do estudo foram calculadas, ainda, as eficiências de remoção das cargas poluidoras afluentes, considerando todos os constituintes citados.

4.2.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento

As seis tecnologias de tratamento, mais usualmente utilizadas no Brasil, foram descritas e avaliadas, considerando as concentrações afluentes e efluentes de todos os constituintes, assim como as respectivas eficiências de remoção. A análise das concentrações dos esgotos brutos foi efetuada com a finalidade de verificar se determinados processos de tratamento estariam associados a comunidades que geram esgotos com concentrações diferenciadas.

As modalidades foram analisadas, ainda, de forma comparativa, buscando a identificação de sistemas que apresentassem melhor desempenho. Para isto, os resultados de concentrações efluentes e eficiência de remoção dos constituintes foram comparados com dados de desempenho considerados usuais para as diversas tecnologias de tratamento, conforme literatura especializada.

Algumas análises estatísticas foram efetuadas para verificar se as diferenças observadas entre as concentrações e as eficiências das diversas tecnologias de tratamento foram estatisticamente significativas. Foram utilizados testes paramétricos e não paramétricos, uma vez que os dados oriundos de tratamentos de esgotos não são necessariamente distribuídos segundo um modelo normal.

As análises de variância (ANOVA) foram utilizadas para verificação da existência de diferenças significativas entre os resultados médios obtidos pelas seis diferentes tecnologias de tratamento. O teste paramétrico específico empregado foi a análise de variância para um fator, para amostras de tamanhos diferentes (Snedecor & Cochran, 1989, Drumond et al., 1996, Helsel & Hirsch, 2002, Montgomery, 2003) e o não paramétrico foi o de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas (Kruskal-Wallis, 1952, Siegel & Castellan, 1988).

Quando os resultados obtidos pelos diversos tipos de tratamento, considerando o nível de significância (α) de 5%, foram considerados diferentes pela ANOVA, foram empregados os testes de comparações múltiplas. Estes testes permitem uma comparação simultânea entre todos os resultados obtidos e a verificação de quais modalidades de tratamento apresentaram desempenhos diferenciados.

Para efetuar a comparação entre todos os pares possíveis de médias obtidas pelos tratamentos, o teste paramétrico de Tukey (teste “post hoc”), considerado um dos mais potentes para detectar diferenças entre grupos de médias (Helsel & Hirsch, 2002), foi aplicado após o ANOVA. O teste não paramétrico de comparações múltiplas de classes para todos os grupos (Siegel & Castellan, 1988) foi empregado após a aplicação do teste de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas.

Todos os testes foram desenvolvidos em planilha Excel para permitir um melhor entendimento de sua sistemática e, posteriormente, foi utilizado o “software” Statistica 6.1.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Levantamento e sistematização dos dados

4.3.1.1 Dados coletados

As séries históricas de dados de monitoramento das ETES dos estados de São Paulo e Minas Gerais foram obtidas de entidades estaduais de controle ambiental, de prestadores de serviços de saneamento, estaduais e municipais, e de projetos de pesquisas da UFMG. A Tabela 4.1 mostra o nome das entidades que disponibilizaram os dados nos dois estados e o número de ETES que cada instituição forneceu.

Tabela 4.1 – Origem dos dados de monitoramento das ETES

| Entidades que disponibilizaram os dados | | | | | |
|---|----------|------------|------------------------------------|----------|------------|
| Minas Gerais | | | São Paulo | | |
| Tipo | Nome | Nº de ETES | Tipo | Nome | Nº de ETES |
| Cia. Estadual de Saneamento | Copasa | 21 | Cia. Estadual de Saneamento | Sabesp | 173 |
| Órgão ambiental | FEAM | 6 | Prestadores de serviços municipais | Diversos | 4 |
| Prestadores de serviços municipais | Diversos | 2 | | | |
| Órgãos de pesquisa | UFMG | 2 | | | |
| Total | | 31 | Total | | 177 |

Foram coletados dados de 208 ETES de 21 modalidades diferentes. Estes conjuntos de dados disponibilizados eram compostos, às vezes, por mais de 30 parâmetros analisados e, em outros casos, por apenas quatro (DBO, DQO, SST e CF).

A Tabela 4.2 apresenta a modalidade de tratamento, a notação de referência adotada, o número total e o percentual de ETES compreendidas em cada tipologia.

Foi observada uma grande variação no número de unidades compreendidas em cada tecnologia de tratamento. E, mesmo dentro de cada modalidade, foi verificada uma grande diversidade entre as ETES, considerando o número de dados disponibilizados, a quantidade de parâmetros monitorados e a frequência de amostragem praticada.

Estes aspectos serão melhor discutidos no item específico que se segue, onde são apresentadas e detalhadas as principais dificuldades encontradas.

Tabela 4.2 - Sistemas de tratamento de esgotos inventariados

| Modalidade | Notação de referência | Número de ETEs | (%) de ETEs |
|--|-----------------------|----------------|-------------|
| Escoamento superficial | ES | 02 | 1,0 |
| Filtro biológico percolador | FBP | 01 | 0,5 |
| Fossa séptica + filtro aerado | FS + FAE | 01 | 0,5 |
| Fossa séptica + filtro anaeróbio | FS + FA | 23 | 11,1 |
| Lagoa aerada facultativa | LAF | 02 | 1,0 |
| Lagoa aerada mistura completa | LAMC | 05 | 2,4 |
| Lagoa aerada facultativa + escoamento superficial | LAF + ES | 01 | 0,5 |
| Lagoa aerada facultativa + lagoa facultativa | LAF + LF | 01 | 0,5 |
| Lagoa anaeróbia | LAN | 01 | 0,5 |
| Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa | LAN + LF | 51 | 24,5 |
| Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação | LAN + LF + LM | 07 | 3,4 |
| Lagoa facultativa | LF | 79 | 38,0 |
| Lagoa facultativa + lagoa de maturação | LF + LM | 03 | 1,4 |
| Lodos ativados | LA | 19 | 9,1 |
| Reator UASB | UASB | 04 | 1,9 |
| Reator UASB + filtro aerado | UASB + FAE | 01 | 0,5 |
| Reator UASB + filtro anaeróbio | UASB + FA | 02 | 1,0 |
| Reator UASB + filtro biológico percolador | UASB + FBP | 01 | 0,5 |
| Reator UASB + flotação | UASB + FLOT | 01 | 0,5 |
| Reator UASB + lagoa facultativa | UASB + LF | 02 | 1,0 |
| Reator UASB + lagoa de polimento | UASB + LP | 01 | 0,5 |
| | 21 | 208 | 100,0 |

4.3.1.2 Identificação das dificuldades encontradas

Foram encontradas algumas dificuldades para a utilização dos dados secundários de monitoramento. Em alguns casos, foram observadas inconsistências nos dados disponibilizados, como por exemplo:

- valores de concentração de constituintes afluentes aos sistemas substancialmente menores que os valores efluentes;
- dados de concentração dos nutrientes fósforo total (PT), fosfato (PO_4^{3-}) e nitrogênio total Kjeldahl (NTK) em ordem de grandeza incompatível com a realidade;
- concentrações de sólidos totais menores que as parcelas de sólidos suspensos;
- indicadores de contaminação fecal não definidos;
- médias mensais calculadas em desacordo com os dados originais;

- dados sistematicamente iguais durante vários dias de monitoramento.

Outros problemas verificados que colocaram em dúvida a utilização dos dados de algumas ETEs foram:

- falta de informação sobre dados de vazão: se eram medidos ou calculados;
- indefinição sobre o tipo de amostragem: se eram amostras simples ou compostas;
- falta de informação sobre o horário das coletas;
- grande dificuldade de obtenção de dados relativos aos parâmetros de projeto das ETEs.

Diante disto, foi necessário entrar em contato diversas vezes com algumas empresas responsáveis, para sanar dúvidas ou confirmar resultados duvidosos. Quando a dúvida não era dirimida, o dado era excluído.

Observou-se, também, uma grande variação no período de monitoramento e da frequência de amostragem das estações de tratamento. O período de monitoramento variou de um a 2879 dias entre as ETEs estudadas, considerando o intervalo entre a primeira e a última amostra disponibilizada. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados relativos às diversas frequências de amostragem praticadas, o número de ETEs inseridas em cada categoria e o percentual correspondente. Todos estes comentários dizem respeito a DBO, constituinte mais frequentemente monitorado e presente em todas os registros de operação disponibilizados.

Tabela 4.3 - Frequência de amostragem de DBO, praticada pelas 208 ETEs investigadas

| Frequência de amostragem | Número de ETEs | % de ETEs |
|--------------------------|----------------|-----------|
| Diária | 1 | 0,5 |
| 2 vezes por semana | 2 | 1,0 |
| Semanal | 7 | 3,4 |
| 2 vezes por mês | 11 | 5,3 |
| Mensal | 15 | 7,2 |
| Trimestral | 17 | 8,2 |
| Quadrimestral | 2 | 1,0 |
| Indefinida | 153 | 73,6 |
| Total | 208 | 100 |

Algumas ETEs apresentaram dados diários relativos a um ano de monitoramento, enquanto outras forneciam dois resultados de análises em um período de cinco anos ou mais. Esta intermitência nos monitoramentos esteve presente em grande parte dos sistemas de tratamento avaliados.

Os parâmetros monitorados também variaram muito entre as estações de tratamento, sendo fornecidos, por algumas ETEs, resultados relativos a mais de 30 indicadores e, por outras, apenas quatro, como já comentado. Diante deste quadro, apenas os constituintes DBO, DQO, SST, NTK ou NT, PT e CF foram utilizados como indicadores de desempenho neste trabalho.

Os dados relativos às séries de nitrogênio foram os que apresentaram a maior variação, sendo fornecidos tanto na forma de nitrogênio amoniacal, orgânico, nitrato, nitrito, Kjeldahl ou, simplesmente, como nitrogênio total. Em alguns poucos casos, foram disponibilizadas todas as formas do constituinte. Apenas os dados de NTK e de NT, formas mais frequentes disponibilizadas, foram utilizados nas análises.

Os valores referentes ao fósforo eram fornecidos na forma de fósforo total ou fosfato, o que não implicou em maiores problemas na sua utilização, uma vez que a relação estequiométrica entre PT e PO_4^{3-} era mantida. Houve necessidade, apenas, de correção do valor em função do peso molecular.

Cerca de 85% das ETEs que disponibilizaram os dados utilizados no trabalho foram do estado de São Paulo. O estado de Minas Gerais, apesar de ser representado por apenas 15% das ETEs, foi responsável pela disponibilização de 41% dos dados, tomando-se como base os dados de DBO afluente (2415 dos 5857). Este percentual foi consideravelmente maior para alguns constituintes, com destaque para os nutrientes, que ultrapassaram o valor de 80%.

4.3.2 Estatística descritiva dos dados

4.3.2.1 Descrição geral dos dados

Os dados relativos aos constituintes DBO, DQO, SST, NTK (ou NT), PT e CF, afluentes e efluentes, foram analisados através de estudos estatísticos preliminares, visando o conhecimento e caracterização dos diversos processos de tratamento. Para os constituintes listados foram calculados o número de dados, médias aritmética e geométrica, mediana, moda, valores máximos e mínimos, amplitude (máximo – mínimo), quartis inferior e superior, percentis 10 e 90%, variância, desvio padrão, assimetria e curtose, além das eficiências de remoção.

Alguns resultados relativos às medidas de tendência central (mediana, média geométrica para CF e aritmética para os demais parâmetros) e medidas de dispersão ou variação (valor

máximo, mínimo e desvio padrão), assim como os valores dos coeficientes de variação (desvio padrão / média) - CV são apresentados, em meio eletrônico, para todas as 208 ETEs individualmente.

Os outros resultados não foram mostrados devido ao extenso número de dados e ao pequeno conteúdo informativo das análises, considerando a abordagem específica deste capítulo. No entanto, alguns parâmetros foram úteis para algumas análises que foram efetuadas no decorrer do trabalho e serão apresentados quando oportuno.

Algumas estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mediana e valores máximos e mínimos) referentes ao número de dados dos constituintes DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, disponibilizados pelas ETEs, são apresentadas na Tabela 4.4. Considerando os valores afluentes e efluentes dos seis constituintes, cerca de 50.000 dados foram analisados.

Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas referentes ao número de dados dos constituintes

| Constituintes | Parâmetros | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Afluentes | Média | 28 | 30 | 24 | 11 | 12 | 12 |
| | D. Padrão | 67 | 87 | 64 | 32 | 37 | 18 |
| | Mediana | 10 | 10 | 6 | 0 | 0 | 8 |
| | Mínimo | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Máximo | 727 | 730 | 495 | 202 | 250 | 97 |
| Efluentes | Média | 28 | 29 | 24 | 11 | 12 | 12 |
| | D. Padrão | 68 | 86 | 64 | 34 | 37 | 17 |
| | Mediana | 10 | 10 | 6 | 0 | 0 | 8 |
| | Mínimo | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Máximo | 727 | 730 | 495 | 191 | 247 | 95 |

Nos gráficos “box-whisker”, apresentados na Figura 4.1, foram considerados todos os dados disponibilizados pelas ETEs, buscando uma visualização da variabilidade do número de dados dos constituintes disponibilizados pelas 208 estações de tratamento. São apresentados na figura os valores mínimos e máximos, os percentis 25 e 75% e a mediana referente aos parâmetros analisados.

Uma grande variação no número de dados foi observada entre as diversas ETEs, para todos os constituintes. Para DBO, esta variabilidade ficou na faixa 1 a 727 dados por ETE, sendo observada uma média de 28 dados. Apenas 62 ETEs disponibilizaram dados relativos a NTK ou NT (ambos foram considerados na análise) e 94 estações forneceram resultados de PT.

Apesar de 174 ETEs apresentarem dados de coliformes termotolerantes, estes tiveram uma média de apenas 12 dados.

Não foram apresentadas as estatísticas descritivas dos dados de vazão em virtude das inúmeras incertezas envolvidas em grande parte dos registros operacionais, que forneciam apenas valores médios, não explicitando se se tratavam de vazões medidas ou de projeto.

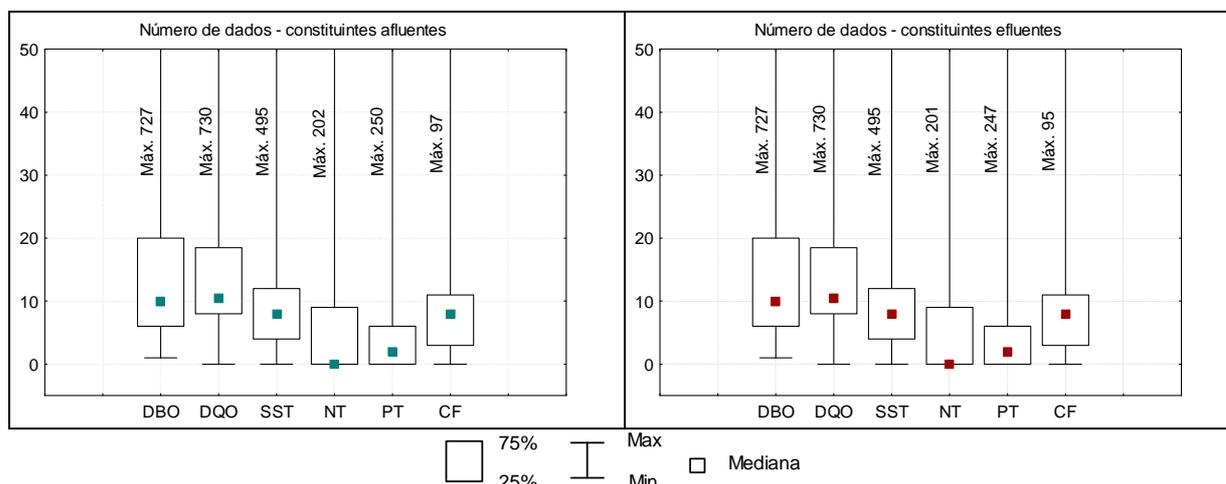


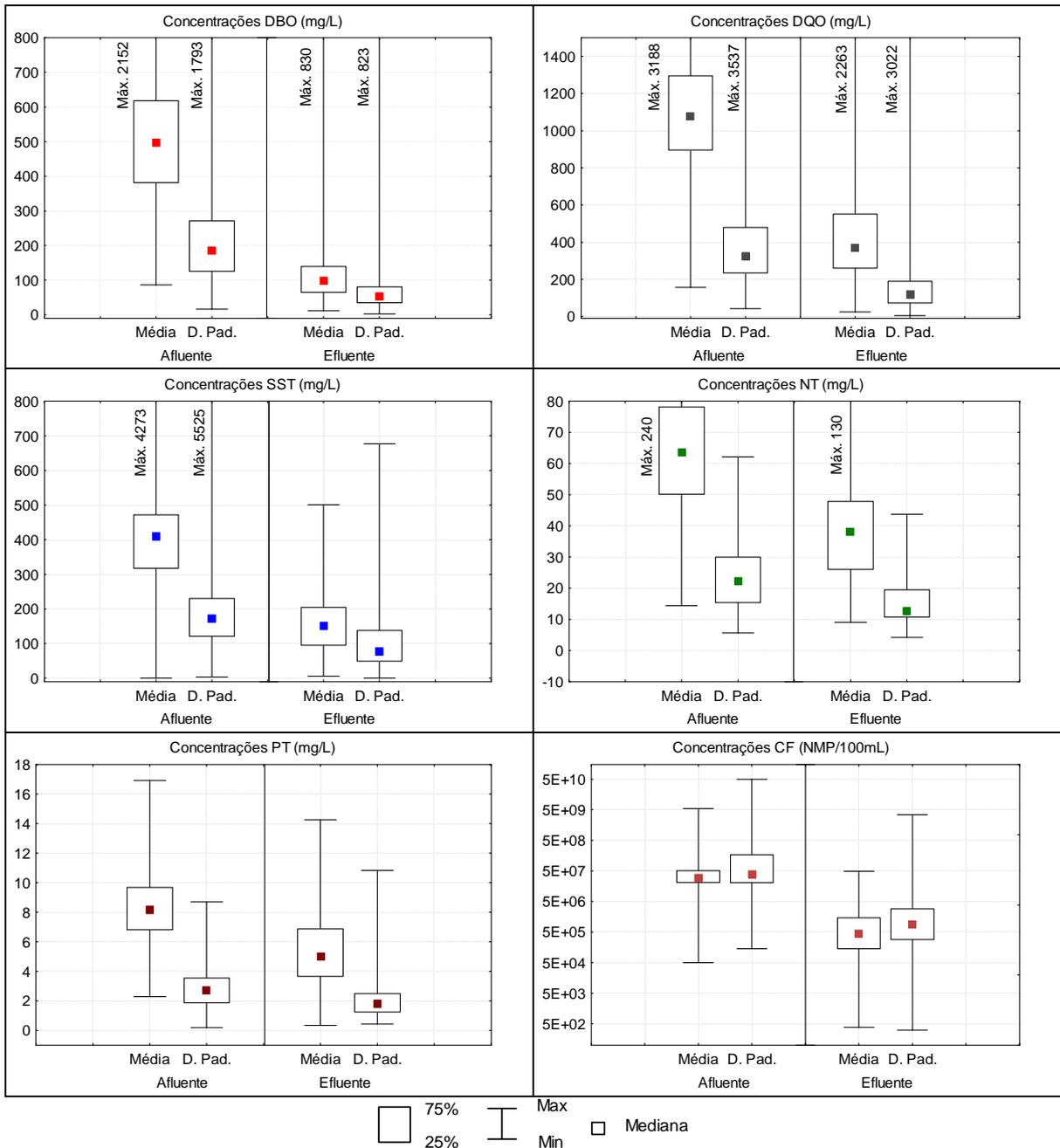
Figura 4.1 - Número de dados por ETE, considerando os diversos constituintes

Os resultados referentes às estatísticas descritivas das concentrações afluentes e efluentes são apresentados na Tabela 4.5. As vazões declaradas variaram de 0,05 L/s, tratada por uma lagoa facultativa, a 6.838 L/s, afluente a uma ETE de lodos ativados, enquanto a média verificada foi de 78 L/s.

Tabela 4.5 – Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes

| Constituintes | Parâmetros | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
|---------------|-------------|------------|-------------|------------|-----------|------------|-----------------------------|
| | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (NMP/100 mL) |
| Afluentes | Média | 527 | 1113 | 435 | 66 | 8,0 | 9,4 x 10 ⁷ |
| | D. Padrão | 230 | 413 | 347 | 29 | 3,6 | 4,2 x 10 ⁸ |
| | Média Geom. | 483 | 1031 | 388 | 61 | 7,0 | 3,6 x 10⁷ |
| | Mediana | 496 | 1076 | 410 | 64 | 8,1 | 2,9 x 10 ⁷ |
| | Vr. Mín. | 86 | 157 | 102 | 14 | 0,7 | 4,9 x 10 ⁴ |
| | Vr. Máx. | 2152 | 3188 | 4273 | 240 | 16,9 | 5,5 x 10 ⁹ |
| Efluentes | Média | 124 | 419 | 167 | 39 | 4,9 | 2,4 x 10 ⁶ |
| | D. Padrão | 106 | 267 | 100 | 21 | 2,7 | 6,4 x 10 ⁶ |
| | Média Geom. | 96 | 346 | 134 | 34 | 4,0 | 4,2 x 10⁵ |
| | Mediana | 99 | 370 | 152 | 38 | 4,7 | 4,4 x 10 ⁵ |
| | Vr. Mín. | 11 | 25 | 6 | 9 | 0,3 | 1,6 x 10 ² |
| | Vr. Máx. | 830 | 2263 | 501 | 130 | 13,6 | 4,8 x 10 ⁷ |

Os valores médios e os desvios padrão apresentados pelas concentrações, considerando as 208 ETEs, são mostrados na Figura 4.2.



Nota: Foram utilizadas médias geométricas para coliformes termotolerantes

Figura 4.2 – Concentrações médias e desvios padrão, afluentes e efluentes, dos constituintes

As concentrações afluentes observadas para as estações de tratamento em operação foram comparadas com os valores usuais reportados pela literatura, conforme apresentado na Tabela 4.6. Foram calculados os percentuais de ETEs que possuíam concentrações médias dos

constituintes acima dos valores considerados típicos para esgotos brutos predominantemente domésticos.

Tabela 4.6 – Comparação entre concentrações afluentes usuais e reais dos constituintes

| Constituinte | Concentrações usuais ⁽¹⁾ | | Concentrações observadas | | | % de ETEs acima das concentrações típicas |
|--------------------------|-------------------------------------|---------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| | Faixa | Típicas | Faixa ⁽³⁾ | Média | Mediana | |
| DBO (mg/L) | 200 – 500 | 350 | 284 - 804 | 527 | 488 | 82 |
| DQO (mg/L) | 400 - 800 | 700 | 505 - 1616 | 1113 | 1073 | 87 |
| SST (mg/L) | 200 - 450 | 400 | 202 - 527 | 435 | 406 | 51 |
| NT ⁽²⁾ (mg/L) | 35 - 70 | 50 | 39 -84 | 66 | 64 | 77 |
| PT (mg/L) | 4 - 15 | 7 | 2 - 14 | 8 | 8 | 68 |
| CF (org/100mL) | 10 ⁶ – 10 ⁹ | - | 1,3 x 10 ⁷ – 1,8 x 10 ⁸ | 9,4 x 10 ⁷ | 2,8 x 10 ⁷ | 1,4 ⁽⁴⁾ |

(1) Adaptado de von Sperling, 2005

(2) Foram utilizados valores de NTK e NT

(3) Foram utilizados os percentis 10% (valor mínimo) e 90% (valor máximo) para composição das faixas observadas

(4) Para CF, foi considerado o percentual de ETEs que apresentou uma concentração média geométrica de CF superior a 5,01 x 10⁸ (valor médio entre 10⁶ e 10⁹).

Para facilitar a visualização das diferenças entre as concentrações típicas expressas na literatura e aquelas efetivamente observadas, foram plotados os gráficos mostrados na Figura 4.3. Neles estão representados os percentis 10 e 90% das concentrações afluentes efetivamente medidas para os processos em operação e os valores máximos e mínimos considerados típicos para despejos domésticos.

Pela observação da Figura 4.3, nota-se que, de uma maneira geral, os esgotos afluentes apresentaram uma concentração mais elevada do que usualmente expresso na literatura.

Algumas possibilidades aventadas para justificar o grande número de ETEs que apresentou concentrações de DBO acima dos valores usuais seriam contribuições industriais não relatadas pelas estações de tratamento ou o tipo de amostragem praticado. Em caso de despejos industriais predominantemente orgânicos, as concentrações de DBO são usualmente mais elevadas do que o observado em esgotos domésticos, o mesmo acontecendo quando se utilizam amostras simples, coletadas em horários de pico. Outras explicações possíveis seriam referentes ao baixo consumo per capita de água e, ainda, à existência de menores coeficientes de retorno (águas cinzas não lançadas na rede de coleta). É possível que várias destas causas estejam agindo simultaneamente. No entanto, seriam necessárias investigações mais específicas para confirmação destas suposições.

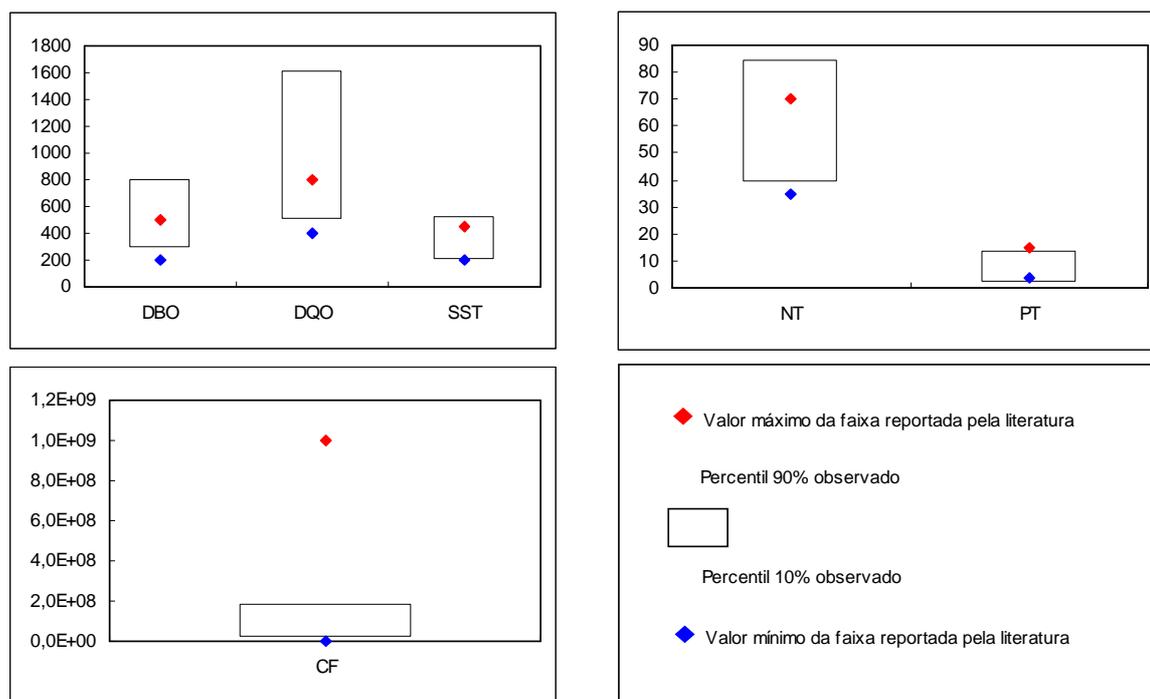


Figura 4.3 - Comparação entre concentrações afluentes dos constituintes e os valores típicos expressos na literatura

O percentual de ETEs que apresentou concentrações médias de DQO, SST e NT acima dos valores típicos também foi elevado.

Foi efetuada uma investigação sobre eventuais diferenças existentes nas concentrações afluentes medidas nos períodos secos e nos chuvosos, buscando-se agregar informações para explicar as elevadas concentrações observadas. No caso de existência de diferenças significativas, uma maior frequência de coleta no período de concentrações mais elevadas poderia influir expressivamente nos resultados médios finais.

Apenas 24 ETEs disponibilizaram dados em número suficiente, coletados nos dois períodos, para uma análise estatística. Foi utilizado o teste de Mann e Whitney (Mann-Whitney U Test), disponibilizado pelo “software” Statistica, que é uma alternativa não paramétrica para o teste T, para avaliar diferenças nas médias observadas entre dois grupos. O período chuvoso, que considerou os meses de outubro a março, foi comparado com o seco, de abril a setembro, para verificação de diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações dos constituintes no esgoto bruto.

Os resultados dos testes estatísticos indicaram que um percentual reduzido de ETEs apresentou médias das concentrações dos esgotos brutos consideradas estatisticamente

diferentes entre os dois períodos, considerando todos os constituintes. Este percentual variou de 21 a 33%, sendo que apenas 30% das ETEs tiveram concentrações médias de DBO diferentes nos períodos chuvoso e seco. O percentual de ETEs que apresentou diferenças significativas, considerando os outros constituintes, foi de 28% para DQO, 21% para SST, 33% para NT, 21% para PT e de 23% para CF.

Este argumento, portanto, não pode ser considerado válido para ser utilizado como uma das justificativas das elevadas concentrações afluentes observadas e, como já comentado, seriam necessárias outras investigações para confirmação das suposições colocadas.

As concentrações efluentes apresentadas na Figura 4.2 foram, também, bastante elevadas e serão motivo de análise e discussão em capítulos que se seguem.

A variabilidade das concentrações dos constituintes, afluentes e efluentes, foi avaliada, de modo preliminar, pela determinação dos coeficientes de variação (CV), isto é, pela relação entre o desvio padrão e a média aritmética calculada. A Figura 4.4 mostra os CVs e a eficiência de remoção obtida pelas tecnologias de tratamento para os seis constituintes.

Pela observação dos gráficos da Figura 4.4 percebe-se que, tanto para os constituintes afluentes quanto para os efluentes, as maiores variações dos valores de CV são apresentadas para CF, conforme esperado. No caso das concentrações efluentes foram observados alguns valores bastante elevados também para DBO, DQO e SST, o que pode denotar instabilidade em alguns sistemas de tratamento.

Os resultados obtidos para a eficiência de remoção dos diversos constituintes foram muito variados, como esperado, já que, nesta análise, todas as tecnologias de tratamento foram avaliadas em conjunto. Mesmo para DBO foram observados alguns percentuais de remoção muito baixos (valor mínimo de 2%), com média observada de 77%. Os menores percentuais foram obtidos para nutrientes, NT e PT, que variaram de -80 e -82% a 99 e 98%, respectivamente. Cabe ressaltar que os valores referentes às concentrações de NT e NTK foram tratados como se tivessem formas semelhantes, indistinção que pode alterar expressivamente as concentrações efluentes já que não é computada a parcela eventualmente nitrificada e desnitrificada e, conseqüentemente, os resultados de eficiência de remoção apresentados.

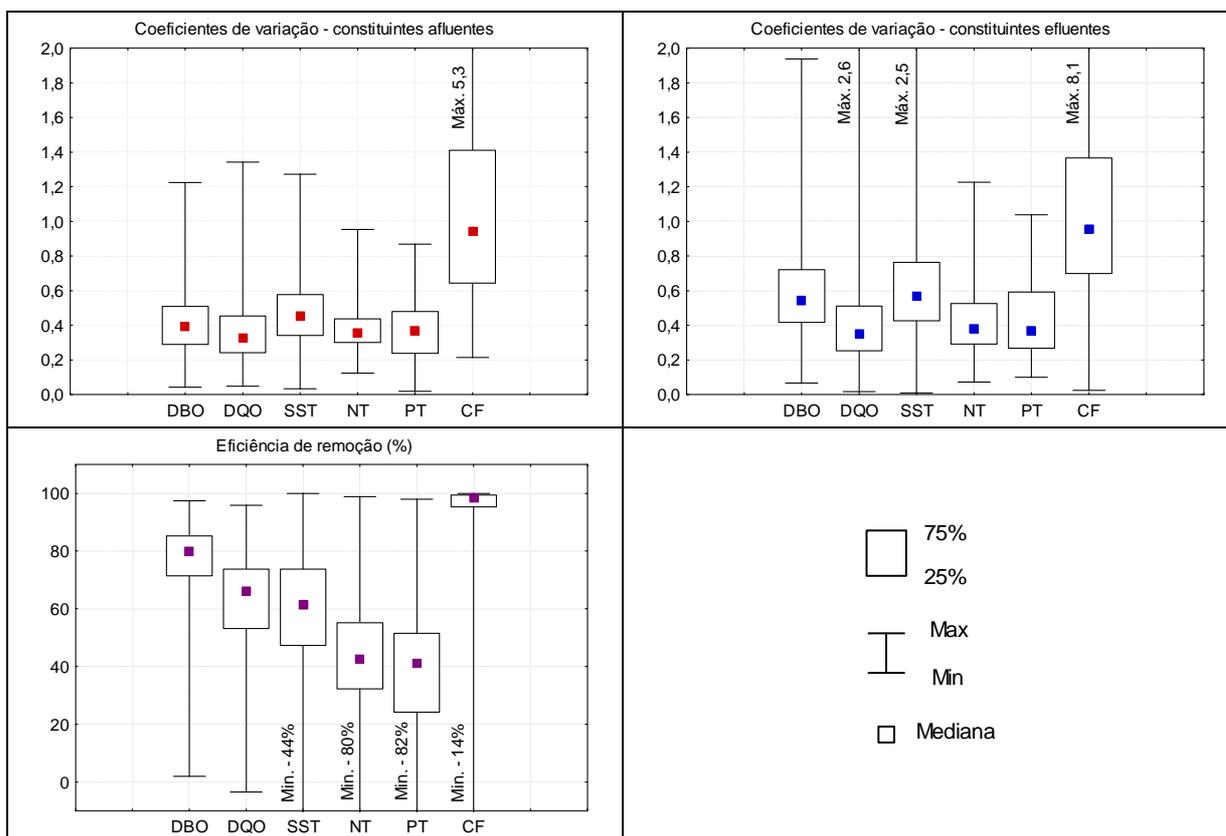


Figura 4.4 – Coeficientes de variação dos constituintes afluentes e efluentes e eficiência de remoção

Como será apresentado mais detalhadamente à frente, as eficiências negativas de remoção de nutrientes foram observadas apenas nos processos anaeróbios de tratamento. Algumas possíveis explicações foram sugeridas para justificar um comportamento diferenciado entre sistemas aeróbios e anaeróbios:

- Maiores idades do lodo comumente observadas em sistemas anaeróbios podem favorecer a lise celular (processo em que a parede celular é rompida, liberando as substâncias contidas no interior dos microrganismos, inclusive nitrogênio e fósforo), o que favoreceria a elevação da concentração dos nutrientes no efluente.
- Taxa de crescimento de organismos aeróbios é mais elevada, o que pode levar à necessidade de incorporação de nutrientes do meio à biomassa para o seu acelerado crescimento, reduzindo, deste modo, a sua concentração no efluente.
- Possibilidade de volatilização da amônia em sistemas com pH elevado, o que acarretaria também a redução do nitrogênio no efluente.

De uma maneira geral, 64% das ETEs apresentaram uma eficiência de remoção de nitrogênio afluente abaixo de 50%. Este valor chegou a 74% para a remoção de fósforo. Estes resultados,

no entanto, não surpreendem, uma vez que os sistemas de tratamento analisados não visavam e não possuíam tratamentos terciários específicos para a remoção de nutrientes.

Os valores observados para coliformes termotolerantes podem ser melhor avaliados se os resultados forem considerados em termos de unidades logarítmicas removidas. Para a obtenção deste valor utiliza-se a seguinte relação:

$$\text{Unidades log removidas} = -\log_{10} [(100 - \text{Eficiência})/100]$$

Analisando desta forma, as remoções variaram de, no mínimo, - 1 a, no máximo, 6 unidades logarítmicas. A média obtida foi de 1,9, o que corresponde a uma eficiência percentual de 98,7%. No entanto, em virtude das altas concentrações afluentes observadas, seriam necessárias eficiências de remoção ainda maiores para a obtenção de um efluente de qualidade aceitável para lançamento na maior parte dos corpos d'água. Estes aspectos serão discutidos mais detalhadamente nos Capítulos 5 e 6 adiante.

O objetivo inicial do trabalho foi descrever e avaliar o comportamento de todas as tecnologias de tratamento que constavam na Tabela 4.2. No entanto, várias modalidades foram representadas por um número reduzido de ETEs, inviabilizando esta análise. Apenas os processos mais usualmente adotados no país, e que possuíam um número de ETEs considerado suficiente, foram descritos e avaliados separadamente do grupo.

4.3.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento

Foram incluídos nesta etapa do estudo os processos que apresentaram um número de unidades e de dados coletados suficiente para análise. Assim, as tecnologias de tratamento selecionadas para estudo, que são também as mais largamente utilizadas no Brasil, foram:

- Fossa séptica seguida de filtro anaeróbio (FS + FA)
- Lagoas facultativas (LF)
- Lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF)
- Lodos ativados (LA)
- Reatores UASB sem pós-tratamento (UASB)
- Reatores UASB com pós-tratamento (UASB+POS).

Estes processos de tratamento e estas ETEs foram objeto de estudos mais aprofundados realizados no restante do presente trabalho.

A Tabela 4.7 apresenta o número de ETEs descritas e avaliadas nas diversas modalidades de tratamento, que disponibilizaram dados dos seis constituintes de interesse para este estudo. Ressalta-se que apenas as ETEs que possuíam pelo menos 4 dados de monitoramento foram consideradas.

Tabela 4.7 - Número de ETEs descritas em cada modalidade, por constituinte

| Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | | Total de ETEs |
|-----------|--------------------------|----|--------|-------------------|------|-------------------------|---------------|
| | FS+FA | LF | LAN+LF | LA ⁽¹⁾ | UASB | UASB+POS ⁽²⁾ | |
| DBO | 19 | 73 | 43 | 13 | 10 | 8 | 166 |
| DQO | 17 | 68 | 42 | 11 | 8 | 7 | 153 |
| SST | 8 | 61 | 36 | 11 | 10 | 8 | 134 |
| NT | 4 | 21 | 16 | 8 | 4 | 1 | 54 |
| PT | 6 | 33 | 21 | 7 | 5 | 4 | 76 |
| CF | 15 | 65 | 40 | 8 | 8 | 6 | 142 |

(1) LA inclui: lodos ativados convencional e aeração prolongada;

(2) UASB + POS inclui os pós-tratamentos: filtro aerado (FAE); filtro anaeróbico (FA); filtro biológico percolador (FBP); flotação (FLOT); lagoas facultativas (LF) e lagoas de polimento (LP).

A última coluna da tabela apresenta o número de ETEs que disponibilizaram dados dos constituintes de interesse. Nota-se que, em alguns casos, o número de ETEs sofre uma drástica redução devido à falta de monitoramento praticada para alguns constituintes.

Apesar da modalidade de lodos ativados ser representada por 19 ETEs, algumas variantes não puderam ser incluídas. Algumas devido à qualidade dos dados disponibilizados e outras em função do tipo de processo que diferia muito dos processos convencionais e de aeração prolongada, inviabilizando uma análise conjunta.

Apenas quatro reatores UASB operam sem pós-tratamento, mas foram analisados também, quando disponíveis, dados dos efluentes dos reatores UASB nos processos combinados (UASB+POS).

As estatísticas descritivas dos dados de concentrações médias afluentes e efluentes de cada ETE, relativas a estas seis tecnologias de tratamento, são apresentadas nas Tabelas 4.8 e 4.9 e na forma de gráficos Box-whisker, na Figura 4.5.

Tabela 4.8 - Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes **afluent**es, considerando seis tecnologias de tratamento

| Constituinte | Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | |
|--------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
| DBO (mg/L) | Média aritm. | 665 | 553 | 510 | 315 | 371 | 362 |
| | Média geom. | 623 | 522 | 486 | 277 | 344 | 313 |
| | D. padrão | 246 | 198 | 150 | 138 | 158 | 199 |
| | Mediana | 613 | 520 | 502 | 348 | 348 | 348 |
| | Percentil 10% | 415 | 361 | 348 | 107 | 236 | 152 |
| | Percentil 90% | 886 | 841 | 671 | 430 | 489 | 548 |
| DQO (mg/L) | Média aritm. | 1398 | 1187 | 1095 | 575 | 715 | 713 |
| | Média geom. | 1339 | 1136 | 1048 | 523 | 630 | 582 |
| | D. padrão | 405 | 354 | 300 | 220 | 377 | 471 |
| | Mediana | 1277 | 1110 | 1083 | 606 | 647 | 448 |
| | Percentil 10% | 923 | 832 | 818 | 303 | 362 | 276 |
| | Percentil 90% | 1807 | 1633 | 1409 | 827 | 1127 | 1269 |
| SST (mg/L) | Média aritm. | 479 | 430 | 411 | 252 | 289 | 334 |
| | Média geom. | 460 | 413 | 399 | 235 | 256 | 273 |
| | D. padrão | 149 | 115 | 111 | 88 | 164 | 230 |
| | Mediana | 460 | 435 | 424 | 289 | 273 | 245 |
| | Percentil 10% | 333 | 304 | 298 | 134 | 154 | 145 |
| | Percentil 90% | 691 | 546 | 480 | 335 | 391 | 679 |
| NT (mg/L) | Média aritm. | 78 | 69 | 78 | 47 | 43 | |
| | Média geom. | 75 | 67 | 72 | 43 | 42 | |
| | D. padrão | 25 | 17 | 45 | 16 | 13 | |
| | Mediana | 71 | 70 | 66 | 47 | 41 | |
| | Percentil 10% | 60 | 50 | 53 | 32 | 32 | |
| | Percentil 90% | 103 | 82 | 89 | 61 | 56 | |
| PT (mg/L) | Média aritm. | 9 | 9 | 8 | 3 | 7 | 7 |
| | Média geom. | 8 | 8 | 8 | 2 | 4 | 4 |
| | D. padrão | 4 | 4 | 2 | 2 | 6 | 7 |
| | Mediana | 8 | 8 | 8 | 2 | 4 | 5 |
| | Percentil 10% | 6 | 5 | 7 | 1 | 2 | 2 |
| | Percentil 90% | 13 | 14 | 11 | 4 | 14 | 13 |
| CF (NMP/100 mL) | Média aritm. | $2,9 \times 10^7$ | $5,3 \times 10^7$ | $2,0 \times 10^8$ | $3,7 \times 10^7$ | $1,2 \times 10^8$ | $1,8 \times 10^8$ |
| | Média geom. | $2,3 \times 10^7$ | $3,2 \times 10^7$ | $3,9 \times 10^7$ | $1,3 \times 10^7$ | $7,7 \times 10^7$ | $1,3 \times 10^8$ |
| | D. padrão | $2,3 \times 10^7$ | $7,5 \times 10^7$ | $8,7 \times 10^8$ | $3,6 \times 10^7$ | $1,1 \times 10^8$ | $1,3 \times 10^8$ |
| | Mediana | $2,1 \times 10^7$ | $2,6 \times 10^7$ | $2,9 \times 10^7$ | $2,5 \times 10^7$ | $6,4 \times 10^7$ | $2,1 \times 10^8$ |
| | Percentil 10% | $9,2 \times 10^6$ | $1,3 \times 10^7$ | $1,9 \times 10^7$ | $5,9 \times 10^6$ | $3,0 \times 10^7$ | $3,4 \times 10^7$ |
| | Percentil 90% | $4,6 \times 10^7$ | $1,1 \times 10^8$ | $1,7 \times 10^8$ | $8,8 \times 10^7$ | $2,5 \times 10^8$ | $3,0 \times 10^8$ |

Tabela 4.9 - Estatísticas descritivas referentes às concentrações dos constituintes **efluentes**, considerando seis tecnologias de tratamento

| Constituinte | Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | |
|--------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
| DBO (mg/L) | Média aritm. | 292 | 136 | 89 | 35 | 98 | 42 |
| | Média geom. | 215 | 126 | 83 | 31 | 94 | 36 |
| | D. padrão | 214 | 64 | 35 | 16 | 28 | 22 |
| | Mediana | 258 | 120 | 87 | 36 | 95 | 49 |
| | Percentil 10% | 74 | 86 | 54 | 16 | 67 | 13 |
| | Percentil 90% | 575 | 176 | 133 | 58 | 129 | 63 |
| DQO (mg/L) | Média aritm. | 730 | 525 | 309 | 92 | 251 | 141 |
| | Média geom. | 570 | 496 | 293 | 77 | 235 | 120 |
| | D. padrão | 509 | 201 | 88 | 58 | 97 | 76 |
| | Mediana | 649 | 525 | 307 | 73 | 244 | 139 |
| | Percentil 10% | 159 | 342 | 213 | 35 | 147 | 61 |
| | Percentil 90% | 1134 | 676 | 421 | 188 | 344 | 219 |
| SST (mg/L) | Média aritm. | 165 | 216 | 153 | 57 | 85 | 51 |
| | Média geom. | 125 | 200 | 138 | 40 | 78 | 40 |
| | D. padrão | 132 | 80 | 86 | 47 | 37 | 29 |
| | Mediana | 150 | 197 | 136 | 49 | 72 | 54 |
| | Percentil 10% | 53 | 132 | 80 | 13 | 49 | 17 |
| | Percentil 90% | 290 | 343 | 236 | 130 | 137 | 85 |
| NT (mg/L) | Média aritm. | 61 | 38 | 45 | 22 | 48 | |
| | Média geom. | 56 | 36 | 40 | 19 | 47 | |
| | D. padrão | 27 | 11 | 27 | 15 | 12 | |
| | Mediana | 61 | 40 | 35 | 18 | 49 | |
| | Percentil 10% | 37 | 25 | 26 | 12 | 36 | |
| | Percentil 90% | 84 | 48 | 69 | 33 | 60 | |
| PT (mg/L) | Média aritm. | 7 | 4 | 5 | 1 | 6 | 5 |
| | Média geom. | 6 | 4 | 5 | 1 | 4 | 3 |
| | D. padrão | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 4 |
| | Mediana | 8 | 4 | 5 | 1 | 5 | 4 |
| | Percentil 10% | 3 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| | Percentil 90% | 9 | 7 | 7 | 2 | 11 | 8 |
| CF (NMP/100 mL) | Média aritm. | $5,5 \times 10^6$ | $1,2 \times 10^6$ | $4,3 \times 10^5$ | $1,3 \times 10^5$ | $3,4 \times 10^7$ | $9,7 \times 10^6$ |
| | Média geom. | $2,8 \times 10^6$ | $6,8 \times 10^5$ | $2,2 \times 10^5$ | $5,3 \times 10^4$ | $1,5 \times 10^7$ | $1,7 \times 10^5$ |
| | D. padrão | $6,1 \times 10^6$ | $1,2 \times 10^6$ | $5,9 \times 10^5$ | $1,0 \times 10^5$ | $4,4 \times 10^7$ | $1,9 \times 10^7$ |
| | Mediana | $3,1 \times 10^6$ | $7,1 \times 10^5$ | $2,3 \times 10^5$ | $1,3 \times 10^5$ | $1,5 \times 10^7$ | $5,5 \times 10^4$ |
| | Percentil 10% | $3,2 \times 10^5$ | $1,5 \times 10^5$ | $6,5 \times 10^4$ | $2,9 \times 10^4$ | $3,8 \times 10^6$ | $8,5 \times 10^3$ |
| | Percentil 90% | $1,2 \times 10^7$ | $2,4 \times 10^6$ | $1,1 \times 10^6$ | $2,5 \times 10^5$ | $7,3 \times 10^7$ | $2,9 \times 10^7$ |

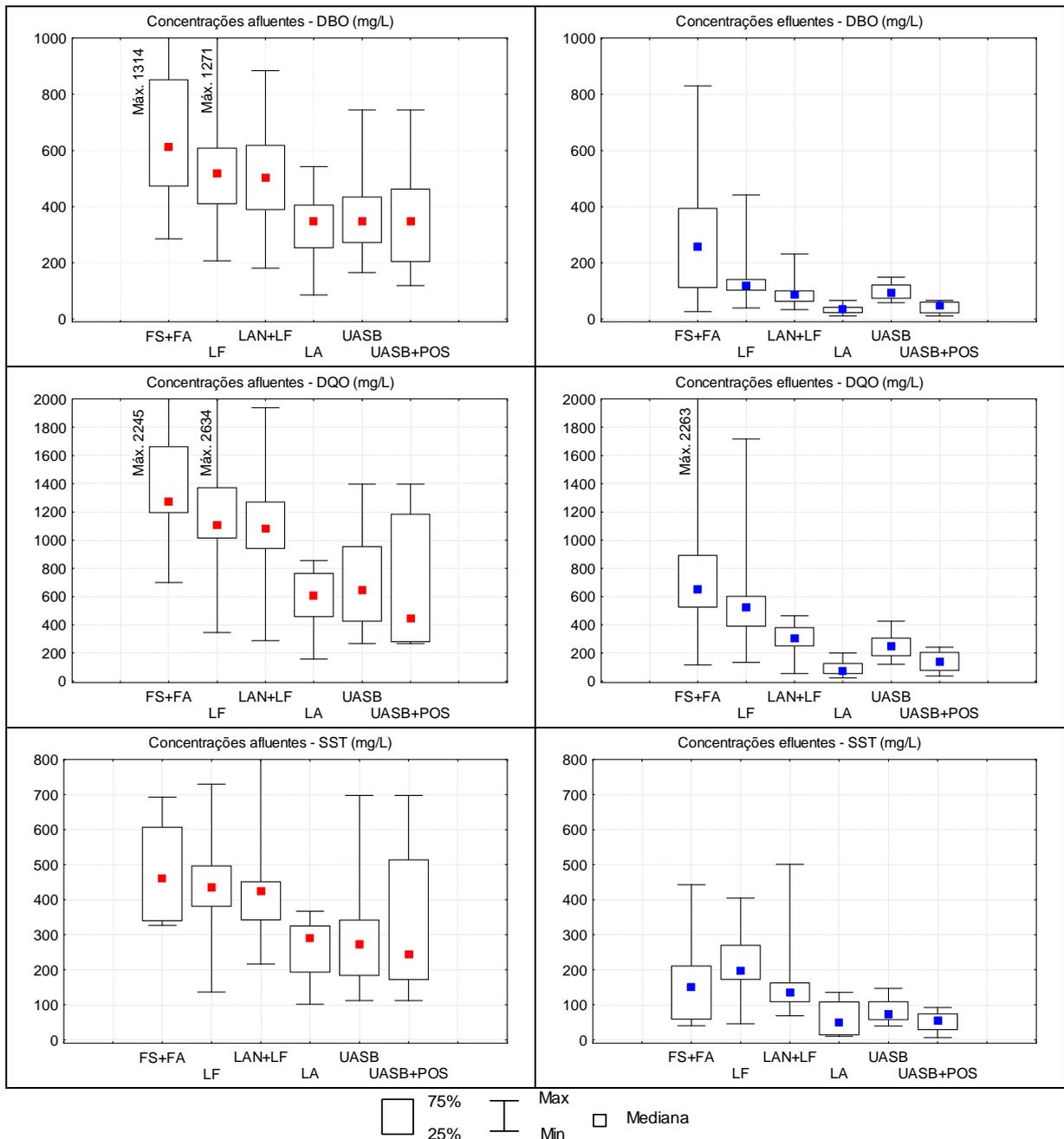


Figura 4.5 – Concentrações médias afluentes e efluentes dos diversos constituintes

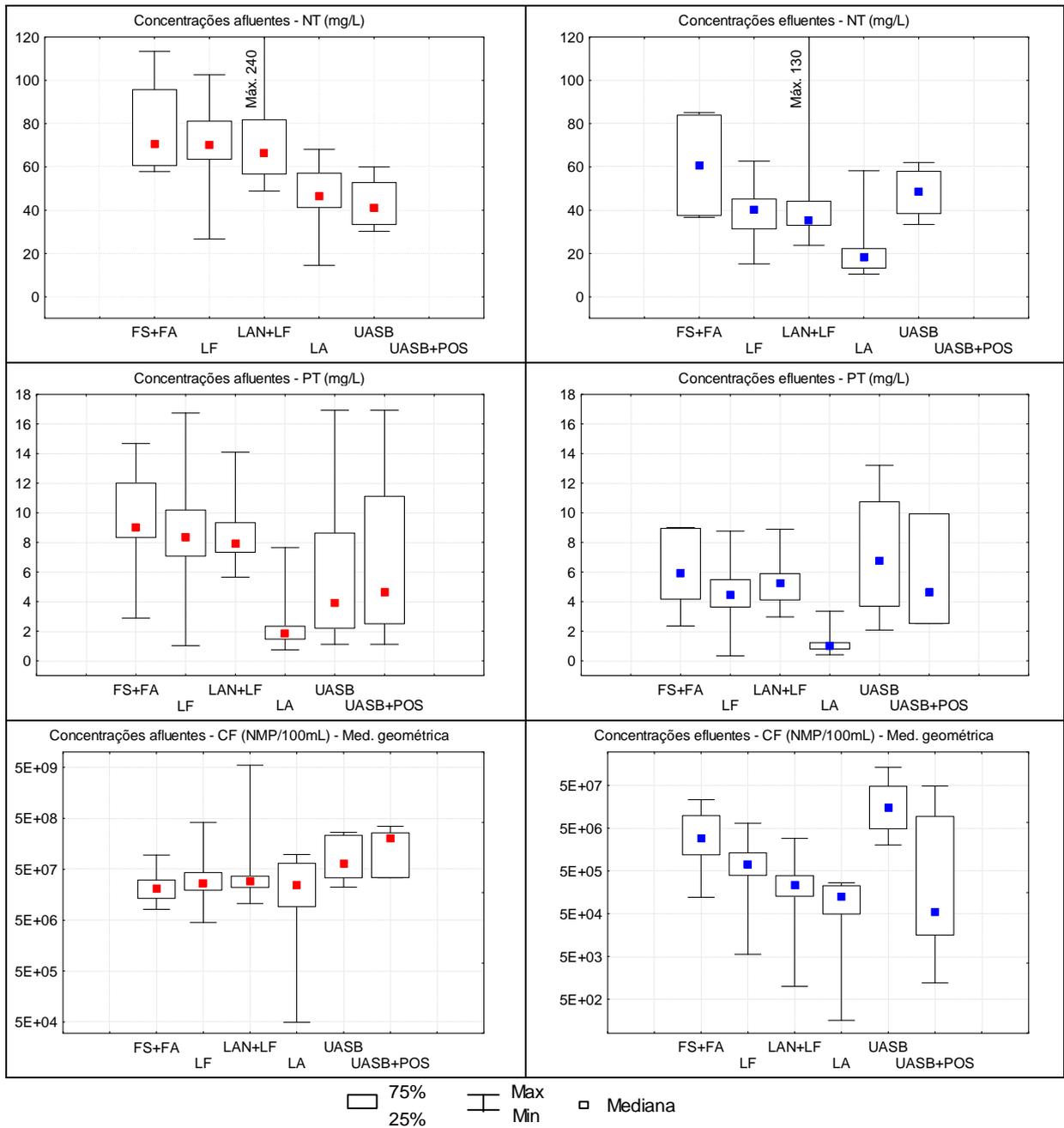


Figura 4.5 – Concentrações médias afluentes e efluentes dos diversos constituintes (Cont.)

Análise das concentrações médias afluentes

Esta análise foi efetuada com a finalidade de verificar se determinados processos de tratamento estariam associados a comunidades que geram esgotos mais ou menos concentrados. Desta forma, buscou-se identificar se, por exemplo, sistemas mais compactos ou sofisticados estariam associados a comunidades com um perfil diferenciado de geração de efluentes, ou mesmo a uma programação de monitoramento mais intensiva e que conduzisse a valores diferenciados das concentrações.

As concentrações afluentes observadas para as estações de tratamento foram comparadas com os valores usuais reportados pela literatura, conforme apresentado na Tabela 4.6, e a Figura 4.6 mostra os gráficos relativos às respectivas modalidades. São apresentados, ainda, os percentis de 10 e 90% das concentrações médias de esgotos brutos efetivamente observadas para as tecnologias de tratamento.

Foi observado que as concentrações afluentes médias de DBO apresentadas por algumas modalidades de tratamento estiveram muito próximas (caso dos UASB e UASB+POS) e até mesmo abaixo (LA) das concentrações típicas de esgotos brutos reportadas pela literatura. No entanto, as fossas sépticas seguidas de filtro anaeróbio (FS+FA), as lagoas facultativas (LF) e as lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF) mostraram concentrações bem superiores aos 350 mg/L considerados usuais para esgotos domésticos.

Observou-se que o processo de lodos ativados (LA) apresentou concentrações médias afluentes abaixo dos valores reportados na tabela para quase todos os constituintes. Somente para CF os valores apresentados mostraram-se dentro da faixa especificada, estabelecida com limites bastante amplos.

Para verificar se as diferenças observadas entre as concentrações afluentes das diversas tecnologias de tratamento foram estatisticamente significativas, foram utilizados os testes paramétricos e não paramétricos citados no item Metodologia. As análises de variância (ANOVA) para um fator, para amostras de tamanhos diferentes, foram utilizadas para verificação da existência de diferenças significativas entre as concentrações afluentes médias apresentadas pelas seis diferentes tecnologias de tratamento. Os testes de comparações múltiplas foram aplicados para verificação de quais tratamentos apresentaram concentrações

diferenciadas, considerando um nível de significância de 5%. O “software” utilizado para os testes foi o Statistica 6.1.

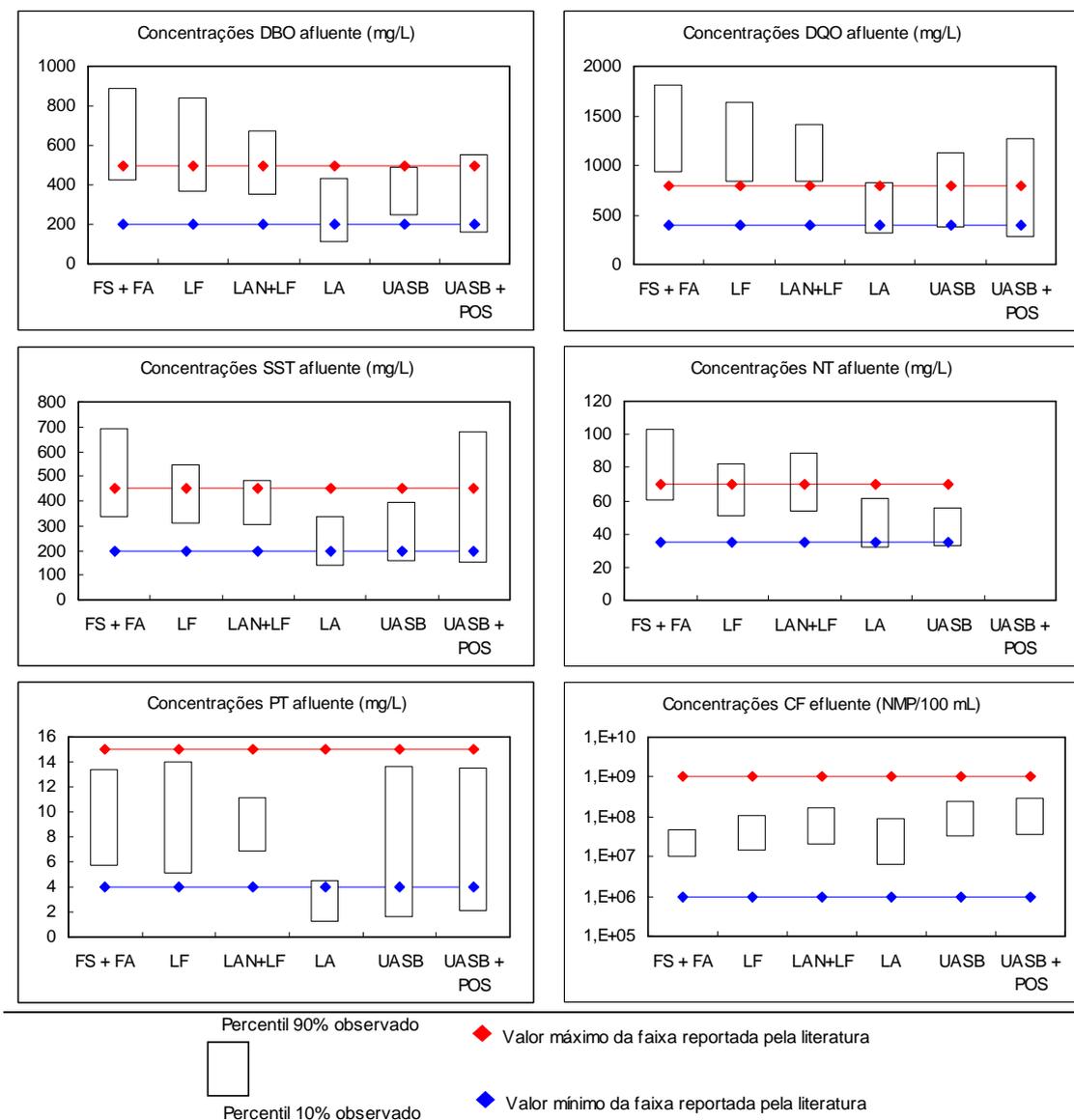


Figura 4.6 - Comparação entre concentrações afluentes dos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura

Os testes estatísticos apontaram diferenças significativas entre as concentrações afluentes médias dos constituintes apresentadas pelas modalidades, exceto para os valores de NT e CF. Pelos resultados dos testes de comparações múltiplas, foram verificadas algumas diferenças entre as modalidades de tratamento, como mostrado na Tabela 4.10.

Os resultados confirmaram as menores concentrações médias afluentes apresentadas pelo processo de lodos ativados (LA) para quase todos os constituintes, excetuando-se os NT e os coliformes termotolerantes (CF). Do mesmo modo, as concentrações afluentes às fossas-filtro

foram significativamente superiores às apresentadas por quase todos os outros processos, considerando a DBO e a DQO. As concentrações de SST das modalidades LA e UASB foram confirmadas estatisticamente como menores que as apresentadas pelas FS+FA, LF e LAN+LF. Os valores de PT verificados nas ETEs de LA foram também inferiores às concentrações destas modalidades mais simplificadas de tratamento.

Tabela 4.10 – Resultados dos testes de comparação entre as concentrações dos esgotos brutos das diversas modalidades de tratamento

| Constituintes | Tecnologias de tratamento | | | | | | Diferenças significativas detectadas pelos testes estatísticos | |
|---------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS | | |
| DBO | Nº ETEs | 19 | 74 | 44 | 13 | 10 | 8 | FS+FA > todas as outras modalidades |
| | Média (mg/L) | 665 | 553 | 510 | 315 | 371 | 362 | LA < FS+FA, LF e LAN+LF, exceto UASB e UASB+POS |
| DQO | Nº ETEs | 17 | 67 | 42 | 11 | 8 | 7 | FS+FA > às de todas as outras modalidades, exceto LF |
| | Média (mg/L) | 1398 | 1189 | 1095 | 575 | 715 | 713 | LA < FS+FA, LF e LAN+LF, exceto UASB e UASB+POS |
| SST | Nº ETEs | 8 | 61 | 36 | 11 | 10 | 8 | FS+FA > LA e UASB |
| | Média (mg/L) | 479 | 430 | 411 | 252 | 289 | 334 | LA < FS+FA, LF e LAN+LF |
| NT | Nº ETEs | 4 | 21 | 16 | 8 | 4 | | Nenhuma diferença |
| | Média (mg/L) | 78 | 69 | 78 | 47 | 43 | | |
| PT | Nº ETEs | 6 | 33 | 21 | 7 | 5 | 4 | LA < FS+FA, LF e LAN+LF |
| | Média (mg/L) | 9 | 9 | 8 | 3 | 7 | 7 | |
| CF | Nº ETEs | 15 | 65 | 40 | 8 | 8 | 6 | Nenhuma diferença |
| | Média (NMP/100mL) | 2,6 x 10 ⁷ | 5,3 x 10 ⁷ | 2,0 x 10 ⁸ | 3,7 x 10 ⁷ | 1,2 x 10 ⁸ | 1,8 x 10 ⁸ | |

No item 4.3.2.1, algumas possibilidades foram aventadas para justificar as diferenças observadas nas concentrações afluentes às ETEs, em geral. No caso das diferenças significativas detectadas pelos testes estatísticos entre as tecnologias de tratamento, algumas hipóteses foram levantadas para justificar as concentrações mais elevadas dos sistemas simplificados. De modo geral, esses sistemas atendem comunidades menores, que usualmente, apresentam menores consumos *percapita* de água e menores coeficientes de retorno e, além disso, para tais tecnologias de tratamento é comum a adoção de amostragens simples.

Análise das concentrações médias efluentes

De uma maneira geral, as concentrações efluentes observadas para os constituintes mostraram-se, também, mais elevadas do que o aguardado para os diversos processos de tratamento. A título de comparação, foram extraídos alguns dados de uma tabela apresentada

em von Sperling (2005) para 37 diferentes tecnologias de tratamento de esgotos, onde constam valores mínimos e máximos considerados usuais para concentrações efluentes de esgotos domésticos. Esses valores típicos presumidos para as seis modalidades analisadas e as faixas efetivamente observadas para as ETEs em operação, considerando os percentis de 10% e 90%, são apresentadas na Tabela 4.11.

Para o processo de lodos ativados, que agrupou os sistemas convencional e aeração prolongada, foram considerados o menor e o maior valor para composição das faixas mínimas e máximas, respectivamente.

Tabela 4.11 - Concentrações efluentes usuais reportadas pela literatura e concentrações médias efetivamente observadas

| Constituinte | Faixas | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| DBO (mg/L) | Literatura ⁽¹⁾ | 40 a 80 | 50 a 80 | 50 a 80 | 10 a 40 | 70 a 100 | 20 a 80 |
| | Observadas ⁽²⁾ | 74 a 575 | 86 a 176 | 54 a 133 | 16 a 58 | 67 a 129 | 13 a 63 |
| DQO (mg/L) | Literatura | 100 a 200 | 120 a 200 | 120 a 200 | 30 a 120 | 180 a 270 | 60 a 200 |
| | Observadas | 159 a 1134 | 342 a 676 | 213 a 421 | 35 a 188 | 147 a 344 | 61 a 219 |
| SST (mg/L) | Literatura | 30 a 60 | 60 a 90 | 60 a 90 | 20 a 40 | 60 a 100 | 10 a 90 |
| | Observadas | 53 a 290 | 132 a 343 | 80 a 236 | 13 a 130 | 49 a 137 | 17 a 85 |
| NT ⁽³⁾ (mg/L) | Literatura | > 20 | > 20 | > 20 | > 20 | > 20 | 15 a > 30 |
| | Observadas | 37 a 84 | 25 a 48 | 26 a 69 | 12 a 33 | 36 a 60 | - |
| PT (mg/L) | Literatura | > 4 | > 4 | > 4 | > 4 | > 4 | 1 a > 4 |
| | Observadas | 4 a 9 | 2 a 7 | 4 a 8 | 1 a 2 | 2 a 11 | 1 a 8 |
| CF (org/100mL) | Literatura | 10 ⁶ a 10 ⁷ | 10 ² a 10 ⁷ |
| | Observadas | 4x10 ⁵ a 1x10 ⁷ | 2x10 ⁵ a 2x10 ⁶ | 7x10 ⁴ a 1x10 ⁶ | 3x10 ⁴ a 3x10 ⁵ | 4x10 ⁶ a 7x10 ⁷ | 9x10 ³ a 3x10 ⁷ |

(1) Faixa reportada pela literatura: adaptada de von Sperling (2005);

(2) Faixas observadas: foram utilizados os percentis 10% (valor mínimo) e 90% (valor máximo);

(3) Foram utilizados valores de NTK e NT.

No caso dos reatores UASB seguidos de pós-tratamento (UASB+POS), foram extraídos da tabela original as faixas esperadas para concentrações efluentes de alguns sistemas citados na nota de rodapé da Tabela 4.7 como pós-tratamentos: filtro anaeróbio, filtro biológico percolador, flotação, lagoas facultativas e lagoas de polimento. As faixas mínimas e máximas para as concentrações efluentes foram adotadas considerando-se o menor e o maior valor apresentado por estas modalidades. Ressalta-se que a faixa de valores apresentada por processos específicos de pós-tratamento é bastante ampla, o que pode fragilizar a avaliação comparativa com o sistema que agrupa vários tipos de processos combinados.

Pela observação da Tabela 4.11, nota-se que, de uma maneira geral, houve uma grande diferença entre as faixas reportadas pela literatura como usuais e as efetivamente observadas,

considerando todos os constituintes e todas as tecnologias de tratamento. Os resultados obtidos estão detalhados por modalidade de tratamento, como mostrado nas páginas que se seguem. Para facilitar a visualização destas diferenças, foram plotados os gráficos mostrados na Figura 4.7. Neles estão representados os percentis 10 e 90% das concentrações efluentes efetivamente medidas para os processos em operação e os valores máximos e mínimos considerados típicos para despejos domésticos, descritos na literatura para cada tecnologia e constituinte. A Tabela 4.11 apresenta apenas os valores mínimos para NT (20 mg/L) e PT (4 mg/L) para as várias tecnologias, sendo que apenas os reatores UASB+POS possuíam um intervalo específico para a categoria.

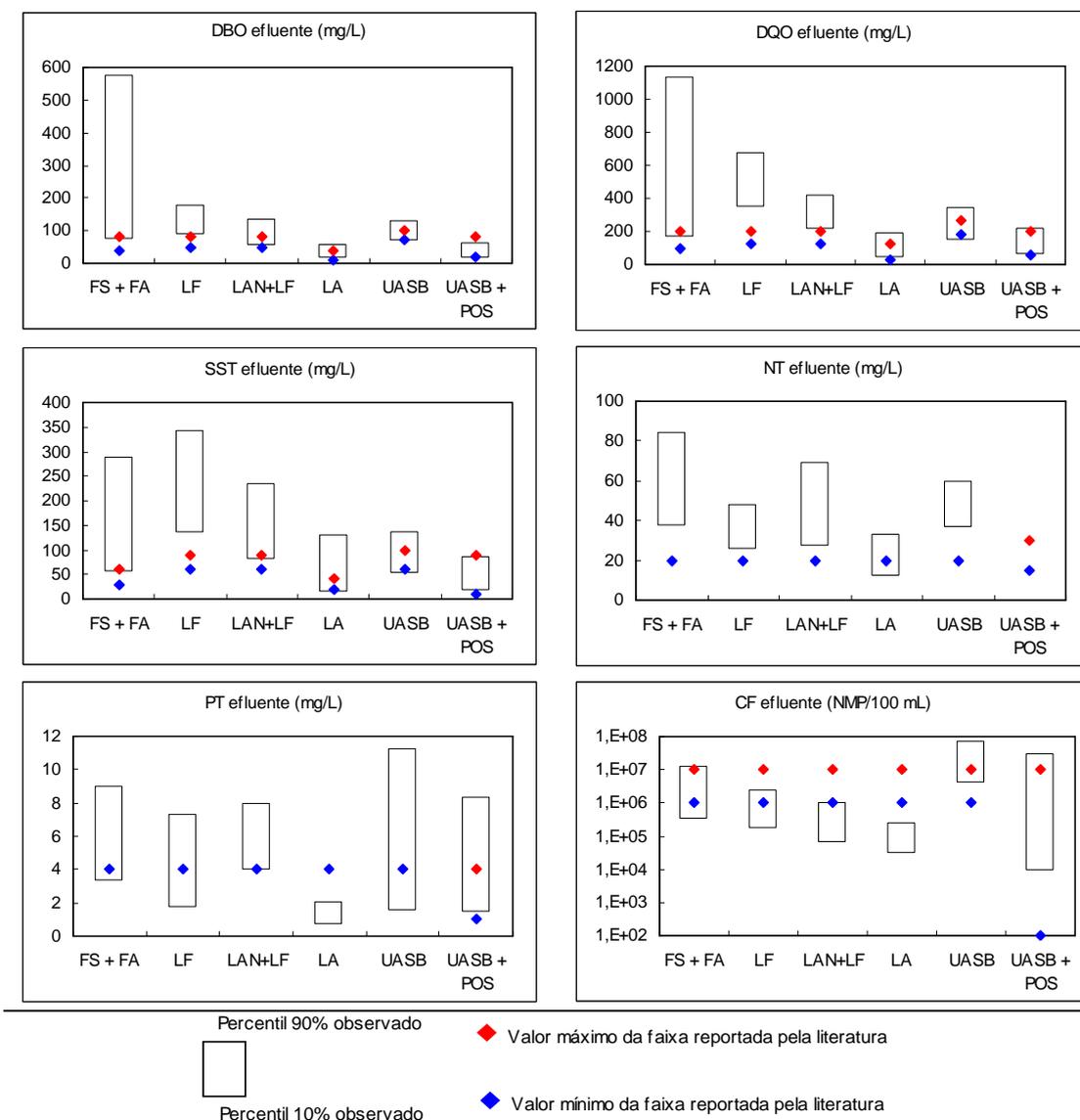


Figura 4.7 - Comparação entre concentrações efluentes dos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura

FS+FA. A diferença entre as concentrações observadas e as reportadas pela literatura como usuais para a modalidade foi muito expressiva considerando, principalmente, DBO, DQO e SST. Foram observadas concentrações efluentes de DBO e DQO até dez vezes maiores que os limites superiores das faixas de referência e de sete vezes para SST. Considerando os nutrientes, o desempenho ficou dentro do esperado para a modalidade, enquanto os resultados de concentrações efluentes de CF estiveram até melhores que as expectativas, apresentando cerca de 18% dos resultados abaixo do valor inferior da faixa reportada.

LF. As concentrações efluentes observadas para as lagoas facultativas (LF) mostraram-se, também, bastante superiores aos valores tomados como referência. Para DBO, DQO e SST, as menores concentrações observadas estiveram acima do limite superior das faixas reportadas pela literatura como usuais. Já as concentrações de CF estiveram todas dentro ou abaixo das esperadas para a modalidade.

LAN+LF. As lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas apresentaram resultados mais próximos aos reportados na literatura, considerando os constituintes DBO, NT e PT. As concentrações efluentes de DQO e SST estiveram superiores aos valores de referência e 100% dos resultados observados para CF estiveram abaixo do esperado (desempenho melhor que o reportado como usual).

LA. A modalidade de LA mostrou concentrações efluentes de DBO e DQO bastante ajustadas aos valores tomados como referência de desempenho. Esse comportamento não foi observado, no entanto, para os constituintes SST, que apresentou desempenho inferior ao esperado, PT e CF, estes últimos apresentando concentrações efluentes médias menores que o considerado típico para a modalidade (desempenho superior às faixas reportadas).

UASB. Os reatores UASB operando isoladamente apresentaram um desempenho um pouco aquém do reportado pela literatura, considerando alguns constituintes.

UASB+POS. Os reatores UASB+POS mostraram os melhores ajustes aos valores reportados, considerando praticamente todos os constituintes. Para essa modalidade não foram disponibilizados dados de concentração efluente de NT ou NTK.

De modo geral, as concentrações observadas de CF efluente mostraram-se menores que as presumidas para quase todas as tecnologias de tratamento, exceto para os reatores UASB.

Chamam a atenção, principalmente, os bons desempenhos apresentados pelas modalidades LA, LF e LAN+LF. Já as concentrações efluentes dos nutrientes estiveram acima dos valores máximos das faixas para a maioria absoluta dos processos. Apenas o processo de lodos ativados, considerando o PT, apresentou 100% das ETEs com concentrações efluentes inferiores aos valores estipulados.

Foram aplicados os mesmos testes estatísticos de comparação de médias e medianas que checaram as diferenças observadas entre as concentrações afluentes. Os resultados dos testes confirmaram, também neste caso, as diferenças observadas entre as concentrações efluentes das diversas tecnologias de tratamento. As menores concentrações efluentes foram observadas para as modalidades LA e as maiores apresentadas pelas FS+FA. Considerando os constituintes DBO, DQO e SST, os processos UASB+POS mostraram concentrações estatisticamente semelhantes às de lodos ativados. No caso das concentrações efluentes de CF, os melhores desempenhos foram confirmados para as modalidades LA e LAN+LF.

Análise das eficiências médias de remoção

As estatísticas descritivas das eficiências de remoção dos constituintes são apresentadas nas Tabelas 4.12 e Figura 4.8.

As eficiências de remoção foram, também, comparadas com as esperadas para os diversos processos de tratamento. Parte dos dados citados por von Sperling (2005) para as diferentes tecnologias de tratamento de esgotos, onde constam valores mínimos e máximos esperados para eficiências de remoção, foram utilizados para elaboração da Tabela 4.13 e Figura 4.9.

Pela observação da Tabela 4.13 e da Figura 4.9, nota-se que, de uma maneira geral, houve uma grande diferença entre as faixas reportadas pela literatura e as efetivamente observadas, considerando todos os constituintes e todas as tecnologias de tratamento, predominando eficiências médias de remoção inferiores ao que seria considerado usual, como comentado detalhadamente a seguir, para cada tecnologia de tratamento.

FS+FA. Observou-se um alto percentual de eficiências médias de remoção menores que os valores mínimos esperados para a modalidade FS+FA. Esse desempenho aquém do esperado foi observado para os constituintes DBO, DQO e SST e pode ser atribuído, provavelmente, à falta de descarte de lodo do sistema, situação frequentemente observada.

Tabela 4.12 - Estatísticas descritivas referentes às eficiências de remoção dos constituintes afluentes, considerando seis tecnologias de tratamento

| Constituinte efluente | Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------------|-----|--------|-----|------|----------|
| | | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
| DBO | Média | 59 | 75 | 82 | 85 | 72 | 88 |
| | D. Padrão | 22 | 8 | 6 | 11 | 7 | 3 |
| | Mediana | 59 | 76 | 84 | 87 | 70 | 88 |
| | Percentil 10% | 36 | 65 | 73 | 74 | 65 | 85 |
| | Percentil 90% | 82 | 84 | 88 | 96 | 79 | 92 |
| DQO | Média | 51 | 55 | 71 | 81 | 59 | 77 |
| | D. Padrão | 25 | 12 | 7 | 14 | 19 | 12 |
| | Mediana | 57 | 55 | 72 | 86 | 60 | 80 |
| | Percentil 10% | 18 | 40 | 65 | 62 | 44 | 64 |
| | Percentil 90% | 78 | 72 | 78 | 93 | 77 | 86 |
| SST | Média | 66 | 48 | 62 | 76 | 67 | 82 |
| | D. Padrão | 21 | 21 | 18 | 19 | 12 | 14 |
| | Mediana | 67 | 50 | 68 | 87 | 65 | 86 |
| | Percentil 10% | 39 | 23 | 35 | 53 | 57 | 71 |
| | Percentil 90% | 86 | 69 | 78 | 95 | 81 | 92 |
| NT | Média | 24 | 44 | 39 | 50 | -13 | |
| | D. Padrão | 21 | 14 | 34 | 27 | 7 | |
| | Mediana | 31 | 43 | 45 | 53 | -14 | |
| | Percentil 10% | 3 | 34 | 26 | 20 | -19 | |
| | Percentil 90% | 39 | 58 | 60 | 78 | -6 | |
| PT | Média | 30 | 46 | 36 | 46 | -1 | 23 |
| | D. Padrão | 23 | 18 | 15 | 12 | 21 | 32 |
| | Mediana | 26 | 46 | 40 | 48 | 4 | 30 |
| | Percentil 10% | 12 | 32 | 19 | 35 | -21 | -8 |
| | Percentil 90% | 53 | 63 | 50 | 55 | 16 | 49 |
| CF | Média | 0,9 | 1,6 | 2,2 | 2,0 | 0,6 | 2,8 |
| | D. Padrão | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 2,1 |
| | Mediana | 0,8 | 1,6 | 2,1 | 1,8 | 0,7 | 2,4 |
| | Percentil 10% | 0,2 | 1,0 | 1,6 | 1,4 | 0,0 | 0,8 |
| | Percentil 90% | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 2,8 | 1,3 | 5,2 |

Nota: Para o CF, as eficiências foram expressas em unidades logarítmicas removidas e para os demais constituintes, em %.

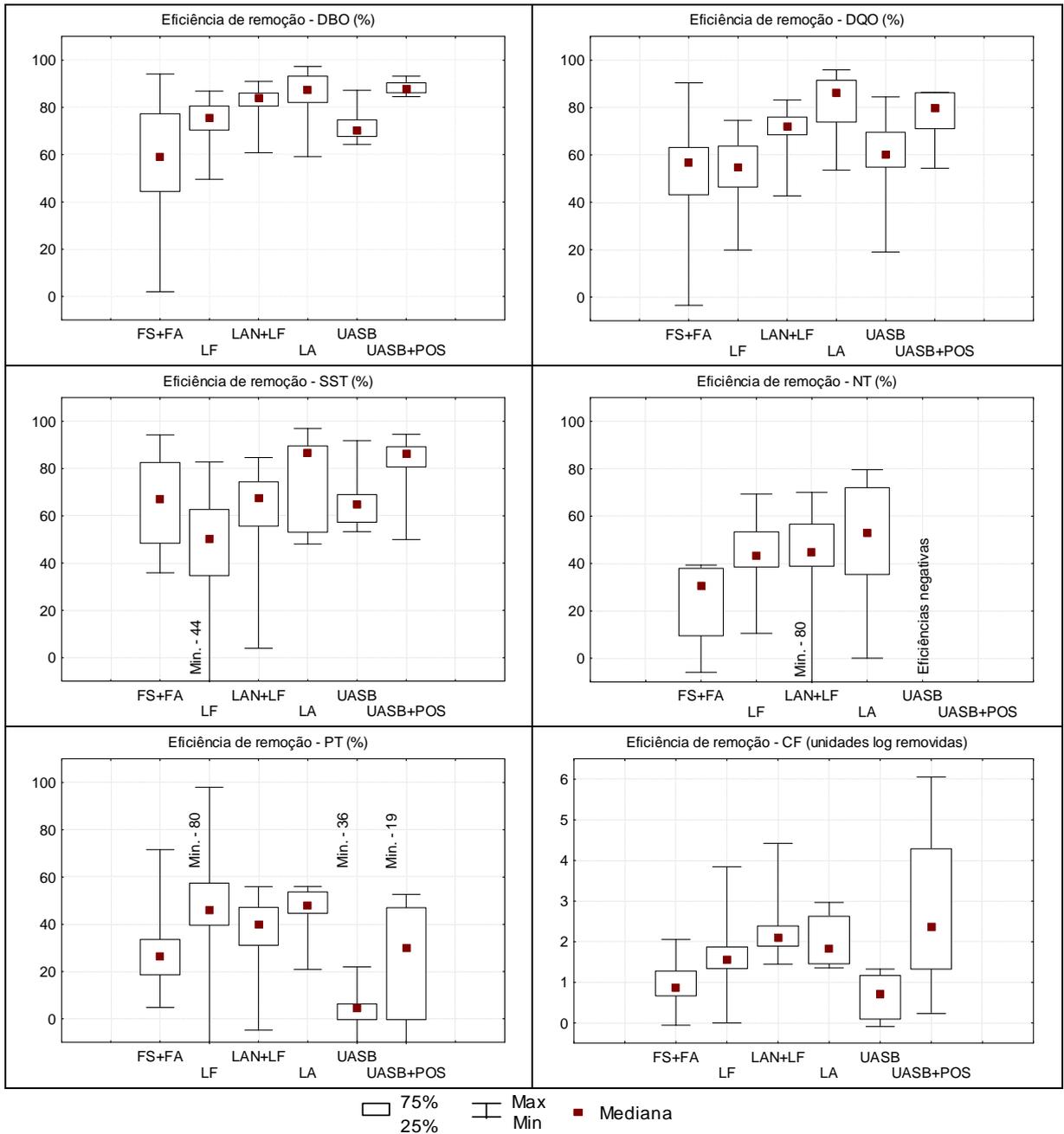


Figura 4.8 - Eficiências médias de remoção dos diversos constituintes

Tabela 4.13 - Eficiências típicas de remoção dos constituintes de interesse nos esgotos domésticos

| Constituinte | Faixas | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
|-----------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| DBO (%) | Literatura ⁽¹⁾ | 80 a 85 | 75 a 85 | 75 a 85 | 85 a 97 | 60 a 75 | 75 a 93 |
| | Observadas ⁽²⁾ | 36 a 82 | 65 a 84 | 73 a 88 | 74 a 96 | 65 a 79 | 85 a 92 |
| DQO (%) | Literatura | 70 a 80 | 65 a 80 | 65 a 80 | 80 a 93 | 55 a 70 | 65 a 90 |
| | Observadas | 18 a 78 | 40 a 72 | 65 a 78 | 62 a 93 | 44 a 77 | 64 a 86 |
| SST (%) | Literatura | 80 a 90 | 70 a 80 | 70 a 80 | 87 a 93 | 65 a 80 | 70 a 97 |
| | Observadas | 39 a 86 | 23 a 69 | 35 a 78 | 53 a 95 | 57 a 81 | 71 a 92 |
| NT ⁽³⁾ (%) | Literatura | < 60 | < 60 | < 60 | < 60 | < 60 | < 30 a 65 |
| | Observadas | 3 a 39 | 34 a 58 | 26 a 60 | 20 a 78 | - 19 a - 6 | - |
| PT (%) | Literatura | < 35 | < 35 | < 35 | < 35 | < 35 | < 35 a 88 |
| | Observadas | 12 a 53 | 32 a 63 | 20 a 50 | 35 a 55 | - 21 a 16 | - 8 a 49 |
| CF (Unid log) | Literatura | 0,5 a 1,5 | 1,0 a 2,0 | 1,0 a 2,0 | 1,0 a 2,0 | 0,5 a 1,5 | 1,0 a 5,0 |
| | Observadas | 0,2 a 1,8 | 1,0 a 2,4 | 1,6 a 3,0 | 1,4 a 2,8 | 0 a 1,3 | 0,8 a 5,2 |

(1) Faixa reportada pela literatura: adaptada de von Sperling (2005);

(2) Faixas observadas: foram utilizados os percentis 10% (valor mínimo) e 90% (valor máximo);

(3) Foram utilizados valores de NTK e NT.

LF. No caso das LF, um percentual bastante elevado de ETes mostrou eficiências médias de remoção de DBO, DQO, SST e NT abaixo da faixa mínima de referência reportada. No entanto, boas eficiências de remoção de PT e CF foram observadas.

LAN+LF. O sistema combinado por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas mostraram um bom desempenho em termos de remoção de DBO, DQO, PT e CF, apresentando um percentual expressivo de ETes com eficiências acima do limite superior das faixas consideradas.

LA. Este processo apresentou elevadas eficiências de remoção da matéria orgânica. No entanto, considerando as remoções de DBO e SST reportadas pela literatura, ficou abaixo do que seria pretendido. Isto pode ser parcialmente explicado pelas baixas concentrações afluentes ao sistema LA, considerando todos os constituintes, conforme menção anterior, o que dificulta a obtenção de elevadas eficiências de remoção.

UASB. Os reatores UASB mostraram uma boa eficiência de remoção de DBO, DQO e SST e um fraco desempenho em relação às faixas de referência reportadas na literatura, considerando CF e nutrientes. Conforme anteriormente descrito, foram observadas eficiências médias de remoção de nutrientes sempre negativas para esta modalidade de tratamento e a suposição de ocorrência de lise celular no sistema foi aventada para explicar tais resultados.

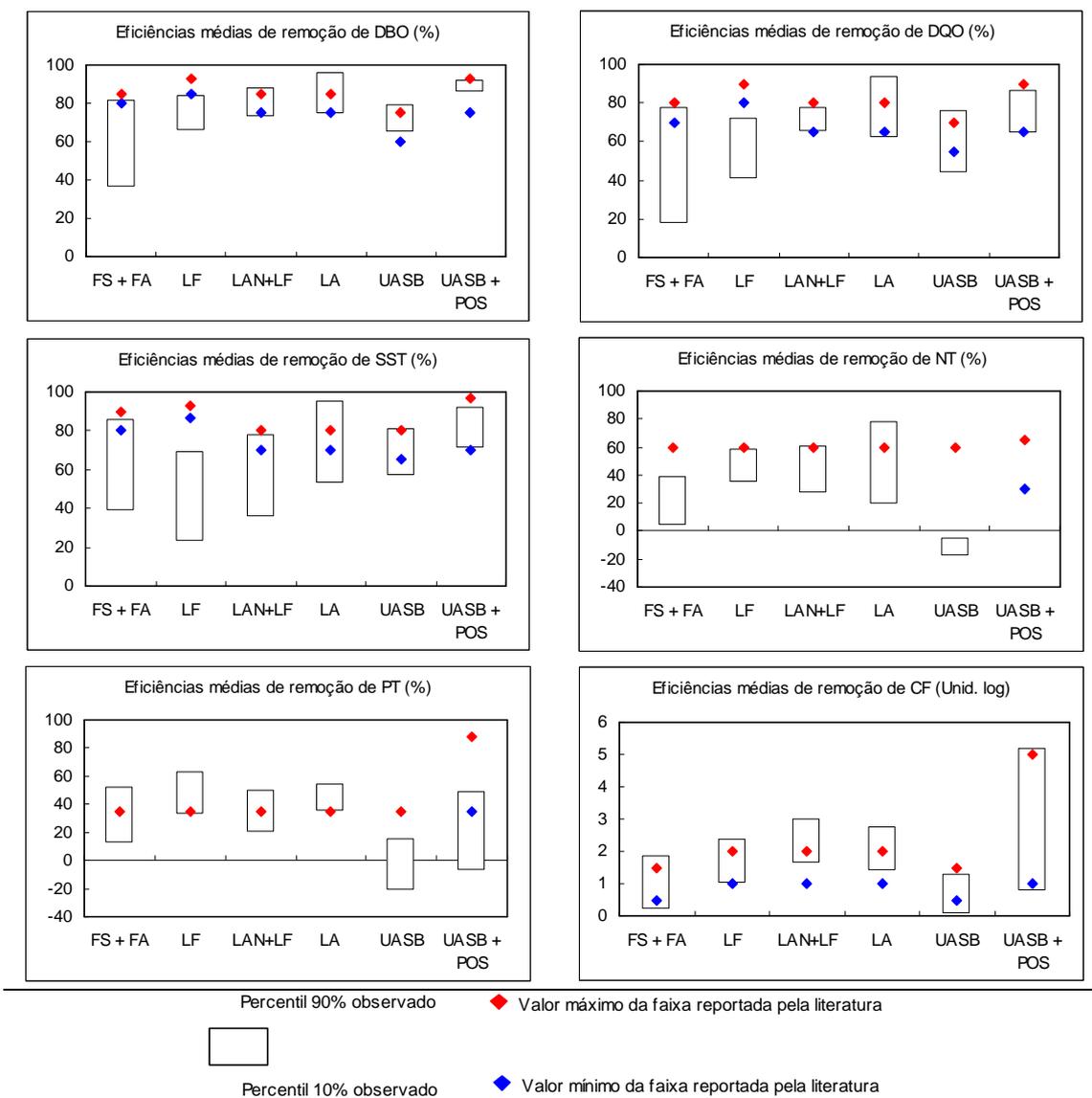


Figura 4.9 - Comparação entre eficiências de remoção obtidas pelos diferentes processos e os valores típicos expressos na literatura

UASB+POS. O desempenho obtido pelos reatores UASB seguidos de pós-tratamento foi o que melhor se ajustou aos dados de literatura, considerando praticamente todos os constituintes. No entanto, as faixas da literatura são mais amplas, devido à diversidade de possíveis sistemas de pós-tratamento.

Para verificação destes resultados, foram aplicados os mesmos testes estatísticos utilizados nas situações anteriores e os resultados dos testes confirmaram, também neste caso, as diferenças observadas entre as eficiências médias de remoção das diversas tecnologias de tratamento.

As maiores eficiências de remoção foram confirmadas para as modalidades LA e UASB+POS, considerando os constituintes DBO, DQO, SST e CF. Os processos FS+FA e UASB mostraram desempenhos significativamente inferiores aos outros, considerando os constituintes DBO, DQO, NT, PT e CF. No caso das eficiências de SST, o pior desempenho foi confirmado para as lagoas facultativas, devido, provavelmente, à presença de algas no efluente, uma vez que os dados de concentração utilizados foram referentes a amostras não filtradas.

Ressalta-se o bom desempenho das lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, quando comparado ao das lagoas facultativas, uma vez que as eficiências de remoção sugeridas pela literatura são as mesmas. Foram observadas diferenças estatisticamente significativas nos desempenhos, considerando os constituintes DBO, DQO, SST e CF.

4.4 Conclusões

4.4.1 Levantamento e sistematização dos dados

4.4.1.1 Dados coletados

- Mais de 50.000 dados operacionais de 208 ETEs, compreendendo 21 processos de tratamentos foram analisados, por meio de estatísticas descritivas e avaliação de desempenho.
- Cerca de 85% das ETEs que disponibilizaram os dados utilizados no trabalho foram do estado de São Paulo, mas o estado de Minas Gerais foi responsável pela disponibilização de 41% dos dados de DBO e por mais de 80% dos dados relativos aos nutrientes.
- Algumas inconsistências nos dados disponibilizados tornaram necessária a exclusão daqueles de qualidade reconhecidamente duvidosa. Para grande parte dos dados que permaneceram, não se pode dar garantia sobre sua integridade, e todas as análises, interpretações e conclusões foram baseadas nestes dados.

4.4.1.2 Identificação das dificuldades encontradas

- Foi grande a heterogeneidade dos dados disponibilizados pelas ETEs, que apresentaram, em alguns casos, periodicidade de monitoramento definido e vários dados de diversos constituintes e, em outros, dados escassos e com periodicidade indefinida, considerando um número reduzido de parâmetros.

- O número de ETEs analisadas dentro de cada modalidade de tratamento e o porte das unidades foram muito diferenciados, tratando vazões que variaram de 0,05 a 6.838 L/s.

4.4.2 Estatística descritiva dos dados

4.4.2.1 Descrição geral dos dados

- Os esgotos brutos apresentaram uma concentração de DBO mais elevada do que usualmente expresso na literatura para esgotos predominantemente domésticos. Algumas possibilidades foram aventadas para justificar esta situação, tais como, contribuições industriais não relatadas pelas ETEs, tipo de amostragem praticado, baixo consumo per capita de água e, ainda, existência de menores coeficientes de retorno. É possível que várias destas causas estejam agindo simultaneamente. No entanto, seriam necessárias investigações mais específicas e estudos mais aprofundados para confirmação destas suposições.
- O percentual de ETEs que apresentou concentrações afluentes médias de DQO, SST, PT e NT acima dos valores típicos também foi elevado. Apenas para CF, este comportamento não foi observado.
- Os resultados de eficiência de remoção dos diversos constituintes foram muito variados, considerando uma análise conjunta das tecnologias de tratamento. Mesmo para DBO foram observados alguns percentuais de remoção muito baixos (valor mínimo de 2%) e a média observada foi de 77%. Os menores percentuais foram obtidos para nutrientes, NT e PT, que variaram de -80 e -82% a 99 e 98%, respectivamente.

4.4.2.2 Descrição dos dados relativos a tecnologias de tratamento

Análise das concentrações médias afluentes

- As concentrações de DBO, DQO, SST e NT observadas nos esgotos brutos tratados em sistemas mais simplificados, como FS+FA, LF e LAN+LF, foram superiores aos valores considerados típicos para despejos predominantemente domésticos. De modo geral, esses sistemas adotam amostragens simples e atendem comunidades menores, que usualmente, apresentam menores consumos *percapita* de água e menores coeficientes de retorno.
- Testes estatísticos de comparações múltiplas confirmaram as menores concentrações médias afluentes ao processo de LA para quase todos os constituintes, excetuando-se o NT e os CF, e a superioridade das concentrações de DBO e DQO das FS+FA. As

concentrações de SST das modalidades LA e UASB foram confirmadas estatisticamente como menores que as apresentadas pelas FS+FA, LF e LAN+LF.

Análise das concentrações médias efluentes

- O percentual de ETEs da modalidade FS+FA que apresentou um desempenho abaixo do esperado foi muito elevado, considerando praticamente todos os constituintes. Apenas para CF este comportamento não foi verificado.
- No caso das LF, um percentual bastante elevado de ETEs mostrou eficiências de remoção de DQO, SST e NT aquém das expectativas. No entanto, boas eficiências de remoção de PT e CF foram observadas.
- Os sistemas compostos por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF) mostraram um bom desempenho em termos de remoção de DBO, DQO, PT e CF, apresentando um percentual expressivo de ETEs com eficiências dentro e até acima do esperado.
- O processo de lodos ativados apresentou elevadas eficiências de remoção da matéria orgânica. No entanto, considerando as remoções de DBO e SST reportadas pela literatura, ficou abaixo das expectativas. Isto pode ser parcialmente explicado pelas baixas concentrações afluentes ao sistema LA, considerando todos os constituintes, o que dificulta a obtenção de elevadas eficiências de remoção.
- Os reatores UASB mostraram uma boa eficiência de remoção de DBO, DQO e SST e, conforme esperado, um fraco desempenho considerando CF e nutrientes, considerando as faixas de referência reportadas na literatura.
- O desempenho obtido pelos reatores UASB seguidos de pós-tratamento foi o que melhor se ajustou aos dados de literatura, considerando praticamente todos os constituintes. No entanto, as faixas da literatura são mais amplas, devido à diversidade de possíveis sistemas de pós-tratamento.
- Testes estatísticos de comparações múltiplas confirmaram as menores concentrações efluentes apresentadas pelas tecnologias de tratamento LA e reatores UASB, seguidos de pós-tratamento, considerando a maioria dos constituintes, e a superioridade das concentrações das FS+FA.

Análise das eficiências médias de remoção

- Foi observada uma grande diferença entre as faixas reportadas pela literatura e as efetivamente observadas, considerando todos os constituintes e todas as tecnologias de tratamento, predominando eficiências médias de remoção inferiores ao que seria considerado usual.
- As maiores eficiências de remoção foram verificadas para as modalidades LA e UASB+POS, considerando os constituintes DBO, DQO, SST e CF. Os processos FS+FA e UASB mostraram desempenhos significativamente inferiores aos outros, considerando os constituintes DBO, DQO, NT, PT e CF. No caso das eficiências de SST, o pior desempenho foi observado para as LF, provavelmente devido à presença de algas no efluente.

Sabe-se que as condições de carga hidráulica e orgânica aplicada, do nível de operação, de aspectos hidráulicos e de fatores de projeto e de construção exercem uma grande influência no desempenho das ETEs. Estes aspectos não foram considerados no presente capítulo, que procurou apenas apresentar um diagnóstico da realidade do tratamento de esgotos na região em estudo e, possivelmente, no Brasil, considerando as principais tecnologias de tratamento, em termos da qualidade do seu efluente. Os resultados apresentados retratam a realidade ora vivenciada, mas não o potencial de cada uma das tecnologias investigadas, que podem atingir desempenhos superiores aos apresentados. Portanto, para buscar elucidar os fatores que conduziram a um melhor ou pior desempenho, e também para evitar que dúvidas sejam lançadas sobre a capacidade de alguns processos de tratamento analisados, foi efetuado um estudo de avaliação da influência de fatores de projeto e de operação no desempenho das estações de tratamento de esgotos, que será apresentado no capítulo 7.

5 AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS ADOTADOS PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA)

5.1 Introdução

Este capítulo descreve a sistemática utilizada para avaliação do atendimento aos critérios adotados pela ANA – Agência Nacional de Águas, por meio do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES (2002). Este programa objetiva estimular a implantação e operação de estações de tratamento de esgotos através de pagamento pelo esgoto tratado, a prestadores de serviço de saneamento. Para se habilitar ao recebimento do auxílio, o empreendedor deve estabelecer metas de abatimento de carga poluidora, correspondente ao tipo de sistema a ser instalado, e comprovar a eficácia do sistema. Para isto, a ANA elaborou uma tabela que estabelece os parâmetros e as metas de abatimento de carga poluidora para inclusão em padrões de eficiência de tratamento.

No entanto, as metas estabelecidas pela ANA foram baseadas na avaliação de alguns sistemas de tratamento localizados e em dados de literatura, muitas vezes pautados em experiências de regiões ou países com diferentes realidades econômicas e sociais. Associado a isto, verifica-se uma grande variabilidade nos parâmetros de projetos relacionados a clima, disponibilidade de área, domínio de tecnologias, dentre outras.

Para auxiliar no preenchimento desta lacuna, o trabalho elaborado no módulo Esgotamento Sanitário, inserido no projeto URBAGUA, avaliou o desempenho de diversas modalidades de tratamento de esgotos em operação no país para verificar a situação real existente e o enquadramento esperado aos padrões de eficiência para tratamento de esgotos estabelecidos pela ANA. A análise do atendimento a estes padrões foi efetuada para 103 ETEs, de 17 modalidades de tratamento.

Este capítulo dá continuidade ao estudo elaborado para a ANA, mas avalia e compara apenas o desempenho das seis tecnologias de tratamento de esgoto que possuíam um número de ETEs e de dados coletados suficientes para a análise (ver Item 4.3.2.2 e Tabela 4.7).

Neste capítulo, foi feita, a princípio, uma descrição detalhada do PRODES (Item 5.2) uma vez que serve de referencial para todas as análises efetuadas.

O item 5.3 apresenta todas as etapas envolvidas na avaliação individual das ETEs e das modalidades de tratamento quanto ao atendimento aos padrões de eficiência estipulados pela ANA.

No item 5.4 (Resultados e discussão) foram computados os atendimentos aos padrões estabelecidos pelo PRODES, considerando as seis tecnologias de tratamento selecionadas. Os resultados foram apresentados na forma de gráficos, para permitir a visualização das diferenças entre as modalidades, bem como a variabilidade dos percentuais de atendimento.

Os resultados individuais obtidos pelas ETEs foram apresentados no relatório MF1-1 e estão disponíveis no site do URBAGUA:

<http://www.usp.br/fau/pesquisa/infurb/urbagua/home.html>.

5.2 PRODES – Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas

A ANA criou, em março de 2001, o Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES, visando incentivar a implantação de ETEs em todo o Brasil, com a finalidade de reduzir os níveis de poluição hídrica no país, e ao mesmo tempo induzir a constituição do sistema de gestão de recursos hídricos, mediante a organização dos Comitês de Bacia e a instituição da cobrança pelo direito de uso da água.

O PRODES não financia obras ou equipamentos, mas paga pelos resultados alcançados, ou seja, pelo esgoto efetivamente tratado. O contrato de pagamento pelo esgoto tratado é firmado pelo Governo Federal, por intermédio da ANA, diretamente com o prestador do serviço de saneamento - entidade pública ou privada. O Programa paga, ao prestador de serviços, até 50% do valor do investimento estimado para implantação da ETE. Os pagamentos são liberados somente a partir do início da operação da ETE, mediante o cumprimento de determinadas metas de eficiência de tratamento e de carga poluidora afluyente abatida.

O PRODES estabelece, ainda, valores per capita de referência, em função da população equivalente atendida, como apresentado na Tabela 5.1.

Os padrões de eficiência fixam as metas de abatimento de cargas poluidoras a serem pactuadas no contrato e os valores de referência servem de base para o cálculo do valor da contribuição financeira prevista no Programa.

Tabela 5.1 - Tabela de valores de referência – ANA

| Implantação de estações de tratamento de esgotos sanitários – ETE | | | | | | | | | | |
|---|--|---|-------------|-------------|-------------|-----|---------|------|------|---------|
| Indicador (3) | Padrões de eficiência para tratamento de esgotos (em níveis mínimos de abatimento das cargas poluidoras afluentes) | | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | |
| DBO | 30% | 60% | 75% | 85% | 85% | 90% | 90% | 90% | 90% | |
| SST | 40% | 60% | 75%/60% (1) | 85%/60% (1) | 85%/60% (1) | 90% | 90% | 90% | 90% | |
| CF | | | | | 99,999% | | 99,999% | | | 99,999% |
| PT | | | | | | | | 85% | 85% | |
| e/ou | | | | | | | | e/ou | e/ou | |
| NTK | | | | | | | | 80% | 80% | |
| Pop. equivalente (hab.) (2) | | Valores per capita de referência (R\$/hab.) | | | | | | | | |
| até | 10.000 | 20 | 35 | 55 | 80 | 85 | 100 | 105 | 120 | 125 |
| de 10.001 a | 20.000 | 20 | 30 | 50 | 70 | 75 | 90 | 95 | 110 | 115 |
| de 20.001 a | 50.000 | 15 | 25 | 45 | 60 | 65 | 80 | 85 | 100 | 105 |
| de 50.001 a | 100.000 | 10 | 20 | 40 | 55 | 60 | 75 | 80 | 95 | 100 |
| de 100.001 a | 200.000 | 10 | 20 | 40 | 55 | 60 | 75 | 80 | 95 | 100 |
| acima de | 200.000 | 10 | 20 | 40 | 55 | 60 | 75 | 80 | 95 | 100 |

Fonte: ANA (2002)

Obs.: (1) 60% somente para os tratamentos que contemplem lagoas produtoras de algas.

(2) Carga média diária de DBO de projeto da ETE dividida por uma carga média per capita de 54g DBO/dia

(3) DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; SST = Sólidos Suspensos Totais; CF = Coliformes Termotolerantes; PT = Fósforo Total; NTK = Nitrogênio Total Kjeldahl

Esta tabela estabelece, portanto, nove padrões de eficiência (de A a I), que identificam os percentuais de abatimento dos indicadores DBO, SST, CF, PT e NTK e para cada padrão de eficiência, os valores per capita são correlacionados com a população equivalente atendida.

As eficiências de remoção variam, dentro de um certo intervalo, para cada sistema de tratamento considerado. Uma proposição de interpretação dos padrões de eficiência do PRODES foi efetuada nesta tese, considerando o expressos na Tabela 5.1, como a seguir:

- Padrão A: tratamento primário (ex: tanques sépticos, decantação primária convencional);
- Padrão B: tratamento secundário de baixa eficiência na remoção de DBO (ex: reatores UASB);
- Padrão C: tratamento secundário de eficiência entre baixa e intermediária na remoção de DBO (ex: lagoas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas, reatores UASB seguidos de alguns tipos de pós-tratamento, tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios);

- Padrão D: tratamento secundário de eficiência intermediária na remoção de DBO (ex: escoamento superficial, reatores UASB seguidos de alguns tipos de pós-tratamento);
- Padrão E: tratamento secundário de eficiência intermediária na remoção de DBO, mas incorporando remoção de organismos patogênicos (ex: lagoas de estabilização seguidas de lagoas de maturação, tanque séptico + infiltração, infiltração lenta, infiltração rápida);
- Padrão F: tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO (ex: reatores UASB seguidos de alguns tipos de pós-tratamento, lodos ativados convencional e variantes, filtros biológicos percoladores de baixa e alta taxa, biofiltros aerados submersos);
- Padrão G: tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO, e incorporando remoção de organismos patogênicos (ex: infiltração rápida, tanque séptico + infiltração, lodos ativados convencional + filtração terciária, processos do Padrão F seguidos por desinfecção);
- Padrão H: tratamento secundário de alta eficiência na remoção de DBO, seguido por tratamento terciário para remoção de nutrientes (ex: infiltração lenta, lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P, UASB + flotação por ar dissolvido);
- Padrão I: idem Padrão H, mas incorporando remoção de organismos patogênicos (ex: processos do Padrão H seguidos por desinfecção).

O cumprimento das metas de abatimento de cargas poluidoras pactuadas entre o PRODES e os prestadores de serviços de esgotamento sanitário deve ser verificado através do processo de certificação, constante no Manual de Operações, constituído de três etapas:

- a) Procedimento de auto-avaliação
- b) Procedimento de auditoria
- c) Desdobramentos e penalidades

a) Procedimento de auto avaliação

O procedimento de auto-avaliação consiste dos seguintes itens:

- monitoramento dos parâmetros estabelecidos pela ANA;

- medição regular do volume de esgotos tratado;
- medição da carga orgânica afluyente.

A frequência mínima de amostras necessárias para comprovação do desempenho no abatimento da carga poluidora para cada classe é mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Amostragem para análise laboratorial

| Classe | Frequência mínima de coleta | Tipo de amostragem do afluyente | Tipo de amostragem do effuyente |
|--------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| A | Semanal | Composta | Composta |
| B | Semanal | Composta | Composta |
| C | Quinzenal para lagoas | Composta | Simple ou composta |
| | Semanal para o restante | Composta | Composta |
| D | Quinzenal para lagoas | Composta | Simple ou composta |
| | Semanal para o restante | Composta | Composta |
| E | Quinzenal para lagoas | Composta | Simple ou composta |
| | Semanal para o restante | Composta | Composta |
| F | 2 x semana | Composta | Composta |
| G | 2 x semana | Composta | Composta |
| H | 2 x semana | Composta | Composta |
| I | 2 x semana | Composta | Composta |

Os parâmetros de análise laboratorial a serem seguidos no processo de auto-avaliação, de acordo com as exigências das classes, serão DBO, SST,CF, PT e NTK.

b) Procedimento de auditoria

As auditorias levam em consideração não apenas os resultados de desempenho, o volume de esgotos tratados e a carga orgânica afluyente apresentados no processo de auto-avaliação, mas também alguns aspectos de gestão do empreendimento que permitam avaliar se o desempenho apresentado é sustentável em todo o período de operação, tais como:

- existência de pessoal qualificado e treinado (próprio ou terceirizado) para executar as atividades operacionais e de manutenção;
- existência de sistema de manutenção corretiva e preventiva que assegure o funcionamento contínuo da unidade;
- existência de sistema de análises, monitoramento operacional e registros que gerem informações para a adequada operação do sistema;

- disposição de lodos e sub-produtos gerados no processo de tratamento de forma segura em termos de saúde pública, de modo ambientalmente aceitável;
- disponibilidade de recursos financeiros para aquisição de peças sobressalentes e insumos operacionais.

c) Desdobramentos e penalidades

Os resultados da auto-avaliação de desempenho devem ser enviados trimestralmente para a ANA, onde são analisados, podendo apontar os seguintes resultados:

A – Atendimento. Os resultados apresentados na auto-avaliação alcançam/superam as metas estabelecidas (de acordo com as classes constantes na Tabela 5.1) e as informações colhidas no período de auditoria confirmam os resultados e indicam sustentabilidade do processo. Ou seja:

- a média trimestral dos resultados da eficiência de remoção alcança/supera as metas estabelecidas em todos os parâmetros analisados;
- os resultados individuais da eficiência de remoção alcançam/superam o desempenho previsto em mais de 80% das medições, em todos os parâmetros analisados;
- o volume tratado e a carga orgânica afluyente superam o limite de 80% das metas estabelecidas para o período; e
- os critérios de gestão e os resultados das análises adicionais são totalmente atendidos.

B – Atendimento parcial. Resultados da auto-avaliação e/ou as informações colhidas no período de auditoria atendem em parte às metas estabelecidas e/ou os requisitos de sustentabilidade do processo. Isto significa que:

- a média trimestral dos resultados da eficiência de remoção de no mínimo 50% dos parâmetros alcança as metas estabelecidas;
- os resultados das eficiências de remoção individuais alcançam/superam o desempenho previsto em mais de 66% das medições, em todos os parâmetros analisados;
- o volume tratado e a carga orgânica afluyente superam o limite de 66% das metas estabelecidas para o período;

- no mínimo 80% dos critérios de gestão e dos resultados das análises adicionais são atendidos; e
- o critério de gestão que trata da disposição do lodo e sub-produtos gerados no processo de tratamento é atendido.

C – Não atendimento. Resultados da auto-avaliação e/ou as informações colhidas no período de auditoria não atendem as metas estabelecidas e/ou os requisitos de sustentabilidade do processo. Isto significa que:

- quaisquer resultados e/ou critérios de gestão não se enquadram nos itens descritos anteriormente.

Ainda de acordo com o Manual de Operações do PRODES, as ETEs que alcançam/superam as metas previstas estão habilitadas a continuar recebendo as parcelas pelo pagamento do esgoto tratado até a próxima avaliação. As ETEs que atendem em parte as metas são advertidas, e se este resultado se repetir por duas vezes consecutivas ou intercaladas, o prestador de serviço será suspenso, perdendo o direito ao saque da respectiva parcela. As ETEs que obtiverem três suspensões seguidas, ou sete intercaladas, ao longo do período contratual, terão seu contrato rescindido.

5.3 Metodologia

5.3.1 Avaliação individual das ETEs

A Figura 5.1 apresenta todas as etapas envolvidas na avaliação individual das ETEs quanto ao atendimento aos padrões de eficiência estipulados pela ANA (Tabela 5.1). Algumas ETEs tiveram que ser excluídas por não apresentarem dados dos parâmetros DBO e/ou SST, indispensáveis para a avaliação do atendimento aos padrões de eficiência.

Também foram excluídas aquelas ETEs que apresentaram um número de dados válidos destes indicadores inferior a seis, mínimo necessário para permitir a avaliação trimestral dos sistemas, considerando uma frequência quinzenal de monitoramento. Esta é a frequência mínima de coleta exigida para comprovação do desempenho no abatimento da carga poluidora para cada classe, como mostrado na Tabela 5.2.

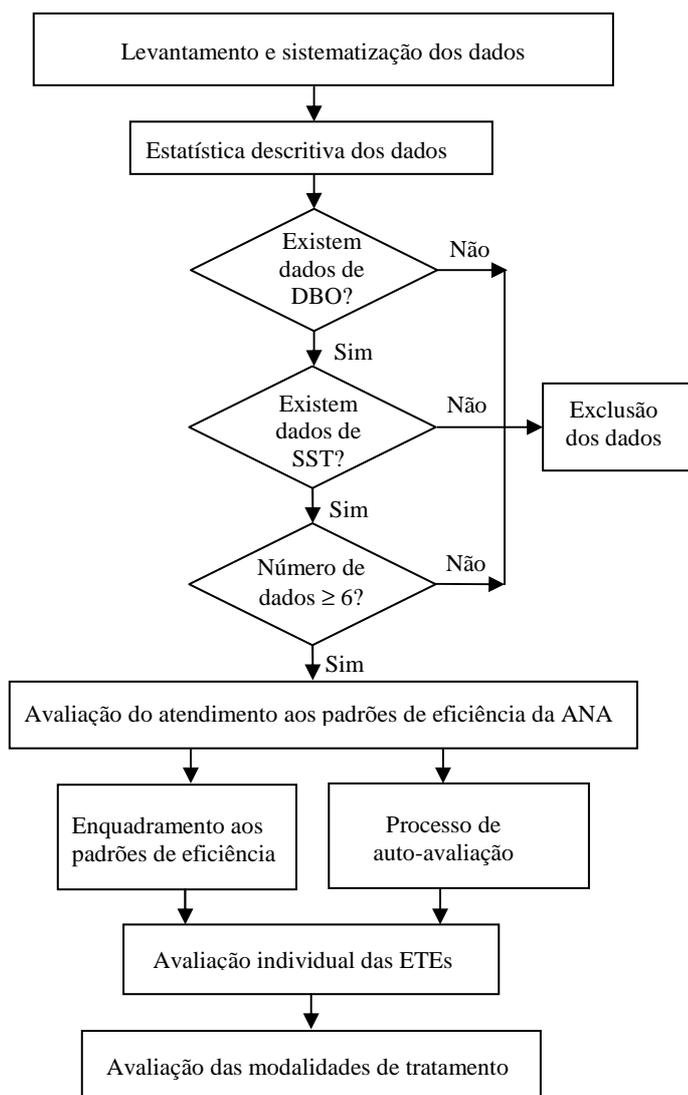


Figura 5.1- Fluxograma das etapas envolvidas na avaliação dos dados.

A metodologia de avaliação de desempenho das diversas ETEs foi elaborada neste trabalho a partir da interpretação pessoal dos critérios estipulados pela ANA em seu Manual de Operações. A falta de instruções e/ou orientações claramente definidas levou, algumas vezes, à necessidade de longas discussões entre a equipe responsável e a contatos pessoais com funcionários da ANA para dirimir dúvidas de interpretação.

Assim, foram determinadas as porcentagens de atendimento a todos os padrões (A a I), a partir da avaliação dos dados fornecidos pelas ETEs. Para isto foram elaborados programas em Visual Basic, onde uma análise conjunta de todos os parâmetros era efetuada. Estes programas checavam, simultaneamente, o percentual de remoção de todos os parâmetros analisados em todas as medições, considerando os níveis mínimos de abatimento das cargas poluidoras afluentes determinados na Tabela 5.1.

As avaliações foram efetuadas, para cada amostra, como exemplificado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Eficiência de remoção das cargas poluidoras afluentes necessária para o atendimento aos diversos padrões ANA.

| Eficiência de remoção das cargas poluidoras afluentes | | | | | | | | | Padrão atendido |
|---|---|---------------|---|-----------|---|-------|------|-------|-----------------|
| DBO | | SST | | CF | | PT | | NTK | |
| ≥ 90% | e | ≥ 90% | e | ≥ 99,999% | e | ≥ 85% | e/ou | ≥ 80% | I |
| ≥ 90% | e | ≥ 90% | | | e | ≥ 85% | e/ou | ≥ 80% | H |
| ≥ 90% | e | ≥ 90% | e | ≥ 99,999% | | | | | G |
| ≥ 90% | e | ≥ 90% | | | | | | | F |
| ≥ 85% | e | ≥ 85% / 60% * | e | ≥ 99,999% | | | | | E |
| ≥ 85% | e | ≥ 85% / 60% * | | | | | | | D |
| ≥ 75% | e | ≥ 75% / 60% * | | | | | | | C |
| ≥ 60% | e | ≥ 60% | | | | | | | B |
| ≥ 30% | e | ≥ 40% | | | | | | | A |

* 60% somente para os tratamentos que contemplem lagoas produtoras de algas

Para atendimento ao padrão I, portanto, era necessário que:

- Percentual de remoção de DBO $\geq 90\%$, e
- Percentual de remoção de SST $\geq 90\%$, e
- Percentual de remoção de CF $\geq 99,999\%$, e
- Percentual de remoção de PT $\geq 85\%$ ou % remoção de NTK $\geq 80\%$.
- Caso estas condições não fossem atendidas, analisava-se o padrão imediatamente anterior, e assim sucessivamente, até se chegar ao nível menos restritivo, o padrão A. Caso nenhum padrão fosse atendido, o resultado era considerado abaixo dos padrões.

Quando valores referentes aos parâmetros DBO e SST não estavam presentes simultaneamente na mesma amostra, o programa considerava a análise do dado como “não avaliado”. Para sistemas de tratamento envolvendo lagoas produtoras de algas (interpretadas como lagoas facultativas, de maturação e polimento), outro programa era utilizado, com os percentuais de remoção de SST devidamente ajustados, uma vez que o nível de exigência de remoção de sólidos em suspensão é menor nestes casos (60%).

No entanto, uma outra consideração seria necessária, já que o atendimento aos padrões mais restritivos implicava no atendimento a outros menos exigentes. Assim, considerou-se que o atendimento a todos os outros padrões implicava em atendimento ao padrão A. Do mesmo modo, o atendimento a todos os outros padrões, exceto o A, implicava em atendimento ao padrão B. Até o padrão D vale o mesmo raciocínio, sendo considerado que o atendimento a todos os outros padrões, exceto ao A, B e C, consistia em atendimento ao D. Para o padrão E, onde é estabelecida uma remoção de 99,999% de coliformes termotolerantes, além de 85% de remoção de DBO e SST, apenas o enquadramento aos padrões G e I implicaria em atendimento a este padrão. De maneira análoga, considerou-se que o atendimento aos padrões G, H e I implicava em atendimento ao padrão F e o atendimento ao padrão I garantia, ainda, o atendimento aos padrões G e H. O Quadro 5.1 resume as informações fornecidas:

Quadro 5.1 - Atendimento cumulativo aos padrões ANA

| | | |
|-------------------------|---|---|
| Atendimento ao padrão I | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D + E + F + G + H + I) |
| Atendimento ao padrão H | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D + F + H) |
| Atendimento ao padrão G | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D + E + F + G) |
| Atendimento ao padrão F | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D + F) |
| Atendimento ao padrão E | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D + E) |
| Atendimento ao padrão D | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C + D) |
| Atendimento ao padrão C | ⇒ | Atendimento aos padrões (A + B + C) |
| Atendimento ao padrão B | ⇒ | Atendimento ao padrão (A + B) |
| Atendimento ao padrão A | ⇒ | Atendimento ao padrão A |

5.3.2 Avaliação das modalidades de tratamento

A avaliação das seis modalidades, selecionadas conforme descrito no Item 4.3.2.2 e apresentadas na Tabela 4.7, foi efetuada em duas etapas. Na primeira, foi considerada a totalização dos resultados de atendimento individual das ETEs aos padrões de eficiência, e na segunda, foi efetuado o procedimento de auto-avaliação necessário para a certificação das unidades de tratamento de esgotos participantes do PRODES. Este processo, como já mencionado anteriormente, consiste no monitoramento dos parâmetros estabelecidos pela ANA, na medição regular do volume de esgotos tratado e da carga orgânica afluente.

5.3.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência

A avaliação das modalidades onde estavam inseridas as diversas ETEs foi efetuada através da totalização dos dados referentes ao desempenho individual dos sistemas. Esta avaliação foi efetuada através da média aritmética das porcentagens de atendimento a cada padrão de eficiência, considerando todas as ETEs inseridas em cada modalidade de tratamento.

5.3.2.2 Processo de auto-avaliação

O processo de auto-avaliação de desempenho das ETEs não considerou as três etapas constantes no Manual de Operações do PRODES, uma vez que não foram disponibilizados dados suficientes pelas estações de tratamento. Assim, os resultados referentes ao volume tratado e à carga orgânica afluyente não foram apresentados, sendo analisada somente a avaliação de desempenho. Para esta avaliação foram utilizados programas em Visual Basic e algumas funções em Microsoft Excel.

Como os dados disponibilizados eram muito heterogêneos quanto à frequência e ao período de coleta, optou-se por se considerar cada conjunto de dados fornecido pelas diversas ETEs como um trimestre (período de auto-avaliação estabelecido pela ANA). Duas situações foram analisadas para se concluir pelo atendimento, atendimento em parte ou não atendimento aos padrões:

- Avaliação da média trimestral dos resultados de eficiência de remoção quanto ao alcance ou superação das metas estabelecidas para todos os parâmetros;
- Avaliação dos resultados individuais de eficiência de remoção de todos os parâmetros avaliados.

Para a avaliação do atendimento ao processo de auto-avaliação, os cálculos efetuados consistiram de três etapas, como mostrado na Figura 5.2, considerando, como exemplo, um sistema que estabelece como meta de atendimento o padrão E.

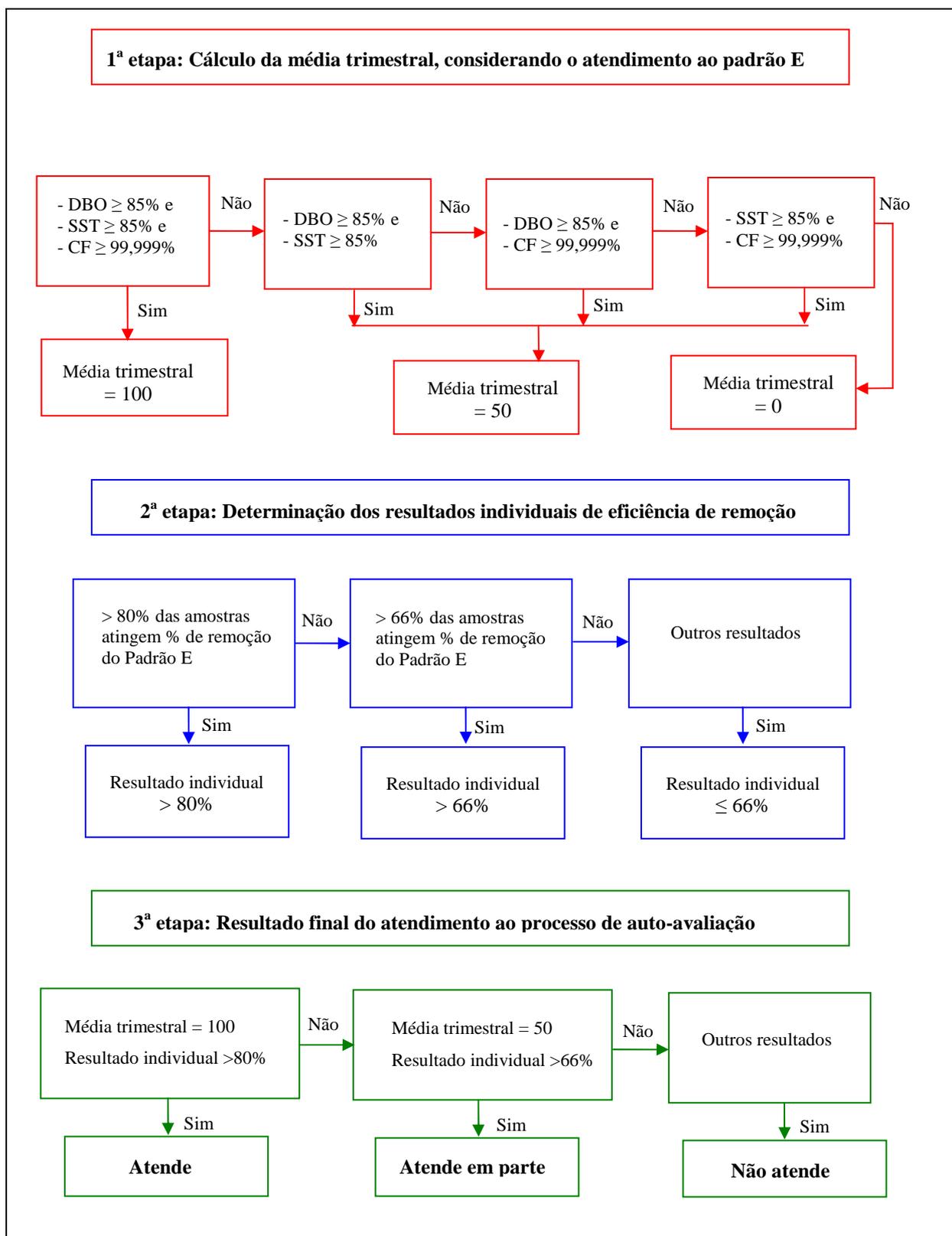


Figura 5.2- Etapas de avaliação do procedimento de auto-avaliação.

Para a análise do atendimento aos padrões que contemplam apenas dois parâmetros foram utilizadas funções em Excel. Para os outros casos (padrões E, G, H e I) que consideram três ou mais parâmetros, foram elaborados também programas em Visual Basic, que consideravam todas as possibilidades de atendimento parcial. Nestes casos, considerou-se que, para se atingir o percentual de 50%, seria necessário o atendimento a dois parâmetros.

Este mesmo procedimento foi utilizado para cálculo dos atendimentos aos padrões para todas as ETEs, de todas as modalidades.

5.4 Resultados e discussão

Após a exclusão de algumas unidades que disponibilizaram menos de seis dados de DBO e SST, a análise do atendimento aos padrões de eficiência foi efetuada para 98 ETEs, das 6 modalidades de tratamento selecionadas, totalizando 3121 conjuntos de dados. A Tabela 5.4 mostra a relação dos sistemas de tratamento avaliados, a notação de referência e o número e percentual de ETEs em cada modalidade.

Tabela 5.4 - Relação de sistemas de tratamento avaliados quanto ao atendimento aos padrões de eficiência ANA

| Modalidade | Notação de referência | Número de ETEs | % de ETEs |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------|-----------|
| Fossa Séptica + Filtro Anaeróbio | FS + FA | 5 | 5 |
| Lagoa Facultativa | LF | 37 | 38 |
| Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa | LAN+LF | 27 | 28 |
| Lodos Ativados | LA ⁽¹⁾ | 11 | 11 |
| Reator UASB | UASB | 10 | 10 |
| Reator UASB + POS | UASB + POS ⁽²⁾ | 8 | 8 |
| | | 98 | 100 |

(1) LA inclui: lodos ativados convencional e aeração prolongada;

(2) UASB + POS inclui os pós-tratamentos: filtro aerado (FAE); filtro anaeróbio (FA); filtro biológico percolador (FBP); flotação (FLOT); lagoas facultativas (LF) e lagoas de polimento (LP).

Um levantamento da prática de monitoramento efetuada pelas ETEs foi realizado, visando verificar se a frequência mínima de coleta exigida pelo Prodes, e mostrada na Tabela 5.2, seria cumprida caso estas estações de tratamento fizessem parte do Programa.

Foi muito grande a heterogeneidade observada na frequência de coleta praticada pelas ETEs, dentro de cada modalidade de tratamento, como mostrado na Tabela 5.5. Nela, as frequências de amostragem são representadas por grupos contendo tipos variados de práticas. Como

exemplo, a frequência “até 2 x semana” considera o percentual de ETEs que efetuava coletas diariamente e duas vezes por semana.

Tabela 5.5 - Porcentagem de ETEs que praticavam as diversas frequências de amostragem

| Frequências | FS + FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
|---------------------------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------------|
| Até 2 x semana | 0 | 0 | 0 | 18 | 20 | 25 |
| Semanal | 0 | 0 | 0 | 18 | 20 | 25 |
| Acima de semanal a quinzenal | 0 | 0 | 0 | 55 | 20 | 13 |
| Acima de quinzenal a trimestral | 60 | 27 | 19 | 0 | 40 | 38 |
| Frequência não definida | 40 | 73 | 81 | 9 | 0 | 0 |
| Exigência Prodes | Semanal | Quinzenal | Quinzenal | 2 x sem | Semanal | 2 x sem ou Sem. |

Foi observado que um percentual pouco expressivo de ETEs atenderia às exigências contidas no manual do Prodes. No caso das fossas-filtro (FS+FA) e das lagoas (LF e LAN+LF), este percentual seria zero. O percentual de atendimento seria de apenas 18% das ETEs para a modalidade lodos ativados, 40% para os reatores UASB e 50% para os UASB seguidos de pós-tratamento (dependendo do tipo de pós-tratamento, a frequência mínima de coleta exigida variou).

5.4.1 Avaliação individual das ETEs

A avaliação individual de desempenho das ETEs verificou o enquadramento aos padrões de eficiência estabelecidos pela ANA, considerando a situação real existente. Foram determinadas as porcentagens de atendimento a todos os padrões, a partir da avaliação de todos os dados fornecidos pelas ETEs. Os resultados estão disponibilizados no relatório MF1-1 no site do URBAGUA (<http://www.usp.br/fau/pesquisa/infurb/urbagua/home.html>).

5.4.2 Avaliação das modalidades de tratamento

5.4.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência

A partir dos resultados individuais obtidos pelas ETEs, foram computadas as médias dos atendimentos cumulativos aos padrões de eficiência ANA de cada modalidade. Os resultados obtidos para as seis tecnologias selecionadas são apresentados na forma de gráficos de barras e de “box-whisker”, na Figura 5.3.

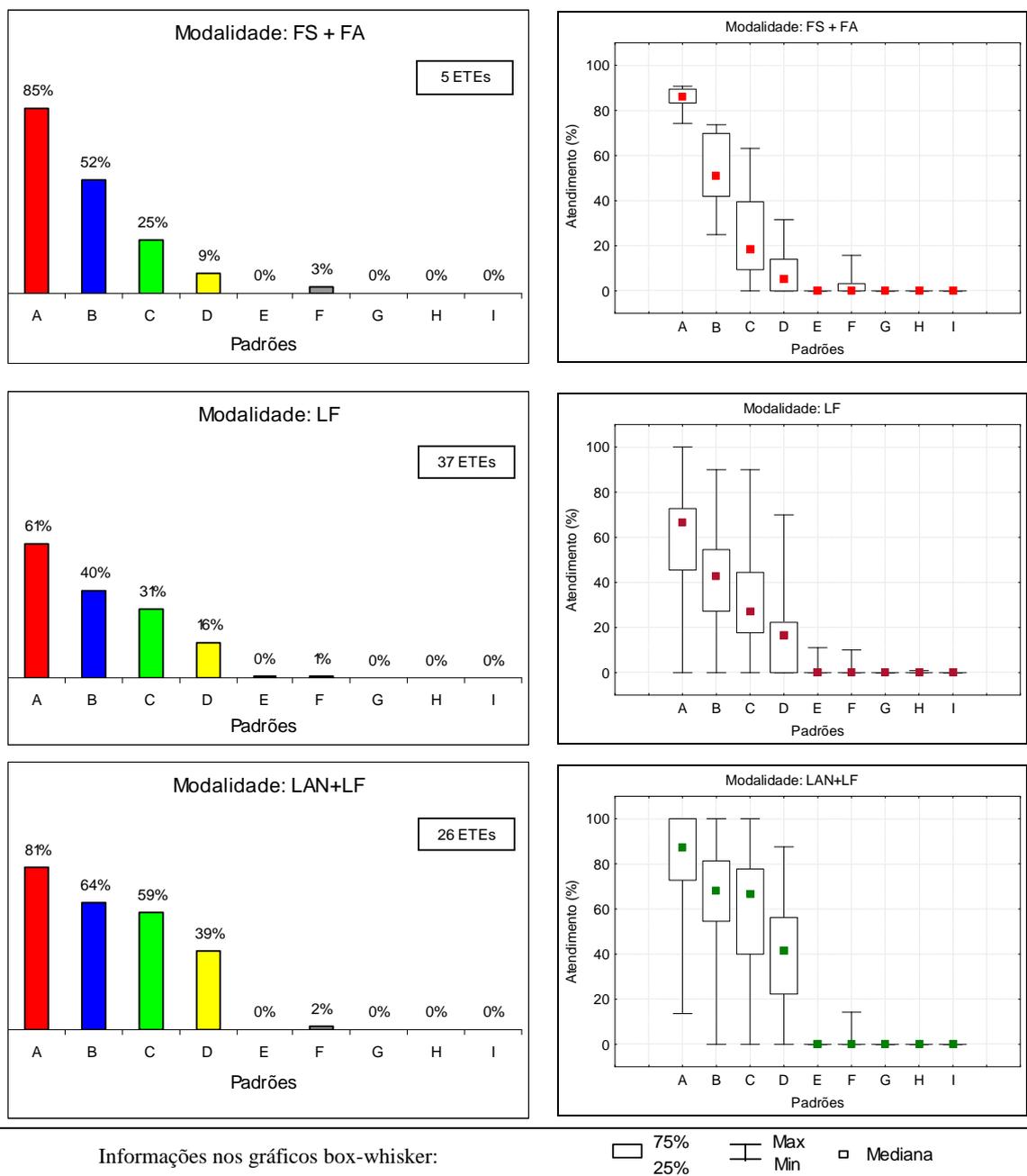


Figura 5.3 - Média dos atendimentos cumulativos aos padrões de eficiência ANA, considerando as seis tecnologias de tratamento

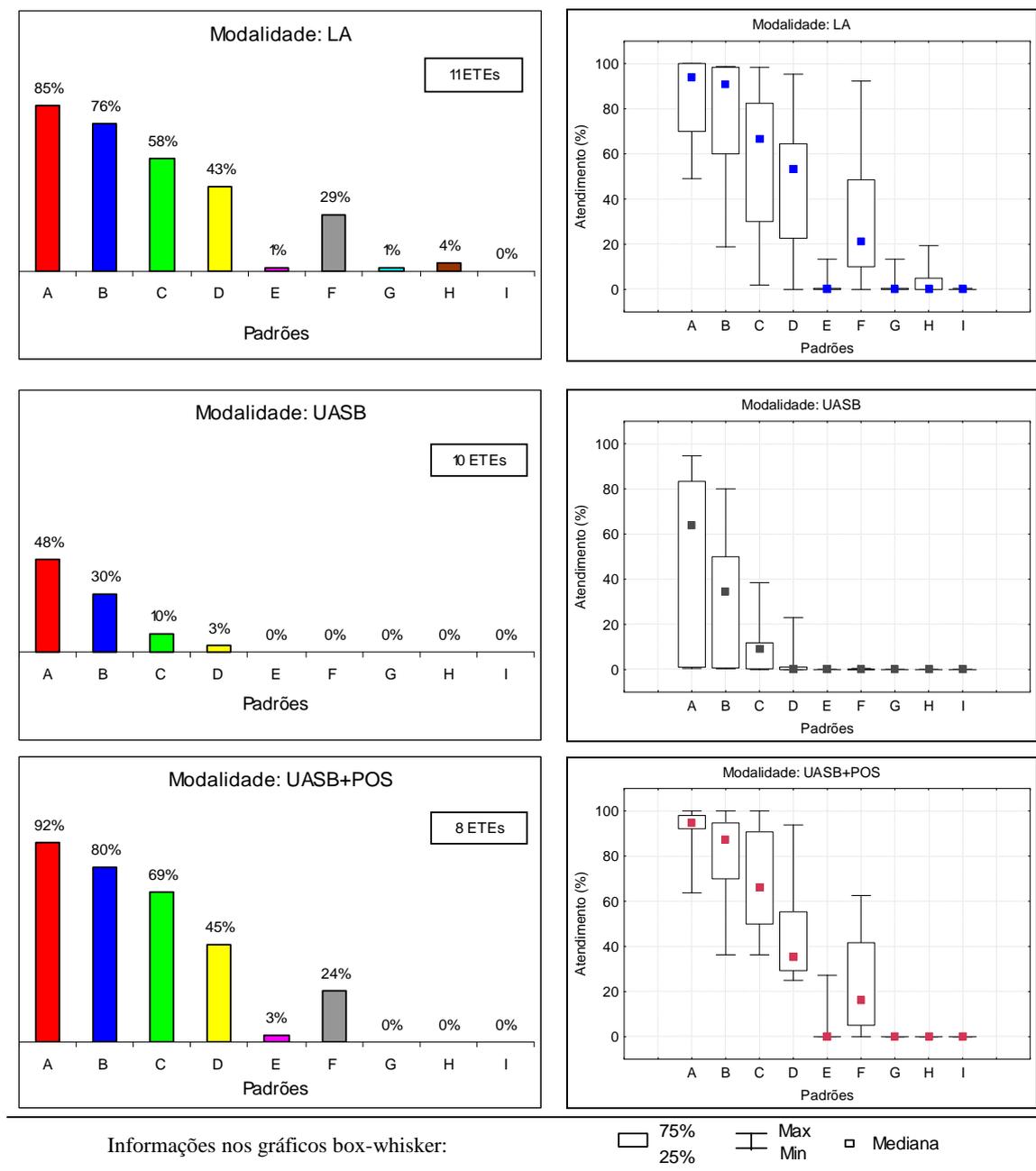


Figura 5.3 - Média dos atendimentos cumulativos aos padrões de eficiência ANA, considerando as seis tecnologias de tratamento (Cont.)

Os gráficos permitem uma visualização da variabilidade de desempenho dentro de cada modalidade, e pode ser visto que os padrões mais restritivos, que incorporam exigências de remoção de CF e nutrientes, não tiveram praticamente nenhum atendimento. Estes resultados já eram esperados, já que as tecnologias de tratamento avaliadas não foram projetadas com este objetivo. Diante disto, as análises que se seguiram não consideraram mais os padrões E, G, H e I.

Para permitir uma rápida visualização das diferenças de atendimento apresentadas pelos sistemas, foram elaborados gráficos de atendimentos cumulativos médios aos diversos padrões, conforme pode ser visto pela Figura 5.4.

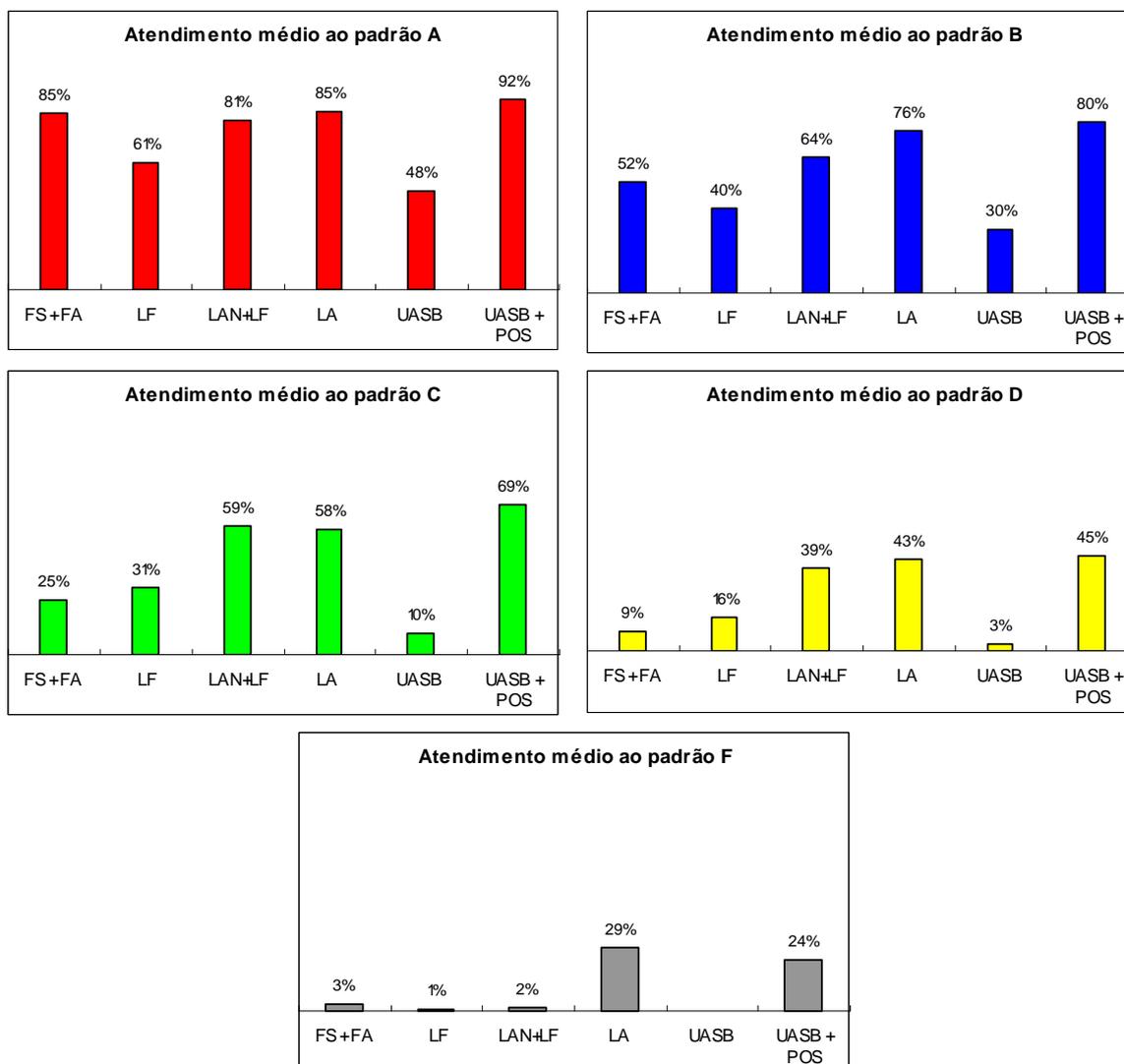


Figura 5.4 - Atendimentos cumulativos médios aos padrões A, B, C, D e F, por modalidade de tratamento

Pela observação dos gráficos apresentados percebe-se que parte das modalidades de tratamento alcançaram altos índices de atendimento ao padrão A, já que as exigências de remoção de cargas poluidoras afluentes são as menores apresentadas. No entanto, chamam a atenção os baixos índices de atendimento obtidos pelas modalidades UASB (48%) e LF (61%). Algumas possibilidades aventadas para explicar este comportamento seriam problemas operacionais e/ou de sobrecarga, já que, em unidades bem operadas e funcionando

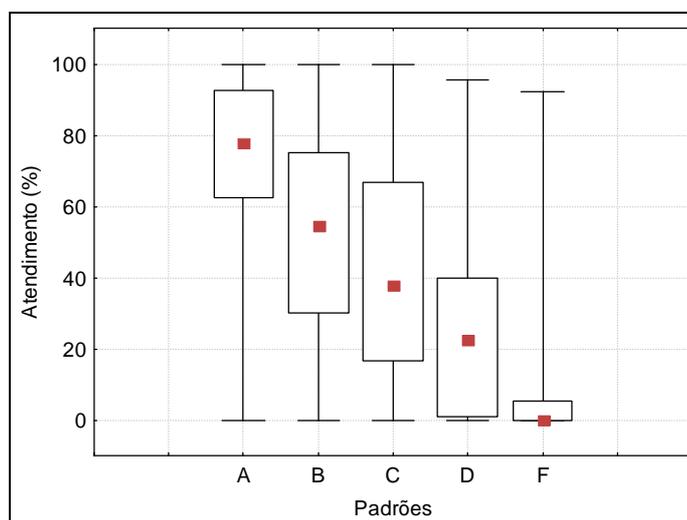
de acordo com os critérios e parâmetros usuais de dimensionamento, o atendimento ao padrão A seria perto de 100%. Estes aspectos serão explorados com mais detalhes no Capítulo 7.

Para o padrão B, foram muito baixos os índices de atendimento da maior parte das modalidades de tratamento, indicando que problemas diversos podem estar contribuindo para tal. Da mesma forma explicitada para o padrão A, esperar-se-iam elevados percentuais de ETEs de praticamente todas as modalidades analisadas neste trabalho, que atendessem ao padrão B.

Em relação aos padrões C e D, pode-se dizer que estes apresentaram baixíssimos níveis de atendimento por parte de quase a totalidade das modalidades de tratamento, levando-se em conta as mesmas considerações anteriores.

Foi grande a dificuldade encontrada pelos sistemas analisados em atender ao padrão E, devido à exigência de remoção dos coliformes termotolerantes. Quando a remoção deste indicador não foi exigida, como no padrão F, os resultados obtidos melhoraram bastante.

Na Figura 5.5 é apresentada uma avaliação comparativa de todas as modalidades, considerando as médias dos percentuais de atendimento aos padrões A até F, excetuando-se o E, considerando as 98 ETEs.



Informações gráfico: Mediana; Box: 25%, 75%; Whisker: Min, Max

Figura 5.5 - Avaliação comparativa do atendimento aos diversos padrões de eficiência ANA

Note-se que, em geral, as modalidades apresentaram uma grande variação nos percentuais de atendimento a cada padrão, devido à grande diferença de desempenho observada entre as tecnologias de tratamento.

5.4.2.2 Processo de auto-avaliação

O processo de auto-avaliação de desempenho das ETEs foi efetuado de acordo com o Manual de Operações da ANA, desconsiderando a análise referente ao cumprimento dos itens relativos ao volume tratado e à carga orgânica afluente.

Para efeito desta avaliação, todos os conjuntos de dados disponibilizados pelas ETEs foram considerados como trimestres. Assim, os “trimestres” analisados contiveram números de dados que variaram de 6 a 310 conjuntos.

A Figura 5.6 apresenta os resultados do processo de auto-avaliação para as 6 modalidades de tratamento analisadas, considerando o percentual de ETEs que atendeu, atendeu em parte ou não atendeu aos padrões A, B, C, D e F de eficiência ANA.

O que chama a atenção nos gráficos apresentados é o desempenho aquém do esperado da modalidade LA, principalmente se considerando o atendimento ao padrão A. Isto pode ser atribuído ao baixo desempenho de algumas ETEs específicas, que apresentaram problemas de altas concentrações efluentes de sólidos suspensos, comprometendo o atendimento a todos os padrões.

Os bons percentuais de atendimento observados para as modalidades UASB+POS também merecem ser comentados. O padrão A foi atendido por todas as ETEs, não importando o tipo de pós-tratamento e, mesmo para as outras metas, o desempenho foi superior, considerando todos os outros processos.

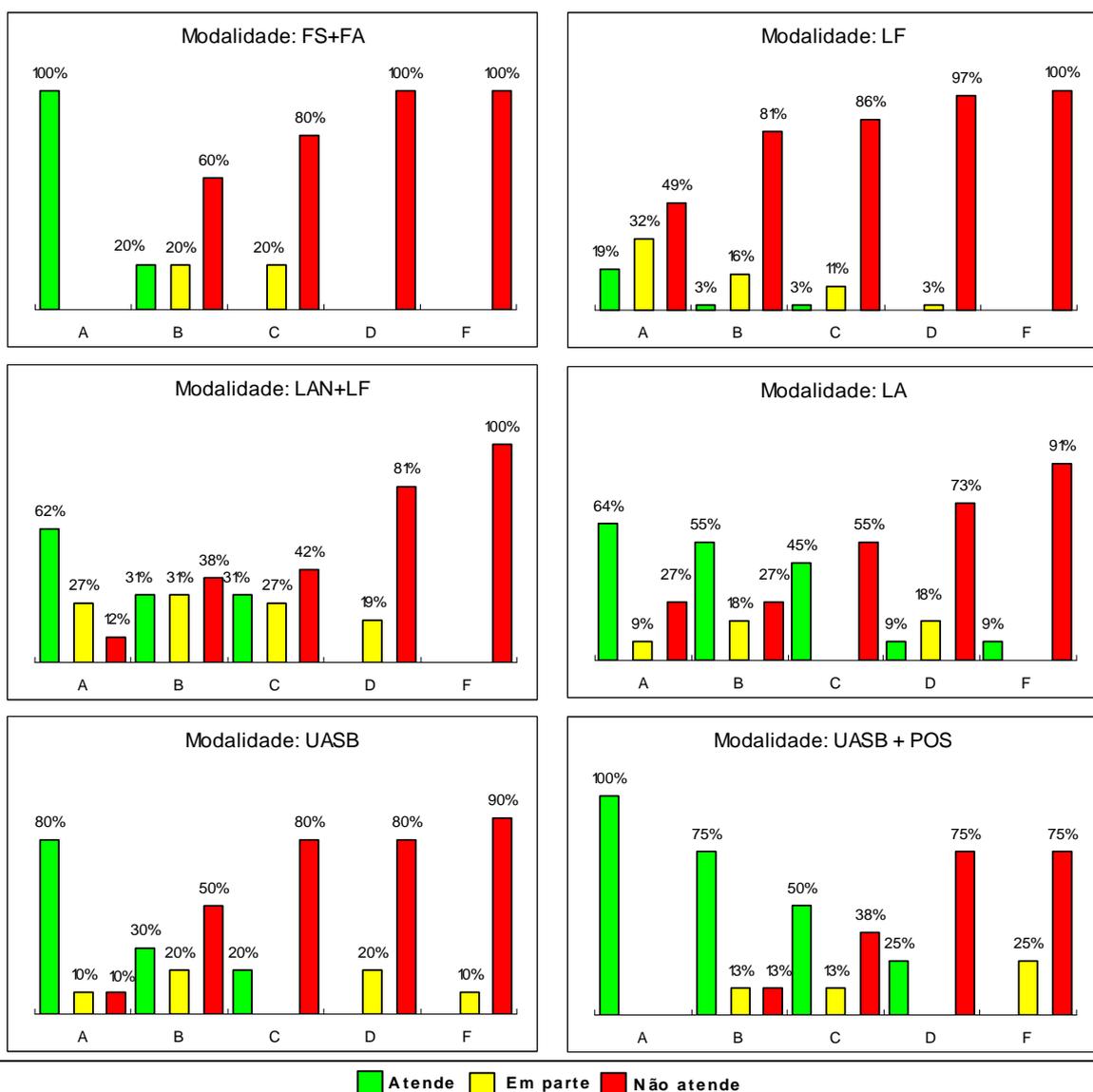


Figura 5.6 - Resultado do processo de auto-avaliação ANA, por modalidade (% de ETEs)

Uma particularidade do processo de auto-avaliação foi observada no decorrer do trabalho e deve ser ressaltada, uma vez que definiu o resultado final das análises. Como já foi mencionado, foram analisadas duas etapas para verificação do cumprimento ou não das metas estabelecidas: (1) a média trimestral de eficiência de remoção e (2) os resultados individuais de eficiência de remoção. Apenas o atendimento à segunda etapa resultou em atendimento ao padrão estabelecido, sendo irrelevante o resultado obtido na análise das médias trimestrais, quesito mais facilmente atingido pelas estações de tratamento.

5.5 Conclusões

5.5.1 Avaliação individual das ETEs

- Os resultados da avaliação individual de desempenho das ETEs estão disponibilizados no site do URBAGUA (<http://www.usp.br/fau/pesquisa/infurb/urbagua/home.html>).

5.5.2 Avaliação das modalidades de tratamento

- Um percentual pouco expressivo de ETEs atenderia às exigências contidas no manual do Prodes, considerando a frequência mínima de coleta de constituintes. O percentual de atendimento, considerando cada modalidade, seria de 0% para as FS+FA, LF e LAN+LF, de 18% para os LA, de 40% para os reatores UASB e de 50% para os UASB+POS.

5.5.2.1 Atendimento aos padrões de eficiência

- A maioria das modalidades de tratamento alcançou altos índices de atendimento ao padrão A, mas surpreenderam os baixos índices de atendimento obtidos pelas modalidades UASB (48%) e LF (61%).
- O atendimento ao padrão B esteve aquém do esperado para a maior parte das modalidades de tratamento.
- Foram muito baixos os níveis de atendimento aos padrões C (todas as tecnologias apresentaram resultados abaixo de 70%) e D (nenhum percentual de atendimento acima de 45%) por parte de todas as modalidades de tratamento.
- Somente um pequeno número de ETEs de LA (29%) e de UASB+POS (24%) obtiveram êxito em atender ao padrão F, que exige a remoção de 90% da carga afluente de DBO e de SST.
- Ficou evidente que a dificuldade de atendimento aos padrões estabelecidos pela ANA, apresentada por quase todas as tecnologias de tratamento, foi ditada pela exigência de remoção de SST.

5.5.2.2 Processo de auto-avaliação

- No processo de auto-avaliação, o desempenho do processo LA esteve aquém do esperado, principalmente se considerando o atendimento ao padrão A. Isto pode ser atribuído ao baixo desempenho de algumas ETEs específicas, que apresentaram problemas de altas

concentrações efluentes de sólidos suspensos, comprometendo o atendimento a todos os padrões.

- Foram observados bons percentuais de atendimento para as modalidades UASB+POS, não importando o tipo de pós-tratamento. O padrão A foi atendido por todas as ETEs e o desempenho foi superior ao dos outros processos considerando os padrões B, C e D.
- Apenas o atendimento a uma das duas etapas envolvidas no processo de auto-avaliação foi relevante para o resultado final, mostrando que o critério de avaliação deve sofrer ajustes.

Foi observado que a maioria de ETEs em operação na região em estudo não alcançaria um desempenho satisfatório, considerando os padrões de lançamento baseados nas eficiências de remoção, estabelecidos pela ANA, deduções que podem ter sido um pouco prejudicadas pela não uniformidade dos dados disponibilizados. Acredita-se que a incorporação de um quesito referente a concentrações efluentes levaria os padrões da ANA a uma proximidade maior daqueles estabelecidos pelas legislações ambientais. Considerando-se as elevadas concentrações afluentes a alguns sistemas, tal como verificado no Capítulo 4, mesmo que os processos de tratamento atinjam as eficiências de remoção requeridas, ainda poderão estar em desconformidade com os padrões estabelecidos pela maioria das legislações ambientais. Por outro lado, em estações com baixas concentrações afluentes, poderão não ocorrer violações dos padrões de lançamento, ainda que as ETEs não consigam alcançar as eficiências de remoção exigidas. Outro aspecto que deve ser ressaltado é a grande variação do nível de monitoramento praticado pelas diversas ETEs, considerando a frequência de amostragem e os parâmetros monitorados, além da qualidade de operação e manutenção adotada. Neste sentido, a contribuição do Prodes pode ser muito grande por ser um fator catalisador de boa qualidade de monitoramento das ETEs, já que adota critérios definidos para amostragens, incluindo frequências mínimas de coleta e tipos de amostragens do afluente e efluente. Aliado a isto, apresenta um programa rígido de monitoramento e fiscalização em que são avaliados também aspectos de gestão do empreendimento, permitindo avaliar se o desempenho apresentado é sustentável em todo o período de operação.

6 AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO A LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS

6.1 Introdução

Este capítulo descreve a metodologia utilizada e os resultados obtidos na avaliação de desempenho das estações de tratamento de esgotos considerando o atendimento a diversos padrões de lançamento de efluentes, determinados a partir dos limites de lançamento preconizados pelas legislações estaduais de alguns estados brasileiros.

Num primeiro momento, foram adotados três critérios de avaliação, a partir da composição das legislações vigentes nos estados de Minas Gerais e de São Paulo, considerando a concentração de 60 mg/L de DBO no efluente (único parâmetro, dentre os constituintes investigados, coberto pelos padrões de lançamento dos dois Estados) e percentuais de eficiência de remoção de 80% e 60%. O objetivo desta análise foi retratar a capacidade real de atendimento aos padrões de lançamento em vigor nos estados em que se localizavam as diversas ETEs. As legislações consideradas foram a Deliberação Normativa COPAM n^o 10, de 16 de dezembro de 1986 e a alteração estabelecida pela DN COPAM n^o 46, de 9 de agosto de 2001, de Minas Gerais, e o Decreto n^o 8468, de 8 de setembro de 1976, de São Paulo.

De posse dos resultados obtidos nesta primeira etapa, foi efetuada uma pesquisa acerca de legislações vigentes em outros estados brasileiros e na Comunidade Européia, para elaboração de metas hipotéticas de lançamento, visando verificar os níveis de atendimento que seriam atingidos pelas ETEs em estudo. Estes padrões estipulados procuraram considerar limites mais usuais nas legislações e que retratassem condições mais realistas, abrangentes e variadas de concentrações e eficiências de remoção, considerando os resultados apresentados pelas ETEs avaliadas. O conhecimento do alcance obtido pelas modalidades de tratamento em operação no país a estas metas hipotéticas de lançamento poderá ser útil para implementação de padrões mais ajustados à nossa realidade.

Todos os dados disponibilizados pelas estações de tratamento foram testados quanto à conformidade com as metas estabelecidas e os resultados obtidos pelas modalidades foram determinados a partir das médias dos percentuais de atendimento das diversas ETEs. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA e Kruskal-Wallis ANOVA), e as diferenças entre os percentuais de atendimento obtidos pelos processos de

tratamento foram testadas pelos testes de Tukey (paramétrico) e teste de medianas, seguido pelo teste de comparações múltiplas de classes para todos os grupos (não paramétrico), a um nível de significância de 5%.

6.2 Metodologia

6.2.1 Avaliação do atendimento aos três critérios

Para avaliação do atendimento aos padrões de lançamento preconizados pelas legislações estaduais foram analisados todos os dados de DBO efluente de todas as ETEs, considerando as modalidades de tratamento citadas na Tabela 4.7, no Item 4.3.2.2. Como já mencionado, para a composição dos critérios foram consideradas as legislações DN COPAM nº 10/86 e a alteração estabelecida pela DN COPAM nº 46/01, de Minas Gerais, e o Decreto nº 8468/76, de São Paulo. Deve-se destacar que, de acordo com a Resolução CONAMA 357/05, em qualquer situação, deverá ser atendido o padrão do corpo d'água receptor, em função de sua classe.

Em Minas Gerais, a DN COPAM 010/86 estabelece que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados nos corpos d'água desde que a concentração de DBO atinja, no máximo, 60 mg/L. Este limite poderá ser ultrapassado em situações onde estudos de autodepuração de corpos d'água receptores comprovarem que os padrões de qualidade serão resguardados e o sistema de tratamento reduzir a carga poluidora dos efluentes, em termos de DBO em, no mínimo, 85%. A alteração estabelecida pela DN COPAM 46/01, especificamente para esgotos domésticos e percolados de aterros sanitários municipais, preconiza que este limite máximo poderá ser ultrapassado quando os sistemas de tratamento de águas residuárias reduzirem a carga poluidora do efluente em, no mínimo, 60%.

Em São Paulo, o Decreto 8468/76 permite que os efluentes de qualquer fonte poluidora sejam lançados, direta ou indiretamente, nas coleções de água, desde que a concentração máxima de DBO seja de 60 mg/L. Este limite poderá ser ultrapassado quando os sistemas de tratamento apresentarem uma eficiência de remoção da carga poluidora de, no mínimo, 80%.

Desta forma, foram utilizados três critérios, baseados numa composição das legislações em vigor nos dois Estados, para a avaliação de todas as ETEs:

- Critério 1 - concentração de DBO no efluente igual ou inferior a 60 mg/L;

- Critério 2 - concentração de DBO no efluente igual ou inferior a 60 mg/L ou percentual de eficiência de remoção igual a, no mínimo, 80%;
- Critério 3 - concentração de DBO no efluente igual ou inferior a 60 mg/L ou percentual de eficiência de remoção igual a, no mínimo, 60%.

Avaliou-se cada dado individual de todas as ETEs, verificando se este atendia ao limite adotado. Ao final da análise dos dados de cada ETE, o percentual de atendimento a este critério era computado, considerando-se o quociente entre o número de dados que atendiam e o número total de dados válidos.

Ao final da avaliação das ETEs de todas as modalidades, considerando os três critérios, foi efetuada a média aritmética dos percentuais de atendimento individuais obtidos pelas diversas estações de tratamento. O procedimento foi utilizado para as seis modalidades de tratamento selecionadas para estudo.

Para comprovação dos resultados obtidos, foram utilizados os testes paramétricos ANOVA e Teste de Tukey e os testes não paramétricos Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas, seguido pelo teste de comparações múltiplas de classes para todos os grupos, já mencionados no Capítulo 4.

6.2.2 Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas

6.2.2.1 Legislações pesquisadas para elaboração das novas metas

A inclusão de outros critérios de atendimento baseou-se em diversas diretrizes e legislações adotadas por outros estados brasileiros e pela Comunidade Européia (Council of the European Communities, 1991). Além dos estudos efetuados por von Sperling e Nascimento (1999, 1999b), foram consultadas outras legislações estaduais brasileiras para determinação dos novos padrões a serem adotados. A pesquisa foi efetuada, preliminarmente, por meio de acessos eletrônicos a páginas de órgãos ambientais oficiais dos diversos estados. Quando a informação sobre os padrões de lançamento de efluentes não estava disponível, eram enviadas cartas aos mesmos órgãos solicitando esclarecimentos sobre as legislações vigentes. Alguns estados não responderam aos questionamentos e, na ausência de informações, considerou-se que era adotada a Resolução CONAMA 357/05.

As legislações dos estados brasileiros que foram identificados como possuindo instrumentos legais próprios, relativos ao lançamento de efluentes, estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Legislações estaduais que tratam de lançamento de efluentes domésticos em corpos d'água

| Estado | Instrumento legal |
|--------------------|--|
| Acre | Lei Estadual n.º 1.500/03 |
| Alagoas | Decreto Estadual 6.200 de 01/03/85 |
| Amazonas | Lei Estadual n.º 2712/01 (ainda não regulamentada) |
| Ceará | Portaria N.º 154 de 22/07/02 |
| Goiás | Decreto n.º 1.745, de 06/12/79 |
| Mato Grosso do Sul | Deliberação CECA/MS 003 de 20/06/97 |
| Minas Gerais | Deliberação Normativa COPAM 010/86 Deliberação Normativa COPAM 046/01 |
| Paraná | Norma Técnica COPAM 301/88 |
| Pernambuco | CPRH N 2.002 de 21/02/00 |
| Rio de Janeiro | Diretriz 215.R-1 de 26/04/94 |
| Rio Grande do Sul | Portaria 05/89 SSMA |
| Rondônia | Decreto Estadual 7.903 de 01/07/97 |
| Santa Catarina | Decreto Estadual 14.250 de 05/06/81 |
| São Paulo | Decreto Estadual 8.468 de 08/09/76 |

Destaca-se que os órgãos ambientais estaduais podem adotar os mesmos padrões da Resolução CONAMA 357/05, complementá-los ou eventualmente aplicar padrões mais restritivos. Algumas legislações estaduais estabelecem limites de lançamento para DBO, DQO, coliformes termotolerantes, fósforo total e nitrogênio total, parâmetros ausentes na legislação nacional.

A Tabela 6.2 apresenta os padrões de lançamento para as concentrações e eficiências de remoção preconizadas pelas diversas legislações brasileiras e pela Comunidade Européia.

Alguns padrões de emissão adotados pelos estados consideram apenas as concentrações dos constituintes, enquanto outros adotam também eficiências mínimas de remoção.

Os padrões de lançamento de DBO e SST adotados pelo estado do Rio de Janeiro são variáveis em função da carga orgânica, modelo também estabelecido no estado de Pernambuco para DBO e DQO. Já o estado do Rio Grande do Sul adota uma abordagem de padrões para DBO, SST e DQO segundo faixas de vazão.

Tabela 6.2 - Padrões de emissão para concentrações e eficiências de remoção segundo algumas legislações estaduais brasileiras e Comunidade Européia

| Padrões adotados | DBO | | DQO | | SST | | NT | | PT | | CF |
|----------------------------|--------|---------------|--------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|------------------|---------------|--------------|
| | (mg/l) | Efic. mín (%) | (mg/l) | Efic. mín (%) | (mg/l) | Efic. mín (%) | (mg/l) | Efic. mín (%) | (mg/l) | Efic. mín (%) | (NMP/100 ml) |
| Alagoas (1985) | 60 | | 150 | | | | | | | | |
| Ceará (2002) | 60 | | 200 | | 50 ⁽¹⁾ | | | | | | 5.000 |
| Goiás (1978) | 60 | 80 | | | | | | | | | |
| Mato Grosso do Sul (1997) | 60 | | | | | | | | | | |
| Minas Gerais (1986) | 60 | 85 | 90 | 85 | 60 | | | | | | |
| Minas Gerais (2001) | 60 | 60 | 90 | 60 | | | | | | | |
| Paraíba (1988) | 60 | 80 | | | | | 10 ⁽²⁾ | | 1 ⁽²⁾ | | |
| Pernambuco (2000) | Var. | | Var. | | | | | | | | |
| Rio de Janeiro (1994) | Var. | | | | Var. | Var. | 10 | | 1 | | |
| Rio Grande do Sul (1989) | Var. | | Var. | | | | 10 | | 1 | | 3.000 |
| Rondônia (1997) | | | | | - | | | | | | |
| Santa Catarina (1981) | 60 | 80 | | | | | 10 ⁽²⁾ | | 1 ⁽²⁾ | | |
| São Paulo (1976) | 60 | 80 | | | | | | | | | |
| Comunidade Européia (1991) | 25 | Var. | 125 | 75 | Var. | Var. | Var. | Var. | Var. | 80 | |

Obs.: Var. – concentração e/ou eficiência de remoção variável

(1) Para efluentes de lagoas de estabilização, a concentração de SST será de 150 mg/L

(2) Para lançamentos em trechos de corpos d'água contribuintes de lagoas, lagoas e represas

A Comunidade Européia, através da Deliberação nº 91/271/EEC de 21/05/1991 (Council of the European Communities, 1991), especifica as faixas de eficiência de remoção e as concentrações para DBO (de 70 a 90% e 25 mg/L), para DQO (75% e 125 mg/L) e SST (variável em função da população equivalente e diferenciadas para lagoas) para os efluentes de estações de tratamento de efluentes urbanos domésticos e industriais. Estabelece, ainda, padrões complementares para NT e PT, variáveis segundo a população equivalente, no caso de lançamento em corpos d'água sensíveis.

A Tabela 6.3 mostra uma síntese dos padrões de lançamento investigados, considerando as concentrações e eficiências de remoção. Como, em alguns casos, os valores das concentrações de determinados parâmetros foram variáveis com a vazão, população ou carga orgânica, a tabela apresenta a faixa de valores (valor mínimo e valor máximo). A partir desta síntese foram estabelecidas as outras metas de qualidade apresentadas no item que se segue.

Tabela 6.3 – Faixas de concentrações e eficiências de remoção preconizadas pelas legislações estaduais brasileiras e Comunidade Européia

| Legislação | Limites | Parâmetro | | | | | |
|---|---------------------------|------------------|---------|----------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| | | DBO ₅ | DQO | SST | NT | PT | CF |
| | | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (NMP/100mL) |
| Legislações estaduais brasileiras | Concentrações (mín-máx) | 20 - 200 | 60-450 | 30 - 200 | 10 ⁽¹⁾ | 1 ⁽¹⁾ | 3000 - 5000 ⁽²⁾ |
| | Eficiência de remoção (%) | 30 - 90 | 40 - 90 | 30 - 90 | | | |
| Comunidade Européia (efluentes urbanos) | Concentrações (mín-máx) | 25 | 125 | 35 - 150 | 10 - 15 ⁽¹⁾ | 1 - 2 ⁽¹⁾ | - |
| | Eficiência de remoção (%) | 70 - 90 | 75 | 70 - 90 | 70 - 80 | 80 | |

(1) Padrão de emissão aplicável no caso de descarga em corpos d'água sensíveis

(2) A faixa para CF não é considerada representativa, apenas retrata as concentrações constantes nas legislações investigadas.

6.2.2.2 Metas de qualidade adotadas

A partir dos limites de lançamento preconizados pelas legislações consultadas foram determinados valores de concentrações efluente e de eficiências de remoção a serem adotadas no estudo. Estes padrões estipulados, apresentados na Tabela 6.4, procuraram considerar limites mais usuais nas legislações e que retratassem condições mais realistas, abrangentes e variadas de concentrações e eficiências de remoção, considerando os resultados apresentados pelas ETEs avaliadas.

Tabela 6.4 – Metas de emissão adotadas para avaliação das tecnologias de tratamento

| Metas adotadas | Constituintes | | | | | |
|------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| | DBO ₅ | DQO | SST | NT | PT | CF |
| | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (NMP/ 100ml) |
| Concentrações efluente | 20 | 50 | 20 | 10 | 1 | 10 ² |
| | 40 | 100 | 40 | 15 | 2 | 10 ³ |
| | 60 | 150 | 60 | 20 | 3 | 10 ⁴ |
| | 80 | 200 | 80 | 25 | 4 | 10 ⁵ |
| | 100 | 250 | 100 | 30 | 5 | 10 ⁶ |
| | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (Unid. log) |
| Eficiências de remoção | 60 | 55 | 60 | 80 | 85 | 1 |
| | 70 | 65 | 70 | | | 2 |
| | 80 | 75 | 80 | | | 3 |
| | 90 | 85 | 90 | | | 4 |
| | | | | | | 5 |
| | | | | | | 6 |

Ressalta-se que estes padrões ou metas foram analisados de forma independente, isto é, os padrões de um constituinte não foram associados aos dos outros. Assim, como exemplo, a concentração adotada para DBO, de 20 mg/l, não estava associada à de DQO (50 mg/l) ou à qualquer outra estipulada para os outros constituintes.

Para avaliação do atendimento a estas metas de lançamento foram analisados todos os dados de DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, efluentes, e das eficiências de remoção destes constituintes, considerando as ETEs das seis modalidades de tratamento anteriormente mencionadas.

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Avaliação do atendimento aos três critérios

A análise do atendimento aos padrões de lançamento preconizados pelas legislações estaduais foi efetuada para todos os dados de DBO efluente de todas as 166 ETEs. A totalização dos resultados, considerando as médias dos atendimentos aos três critérios, foi computada para as seis tecnologias selecionadas e os resultados são apresentados na forma de gráficos de barras e de “box-whisker” na Figura 6.1.

Pela observação dos gráficos “box-whisker”, percebe-se que os resultados obtidos por quase todas as ETEs dentro de suas modalidades foram bastante variáveis, com exceção das FS+FA que mostraram resultados sempre muito baixos. Deve-se ressaltar, como apresentado na Tabela 4.8, que as concentrações de DBO no esgoto bruto foram muito elevadas, usualmente superiores a 300 mg/l, o que dificultou o atendimento a este critério. No caso da modalidade FS+FA as concentrações de DBO afluente atingiram valores médios superiores a 600 mg/L.

Os gráficos mostram claramente que o critério 1 é o mais restritivo dos três avaliados, já que contempla apenas o resultado de concentração efluente e não a eficiência de remoção de DBO. Quatro, das seis tecnologias de tratamento analisadas, apresentaram percentuais de atendimento bastante baixos. Apenas os processos de lodos ativados (LA) e os reatores UASB seguidos de pós-tratamento (UASB+POS) obtiveram bons resultados (86 e 78%, respectivamente).

Conforme esperado, as modalidades, de uma maneira geral, apresentaram expressivas elevações nos índices de atendimento, considerando o critério 2 (concentração de DBO \leq 60 mg/L ou eficiência de remoção \geq 80%). Destaque deve ser dado às lagoas facultativas (LF) que obtiveram quase 200% de aumento nos níveis de atendimento, considerando o obtido para o critério 1. Os sistemas LAN+LF também apresentaram uma acentuada elevação, chegando a níveis de atendimento bastante próximos dos obtidos por LA e UASB+POS. Os resultados

obtidos por LA e UASB+POS pouco se alteraram, devido ao bom desempenho já apresentado, considerando o critério 1.

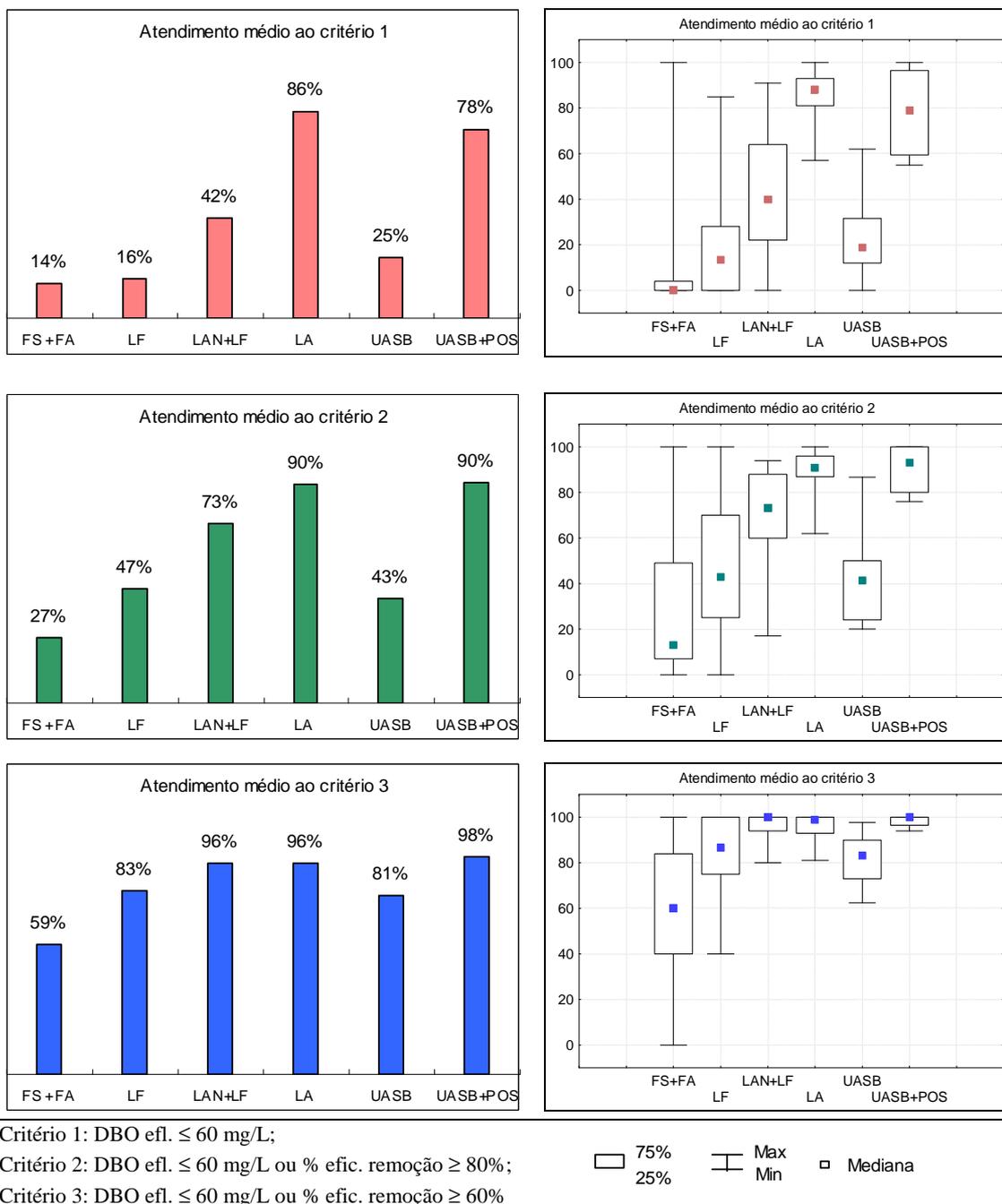


Figura 6.1 – Média dos atendimentos aos três critérios de atendimento

Considerando o critério 3 (concentração de DBO ≤ 60 mg/L ou eficiência de remoção $\geq 60\%$) as elevações nas taxas de atendimento percentual são ainda mais acentuadas, excetuando-se os resultados obtidos por LA e UASB+POS. Para estes dois processos de tratamento a redução do quesito eficiência de remoção não foi tão substancial (cerca de 11 e 26% de elevação,

respectivamente), devido ao bom desempenho obtido considerando todos os critérios. Apenas as FS+FA apresentaram um índice pouco expressivo de atendimento, chamando a atenção o percentual sempre igual a zero obtido por uma ETE da modalidade, mas deve-se salientar que os resultados tiveram mais que 100% de aumento em relação ao critério 2.

Os resultados dos testes estatísticos para verificação de diferenças significativas entre os atendimentos obtidos são apresentados na Tabela 6.5. Nela são apresentados o percentual de atendimento a cada critério, o número de ETEs avaliadas dentro de cada modalidade e a interpretação dos resultados obtidos nos testes estatísticos, o que permitiu a avaliação comparativa de desempenho das diversas tecnologias de tratamento.

Tabela 6.5 – Desempenho das tecnologias de tratamento, a partir da interpretação dos testes estatísticos

| Atendimento médio obtido pelas tecnologias aos critérios | | | | | | | Interpretação dos resultados dos testes estatísticos |
|--|-------|----|--------|----|------|----------|--|
| | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS | |
| Nº ETEs avaliadas | 19 | 73 | 43 | 13 | 10 | 8 | |
| Critério 1 (%) | 14 | 16 | 42 | 86 | 25 | 78 | FS+FA = LF < LAN+LF, LA e UASB+POS LAN+LF = UASB < LA, UASB+POS LA = UASB+POS |
| Critério 2 (%) | 27 | 47 | 73 | 90 | 43 | 90 | FS+FA < LF, LAN+LF, LA e UASB+POS LF = UASB < LA, LAN+LF e UASB+POS FS+FA = UASB |
| Critério 3 (%) | 59 | 83 | 96 | 96 | 81 | 98 | FS+FA < LF, LAN+LF, LA, UASB e UASB+POS LAN+LF > LF, UASB |

Critério 1: DBO efl. ≤ 60 mg/L;

Critério 2: DBO efl. ≤ 60 mg/L ou % efic. remoção ≥ 80%;

Critério 3: DBO efl. ≤ 60 mg/L ou % efic. remoção ≥ 60%.

Tomando o critério 1 como exemplo de interpretação dos resultados, os atendimentos médios apresentados pelas modalidades FS+FA e LF não podem ser considerados significativamente diferentes um do outro, mas são significativamente inferiores (“<”) aos obtidos pelos outros processos. Não foi detectada diferença significativa entre os desempenhos dos processos LAN+LF e UASB, que acusaram, no entanto, atendimentos significativamente inferiores aos apresentados pelos LA e UASB+POS.

Como pode ser observado, os testes confirmaram estatisticamente o pior desempenho da modalidade FS+FA, considerando os três critérios de atendimento. Da mesma forma, os desempenhos das tecnologias LA e UASB+POS se mostraram significativamente superiores aos apresentados pelas outras modalidades, considerando os três critérios. Ressalta-se que, à

medida que os critérios foram ficando menos restritivos, as diferenças observadas entre os tratamentos foram decrescendo, fato refletido nos resultados dos testes.

6.3.2 Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas

Para avaliação do atendimento às metas de lançamento adotadas, foram analisados todos os dados de DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, efluentes, e das eficiências de remoção destes constituintes, considerando as 166 ETes das seis modalidades de tratamento anteriormente mencionadas. A totalização dos resultados, considerando os percentuais de atendimento às diversas metas adotadas para os constituintes, foi efetuada e os resultados foram apresentados na forma de gráficos de “box-whisker”. O detalhamento e discussão dos resultados foi efetuado considerando cada constituinte individualmente, como apresentado a seguir.

Metas de lançamento para DBO

Na Figura 6.2, os quatro primeiros gráficos são relativos às metas de eficiência de remoção adotadas para o estudo, e os demais retratam os percentuais de atendimento às metas de concentração efluente de DBO, para o conjunto de 166 ETes avaliadas. Cabe ressaltar que os valores expressam a razão entre o número de dados, avaliados um a um, que atenderam aos padrões e o número total de amostras coletadas.

Conforme já verificado em outras análises efetuadas nos capítulos anteriores, foi grande a variabilidade observada nos desempenhos das ETes dentro de cada modalidade e entre os processos de tratamento. Nos gráficos apresentados na Figura 6.2 é possível perceber que algumas tecnologias mostram dificuldades para alcance de metas consideradas muito pouco restritivas, como eficiências de remoção de 60% e concentrações efluentes de 100 mg/L de DBO. Este foi o caso, principalmente, das FS+FA, cuja mediana dos percentuais de atendimento esteve sistematicamente abaixo dos valores apresentados pelas outras modalidades. No entanto, em geral, bons resultados foram observados dentro de todas as tecnologias, mostrando que as limitações não podem ser atribuídas aos processos de tratamento mas, talvez, a eventuais problemas de projeto, operação e manutenção das unidades.

Dentro deste enfoque, procurou-se destacar as ETes que obtiveram os melhores desempenhos e adotá-las como um referencial dentro de sua modalidade. Assim, o desempenho alcançado

pelas ETEs que se destacaram poderia ser considerado factível e poderia ser almejado por todas as outras que empregassem o mesmo processo de tratamento.

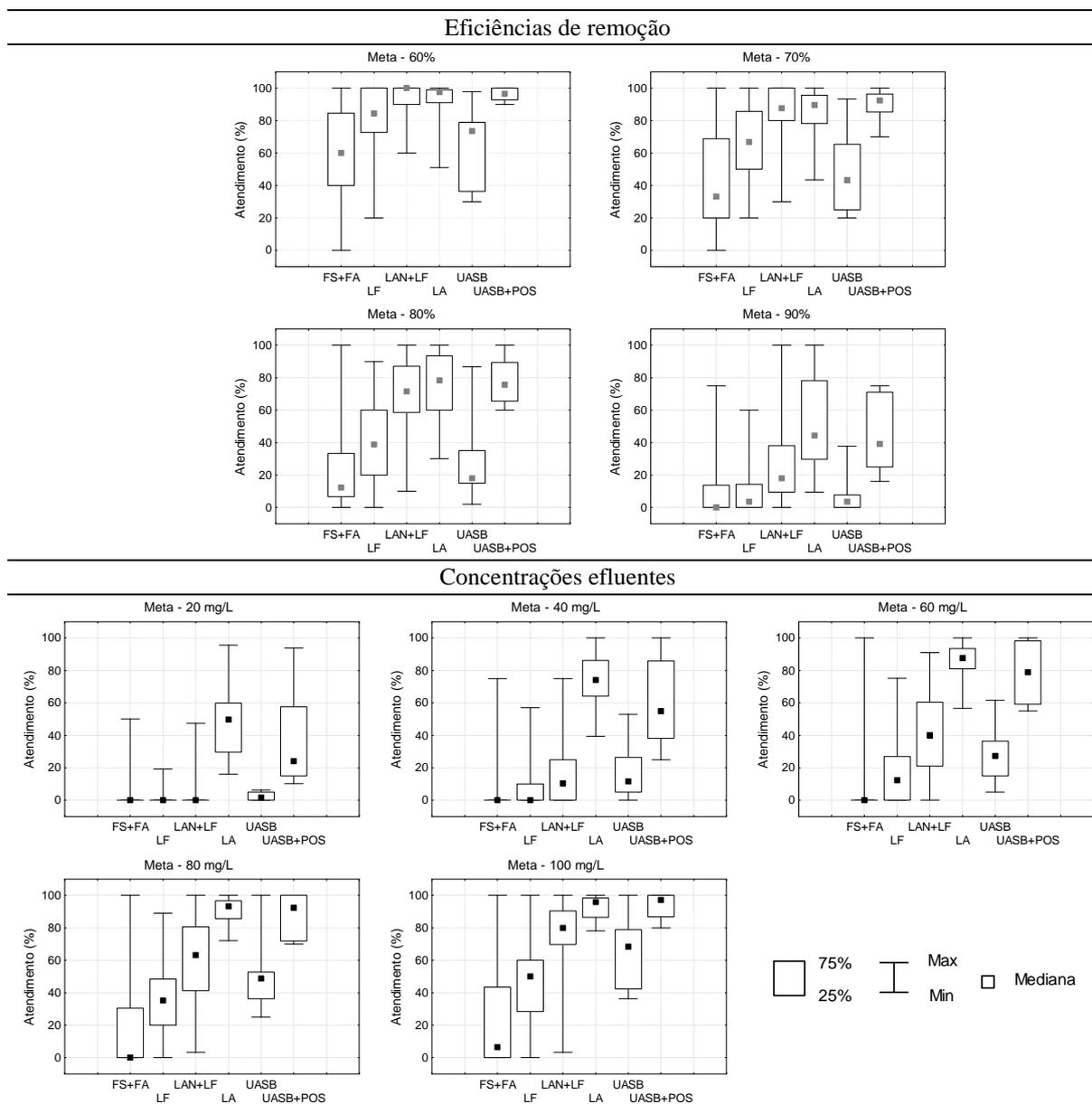


Figura 6.2 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de **DBO** (conjunto de 166 ETEs)

Para isto foi utilizado um critério arbitrário e bastante exigente para a seleção das ETEs de melhor desempenho que, neste caso, só seriam eleitas quando 95% dos dados atendessem às metas estabelecidas para DBO.

De uma maneira geral, as comprovações de cumprimento aos padrões de lançamento de efluentes variam bastante e adotam, como no caso da Deliberação nº 91/271/EEC (Council of the European Communities, 1991), percentuais que variam com o número de amostras anuais,

podendo chegar a um número máximo de 25 violações em caso de amostragens diárias. No caso da Alemanha, o cumprimento é considerado satisfatório se 80% dos eventos amostrados estiverem dentro dos padrões e nenhum resultado exceda o limite em mais que 100% (CCME, 2005).

A Tabela 6.6 relaciona as ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas estabelecidas para DBO, e apresenta o número de unidades e o percentual que elas representam dentro de suas modalidades.

Tabela 6.6 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para DBO

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------|-------|---------|----------|----------|---------|---------|------------|
| Concentração efluente (mg/L) | 20 | 0 | 0 | 0 | 1 (8%) | 0 | 0 |
| | 40 | 0 | 0 | 0 | 2 (15%) | 0 | 1 (13%) |
| | 60 | 1 (5%) | 0 | 0 | 3 (23%) | 0 | 3 (38%) |
| | 80 | 1 (5%) | 0 | 3 (7%) | 5 (38%) | 1 (10%) | 4 (50%) |
| | 100 | 1 (5%) | 2 (3%) | 8 (18%) | 7 (54%) | 1 (10%) | 4 (50%) |
| Eficiências de remoção (%) | 60 | 2 (11%) | 19 (26%) | 31 (70%) | 7 (54%) | 1 (10%) | 5 (63%) |
| | 70 | 1 (5%) | 8 (11%) | 15 (35%) | 4 (31%) | 0 | 3 (38%) |
| | 80 | 1 (5%) | 0 | 2 (5%) | 2 (15%) | 0 | 2 (25%) |
| | 90 | 0 | 0 | 2 (5%) | 2 (15%) | 0 | 0 |

O que se observa é que até algumas metas muito restritivas e adotadas em países desenvolvidos, como as de 20 mg/L de DBO efluente, seriam atendidas por uma ETE da modalidade lodos ativados convencional. Vale ressaltar que 94% dos dados de um reator UASB seguido por filtro anaeróbio também atenderam a esta meta. O padrão de 60 mg/L, preconizado pela DN COPAM 010/86 de Minas Gerais, não foi atendido por nenhum dos sistemas de lagoas ou reatores UASB operando sem pós-tratamento, fato já evidenciado nas análises anteriores. Considerando as eficiências de remoção, a meta de 90% seria atendida por duas ETEs de LA e duas LAN+LF.

Metas de lançamento para DQO

Os resultados das análises dos dados de DQO, considerando as diversas metas propostas, são apresentados na Figura 6.3 e o número e percentual de ETEs que tiveram os melhores desempenhos são mostrados na Tabela 6.7.

Na avaliação do atendimento a metas de DQO, fica evidente o desempenho superior apresentado pelos processos de lodos ativados, representado por uma ETE da modalidade aeração prolongada, que se mostrou capaz de atingir valores bastante restritivos para concentrações efluentes (50 mg/L) e obter elevadas eficiências de remoção (85%). Os outros processos de tratamento foram capazes de atender apenas concentrações e eficiências de remoção bem menos exigentes. O bom resultado obtido por uma fossa-filtro (eficiência de 75%) pode ser atribuído mais à elevada concentração presente no esgoto bruto que a um desempenho efetivo da ETE.

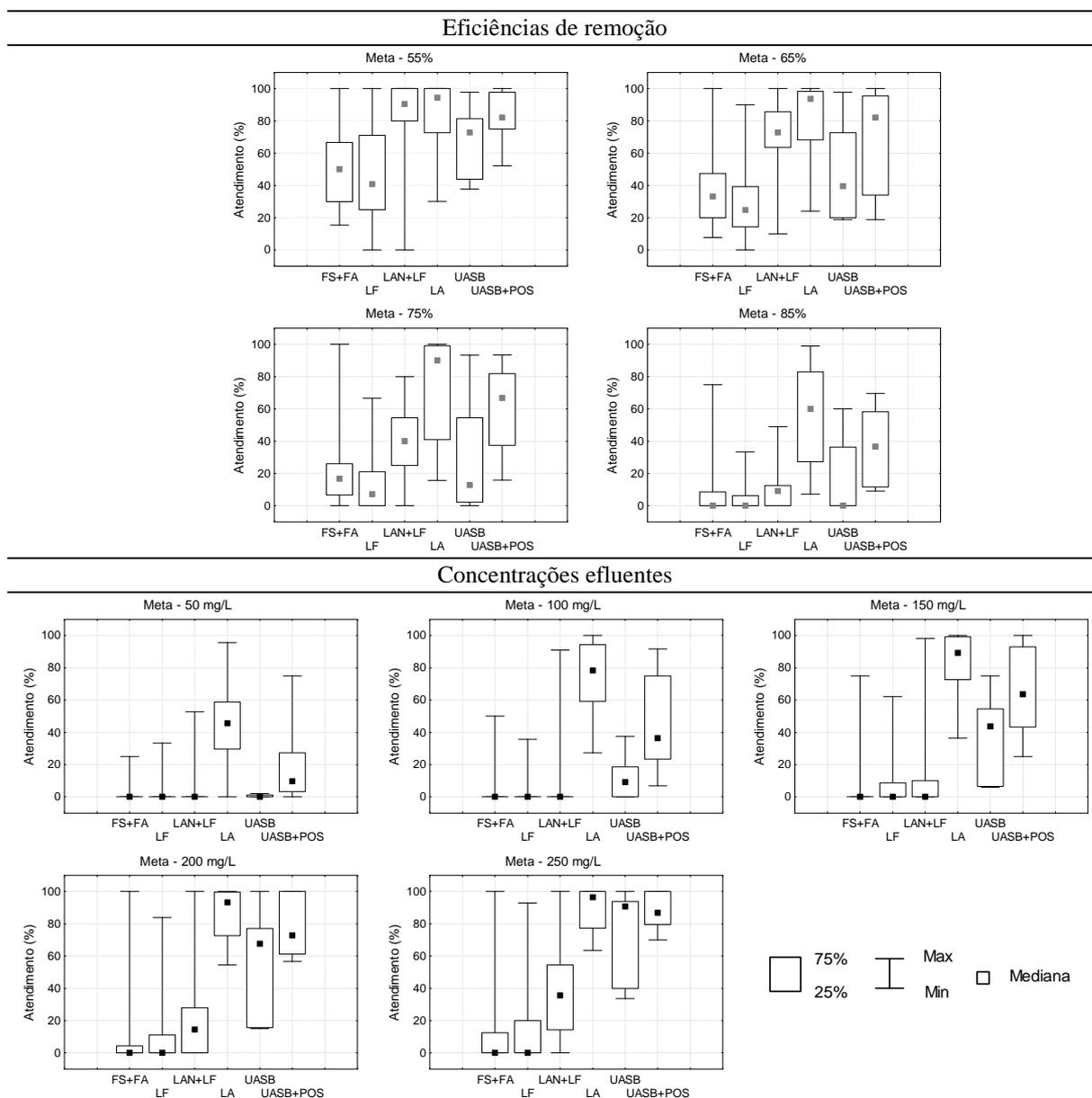


Figura 6.3 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de **DQO** (conjunto de 166 ETEs)

Tabela 6.7 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para DQO

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------|-------|---------|--------|----------|---------|---------|------------|
| Concentração efluente (mg/L) | 50 | 0 | 0 | 0 | 1 (9%) | 0 | 0 |
| | 100 | 0 | 0 | 0 | 2 (18%) | 0 | 0 |
| | 150 | 0 | 0 | 1 (2%) | 4 (36%) | 0 | 1 (14%) |
| | 200 | 1 (6%) | 0 | 1 (2%) | 5 (45%) | 1 (14%) | 3 (43%) |
| | 250 | 1 (6%) | 0 | 1 (2%) | 7 (64%) | 1 (14%) | 3 (43%) |
| Eficiências de remoção (%) | 55 | 2 (12%) | 4 (6%) | 12 (29%) | 4 (36%) | 1 (14%) | 2 (29%) |
| | 65 | 1 (6%) | 0 | 5 (12%) | 4 (36%) | 0 | 2 (29%) |
| | 75 | 1 (6%) | 0 | 0 | 4 (36%) | 0 | 0 |
| | 85 | 0 | 0 | 0 | 2 (18%) | 0 | 0 |

Metas de lançamento para SST

Os percentuais médios de atendimento às diversas metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de SST são apresentados na Figura 6.4 e a Tabela 6.8 lista as unidades que mereceram destaque pelo melhor desempenho obtido.

O desempenho dos diversos sistemas de tratamento, também neste caso, foi muito variado. Apenas um reator UASB seguido por filtro anaeróbio foi capaz de atingir a meta de 20 mg/L de SST no efluente, desempenho superior a todos os outros. O fraco desempenho obtidos pelos sistemas compostos por lagoas pode ser atribuído à presença de algas no efluente, uma vez que os dados de concentração utilizados foram referentes a amostras não filtradas.

Metas de lançamento para os nutrientes

Os resultados relativos aos atendimentos médios às metas de concentrações efluentes e eficiências de remoção dos nutrientes NT e PT são apresentados nas Figuras 6.5 e 6.6 e nas Tabelas 6.9 e 6.10, respectivamente, e são discutidos conjuntamente.

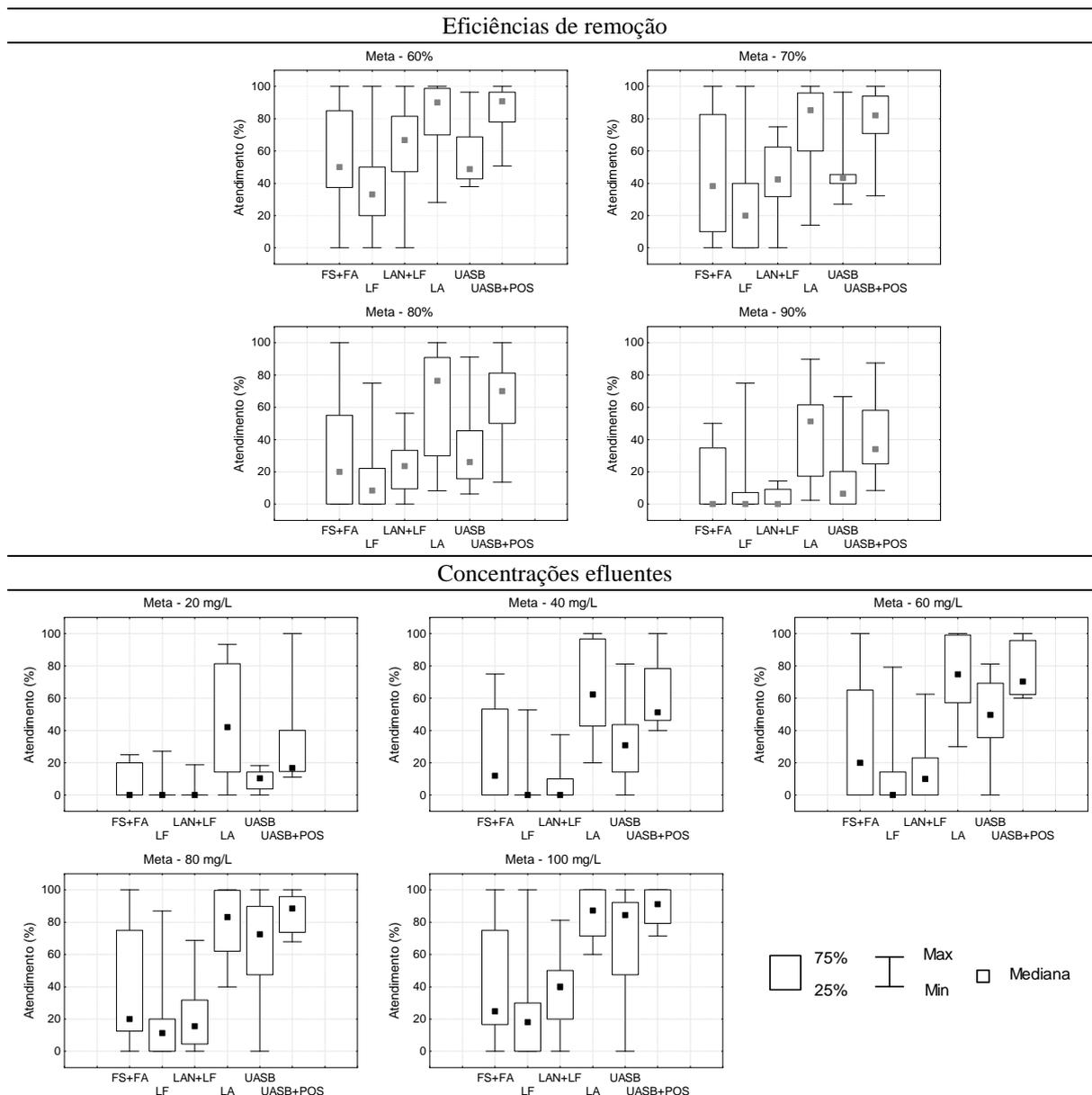


Figura 6.4 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de **SST** (conjunto de 166 ETEs)

Tabela 6.8 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para SST

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------|-------|---------|---------|----------|---------|---------|------------|
| Concentração efluente (mg/L) | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 (13%) |
| | 40 | 0 | 0 | 0 | 3 (27%) | 0 | 1 (13%) |
| | 60 | 1 (11%) | 0 | 0 | 4 (36%) | 0 | 2 (25%) |
| | 80 | 1 (11%) | 0 | 0 | 4 (36%) | 1 (10%) | 2 (25%) |
| | 100 | 1 (11%) | 1 (2%) | 0 | 4 (36%) | 2 (20%) | 3 (38%) |
| Eficiências de remoção (%) | 60 | 1 (11%) | 8 (13%) | 2 (6%) | 5 (45%) | 1 (10%) | 3 (38%) |
| | 70 | 1 (11%) | 1 (2%) | 0 | 4 (36%) | 1 (10%) | 2 (25%) |
| | 80 | 1 (11%) | 1 (2%) | 0 | 2 (18%) | 0 | 1 (13%) |
| | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

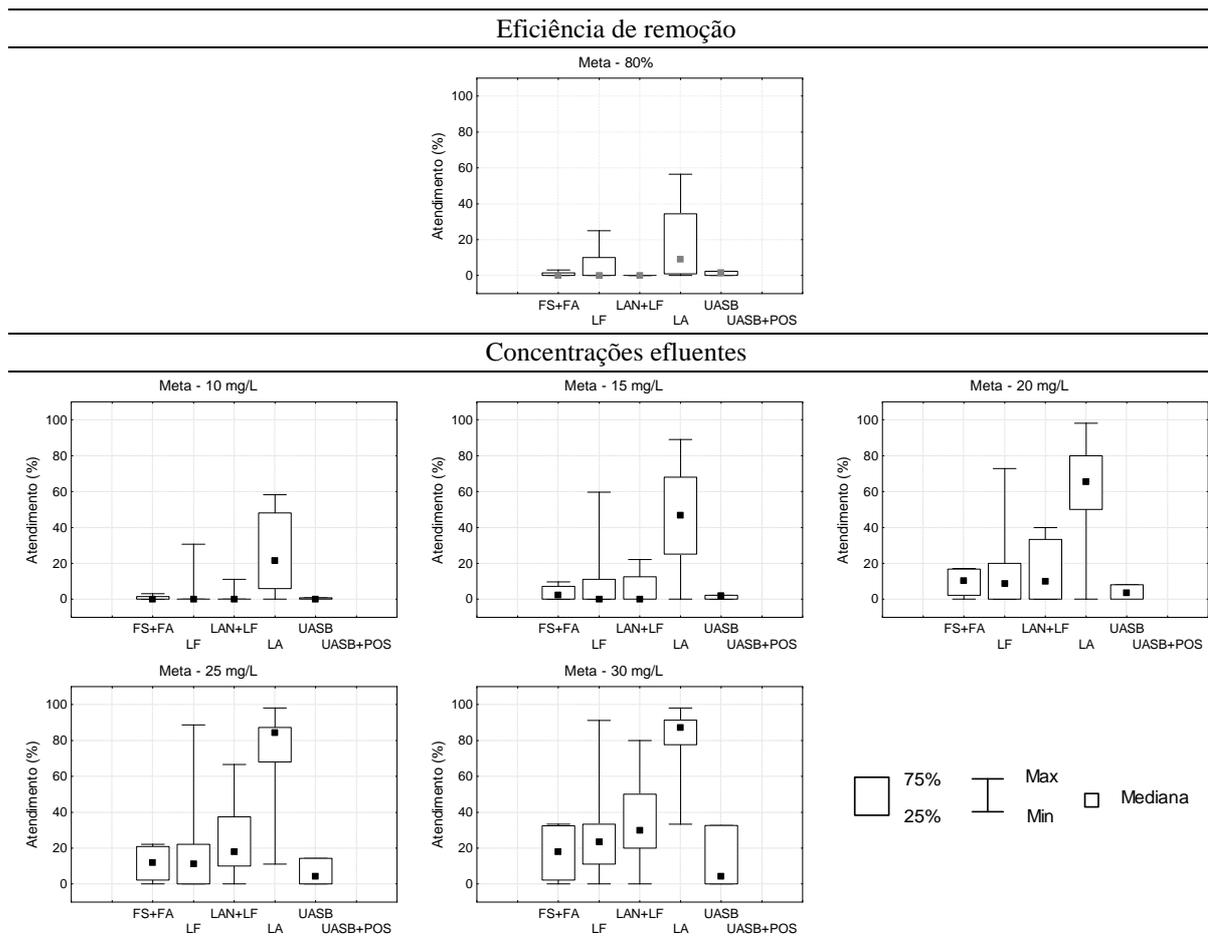


Figura 6.5 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de NT (conjunto de 166 ETEs)

Tabela 6.9 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para NT

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------|-------|---------|----|----------|---------|------|------------|
| Concentração efluente (mg/L) | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 1 (13%) | 0 | |
| | 25 | 0 | 0 | 0 | 1 (13%) | 0 | |
| | 30 | 0 | 0 | 0 | 1 (13%) | 0 | |
| Eficiência de remoção (%) | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

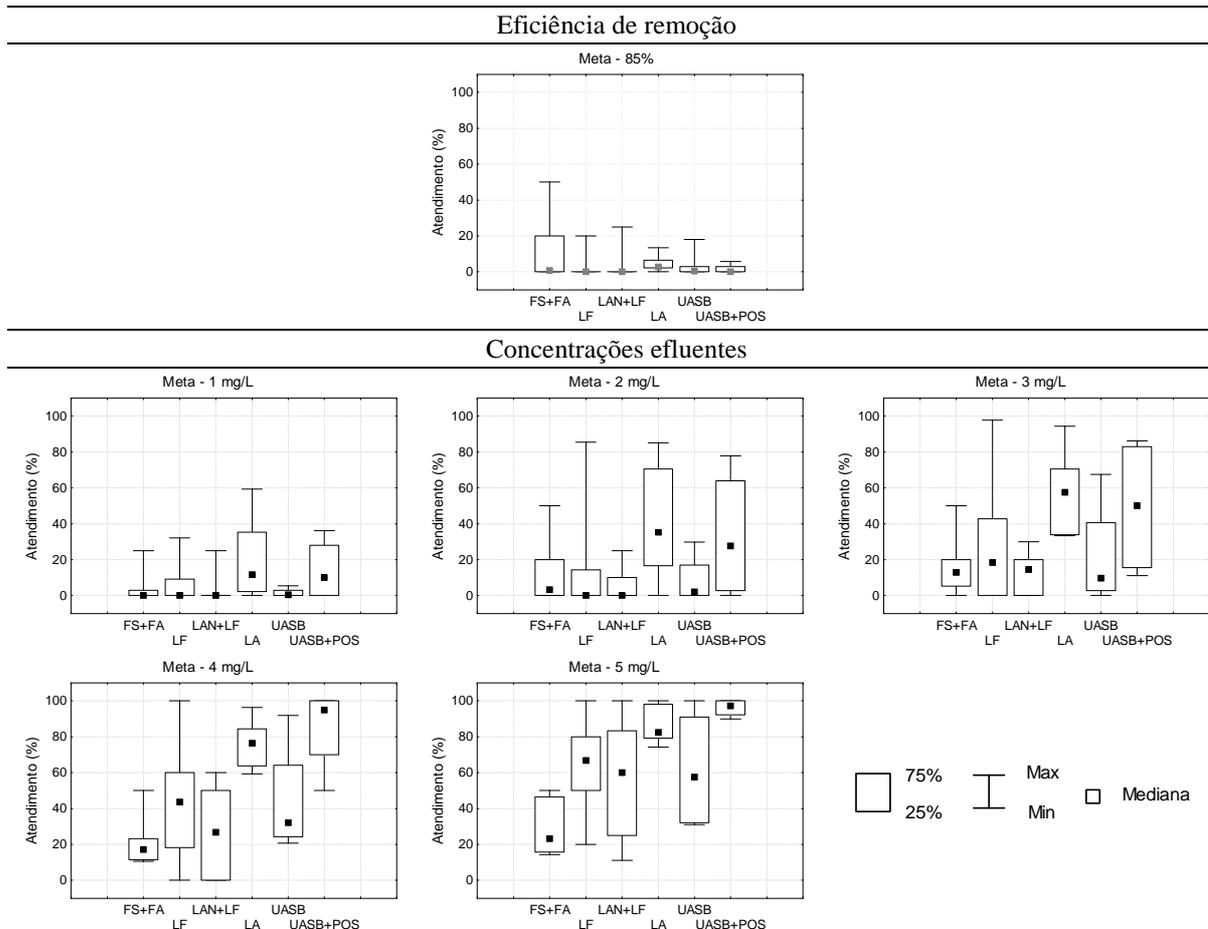


Figura 6.6 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de **PT** (conjunto de 166 ETEs)

Tabela 6.10 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para PT

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------|-------|---------|---------|----------|---------|---------|------------|
| Concentração efluente (mg/L) | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 1 (6%) | 0 | 1 (14%) | 0 | 0 |
| | 4 | 0 | 1 (6%) | 0 | 1 (14%) | 0 | 2 (50%) |
| | 5 | 0 | 3 (17%) | 1 (7%) | 2 (29%) | 1 (25%) | 2 (50%) |
| Eficiência de remoção (%) | 85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

As metas estipuladas para NT foram as mais difíceis de serem alcançadas, considerando todas as tecnologias de tratamento. Apenas uma ETE de LA conseguiu ter 95% dos dados iguais ou abaixo da concentração de 20, 25 ou 30 mg/L. A meta de 3 mgP/L no efluente foi alcançada por uma LF e por uma ETE de LA. As eficiências de remoção analisadas para os dois constituintes não foram alcançadas por nenhuma unidade, considerando todas as modalidades.

Metas de lançamento para CF

Os resultados das análises dos dados de coliformes termotolerantes, considerando as diversas metas propostas, são apresentados na Figura 6.7 e o número e percentual de ETEs que tiveram os melhores desempenhos são mostrados na Tabela 6.11. Os percentuais médios de atendimento às metas adotadas para as eficiências de remoção foram apresentados em unidades logarítmicas removidas.

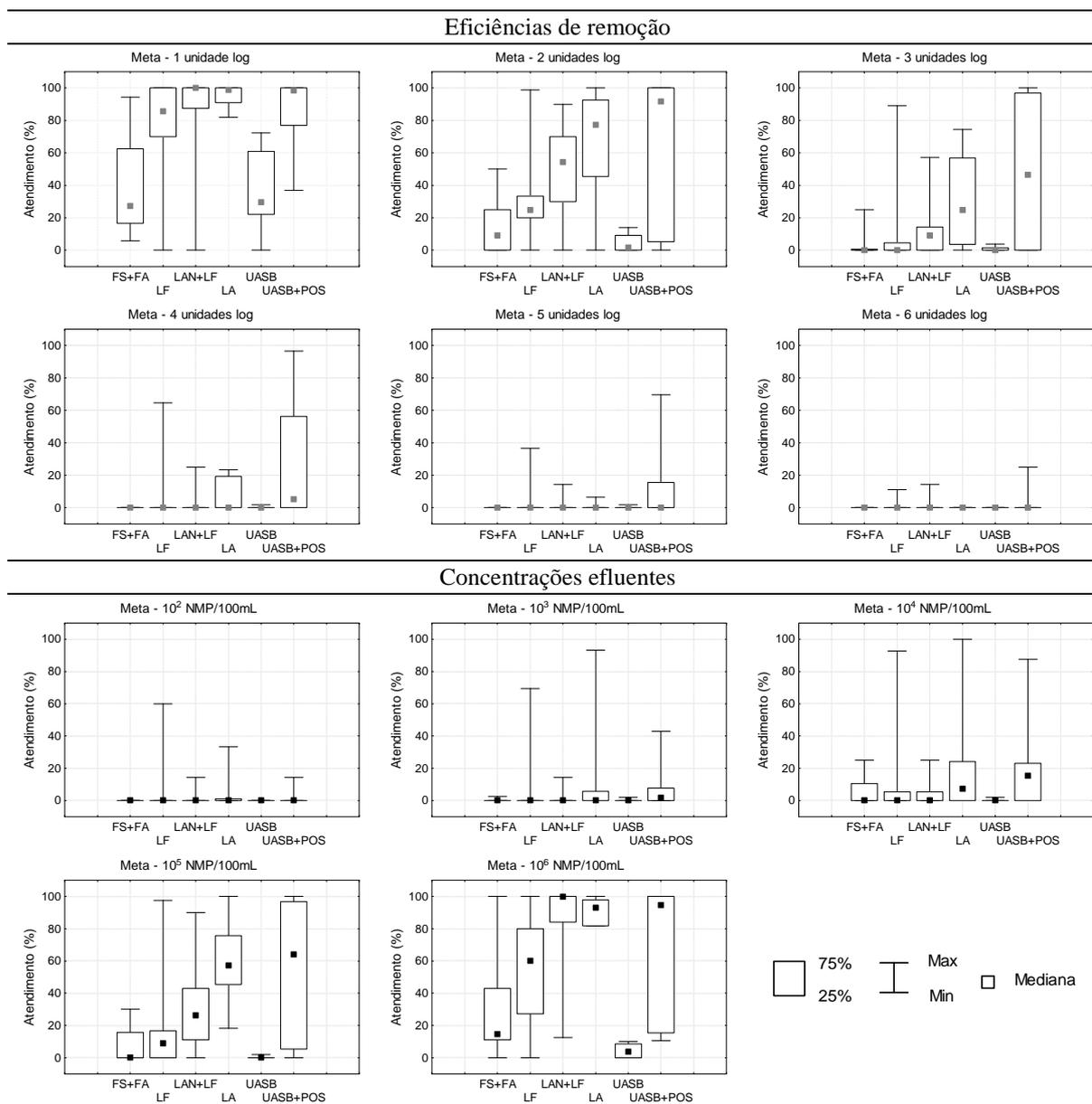


Figura 6.7 - Percentual médio de atendimento às metas adotadas para concentração efluente e para eficiência de remoção de CF (conjunto de 166 ETEs)

Tabela 6.11 - Número e percentual de ETEs que tiveram 95% dos dados atendendo às metas propostas para CF

| | Metas | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------------------|-----------------|---------|----------|----------|---------|------|------------|
| Concentração efluente (NMP/100mL) | 10 ² | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 ³ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 10 ⁴ | 0 | 0 | 0 | 1 (14%) | 0 | 0 |
| | 10 ⁵ | 0 | 1 (2%) | 0 | 1 (14%) | 0 | 1 (33%) |
| | 10 ⁶ | 1 (7%) | 7 (14%) | 22 (56%) | 3 (43%) | 0 | 3 (50%) |
| Eficiências de remoção (Unid. log) | 1 | 0 | 13 (28%) | 25 (64%) | 5 (71%) | 0 | 4 (67%) |
| | 2 | 0 | 1 (2%) | 0 | 1 (14%) | 0 | 2 (33%) |
| | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 (33%) |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 (17%) |
| | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Considerando as concentrações efluentes adotadas para CF, o melhor desempenho foi obtido pelos LA, seguidos pelas LF e UASB+POS. No entanto, as maiores eficiências de remoção foram obtidas por um reator UASB seguido de lagoas de polimento, como seria de se esperar, que apresentou uma remoção de 4 unidades logarítmicas (99,99%).

Síntese dos resultados obtidos

Os resultados de atendimentos percentuais obtidos, considerando todas as metas, foram sintetizados e avaliados, de maneira conjunta, para verificação dos melhores desempenhos obtidos pelas seis tecnologias de tratamento. A Tabela 6.12 mostra as metas mais restritivas que cada modalidade conseguiu alcançar, considerando o critério adotado.

Tabela 6.12 - Metas de qualidade alcançadas pelas ETEs de melhor desempenho (95% de atendimento), dentro das modalidades

| | Metas | Unidade | FS + FA | LF | LAN + LF | LA | UASB | UASB + POS |
|------------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|
| Concentração efluente | DBO | (mg/L) | 60 | 100 | 80 | 20 | 80 | 40 |
| | DQO | (mg/L) | 200 | - | 150 | 50 | 200 | 150 |
| | SST | (mg/L) | 60 | 100 | - | 40 | 80 | 20 |
| | NT | (mg/L) | - | - | - | 20 | - | * |
| | PT | (mg/L) | - | 3 | 5 | 3 | 5 | 4 |
| | CF | (NMP/100mL) | 10 ⁶ | 10 ⁵ | 10 ⁶ | 10 ⁴ | - | 10 ⁵ |
| Eficiências de remoção | DBO | (%) | 80 | 60 | 90 | 90 | 60 | 80 |
| | DQO | (%) | 75 | 55 | 65 | 85 | 55 | 65 |
| | SST | (%) | 80 | 70 | 60 | 80 | 70 | 80 |
| | NT | (%) | - | - | - | - | - | - |
| | PT | (%) | - | - | - | - | - | - |
| | CF | (Unid. log) | - | 2 | 1 | 2 | - | 4 |

- Nenhuma das metas avaliadas foi atingida

* Não foram disponibilizados dados para análise

O que se percebe é que os resultados variaram bastante, dependendo do processo de tratamento avaliado. Algumas ETEs das modalidades LA e UASB+POS se mostraram capazes de alcançar padrões bastante restritivos, adotados em alguns países desenvolvidos, considerando alguns constituintes. No entanto, para a grande maioria dos sistemas, os resultados mostraram uma grande dificuldade e, em vários casos, total incapacidade das ETEs em alcançar, inclusive, os padrões vigentes nos estados consultados.

Foi observado que as ETEs que alcançaram os melhores resultados, em geral, apresentaram os menores desvios-padrão, fato que caracteriza uma maior estabilidade do processo.

6.4 Conclusões

6.4.1 Avaliação do atendimento aos três critérios

- O atendimento ao critério 1 (concentração efluente de DBO ≤ 60 mg/L) mostrou-se difícil de alcançar por quatro das seis modalidades de tratamento analisadas. Apenas os processos LA e UASB+POS obtiveram bons resultados (86 e 76%, respectivamente).
- Estes baixos resultados podem ser atribuídos, em parte, às elevadas concentrações de DBO presentes nos esgotos brutos, usualmente superiores a 300 mg/L e, no caso da modalidade FS+FA, que apresentou os piores resultados, acima de 600 mg/L.
- As modalidades apresentaram expressivas elevações nos índices de atendimento, considerando o critério 2 (concentração de DBO ≤ 60 mg/L ou eficiência de remoção $\geq 80\%$), com destaque para as LF, que obtiveram quase 200% de aumento em relação ao critério 1.
- Quase todas as tecnologias atingiram altos níveis de atendimento ao critério 3 (concentração de DBO ≤ 60 mg/L ou eficiência de remoção $\geq 60\%$): LA (96%), LF (83%), LAN+LF (96%), UASB (81%) e UASB+POS (98%).
- Apenas as fossas-filtro (FS+FA) apresentaram um índice pouco expressivo de atendimento, mas deve-se salientar que os resultados tiveram mais que 100% de aumento em relação ao critério 2.

- Os testes estatísticos confirmaram os melhores desempenhos obtidos pelas modalidades LA e UASB+POS e os piores resultados das FS+FA, considerando os três critérios.

6.4.2 Avaliação do atendimento a metas de lançamento adotadas

Considerando as metas alcançadas pelas ETEs de melhor desempenho, representado pelos resultados das estações que apresentaram 95% dos dados atendendo às metas hipotéticas, os seguintes resultados foram obtidos:

- **FS+FA.** Este processo se mostrou capaz de atender às seguintes metas estabelecidas para concentrações efluentes: DBO (60 mg/L), DQO (200 mg/L), SST (60 mg/L), CF (10^6 NMP/100mL). As máximas eficiências atingidas foram: DBO (80%), DQO (75%), SST (80%). Nenhuma meta adotada para os nutrientes ou CF foi alcançada.
- **LF.** As lagoas facultativas tiveram como melhores resultados os atendimentos às metas: DBO (100 mg/L), SST (100 mg/L), PT (3 mg/L) e CF (10^5 NMP/100mL). Considerando as metas para eficiências de remoção: DBO (60%), DQO (55%), SST (70%) e CF (2 unidades logarítmicas). Nenhuma meta estabelecida para as concentrações efluentes de DQO e NT foram alcançadas, fato também observado para as metas de eficiência de remoção de nutrientes.
- **LAN+LF.** Os melhores resultados apresentados pelas lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas foram os atendimentos às metas: DBO (80 mg/L), DQO (150 mg/L), PT (5 mg/L) e CF (10^6 NMP/100mL), mas nenhuma meta relativa aos SST e NT foi alcançada. Considerando as metas para eficiências de remoção: DBO (90%), DQO (65%), SST (60%) e CF (1 unidade logarítmica), enquanto nenhuma remoção foi observada para os nutrientes.
- **LA.** O processo de lodos ativados mostrou-se capaz de atender a algumas metas bastante restritivas e, de modo geral, apresentou desempenhos superiores a todas as outras modalidades, exceção feita, em alguns casos, para os UASB+POS. Os melhores resultados de atendimento obtidos foram: DBO (20 mg/L), DQO (50 mg/L), SST (40 mg/L), NT (20 mg/L), PT (3 mg/L) CF (10^4 NMP/100mL). As máximas eficiências de remoção atingidas foram: DBO (90%), DQO (85%), SST (80%) e CF (2 unidades logarítmicas), mas nenhuma meta relativa aos nutrientes foi alcançada.

- **UASB.** As metas mais restritivas de atendimento alcançadas pelos reatores UASB foram: DBO (80 mg/L), DQO (200 mg/L), SST (80 mg/L) e PT (5 mg/L). Considerando as metas para eficiências de remoção: DBO (60%), DQO (55%), SST (70%).
- **UASB+POS.** Os reatores UASB, quando seguidos de pós-tratamento, mostraram desempenhos superiores aos apresentados pelos outros processos, considerando as metas propostas para SST e CF e tiveram como melhores resultados os atendimentos às metas: DBO (40 mg/L), DQO (150 mg/L), SST (20 mg/L), NT (não avaliado), PT (4 mg/L) e CF (10^5 NMP/100mL). Considerando as metas para eficiências de remoção: DBO (80%), DQO (65%), SST (80%), NT (não avaliado), PT (nenhuma) e CF (4 unidades logarítmicas).

7 INFLUÊNCIA DE FATORES DE PROJETO E OPERAÇÃO NA QUALIDADE DO EFLUENTE

7.1 Introdução

Este estudo buscou avaliar a influência de fatores de projeto e de operação no desempenho das estações de tratamento de esgotos, medido pela qualidade do efluente gerado.

Geralmente, não existe apenas uma variável responsável pela qualidade e variabilidade do efluente, que dependem de variações na carga afluente, das condições ambientais, da natureza do esgoto a ser tratado, da presença de substâncias tóxicas, da variabilidade inerente aos processos de tratamento biológicos, de falhas mecânicas e humanas no sistema. Todos estes fatores podem levar a problemas e instabilidade nos processos, o que ocasionará efeitos adversos na qualidade do efluente.

A interpretação da estabilidade de um processo, assim como da sua confiabilidade, em termos de qualidade do efluente e, mesmo sua adequação a uma determinada referência ou norma, tem sido uma prática comum, presente em estudos realizados por Niku et al. (1979, 1981b, 1982), Niku e Schroeder (1981), Jamrah (1999), Crites & Tchobanoglous (2000), von Sperling e Chernicharo (2000, 2002), Abis e Mara (2003), Metcalf & Eddy (2003), Kirkwood (2004), Mines Jr. et al. (2004), Charles et al. (2005). Estes trabalhos, de uma maneira geral, avaliaram estações de tratamento de esgotos bem monitoradas, ainda que nem sempre bem operadas, situação diferente da verificada no presente estudo. Aqui, além das dificuldades inerentes à avaliação de sistemas biológicos de tratamento, a falta de alguns dados técnicos de parâmetros de projeto e de operação dificultou ainda mais a obtenção de conclusões. Poucas modalidades disponibilizaram dados suficientes para esta avaliação e, mesmo aquelas que o fizeram, o fizeram de maneira incompleta.

Dentro das limitações que o número e a qualidade dos dados disponibilizados permitiram, o desempenho das tecnologias de tratamento foi avaliado em termos da qualidade do efluente gerado e da eficiência de remoção de DBO. Procurou-se verificar a existência de melhores desempenhos quando os sistemas trabalhavam numa faixa recomendada para os parâmetros de projeto e operação. Diante da grande variabilidade do desempenho das ETEs, tal como demonstrado nos itens anteriores, procurou-se checar, ainda, se eventuais bons ou maus desempenhos estariam relacionados a condições de subcarga ou sobrecarga, respectivamente.

Para os outros indicadores, DQO, SST, NT, PT e CF, foram efetuados apenas testes estatísticos para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações efluentes e eficiências de remoção, quando os sistemas operavam em condições de sobrecarga ou subcarga orgânica e hidráulica, tratando vazões maiores ou menores e em diferentes condições de monitoramento. A avaliação das condições de carga aplicada considerou apenas a DBO, dentro do pressuposto de que uma ETE em sobrecarga orgânica poderia ter o seu desempenho afetado também em relação aos outros constituintes.

Não foi possível a manutenção das seis tecnologias estudadas nos capítulos anteriores, já que algumas não forneceram dados dos parâmetros de projeto e operação necessários ao estudo. Este foi o caso das modalidades de fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios (FS+FA) e dos reatores UASB seguidos de pós-tratamento (UASB+POS). Assim, apenas quatro das seis tecnologias de tratamento (132 ETEs) forneceram dados suficientes para análise: (a) lagoas facultativas (LF), (b) lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF), (c) lodos ativados (LA) e (d) reatores UASB operando isoladamente (UASB).

7.2 Metodologia

A avaliação das condições operacionais foi efetuada para verificação da existência de uma relação entre parâmetros de projeto e de operação e desempenho das estações de tratamento. Os parâmetros foram calculados a partir de dados técnicos disponibilizados pelas ETEs e foram relacionados com dados de concentrações efluentes de DBO e eficiência de remoção da DBO afluente. A ênfase dada à qualidade do efluente em termos de DBO deveu-se à importância do parâmetro, à facilidade de análise dos resultados, à grande disponibilidade de dados, por ser este o único constituinte presente em padrões de lançamento de todas as legislações estaduais pesquisadas e ainda, pelo fato de que todas as estações investigadas objetivavam a sua remoção. As quatro tecnologias estudadas foram avaliadas, portanto, considerando a influência das condições de carga e das condições de operação.

Condições de carga

Foi efetuada uma comparação entre carga medida e carga recomendada para projetos, para se verificar se condições de sobrecarga ou subcarga poderiam estar afetando o desempenho. Alguns parâmetros de projeto recomendados pela literatura, considerando as modalidades selecionadas para estudo, foram utilizados para esta verificação.

As lagoas facultativas primárias e secundárias foram avaliadas considerando a taxa de aplicação superficial (L_s) e as lagoas anaeróbias dos sistemas combinados, a partir da carga orgânica volumétrica (L_v). Além dos parâmetros de projeto, foi observada, ainda, a correlação entre o TDH e a concentração efluente dos constituintes.

A taxa de aplicação superficial (L_s) é expressa em termos da carga de DBO aplicada por unidade de área da lagoa:

$$L_s = \frac{L}{A} \quad (7.1)$$

onde,

- L_s – taxa de aplicação superficial, em kgDBO/ha.d;
- L – carga de DBO total (solúvel + particulada) afluente, em kgDBO/d;
- A – área superficial da lagoa, em ha.

A taxa de aplicação volumétrica (L_v) é expressa em termos da carga de DBO aplicada por unidade de volume da lagoa:

$$L_v = \frac{L}{V} \quad (7.2)$$

onde,

- L_v – taxa de aplicação volumétrica, em kgDBO/m³.d;
- L – carga de DBO total (solúvel + particulada) afluente, em kgDBO/d;
- V – volume da lagoa, em m³.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) está associado ao volume e à vazão de projeto:

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (7.3)$$

onde,

- V – volume da lagoa, em m³;
- Q – vazão média afluente, em m³/dia;

O cálculo dos parâmetros relativos às lagoas facultativas e sistemas combinados de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas foram baseados em von Sperling (2002).

Para os processos de lodos ativados foram analisados os parâmetros de projeto: tempo de detenção hidráulica (TDH) e relação alimento sobre microrganismos (A/M) no tanque de aeração e taxa de escoamento superficial (TES) e taxa de aplicação de sólidos (TAS) no decantador secundário.

Todos os parâmetros calculados foram baseados em von Sperling (1997). A relação alimento / microrganismos (A/M) é dada pela expressão:

$$\text{Relação } A / M = \frac{Q \times DBO}{SSVTA \times V} \quad (7.4)$$

onde,

- Q – vazão afluyente média, em m³/dia;
- DBO – concentração de DBO efluente do decantador primário, para os sistemas de lodos ativados convencional (quando o dado não era disponibilizado, adotava-se uma remoção de 30% no decantador primário) e DBO do esgoto bruto, para os sistemas com aeração prolongada, em mg/L ou g/m³;
- SSVTA – concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração, em mg/L ou g/m³;
- V – volume do tanque de aeração, em m³.

O cálculo da taxa de escoamento superficial (TES) foi efetuado como a seguir:

$$TES = \frac{Q}{A} \quad (7.5)$$

onde,

- Q – vazão afluyente média, em m³/dia;
- A – área do decantador secundário, em m².

Finalmente, a taxa de aplicação de sólidos (TAS) foi obtida pela relação:

$$TAS = \frac{(Q + Qr) \times SSTA}{A} \quad (7.6)$$

onde,

- Q – vazão afluyente, em m³/dia;

- Q_r – vazão de recirculação, em m^3/dia ;
- SSTA – concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração, em mg/L ou g/m^3 ;
- A – área do decantador secundário, em m^2 .

Os parâmetros velocidade ascensional (v) e TDH foram utilizados para avaliação dos reatores UASB. A velocidade superficial do fluxo foi calculada a partir da relação expressa em Chernicharo (1997):

$$v = \frac{Q}{A} \quad (7.7)$$

onde,

- v – velocidade superficial do fluxo ou velocidade ascensional, em m/h ;
- Q – vazão, em m^3/h ;
- A – área da seção transversal do reator, em m^2 .

Condições de operação

- *Influência do porte das estações:* medida pela vazão afluente, dentro do pressuposto de que ETEs maiores poderiam estar sendo mais bem acompanhadas, monitoradas e operadas. As ETEs foram divididas em dois grandes grupos dentro de cada modalidade. O primeiro considerou 50% daquelas que tratavam as maiores vazões e no segundo foram agrupadas as ETEs consideradas de menor porte (50% restantes).

- *Influência do nível de operação das estações:* na impossibilidade de se mensurar a qualidade do nível de operação de cada ETE, analisou-se, indiretamente, pelo nível de monitoramento, denominado índice de monitoramento (IM). Este índice considerou a relação entre o número de amostras do constituinte efluente disponibilizado pela ETE e o número total de dias contidos no período de monitoramento. Este índice foi multiplicado por 365 para se ter uma base de comparação entre todos os sistemas, sendo expresso em número de amostras por ano. O mesmo critério foi utilizado para medir o nível de operação das ETEs, considerando o índice de monitoramento (IM) praticado pelas estações. No primeiro grupo foram dispostas 50% das ETEs que possuíam um maior número de amostras coletadas por ano e no segundo as de menores IM (50% restantes).

De posse dos parâmetros calculados, buscou-se, preliminarmente, efetuar uma comparação com os valores usuais de projeto encontrados na literatura especializada, por meio de uma análise gráfica. Em seguida foram efetuados testes não paramétricos de comparação de amostras múltiplas, Kruskal-Wallis, para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações de DBO efluentes e eficiências de remoção, quando as ETEs operavam nas diferentes condições de carga e operação. Como já mencionado anteriormente, estes testes não fornecem informações sobre quais grupos de amostras apresentam desempenhos diferenciados entre si, sendo necessária a aplicação de um outro teste, selecionado dentre os denominados testes “post hoc”, que examinam todas as combinações possíveis para identificar diferenças significativas entre os grupos. Neste caso, foi aplicado o teste LSD (“Fisher's least significant difference”), que detecta diferenças entre os diversos pares de médias, e é disponibilizado pelo “software” Statgraphics Centurion XV.

Para verificação de diferenças entre os desempenhos das ETEs que tratavam vazões maiores ou menores, e que praticavam um índice de monitoramento mais ou menos freqüente, foi utilizado um teste não paramétrico de comparação entre duas amostras. O teste de Mann-Whitney (teste W), que compara as medianas de dois grupos, foi utilizado com este propósito.

Para os outros indicadores, DQO, SST, NT, PT e CF, foram efetuados apenas testes estatísticos para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações efluentes e eficiências de remoção, quando os sistemas operavam em condições de sobrecarga ou subcarga orgânica e hidráulica, tratando vazões maiores ou menores e em diferentes condições de monitoramento. A avaliação das condições de carga aplicada considerou apenas a DBO, dentro do pressuposto de que uma ETE em sobrecarga orgânica poderia ter o seu desempenho afetado também em relação aos outros constituintes.

7.3 Resultados e discussão

A Tabela 7.1 apresenta as modalidades selecionadas para estudo, o número de ETEs avaliadas em cada tecnologia de tratamento e os parâmetros utilizados para comparação. Os parâmetros de literatura retratam faixas amplas, recomendadas para projeto, em virtude da diversidade de características do afluente e das condições climáticas na região de estudo. O parâmetro TDH foi incluído em quase todas as unidades de todos os processos, não pelo fato de ser um parâmetro de projeto explícito, mas por retratar condições de operação, além de ser possível seu cálculo para todos os sistemas.

Tabela 7.1 - Parâmetros de projeto e operação utilizados na avaliação das condições de carga

| Modalidade | Nº de ETEs | Parâmetros | | |
|------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|
| | | Tipo | Unidade | Intervalo usual |
| LF | 73 | L_s : taxa de aplicação superficial | kg DBO/ha.dia | 150 – 300 |
| | | TDH: tempo de detenção hidráulica | dias | 15 – 45 |
| LAN+LF | LAN | L_v : taxa de aplicação volumétrica | kg DBO/m ³ .dia | 0,10 - 0,35 |
| | | TDH: tempo de detenção hidráulica | dias | 3 – 6 |
| | LF | L_s : taxa de aplicação superficial | kg DBO/ha.dia | 150 – 300 |
| | | TDH: tempo de detenção hidráulica | dias | 8 – 20 |
| LA | TA ^(c) | Relação A/M: alimento/microrganismos | kgDBO/kgSSVTA.d | 0,3 – 0,8 (LAC) ^(a) 0,08 – 0,15 (LAP) ^(b) |
| | | TDH: tempo de detenção hidráulica | horas | 6 a 8 (LAC) 16 - 24 (LAP) |
| | DS ^(d) | TES: taxa de escoamento superficial | m ³ /m ² .h | 0,67 – 1,33 (LAC) 0,33 - 0,67 (LAP) |
| | | TAS: taxa de aplicação de sólidos | kgSSTA/m ² .h | 4 – 6 (LAC) 1 – 5 (LAP) |
| UASB | 9 | TDH: tempo de detenção hidráulica | horas | 6 – 9 |
| | | v: velocidade ascensional | m/h | 0,5 - 0,7 |

(a) LAC – Lodos ativados convencional

(b) LAP - Lodos ativados aeração prolongada

(c) TA – Tanque de aeração

(d) DS – Decantador secundário

Fonte: Adaptada de von Sperling (1997 e 2002); Chernicharo (1997)

O intervalo usual citado na Tabela 7.1 foi utilizado como referência para determinação das condições de operação dos processos de tratamento analisados. Quando, por exemplo, uma LF operava com uma taxa de aplicação superficial (L_s) acima do limite superior da faixa reportada (300 kg DBO/ha.dia), era considerada em sobrecarga. Caso operasse com uma taxa menor que o limite inferior (150 kg DBO/ha.dia), considerava-se a ETE em subcarga. No caso do tempo de detenção hidráulica (TDH), aplicava-se o raciocínio inverso, isto é, TDHs superiores ao valor máximo da faixa reportada indicavam subcarga. Este critério foi empregado para todos os parâmetros e todas as modalidades.

7.3.1 Lagoas facultativas primárias

A Figura 7.1 apresenta os gráficos que consideram a relação da DBO efluente e da eficiência de remoção com os parâmetros taxa de aplicação superficial (L_s) e tempo de detenção hidráulica (TDH), para as lagoas facultativas primárias (LF).

Pela observação da Figura 7.1, concluiu-se que, quando as ETEs operavam em condições de sobrecarga, existia uma elevação da concentração de DBO efluente, como era de se esperar. Estas conclusões foram confirmadas pelas análises estatísticas apresentadas na Tabela 7.2,

que mostra os resultados dos testes estatísticos Kruskal-Wallis e LSD, para verificação de diferenças significativas entre as medianas e médias das concentrações de DBO efluentes e eficiências de remoção, quando as lagoas operavam nas três faixas de L_s e TDH (subcarga, usual e sobrecarga). As medianas das concentrações efluentes médias de DBO, oriundas das ETEs que operavam em subcarga e sobrecarga orgânica foram consideradas significativamente diferentes, no nível de confiabilidade de 95%. No entanto, os testes não apontaram diferenças significativas entre as concentrações das ETEs que operavam em sobrecarga e com L_s usuais, corroborando o observado no gráfico, que mostra que valores bastante elevados de taxa de aplicação não conduziram a uma deterioração expressiva da qualidade do efluente. Foi observado, também, que os valores de concentração estiveram, de uma maneira geral, muito acima das faixas reportadas na literatura como típicas para esta modalidade de tratamento.

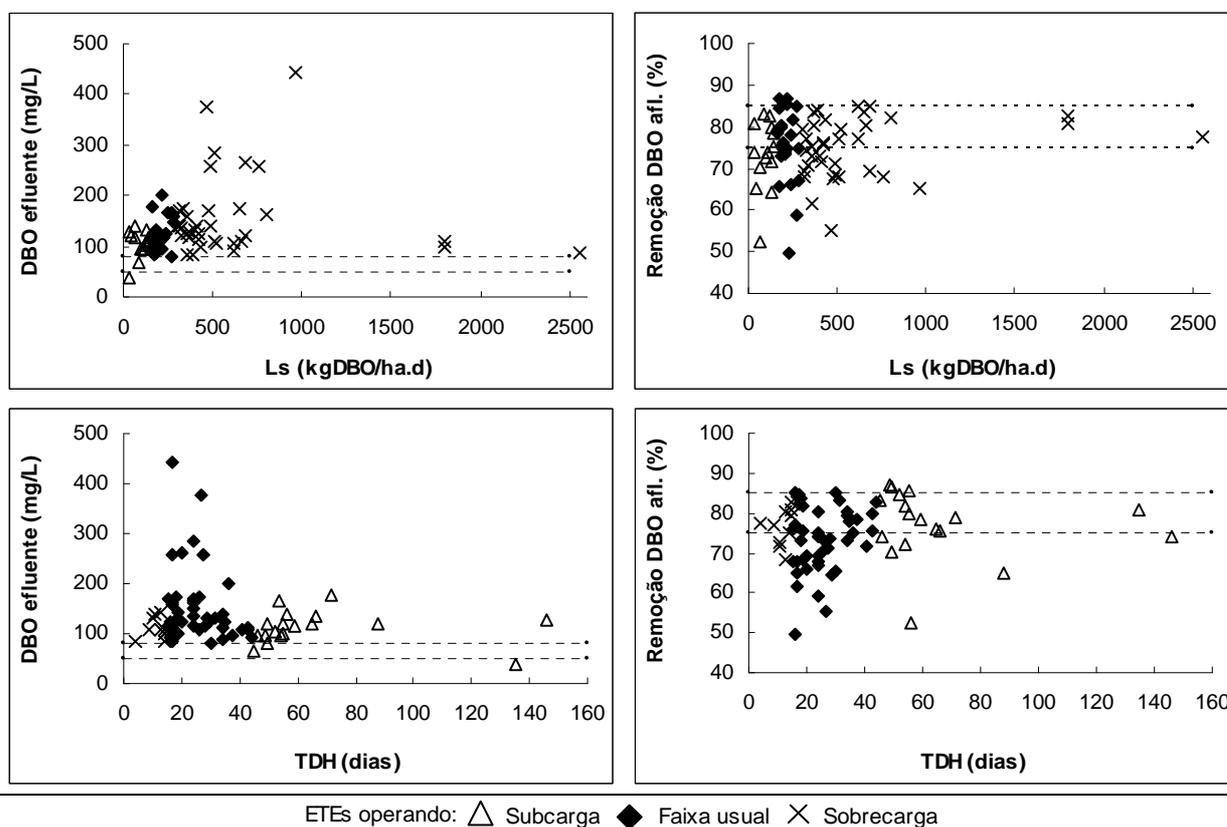


Figura 7.1 – Relação entre L_s , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LFs primárias

Nota: Faixas pontilhadas referem-se às concentrações de DBO e eficiências de remoção consideradas típicas pela literatura (von Sperling, 2005).

Tabela 7.2 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LFs primárias

| Taxa de aplicação superficial - L_s | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 105 * | 109 | 73 | 74 | Acima | 112 * | 118 | 77 | 79 |
| Usual | 125 | 118 | 75 | 76 | Usual | 152 * | 125 | 73 | 74 |
| Sobrecarga | 157 * | 132 | 75 | 76 | Abaixo | 111 | 109 | 77 | 78 |
| Valor de p | 2,6E-02 | | 5,8E-01 | | Valor de p | 2,3E-02 | | 1,6E-01 | |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Foi observada, e confirmada pelos testes estatísticos, uma ausência de relação entre a eficiência de remoção de DBO e L_s . As condições de subcarga ou sobrecarga não mostraram ter grande influência no desempenho, já que eficiências de remoção dentro ou abaixo das faixas de referência foram verificadas para ETEs operando em quaisquer das situações analisadas. No entanto, os únicos episódios de desempenho acima do limite superior da faixa reportada (melhor desempenho) foram observados para LFs operando dentro do intervalo recomendado para L_s .

A influência de maiores tempos de detenção hidráulica (TDH) no desempenho foi muito pequena, como pode ser observado nos gráficos. As ETEs que apresentaram as maiores concentrações efluentes e menores eficiências de remoção, isto é, os piores desempenhos, operavam dentro das faixas recomendadas para TDH, fato comprovado pelos testes estatísticos.

A Tabela 7.3 apresenta os valores máximo, médio (em negrito) e mínimo de vazão afluente e do índice de monitoramento (IM) apresentados pelas lagoas facultativas. A Figura 7.2 mostra os gráficos das relações entre os parâmetros que avaliam essas condições de operação e a concentração de DBO efluente e a remoção de DBO afluente.

Tabela 7.3 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LFs primárias

| Parâmetros | Máximo | Médio | Mínimo |
|------------------------------|--------|------------|--------|
| Vazões (m ³ /dia) | 4.689 | 462 | 4 |
| IM (nº amostras/ano) | 19,4 | 3,2 | 0,6 |

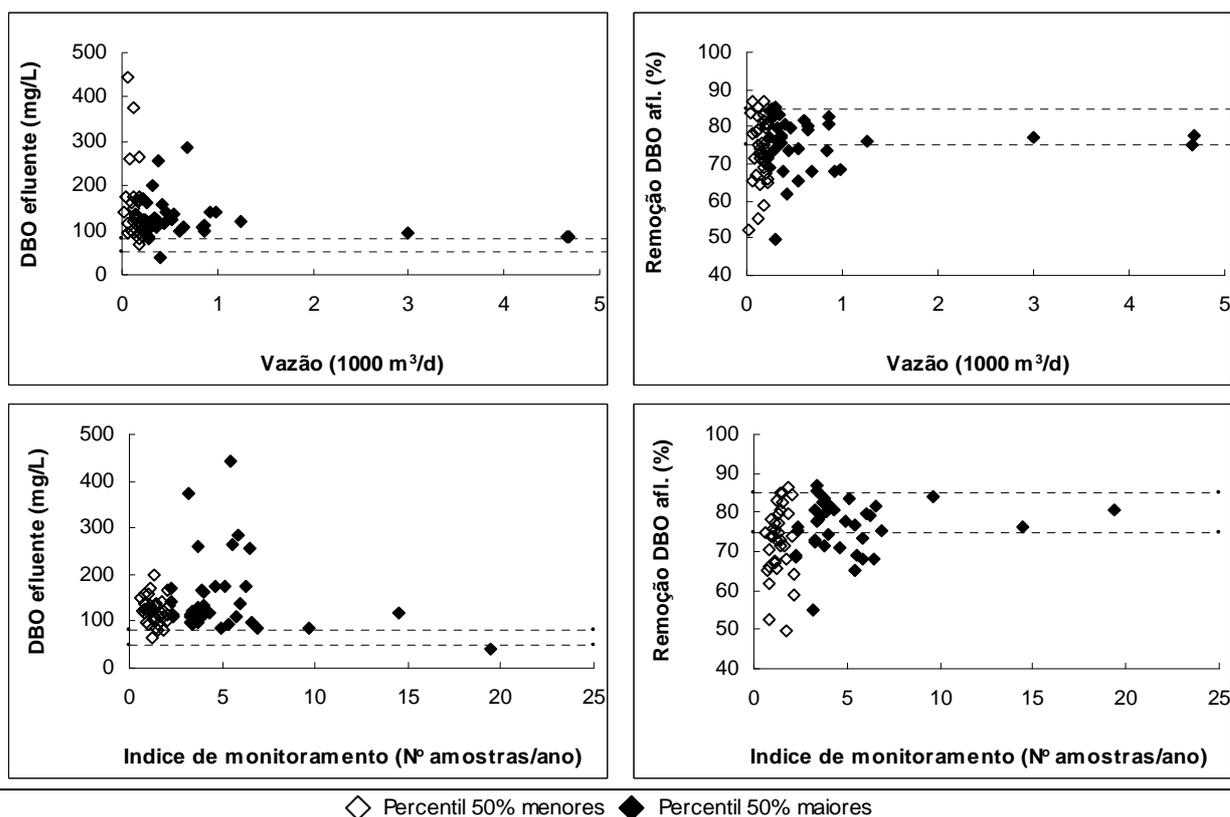


Figura 7.2 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LFs primárias

Nota: Faixas pontilhadas referem-se às concentrações de DBO e eficiências de remoção consideradas típicas pela literatura, conforme von Sperling, 2005.

Pela observação da Tabela 7.3 e da Figura 7.2, nota-se que houve uma grande amplitude considerando os valores máximos e mínimos de vazão e de IM apresentados pelas lagoas. Mas, de uma maneira geral, as ETEs que tratavam uma vazão menor não tiveram desempenhos diferenciados daquelas consideradas de maior porte. Apenas uma ligeira tendência de maiores concentrações efluentes de DBO foram observadas para as LFs de pequeno porte, apesar dos testes estatísticos não terem detectado diferenças significativas entre as medianas dos dois grupos de ETEs. Os resultados dos testes não paramétricos de comparação entre duas amostras, Mann-Whitney (teste W), são apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LFs primárias

| | Vazão | | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------|---------|----------------|---------|----|
| | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | |
| 50% menores | 149 | 127 | 74 | 74 | 50% menores | 122 | 122 | 73 | 74 |
| 50% maiores | 125 | 115 | 76 | 77 | 50% maiores | 150 | 119 | 76 | 78 |
| Valor de <i>p</i> | 1,7E-01 | | 3,2E-01 | | Valor de <i>p</i> | 5,2E-01 | | 6,2E-02 | |

Nível de significância, α , de 5%

O índice de monitoramento não pareceu ter alguma influência expressiva no desempenho das estações de tratamento, ao se analisar as concentrações efluentes. No entanto, as eficiências de remoção observadas para as ETEs com menor número de amostras coletadas foram ligeiramente inferiores, ainda que não significativas.

Os testes de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas, seguidos pelos testes de comparação múltipla das médias de todos os grupos, foram aplicados para verificação de diferenças significativas entre as eficiências de remoção das 73 lagoas facultativas e apenas uma delas mostrou um desempenho considerado significativamente inferior ao das outras. Esta ETE operava dentro das faixas recomendadas para L_s e TDH, mas tratava uma vazão de apenas $293\text{m}^3/\text{d}$ e apresentava um IM igual a 1,7 amostras/ano. Dentro do raciocínio adotado nesta avaliação, os dois últimos quesitos poderiam indicar uma pior qualidade de operação, o que favoreceria a eficiência aquém das expectativas. Não foi possível, no entanto, uma generalização das observações efetuadas, devido ao desempenho diferenciado das lagoas facultativas, considerando as diversas condições de operação.

Constituintes DQO, SST, NT, PT e CF

Como já mencionado, para os indicadores DQO, SST, NT, PT e CF, foram efetuados apenas testes estatísticos para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações efluentes e eficiências de remoção, quando os sistemas operavam em condições de sobrecarga ou subcarga orgânica e hidráulica, e quando tratavam diferentes vazões, em diferentes condições de monitoramento. Os resultados dos testes são apresentados nas Tabelas 7.5 e 7.6.

Tabela 7.5 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs primárias

| Constituinte | Taxa de aplicação superficial - L_s | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | |
|--------------|---------------------------------------|------------|----------|------------|--------------|------------------------------------|------------|------------|--------------|
| | | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | Acima | Usual | Abaixo | Valor de p |
| Conc. DQO | Média | 411 * | 511 | 595 * | | 440 * | 579 * | 471 | |
| | Mediana (mg/L) | 389 | 556 | 576 | 3,1E-03 | 433 | 560 | 444 | 1,6E-02 |
| Efic. DQO | Média | 52 | 56 | 54 | | 56 | 53 | 57 | |
| | Mediana (%) | 55 | 56 | 52 | 6,1E-01 | 62 | 52 | 59 | 4,7E-01 |
| Conc. SST | Média | 214 | 212 | 224 | | 211 | 219 | 222 | |
| | Mediana (mg/L) | 206 | 201 | 191 | 4,7E-01 | 205 | 196 | 189 | 9,4E-01 |
| Efic. SST | Média | 43 | 48 | 50 | | 47 | 47 | 50 | |
| | Mediana (%) | 48 | 50 | 56 | 9,4E-01 | 50 | 50 | 53 | 7,7E-01 |
| Conc. NT | Média | 25 * | 34 * | 45 * | | 44 | 44 | 42 | |
| | Mediana (mg/L) | 25 | 36 | 43 | 1,9E-02 | 45 | 45 | 41 | 4,8E-01 |
| Efic. NT | Média | 48 | 11 | 20 | | -1 | 42 | 36 | |
| | Mediana (%) | 36 | 38 | 35 | 6,0E-01 | 33 | 33 | 36 | 6,9E-01 |
| Conc. PT | Média | 3,2 * | 4,4 | 5,5 * | | 6,7 | 4,8 | 4,0 | |
| | Mediana (mg/L) | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 7,8E-02 | 5,0 | 4,0 | 4,0 | 9,0E-01 |
| Efic. PT | Média | 54 | 46 | 41 | | 42 | 47 | 52 | |
| | Mediana (%) | 56 | 43 | 45 | 3,7E-01 | 44 | 47 | 52 | 6,5E-01 |
| Conc. CF | Média | 3,96E+05 * | 1,09E+06 | 1,54E+06 * | | 3,46E+05 * | 1,44E+06 * | 1,42E+06 * | |
| | Mediana (mg/L) | 3,18E+05 | 6,56E+05 | 1,20E+06 | 4,1E-05 | 3,50E+05 | 1,12E+06 | 8,03E+05 | 3,8E-05 |
| Efic. CF | Média | 2,04 * | 1,76 * | 1,36 * | | 1,67 | 1,70 | 1,17 | |
| | Mediana (%) | 2,01 | 1,74 | 1,35 | 2,0E-04 | 1,73 | 1,57 | 1,22 | 1,6E-02 |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Tabela 7.6 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs primárias

| Constituinte | Vazão | | | | IM | | |
|--------------|---------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | | 50% menores | 50% maiores | Valor de p | 50% menores | 50% maiores | Valor de p |
| Conc. DQO | Média | 549 | 505 | | 525 | 533 | |
| | Mediana (mg/L) | 558 | 524 | 4,9E-01 | 536 | 527 | 5,2E-01 |
| Efic. DQO | Média | 53 | 56 | | 50 | 59 | |
| | Mediana (%) | 52 | 57 | 2,6E-01 | 50 | 59 | 3,0E-03 |
| Conc. SST | Média | 236 | 196 | | 242 | 183 | |
| | Mediana (mg/L) | 213 | 181 | 5,7E-02 | 260 | 162 | 5,7E-03 |
| Efic. SST | Média | 44 | 52 | | 42 | 56 | |
| | Mediana (%) | 47 | 57 | 1,4E-01 | 39 | 58 | 4,8E-03 |
| Conc. NT | Média | 37 | 40 | | 15 ** | 40 | - |
| | Mediana (mg/L) | 40 | 43 | 3,6E-01 | 15 | 42 | |
| Efic. NT | Média | 19 | 23 | | 67 ** | 19 | - |
| | Mediana (%) | 33 | 35 | 4,5E-01 | 67 | 35 | |
| Conc. PT | Média | 4,7 | 4,3 | | 3,5 | 4,8 | |
| | Mediana (mg/L) | 4,0 | 4,0 | 5,4E-01 | 4,0 | 4,0 | 1,9E-01 |
| Efic. PT | Média | 41 | 51 | | 47 | 44 | |
| | Mediana (%) | 46 | 47 | 3,2E-01 | 48 | 43 | 4,6E-01 |
| Conc. CF | Média | 9,74E+05 | 1,32E+06 | | 1,50E+06 | 8,28E+05 | |
| | Mediana (mg/L) | 6,27E+05 | 1,02E6 | 3,5E-02 | 1,115E6 | 6,64E+05 | 9,2E-02 |
| Efic. CF | Média | 1,78 | 1,50 | | 1,79 | 1,49 | |
| | Mediana (Unid. log) | 1,67 | 1,38 | 1,8E-02 | 1,74 | 1,40 | 2,8E-02 |

** - Teste não efetuado devido à presença de apenas um dado.

Nível de significância, α , de 5%

O desempenho das ETEs não diferiu muito do observado para a DBO, considerando tanto a concentração efluente quanto as eficiências de remoção. O que se notou, em geral, foi uma tendência de elevação das concentrações dos constituintes, quando as lagoas passavam de uma condição de subcarga para sobrecarga, situação nem sempre confirmada pelos testes estatísticos. É importante ressaltar, no entanto, que as médias e medianas das concentrações efluentes de DQO, NT e CF das lagoas que operavam em sobrecarga orgânica, foram consideradas significativamente superiores às das outras. O resultado foi considerado coerente, já que piores desempenhos de sistemas em sobrecarga são esperados também para remoção de NT e CF. Os mecanismos de remoção destes constituintes são diretamente relacionados com a concentração de OD e com os níveis de pH, parâmetros que sofrem a influência das cargas orgânicas aplicadas.

Considerando as eficiências de remoção, não foi observado um padrão de comportamento, com os resultados variando bastante de constituinte para constituinte. A influência de diferentes TDHs foi bem menor que a observada para as L_s e, em algumas situações, o desempenho foi inferior quando as lagoas operavam com tempos de detenção hidráulica considerados usuais.

Pelos resultados dos testes, o índice de monitoramento parece ter tido uma maior influência no desempenho das ETEs do que a vazão, considerando principalmente, a eficiência de remoção dos constituintes.

7.3.2 Lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas

7.3.2.1 Lagoas anaeróbias

A avaliação foi baseada na verificação dos resultados de desempenho quando os sistemas trabalhavam na faixa recomendada para os parâmetros de projeto e operação (Tabela 7.1) para as lagoas anaeróbias e facultativas. A Figura 7.3 apresenta os gráficos de dispersão para concentração de DBO efluente e eficiência de remoção da DBO afluente para as lagoas anaeróbias em função dos parâmetros L_v e TDH.

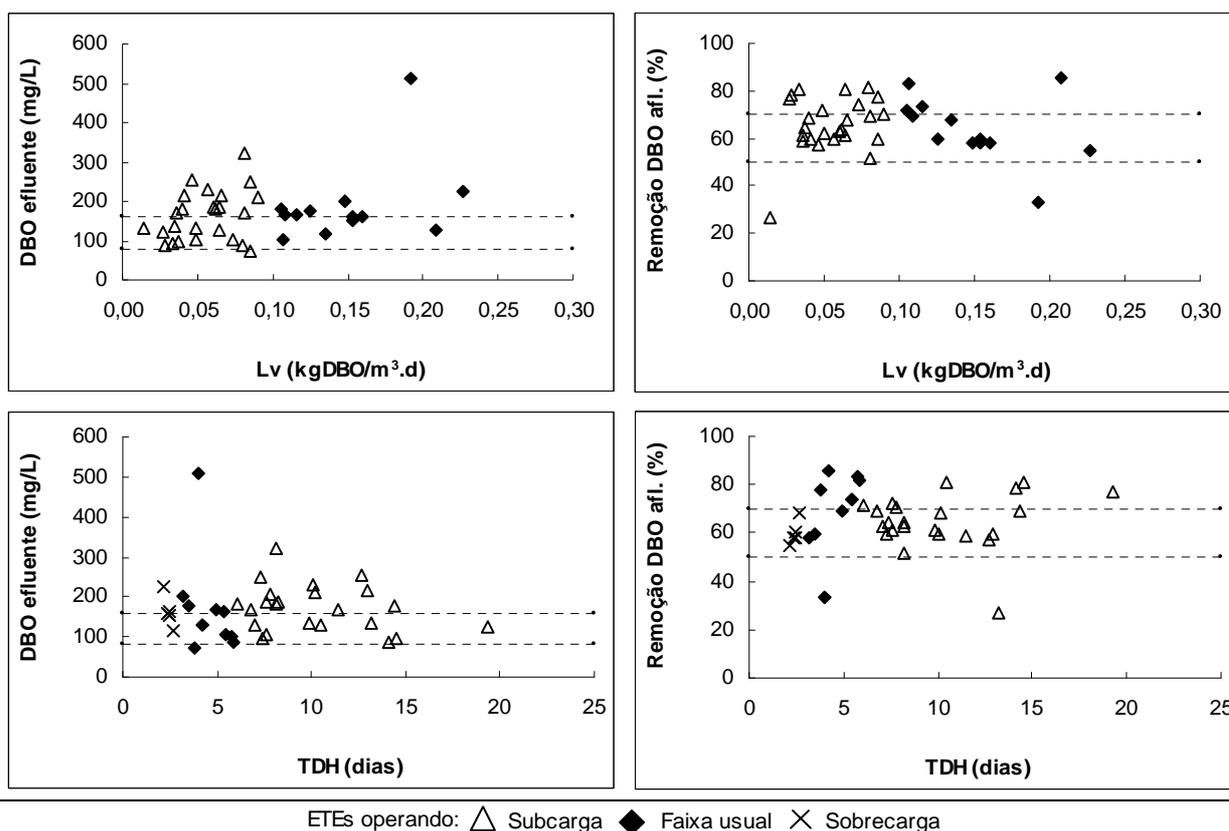


Figura 7.3 – Relação entre L_v , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LANs

A Figura 7.3 mostrou que foram observadas situações sistemáticas de subcarga orgânica, ao se considerar as lagoas anaeróbias. Nenhuma lagoa excedeu a carga orgânica máxima recomendada. No entanto, estas observações se basearam em cálculos que consideraram as dimensões originais das lagoas, sendo possível que várias delas já estivessem com parte de seu volume útil ocupado por lodo, o que diminuiria o volume efetivamente disponível, ocasionando uma carga orgânica volumétrica real superior à calculada no trabalho.

Grande parte das lagoas funcionava com subcargas hidráulicas, ou seja, com tempos de detenção hidráulica bem acima do usual, mas isso não pareceu ter reflexo no desempenho observado.

Os testes estatísticos, apresentados na Tabela 7.7, comprovam o comportamento retratado na análise gráfica, não detectando diferenças significativas entre as medianas das concentrações ou eficiências de remoção de DBO.

Tabela 7.7 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LANs

| Taxa de aplicação volumétrica - L_v | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 162 | 168 | 66 | 65 | Acima | 173 | 180 | 65 | 64 |
| Usual | 188 | 164 | 64 | 60 | Usual | 171 | 146 | 70 | 74 |
| Sobrecarga | - | - | - | - | Abaixo | 163 | 160 | 60 | 58 |
| Valor de p | 7,2E-01 | | 4,7E-01 | | Valor de p | 4,2E-01 | | 5,9E-02 | |

Nota: para a L_v foram aplicados testes de comparação de duas amostras (Mann-Whitney)

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

A Tabela 7.8 apresenta os valores máximo, médio (em negrito) e mínimo de vazão afluente e do índice de monitoramento apresentados pelas lagoas anaeróbias e lagoas facultativas secundárias. As relações entre vazão (Q) e índice de monitoramento (IM) e o desempenho das ETEs são mostradas na Figura 7.4.

Tabela 7.8 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LANs e LFs secundárias

| Parâmetros | Máximo | Médio | Mínimo |
|----------------------|--------|--------------|--------|
| Vazões (m^3/dia) | 9.742 | 1.793 | 173 |
| IM (n° amostras/ano) | 25,8 | 3,6 | 0,7 |

Também nesse caso, foi observada uma grande amplitude considerando os valores máximos e mínimos de vazão e de IM apresentados pelas lagoas anaeróbias. No entanto, como mostra a Figura 7.4 e Tabela 7.9, não foi possível perceber uma influência expressiva da vazão no desempenho das lagoas anaeróbias. O índice de monitoramento teve uma maior influência, já que, de uma maneira geral, menores concentrações efluentes de DBO foram observadas para as ETEs com maiores IM, comportamento confirmado pelos testes estatísticos.

Constituintes DQO, SST, NT, PT e CF

Os resultados dos testes estatísticos, aplicados para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações efluentes e eficiências de remoção dos indicadores DQO, SST, NT, PT e CF, são apresentados nas Tabelas 7.10 e 7.11. Na primeira são apresentados os resultados das concentrações e eficiências de remoção dos constituintes, sob diferentes condições de carga orgânica e hidráulica e, na segunda tabela, considerando a influência da vazão e do índice de monitoramento.

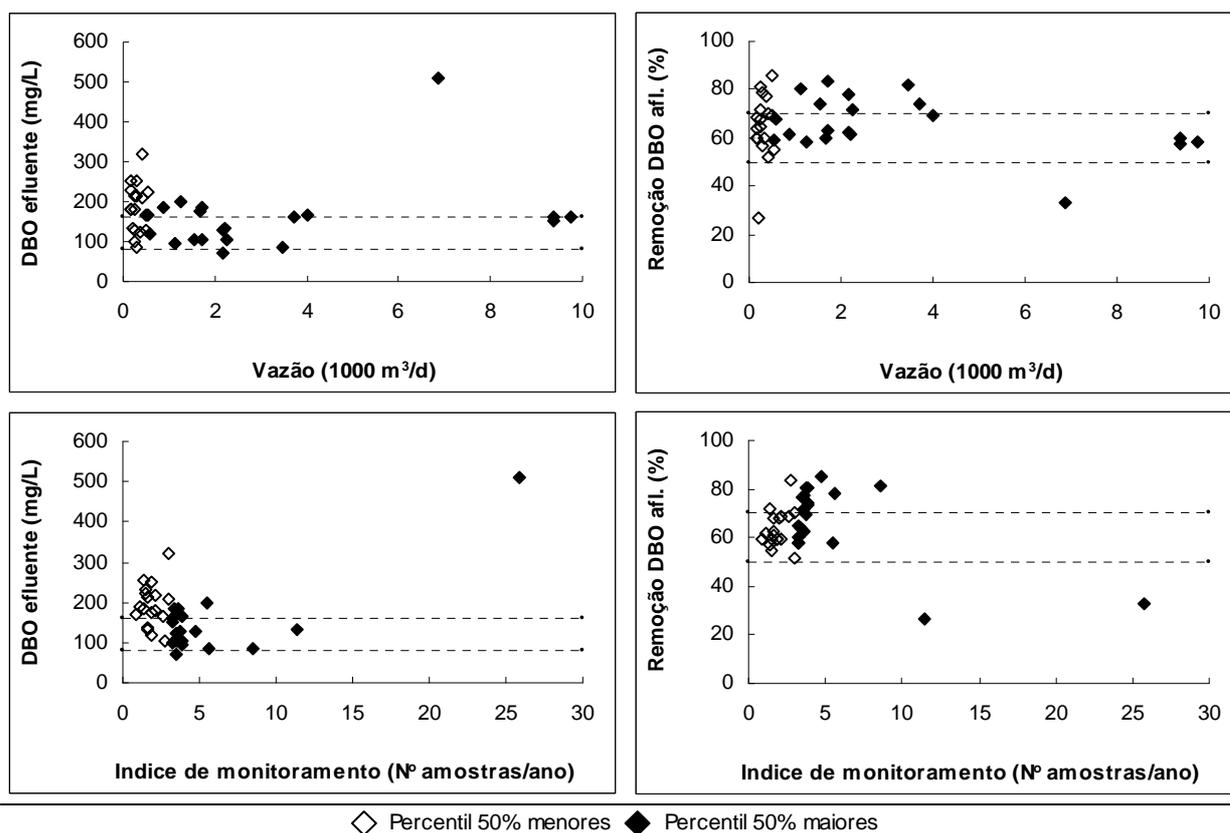


Figura 7.4 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LANs

Tabela 7.9 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LANs

| | Vazão | | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------|---------|----------------|---------|----|
| | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | |
| 50% menores | 185 | 182 | 65 | 67 | 50% menores | 192 | 185 | 63 | 61 |
| 50% maiores | 159 | 157 | 66 | 63 | 50% maiores | 152 | 131 | 68 | 71 |
| Valor de <i>p</i> | 5,0E-02 | | 8,8E-01 | | Valor de <i>p</i> | 3,0E-03 | | 3,6E-02 | |

Nível de significância, α , de 5%

Tabela 7.10 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LANs

| Constituinte | | Taxa de aplicação volumétrica - L_v | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|--------------|---------|---------------------------------------|---------|------------|--------------|------------------------------------|---------|------------|--------------|---------|
| Efluente | | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 416 | 368 | - | 2,3E-01 | 447 * | 317 * | 352 | |
| | Mediana | | 401 | 329 | - | | 439 | 319 | 319 | 1,5E-02 |
| Efic. DQO | Média | (%) | 60 | 65 | - | 2,1E-01 | 58 * | 70 * | 62 | |
| | Mediana | | 62 | 63 | - | | 62 | 72 | 63 | 1,0E-02 |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 165 | 114 | - | 5,2E-02 | 175 * | 100 * | 118 | |
| | Mediana | | 134 | 98 | - | | 147 | 95 | 66 | 1,1E-02 |
| Efic. SST | Média | (%) | 62 | 73 | - | 5,1E-02 | 60 * | 75 * | 74 | |
| | Mediana | | 67 | 77 | - | | 66 | 76 | 78 | 7,7E-03 |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 51 | 77 | - | 2,0E-01 | 45 | 73 | - | |
| | Mediana | | 45 | 51 | - | | 42 | 50 | - | 1,9E-01 |
| Efic. NT | Média | (%) | 37 | -37 | - | 1,5E-01 | 34 | -2 | - | |
| | Mediana | | 37 | 18 | - | | 34 | 38 | - | 7,9E-01 |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 12 | 8 | - | 6,6E-02 | 9,5 | 12,8 | 7,2 | |
| | Mediana | | 9 | 8 | - | | 9,0 | 8,5 | 6,0 | 2,0E-01 |
| Efic. PT | Média | (%) | 0 | -3 | - | 9,2E-01 | -5 | 2 | 3 | |
| | Mediana | | 1 | 3 | - | | 1 | 4 | 20 | 6,7E-01 |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 4,91+E6 | 6,31+E7 | - | 6,9E-02 | 3,34+E6 | 1,15+E8 | 4,66+E6 | |
| | Mediana | | 3,53+E6 | 7,04+E6 | - | 2,3E-01 | 3,52+E6 | 1,61+E8 | 1,87+E6 | 1,8E-02 |
| Efic. CF | Média | (%) | 1,51 | 1,00 | - | | 2,15 | 1,10 | 1,68 | |
| | Mediana | | 0,90 | 1,03 | - | 7,9E-01 | 0,9 | 0,94 | 1,1 | 5,8E-01 |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Pela observação dos testes estatísticos, apresentados na Tabela 7.10, percebe-se que não foi detectada nenhuma diferença significativa no desempenho das lagoas anaeróbias, quando estas operavam em subcarga orgânica ou dentro do intervalo considerado usual. No entanto, as maiores concentrações e menores eficiências de remoção de DQO e SST foram apresentadas pelas lagoas que operavam em subcarga hidráulica (TDH acima do recomendado), considerando o nível de significância de 5%.

Tabela 7.11 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LANs

| Constituinte | | Vazão | | | Índice de monitoramento - IM | | |
|--------------|---------|-------------|-------------|--------------|------------------------------|-------------|--------------|
| Efluente | | 50% menores | 50% maiores | Valor de p | 50% menores | 50% maiores | Valor de p |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 466 | 342 | | 452 | 349 |
| | Mediana | | 494 | 326 | 4,0E-03 | 439 | 324 |
| Efic. DQO | Média | (%) | 58 | 64 | | 60 | 63 |
| | Mediana | | 61 | 63 | 1,9E-01 | 63 | 64 |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 204 | 104 | | 157 | 140 |
| | Mediana | | 154 | 99 | 4,9E-05 | 136 | 120 |
| Efic. SST | Média | (%) | 56 | 74 | | 67 | 65 |
| | Mediana | | 63 | 73 | 7,8E-05 | 69 | 71 |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 46 | 64 | | 48 | 59 |
| | Mediana | | 46 | 48 | 7,0E-01 | 49 | 47 |
| Efic. NT | Média | (%) | 34 | 9 | | 27 | 16 |
| | Mediana | | 35 | 36 | 1,0E+00 | 35 | 36 |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 10 | 10 | | 9 | 11 |
| | Mediana | | 9 | 7 | 1,6E-02 | 8 | 6 |
| Efic. PT | Média | (%) | -10 | 5 | | -9 | 16 |
| | Mediana | | -1 | 12 | 1,3E-01 | -1 | 20 |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 4,47E+06 | 5,87E+07 | | 4,34E+07 | 8,46E+06 |
| | Mediana | | 3,65E+06 | 5,80E+06 | 6,0E-01 | 5,42E+06 | 3,45E+06 |
| Efic. CF | Média | (Unid. log) | 1,05 | 1,55 | | 1,44 | 1,02 |
| | Mediana | | 0,93 | 1,07 | 3,1E-01 | 1,06 | 1,02 |

Nível de significância, α , de 5%

Considerando os resultados constantes na Tabela 7.11, as concentrações de DQO, SST e PT do efluente das lagoas que tratavam menores vazões foram consideradas significativamente superiores às outras. Uma possível influência do índice de monitoramento só foi detectada pelos testes estatísticos na concentração de DQO e na eficiência de remoção de PT.

7.3.2.2 Lagoas facultativas secundárias

A Figura 7.5 apresenta os gráficos de concentração efluente média de DBO e eficiência média de remoção em função dos parâmetros L_s e TDH e a Tabela 7.12 mostra os resultados dos testes estatísticos.

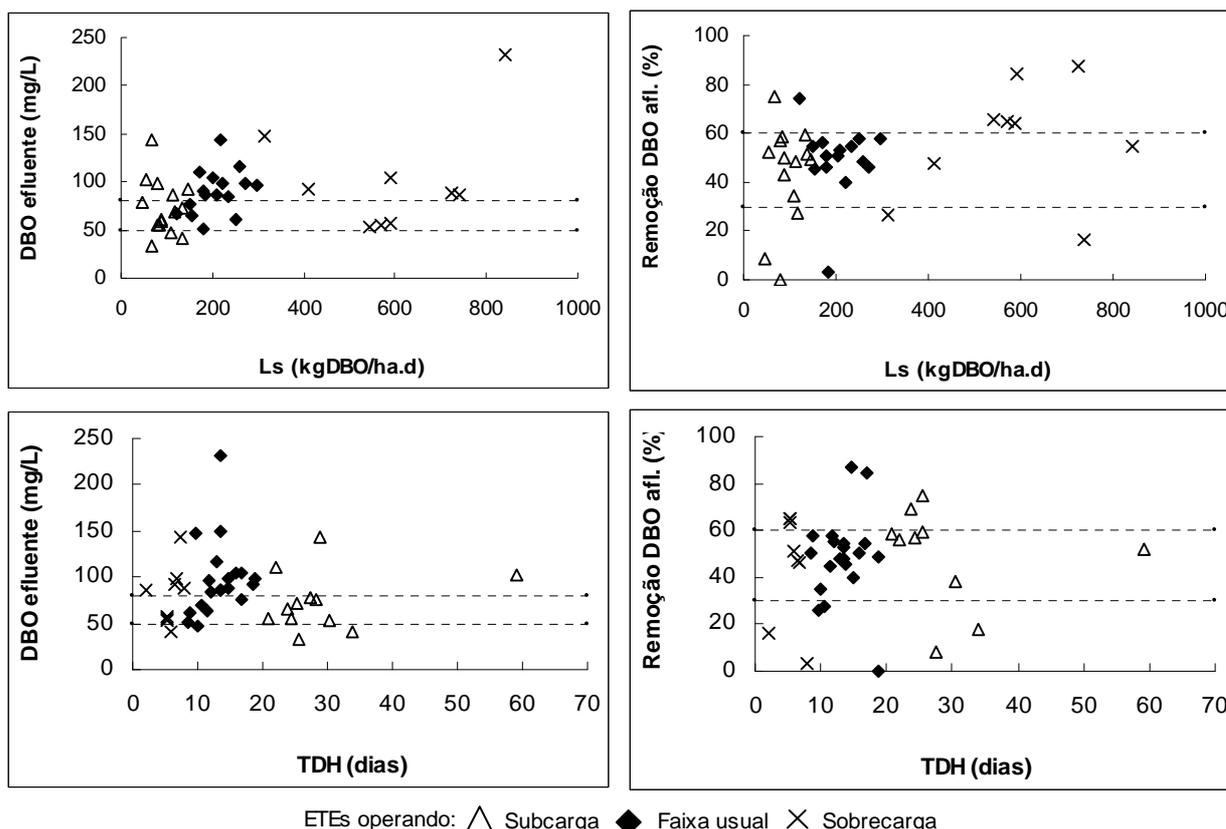


Figura 7.5 – Relação entre L_s , TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção – LFs secundárias

Tabela 7.12 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - LFs secundárias

| Taxa de aplicação superficial - L_s | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 73 | 68 | 42 | 50 | Subcarga ** | - | - | - | - |
| Usual | 91 | 90 | 43 | 50 | Usual | 98 | 91 | 48 | 50 |
| Sobrecarga | 102 | 89 | 57 | 64 | Sobrecarga | 80 | 86 | 38 | 47 |
| Valor de p | 1,0E-01 | | 2,2E-01 | | Valor de p | 1,3E-01 | | 9,4E-01 | |

** - Teste não considerou esta condição (subcarga) devido à presença de apenas um dado.

Nível de significância, α , de 5%

Pela observação da Figura 7.5 e da Tabela 7.12, a carga orgânica aplicada não influenciou significativamente no desempenho das LFs secundárias, sendo possível observar casos de eficiências muito baixas em situações de subcarga e de altas eficiências para ETEs em sobrecarga. Observa-se que muitas lagoas operavam em condições de sobrecarga hidráulica, ou seja, TDH abaixo do valor recomendado. Apesar do mau desempenho de algumas ETEs em sobrecarga parecer ter sido influenciado por esta condição, observam-se casos de lagoas operando dentro dos intervalos usuais, sem uma boa eficiência correspondente. Os testes

estatísticos não detectaram diferenças significativas entre as medianas das concentrações e eficiências de remoção de DBO, no nível de significância adotado.

A Figura 7.6 apresenta os gráficos de concentração efluente média de DBO e eficiência média de remoção em função dos parâmetros vazão e IM para as lagoas facultativas secundárias. Os resultados dos testes estatísticos são apresentados na Tabela 7.13.

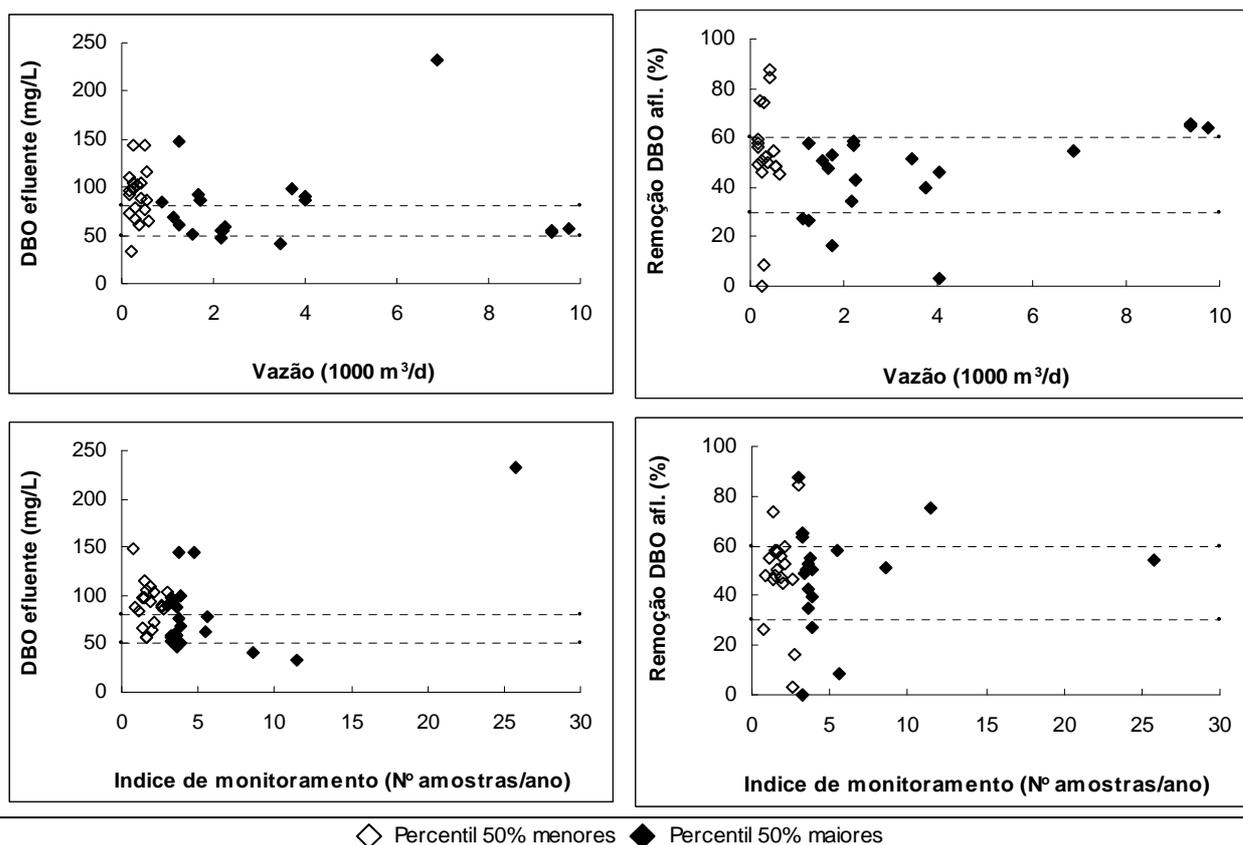


Figura 7.6 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção – LFs secundárias

Pela observação da Figura 7.6 e dos resultados dos testes estatísticos, não foi possível perceber uma influência expressiva da vazão no desempenho das lagoas facultativas secundárias. No entanto, as lagoas que apresentaram um índice de monitoramento maior tiveram um desempenho superior, considerando a média e mediana das concentrações efluentes (valores menores) e as eficiências de remoção de DBO (valores maiores).

Tabela 7.13 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LFs secundárias

| | Vazão | | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------|---------|----------------|---------|---------|
| | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | |
| 50% menores | 185 | 160 | 65 | 65 | 50% menores | 192 | 152 | 63 | 61 |
| 50% maiores | 182 | 157 | 67 | 67 | 50% maiores | 185 | 131 | 68 | 71 |
| Valor de <i>p</i> | | 5,0E-02 | | 9,9E-01 | Valor de <i>p</i> | | 3,0E-03 | | 3,6E-02 |

Nível de significância, α , de 5%

Os testes de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas, seguidos pelos testes de comparação múltipla das médias de todos os grupos, aplicados para verificação de diferenças significativas entre as eficiências de remoção dos 38 sistemas compostos por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, evidenciaram que apenas um deles mostrou um desempenho considerado significativamente superior ao dos outros e dois apresentaram eficiências inferiores. Uma investigação das condições de operação adotadas por estes sistemas provou não ser possível estabelecer uma relação consistente entre a eficiência de remoção e as variáveis operacionais. Foram observadas eficiências de remoção acima ou abaixo da média da modalidade para sistemas operando em sobrecarga ou subcarga indiscriminadamente, como pode ser visto pelos resultados apresentados na Tabela 7.15.

Tabela 7.14 – Condições de operação adotadas pelos sistemas LAN+LF com comportamento diferenciado

| Eficiência média | Nome de referência | Condições de operação | | | | | |
|------------------|--------------------|-----------------------|----------|----------------|------------|-------------|-------------|
| | | LAN | | LF Secundárias | | Sistema | |
| | | Lv | TDH | Ls | TDH | Q | IM |
| Superior | LAN+LF 02 | Subcarga | Usual | Subcarga | Sobrecarga | 50% maiores | 50% maiores |
| Inferior | LAN+LF 01 | Usual | Usual | Sobrecarga | Usual | 50% maiores | 50% maiores |
| | LAN+LF 45 | Subcarga | Subcarga | Usual | Usual | 50% menores | 50% maiores |

Constituintes DQO, SST, NT, PT e CF

Os resultados dos testes estatísticos de Kruskal – Wallis, para comparação de amostras múltiplas, e de Mann-Whitney, para duas amostras, considerando os indicadores DQO, SST, NT, PT e CF, são apresentados nas Tabelas 7.15 e 7.16. A única diferença significativa entre as concentrações e eficiências de remoção dos constituintes, considerando as diferentes condições de carga orgânica, foi observada para os coliformes termotolerantes.

Tabela 7.15 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs secundárias

| Constituinte | | Taxa de aplicação superficial - L_s | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|--------------|---------|---------------------------------------|---------|------------|--------------|------------------------------------|---------|------------|--------------|---------|
| | | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 282 | 327 | 316 | 5,2E-01 | 299 | 316 | 278 | 4,5E-01 |
| | Mediana | | 288 | 307 | 336 | | 333 | 305 | 226 | |
| Efic. DQO | Média | (%) | 71 | 60 | 60 | 2,2E-01 | 72 | 63 | 69 | 4,8E-01 |
| | Mediana | | 72 | 69 | 74 | | 71 | 72 | 74 | |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 150 | 179 | 130 | 5,6E-02 | 160 | 161 | 117 | 2,5E-01 |
| | Mediana | | 129 | 158 | 113 | | 132 | 141 | 112 | |
| Efic. SST | Média | (%) | 63 | 37 | 11 | 3,6E-01 | 65 | 35 | 67 | 3,1E-01 |
| | Mediana | | 69 | 63 | 74 | | 72 | 65 | 74 | |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 45 | 39 | 58 | 4,0E-01 | 32 | 44 | 82 * | 2,2E-01 |
| | Mediana | | 35 | 39 | 49 | | 32 | 39 | 82 | |
| Efic. NT | Média | (%) | 49 * | 44 * | -6 * | 2,6E-01 | 63 | 29 | 48 | 9,8E-02 |
| | Mediana | | 51 | 43 | 11 | | 63 | 42 | 48 | |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 6,5 | 7,4 | 4,9 | 8,6E-02 | 6,0 | 7,5 | 5,0 | 2,1E-01 |
| | Mediana | | 6,0 | 4,0 | 4,5 | | 6,0 | 5,0 | 4,0 | |
| Efic. PT | Média | (%) | 31 | 39 | 34 | 5,1E-01 | 28 | 35 | 39 | 4,8E-01 |
| | Mediana | | 29 | 42 | 43 | | 25 | 40 | 43 | |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 3,5E+05 | 6,5E+05 | 3,2E+05 | 2,8E-02 | 1,8E+05 | 5,0E+05 | 6,4E+05 | 9,2E-02 |
| | Mediana | | 1,2E+05 | 3,9E+05 | 2,1E+05 | | 1,2E+05 | 3,1E+05 | 1,4E+05 | |
| Efic. CF | Média | (%) | 1,11 | 0,78 * | 1,67 * | 2,0E-02 | 1,31 | 1,15 | 1,03 | 9,4E-01 |
| | Mediana | | 1,15 | 0,74 | 1,42 | | 1,11 | 1,14 | 1,04 | |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Na avaliação que considerou as condições de carga hidráulica, nenhuma diferença significativa foi apontada pelos testes estatísticos.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 7.16, diferenças significativas foram detectadas para as concentrações dos constituintes DQO, SST e PT que, em todos os casos, foram mais elevadas para as lagoas que tratavam menores vazões. A influência do índice de monitoramento esteve presente apenas na concentração de DQO efluente e na eficiência de remoção de CF.

Tabela 7.16 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LFs secundárias

| Constituinte | | | Vazão | | | Índice de monitoramento - IM | | |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------------|------------------------------|-------------|-------------------|
| | | | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> |
| Efluente | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 466 | 342 | | 452 | 349 | |
| | Mediana | | 494 | 326 | 4,0E-03 | 439 | 324 | 1,4E-02 |
| Efic. DQO | Média | (%) | 58 | 64 | | 60 | 63 | |
| | Mediana | | 61 | 63 | 1,9E-01 | 63 | 64 | 2,5E-01 |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 204 | 104 | | 157 | 140 | |
| | Mediana | | 154 | 99 | 4,9E-05 | 136 | 120 | 3,2E-01 |
| Efic. SST | Média | (%) | 56 | 74 | | 67 | 65 | |
| | Mediana | | 63 | 76 | 7,8E-05 | 69 | 71 | 7,5E-01 |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 46 | 64 | | 48 | 59 | |
| | Mediana | | 46 | 48 | 7,0E-01 | 49 | 47 | 9,5E-01 |
| Efic. NT | Média | (%) | 34 | 9 | | 27 | 16 | |
| | Mediana | | 35 | 36 | 1,0E+00 | 35 | 36 | 8,9E-01 |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 10,2 | 9,6 | | 9,3 | 11,1 | |
| | Mediana | | 9,0 | 7,0 | 1,6E-02 | 8,0 | 6,0 | 2,5E-01 |
| Efic. PT | Média | (%) | -10 | 4,6 | | -9 | 16 | |
| | Mediana | | -1 | 12 | 1,3E-01 | -1 | 20 | 2,4E-02 |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 4,5E+06 | 5,9E+07 | | 4,3E+07 | 8,5E+06 | |
| | Mediana | | 3,6E+06 | 5,8E+06 | 6,0E-01 | 5,4E+06 | 3,4E+06 | 9,2E-01 |
| Efic. CF | Média | (Unid. log) | 1,05 | 1,55 | | 1,44 | 1,02 | |
| | Mediana | | 0,93 | 1,07 | 3,1E-01 | 1,06 | 1,02 | 7,6E-01 |

Nível de significância, α , de 5%

7.3.3 Lodos ativados

A Figura 7.8 apresenta os gráficos de concentração de DBO e eficiência de remoção de DBO afluente em função da relação A/M e do tempo de detenção hidráulica (TDH) no tanque de aeração e a Tabela 7.18 mostra os resultados dos testes estatísticos.

Pela observação dos gráficos e dos testes estatísticos, verificou-se que o desempenho das ETEs da modalidade LA não foi afetado por diferentes relações A/M utilizadas. As condições de subcarga ou sobrecarga não foram refletidas nos resultados de desempenho observados. As mesmas observações são válidas para o tempo de detenção hidráulica no tanque de aeração.

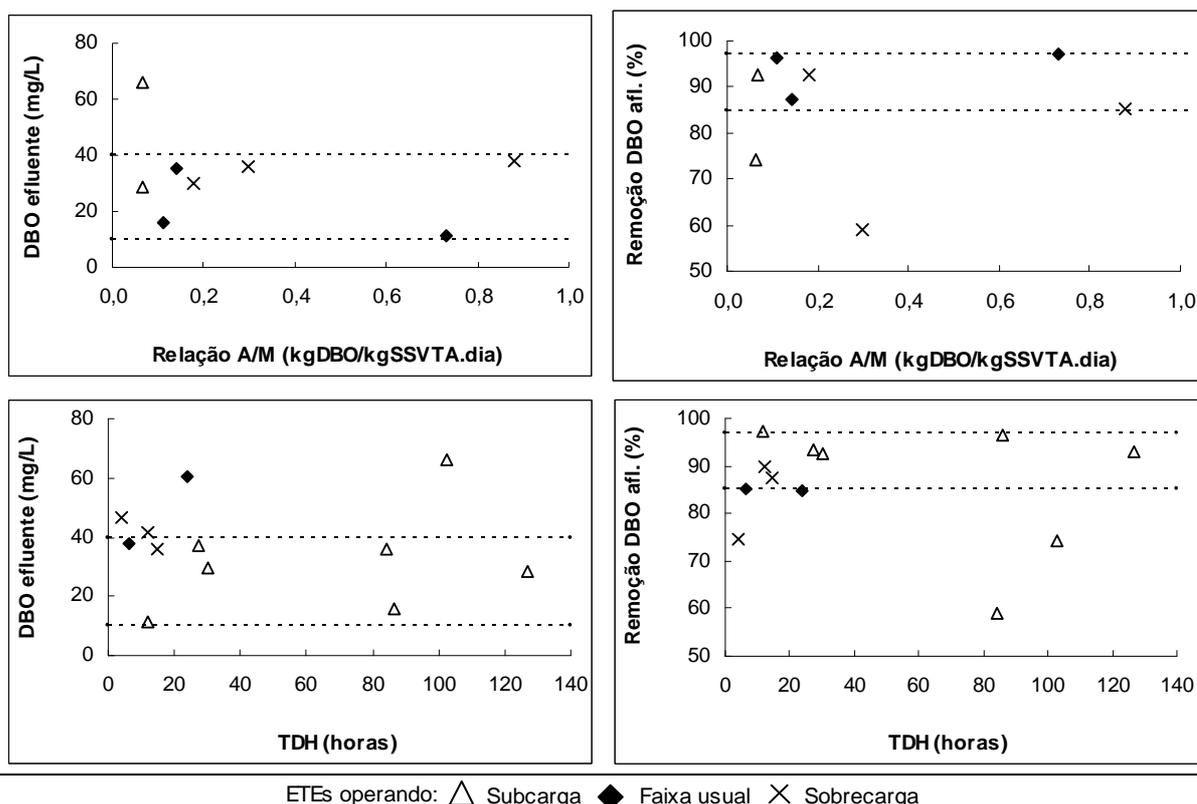


Figura 7.7 – Relação entre rel. A/M, TDH e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Tanques de aeração dos LA

Tabela 7.17 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - Tanques de aeração, LA

| Relação A/M | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 45 | 45 | 84 | 84 | Acima | 31 | 30 | 86 | 93 |
| Usual | 21 | 16 | 93 | 96 | Usual | 49 | 49 | 85 | 85 |
| Sobrecarga | 35 | 36 | 79 | 85 | Abaixo | 41 | 42 | 84 | 87 |
| Valor de <i>p</i> | 3,2E-01 | | 2,5E-01 | | Valor de <i>p</i> | 1,9E-01 | | 4,1E-01 | |

O valor de *p* refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).
Nível de significância, α , de 5%

Na Figura 7.9 estão representados os gráficos de dispersão da concentração de DBO e da eficiência de remoção de DBO afluente em função da taxa de escoamento superficial (TES) e taxa de aplicação de sólidos (TAS) no decantador secundário e na Tabela 7.19 os resultados dos testes estatísticos de comparação de medianas das concentrações efluente e de eficiência de remoção de DBO.

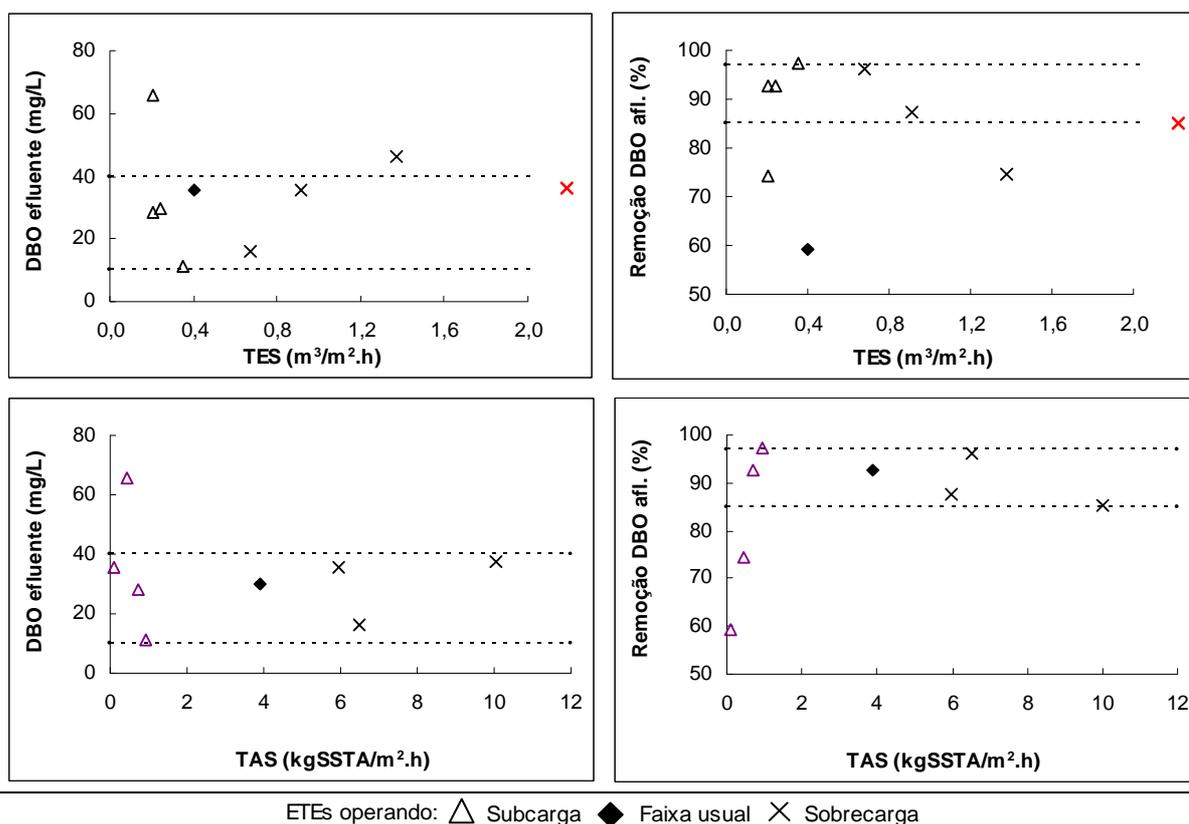


Figura 7.8 – Relação entre TES, TAS e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Decantadores secundários dos LA

Nota: O ponto vermelho refere-se a uma ETE que apresentou uma taxa de escoamento superficial (TES) igual a 5 m³/m².h.

Tabela 7.18 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - Decantadores secundários, LA

| Taxa de escoamento superficial (TES) | | | | | Taxa de aplicação de sólidos – TAS | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 33 | 27 | 89 | 93 | Subcarga | 34 | 30 | 81 | 84 |
| Usual | - | - | - | - | Usual ** | - | - | - | - |
| Sobrecarga | 34 | 37 | 86 | 86 | Sobrecarga | 30 | 36 | 89 | 87 |
| Valor de <i>p</i> | - | 6,7E-01 | - | 5,6E-01 | Valor de <i>p</i> | - | 9,9E-01 | - | 8,6E-01 |

** - Sem dados suficientes para análise

O valor de *p* refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Foi verificado, pela observação da Figura 7.8, que o desempenho das ETEs da modalidade LA não foi afetado por diferentes taxas de escoamento superficial no decantador secundário. Mesmo uma ETE que operava em situação de grande sobrecarga (TES de 5 m³/m².h, quando o máximo recomendado é de 1,33) apresentou um desempenho típico para essa modalidade de tratamento. A maioria absoluta das ETEs (cerca de 90%) trabalhava com taxas de aplicação de sólidos (TAS) acima do recomendado, sem que isso tenha se refletido nos resultados, considerando o desempenho típico desta modalidade de tratamento (faixas pontilhadas).

Ressalta-se que apenas uma ETE operava dentro das condições recomendadas, o que inviabilizou a sua comparação com as outras pelos testes estatísticos.

A Tabela 7.19 apresenta os valores máximo, médio (em negrito) e mínimo de vazão afluente e do índice de monitoramento apresentados pelas ETEs da modalidade lodos ativados. A Figura 7.9 mostra as relações entre o desempenho e a vazão e o índice de monitoramento e a Tabela 7.20 apresenta os resultados das análises estatísticas.

Tabela 7.19 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluente e IM – LA

| Parâmetros | Máximo | Médio | Mínimo |
|------------------------------|---------|---------------|--------|
| Vazões (m ³ /dia) | 604.800 | 63.718 | 173 |
| IM (nº amostras/ano) | 157,4 | 39,6 | 0,5 |

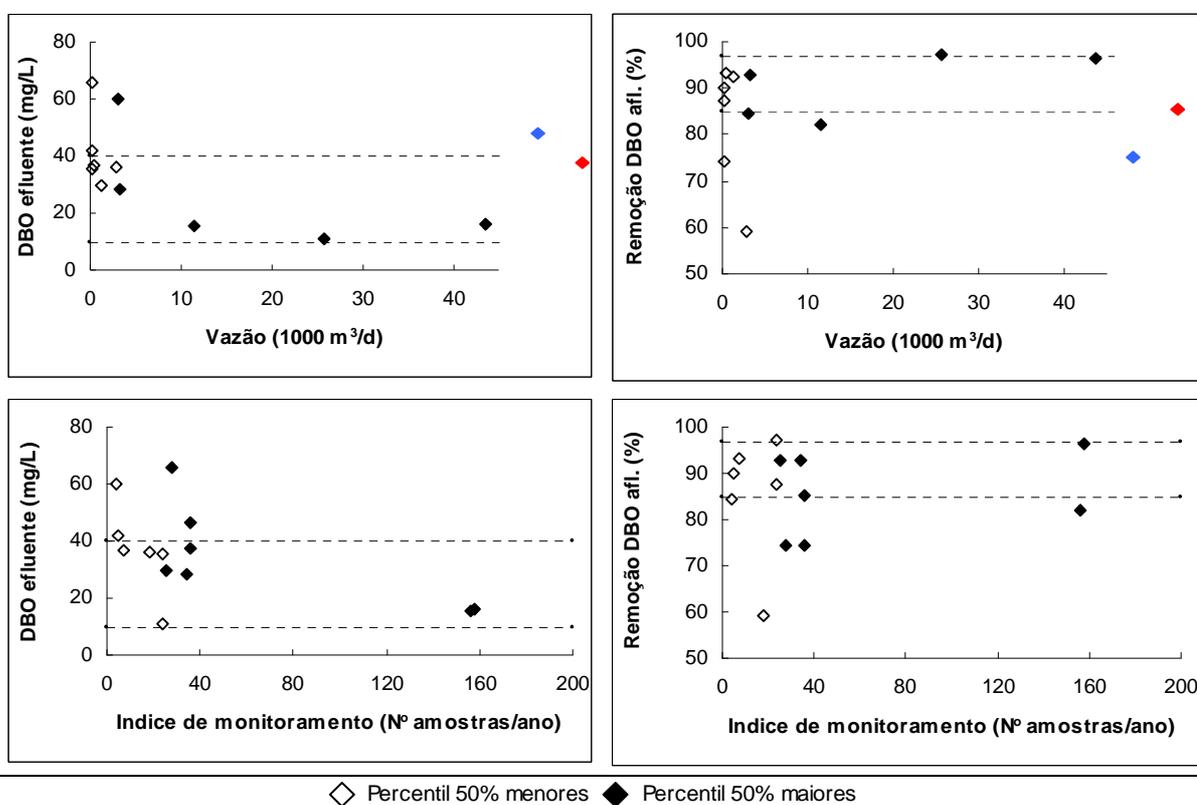


Figura 7.9 - Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – LA

Nota: Os pontos em azul e vermelho referem-se a ETEs que tratam vazões de 194 e 605 mil m³/d, respectivamente.

Tabela 7.20 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - LA

| | Vazão | | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------|---------|----------------|---------|----|
| | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | |
| 50% menores | 41 | 37 | 83 | 89 | 50% menores | 37 | 37 | 85 | 89 |
| 50% maiores | 30 | 23 | 87 | 85 | 50% maiores | 33 | 30 | 85 | 85 |
| Valor de <i>p</i> | 3,5E-01 | | 6,7E-01 | | Valor de <i>p</i> | 8,3E-01 | | 7,7E-01 | |

Nível de significância, α , de 5%

Observando-se as Tabelas 7.19 e 7.20 e a Figura 7.9, nota-se que foi muito grande a diferença entre as vazões tratadas pelas ETEs dessa modalidade, sem que isso interferisse significativamente no desempenho das ETEs. Esta situação fica bem evidenciada ao se observar as duas ETEs que tratavam as maiores vazões, representadas nos gráficos pelos pontos azul e vermelho devido à grande diferença de magnitude observada. O desempenho apresentado por ambas esteve dentro e até abaixo do apresentado pelas outras ETEs da modalidade. O mesmo comportamento foi observado para IM que, apesar da grande amplitude, considerando o número máximo e mínimo de amostras coletadas, o desempenho não pareceu ter sido afetado.

Os testes de Kruskal-Wallis ANOVA e teste de medianas, seguidos pelos testes de comparação múltipla das médias de todos os grupos, aplicados para verificação de diferenças significativas entre as eficiências de remoção das 12 ETEs de lodos ativados, mostrou que duas unidades mostraram um desempenho considerado significativamente superior ao dos outros e quatro apresentaram eficiências inferiores. A investigação das condições de operação adotadas por estes sistemas, apresentada na Tabela 7.21, mostrou que as duas ETEs que apresentaram melhor desempenho operavam nas mesmas condições, considerando os parâmetros relação A/M, TDH e Q. No entanto, o desempenho inferior das outras ETEs não pode ser associado às variáveis operacionais, já que variaram muito entre si.

Tabela 7.21 – Condições de operação adotadas pelos sistemas de lodos ativados (LA) com comportamento diferenciado

| Eficiência média | Nome de referência | Condições de operação | | | | | |
|------------------|--------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|
| | | Tanque de aeração | | Decantador secundário | | Sistema | |
| | | Rel. A/M | TDH | TES | TAS | Q | IM |
| Superior | LA 07 | Usual | Subcarga | Sobrecarga | Sobrecarga | 50% maiores | 50% maiores |
| | LA 11 | Usual | Subcarga | Subcarga | Subcarga | 50% maiores | 50% menores |
| Inferior | LA 02 | Usual | Sobrecarga | Sobrecarga | Sobrecarga | 50% menores | 50% maiores |
| | LA 03 | Sobrecarga | Subcarga | Usual | Subcarga | 50% menores | 50% menores |
| | LA 06 | Subcarga | Subcarga | Subcarga | Subcarga | 50% menores | 50% maiores |
| | LA 08 | Sobrecarga | Usual | Sobrecarga | Sobrecarga | 50% maiores | 50% maiores |

Constituintes DQO, SST, NT, PT e CF

Os resultados dos testes estatísticos, considerando os indicadores DQO, SST, NT, PT e CF, são apresentados nas Tabelas 7.22 a 7.24. Nenhuma diferença significativa entre as medianas das concentrações e das eficiências de remoção dos constituintes, considerando as diferentes condições de operação, foi detectada pelos testes.

Tabela 7.22 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LA (Parâmetros Relação A/M e TDH)

| Constituinte | Relação A/M | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|--------------|-------------|--------|----------|-------|------------|------------------------------------|---------|-------|---------|--------------|
| | Efluente | | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | Acima | Usual | Abaixo | Valor de p |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 125 | 63 | 73 | | 81 | 132 | 117 | |
| | Mediana | | 125 | 56 | 73 | 5,7E-01 | 68 | 130 | 120 | 3,2E-01 |
| Efic. DQO | Média | (%) | 77 | 91 | 77 | | 81 | 80 | 79 | |
| | Mediana | | 77 | 93 | 86 | 3,9E-01 | 91 | 80 | 79 | 6,8E-01 |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 71 | 26 | 44 | | 47 | 76 | 94 | |
| | Mediana | | 71 | 14 | 49 | 3,7E-01 | 42 | 76 | 94 | 3,5E-01 |
| Efic. SST | Média | (%) | 69 | 86 | 76 | | 77 | 73 | 64 | |
| | Mediana | | 69 | 87 | 87 | 8,3E-01 | 87 | 73 | 64 | 6,5E-01 |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 18 | - | 13 | | 15 | 37 | 22 | |
| | Mediana | | 18 | - | 14 | 7,7E-01 | 14 | 37 | 22 | 2,8E-01 |
| Efic. NT | Média | (%) | 60 | - | 58 | | 57 | 34 | 53 | |
| | Mediana | | 60 | - | 67 | 7,7E-01 | 60 | 34 | 53 | 7,8E-01 |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 1 | - | 0,8 | | 1 | - | 0,9 | |
| | Mediana | | 1 | - | 0,8 | 1,0E+00 | 1 | - | 0,9 | 6,3E-01 |
| Efic. PT | Média | (%) | 36 | - | 46 | | 41 | - | 51 | |
| | Mediana | | 36 | - | 46 | 7,0E-01 | 46 | - | 51 | 2,5E-01 |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 1,3E+05 | - | 6,5E+04 | | 9,6E+04 | - | 2,1E+05 | |
| | Mediana | | 1,3E+05 | - | 6,5E+04 | 7,0E-01 | 6,5E+04 | - | 2,1E+05 | 2,5E-01 |
| Efic. CF | Média | (%) | 2 | - | 3 | | 3 | - | 2 | |
| | Mediana | | 2 | - | 3 | 7,0E-01 | 3 | - | 2 | 8,2E-01 |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Tabela 7.23 - Resultados dos testes estatísticos para DQO, SST, NT, PT e CF - LA (Parâmetros TES e TAS)

| Constituinte | | Taxas de escoamento superficial - TES | | | | Taxa de aplicação de sólidos – TAS ** | | | |
|--------------|----------------|---------------------------------------|---------|------------|-------------------|---------------------------------------|-------|------------|-------------------|
| Efluente | | Subcarga | Usual * | Sobrecarga | Valor de <i>p</i> | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de <i>p</i> |
| Conc. DQO | Média | 97 | 73 | 81 | | 95 | - | 65 | - |
| | Mediana (mg/L) | 72 | 73 | 86 | 8,9E-01 | 68 | - | 63 | 8,6E-01 |
| Efic. DQO | Média | 84 | 54 | 85 | | 75 | - | 88 | - |
| | Mediana (%) | 91 | 54 | 85 | 8,9E-01 | 77 | - | 86 | 6,0E-01 |
| Conc. SST | Média | 51 | 63 | 56 | | 55 | - | 29 | - |
| | Mediana (mg/L) | 42 | 63 | 37 | 8,9E-01 | 49 | - | 21 | 3,8E-01 |
| Efic. SST | Média | 80 | 53 | 76 | | 72 | - | 84 | - |
| | Mediana (%) | 89 | 53 | 81 | 5,6E-01 | 72 | - | 87 | 8,6E-01 |
| Conc. NT | Média | 16 | 10 | 20 | | 15 | - | 19 | - |
| | Mediana (mg/L) | 14 | 10 | 22 | 3,5E-01 | 13 | - | 19 | 5,5E-01 |
| Efic. NT | Média | 67 | 28 | 58 | | 49 | - | 61 | - |
| | Mediana (%) | 77 | 28 | 54 | 6,6E-01 | 43 | - | 61 | 7,7E-01 |
| Conc. PT | Média | 1 | 0,4 | 0,9 | | - | - | - | - |
| | Mediana (mg/L) | 1 | 0,4 | 0,9 | 2,2E-01 | - | - | - | - |
| Efic. PT | Média | 39 | 45 | 51 | | - | - | - | - |
| | Mediana (%) | 47 | 45 | 51 | 3,9E-01 | - | - | - | - |
| Conc. CF | Média | 1,0E+05 | 7,3E+04 | 2,1E+05 | | - | - | - | - |
| | Mediana (mg/L) | 5,7E+04 | 7,3E+04 | 2,1E+05 | 3,9E-01 | - | - | - | - |
| Efic. CF | Média | 3 | 2,06 | 2 | | - | - | - | - |
| | Mediana (%) | 3 | 2,06 | 2 | 7,7E-01 | - | - | - | - |

* Apenas uma ETE operava com TES recomendado, não sendo incluída na análise.

** Apenas uma ETE operava em sobrecarga e uma dentro da TAS recomendada, considerando o monitoramento dos constituintes PT e CF, o que inviabilizou a análise estatística.

Nível de significância, α , de 5%

Tabela 7.24 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO, SST, NT, PT e CF - LA

| Constituinte | Vazão | | | | | Índice de monitoramento - IM | | |
|--------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------------|------------------------------|-------------|-------------------|
| | Efluente | | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 113 | 81 | 2,2E-01 | 109 | 83 | 5,1E-01 |
| | Mediana | | 95 | 62 | | 91 | 63 | |
| Efic. DQO | Média | (%) | 72 | 86 | 1,6E-01 | 76 | 84 | 4,5E-01 |
| | Mediana | | 73 | 89 | | 79 | 89 | |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 68 | 51 | 3,0E-01 | 65 | 53 | 5,1E-01 |
| | Mediana | | 58 | 21 | | 58 | 34 | |
| Efic. SST | Média | (%) | 66 | 81 | 1,1E-01 | 70 | 79 | 7,0E-01 |
| | Mediana | | 64 | 89 | | 66 | 87 | |
| Conc. NT | Média | (mg/L) | 17 | 27 | 6,6E-01 | 30 | 17 | 7,6E-01 |
| | Mediana | | 18 | 19 | | 22 | 15 | |
| Efic. NT | Média | (%) | 51 | 49 | 8,9E-01 | 27 | 64 | 1,4E-01 |
| | Mediana | | 49 | 60 | | 28 | 67 | |
| Conc. PT | Média | (mg/L) | 1 | 2 | 1,0E+00 | 0,7 | 2 | 2,4E-01 |
| | Mediana | | 1 | 1 | | 0,7 | 1 | |
| Efic. PT | Média | (%) | 40 | 53 | 5,2E-02 | 47 | 46 | 5,6E-01 |
| | Mediana | | 46 | 54 | | 47 | 50 | |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 1,3E+05 | 1,4E+05 | 8,9E-01 | 1,7E+05 | 1,1E+05 | 3,7E-01 |
| | Mediana | | 1,3E+05 | 1,4E+05 | | 1,8E+05 | 5,7E+04 | |
| Efic. CF | Média | (Unid. log) | 2 | 2 | 6,7E-01 | 2 | 3 | 3,7E-01 |
| | Mediana | | 2 | 2 | | 2 | 2 | |

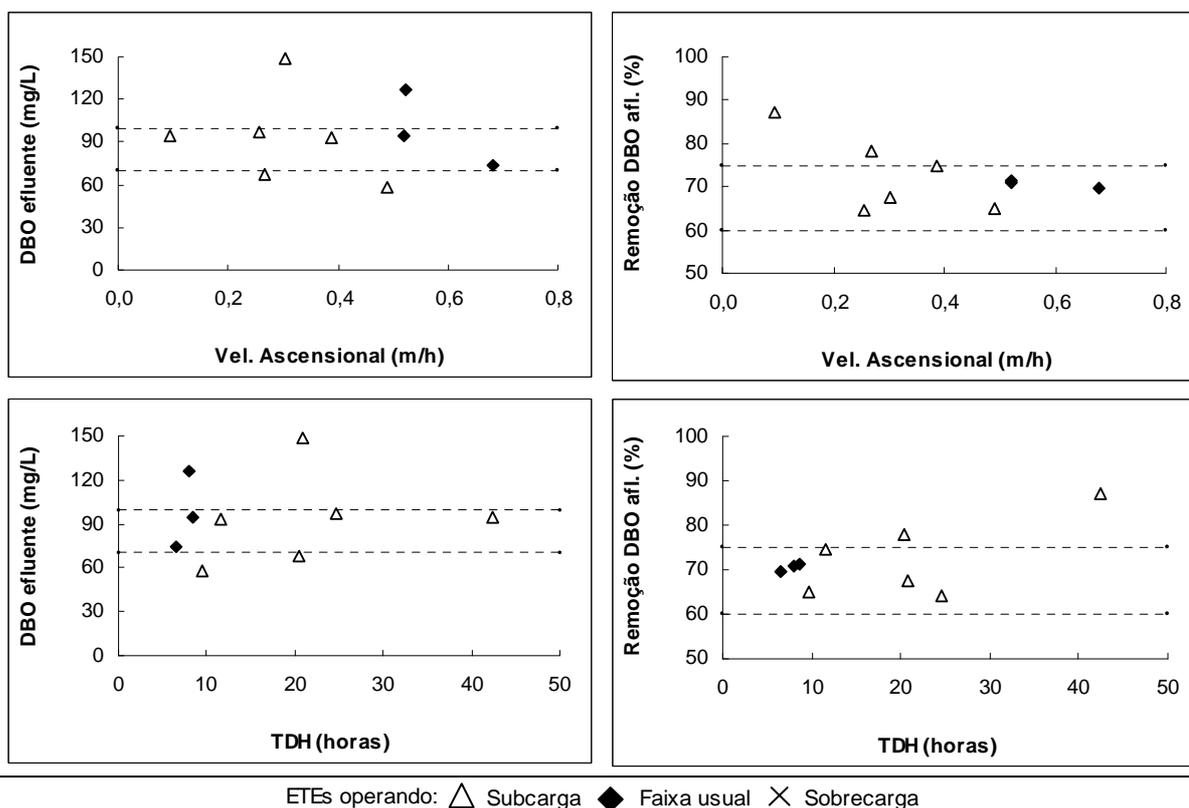
** - Teste não efetuado devido à presença de apenas um dado.

Nível de significância, α , de 5%

7.3.4 Reatores UASB

Para os reatores UASB procurou-se verificar a possível existência de melhores resultados de desempenho quando os sistemas trabalhavam numa faixa recomendada para o tempo de detenção hidráulica e velocidade ascensional (v), como mostrado na Figura 7.10. Os testes estatísticos efetuados para comprovação do comportamento observado na análise gráfica, são apresentados na Tabela 7.25.

De acordo com os gráficos e os testes estatísticos, não foram observadas, também no caso dos reatores UASB, influências significativas dos parâmetros analisados no desempenho dos sistemas. As subcargas orgânica e hidráulica predominaram e nenhum reator operava em sobrecarga.



ETEs operando: \triangle Subcarga \blacklozenge Faixa usual \times Sobrecarga

Figura 7.10 - Relação entre TDH, Vel. Ascensional e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Reatores UASB

Tabela 7.25 - Resultados dos testes estatísticos para DBO efluente - reatores UASB

| Velocidade ascensional - v | | | | | Tempo de detenção hidráulica - TDH | | | | |
|------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------|----------------|---------|
| Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | Condição | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | | Média | Mediana | Média | Mediana |
| Subcarga | 93 | 94 | 73 | 72 | Subcarga | 93 | 94 | 73 | 72 |
| Usual | 98 | 95 | 71 | 71 | Usual | 98 | 95 | 71 | 71 |
| Sobrecarga | - | - | - | - | Sobrecarga | - | - | - | - |
| Valor de p | 8,0E-01 | | 9,0E-01 | | Valor de p | 8,0E-01 | | 9,0E-01 | |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

A Tabela 7.26 apresenta os valores máximo, médio (em negrito) e mínimo de vazão afluyente e do índice de monitoramento apresentados pelos reatores UASB. A Figura 7.11 mostra as relações entre o desempenho e a vazão e o índice de monitoramento.

Tabela 7.26 - Valores máximos, médios e mínimos de Q afluyente e IM – Reatores UASB

| Parâmetros | Máximo | Médio | Mínimo |
|------------------------------|--------|--------------|--------|
| Vazões (m ³ /dia) | 17.971 | 3.054 | 40 |
| IM (nº amostras/ano) | 71,6 | 30,1 | 8,8 |

Na Figura 7.11 pode ser visto que os reatores que tratavam vazões maiores ou que foram considerados mais bem monitorados não tiveram desempenhos superiores aos observados para os outros, fato confirmado pelos testes estatísticos apresentados na Tabela 7.27.

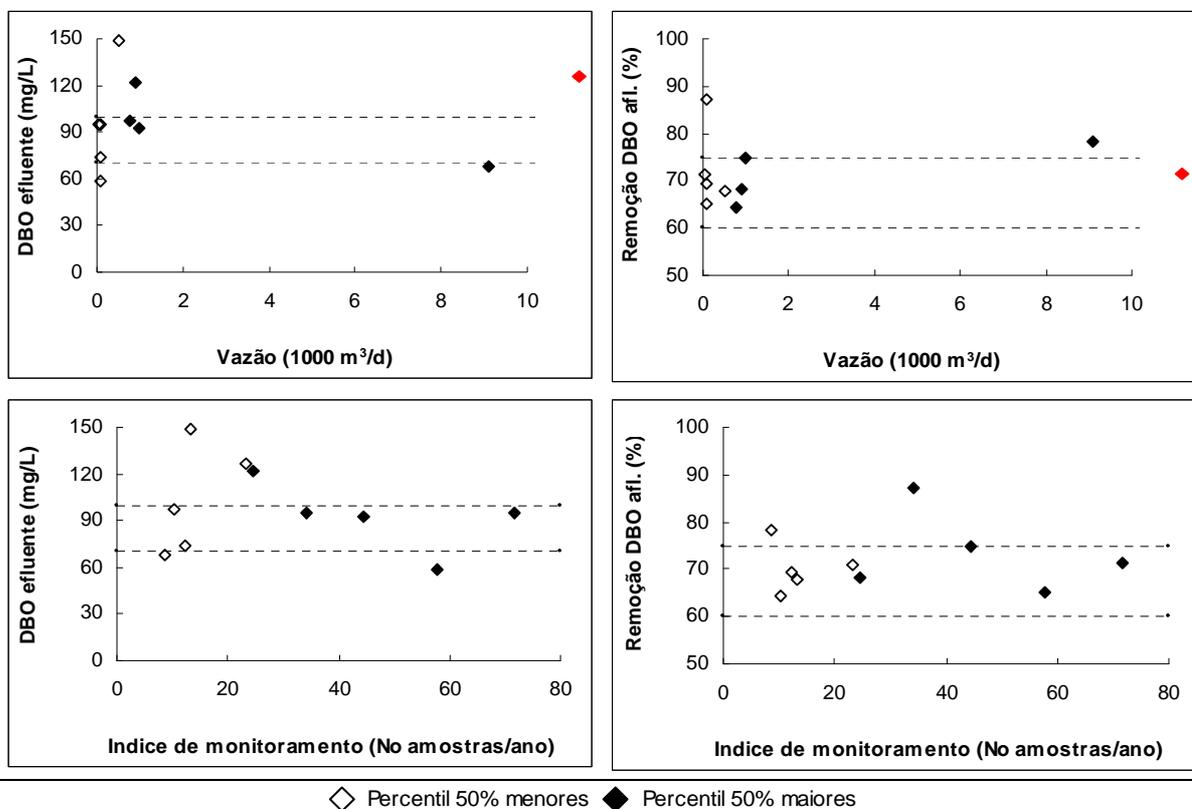


Figura 7.11 – Relação entre Q e IM e concentração de DBO efluente e % de remoção de DBO – Reatores UASB

Nota: O ponto marcado em vermelho refere-se a um reator que trata uma vazão de 18.000 m³/d.

Tabela 7.27 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DBO efluente - reatores UASB

| | Vazão | | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------------|---------|------------------------------|---------|----------------|---------|----|
| | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | DBO efl. (mg/L) | | Eficiência (%) | | |
| | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | Média | Mediana | |
| 50% menores | 94 | 95 | 72 | 70 | 50% menores | 103 | 97 | 70 | 70 |
| 50% maiores | 101 | 97 | 71 | 71 | 50% maiores | 93 | 95 | 73 | 71 |
| Valor de <i>p</i> | 6,8E-01 | | 1,0E+00 | | Valor de <i>p</i> | 5,3E-01 | | 6,7E-01 | |

Nível de significância, α , de 5%

Os testes estatísticos, aplicados para verificação de diferenças significativas entre as eficiências de remoção dos 9 reatores UASB, mostraram que apenas um deles apresentou um desempenho considerado significativamente superior ao dos outros. Este reator operava em subcarga, considerando a velocidade ascensional e o TDH, tratava uma vazão de apenas 76

m³/d e tinha o IM dentro do grupo de 50% maiores. No entanto, outros reatores que apresentaram condições similares de operação não mostraram desempenhos diferenciados.

Constituintes DQO, SST, NT, PT e CF

Os resultados dos testes estatísticos, aplicados para verificação de diferenças significativas entre as medianas das concentrações efluentes e eficiências de remoção dos indicadores DQO, SST, NT, PT e CF, são apresentados nas Tabelas 7.28 e 7.29. Ressalta-se que, no caso dos reatores UASB, foi observado um comportamento idêntico, considerando as condições operacionais, ou seja, as mesmas unidades que operavam em subcarga hidráulica apresentavam uma velocidade ascensional menor que a considerada usual. Isto é de certa forma esperado, uma vez que os reatores UASB possuem alturas úteis similares, o que conduz a uma relação inversa entre os valores de TDH e a velocidade ascensional, ou seja, sistemas com baixo TDH têm elevada velocidade ascensional. Cabe informar, também, que poucos reatores monitoravam os nutrientes, justificando a ausência de resultados dos testes estatísticos. No caso dos coliformes, apenas uma unidade, das três que operavam nas condições usuais de v e TDH, monitoravam este constituinte, inviabilizando uma comparação com o restante do grupo.

Tabela 7.28 - Resultados dos testes estatísticos para DQO e SST - reatores UASB

| Constituinte | | Velocidade ascensional - v | | | | Taxa de detenção hidráulica - TDH | | | |
|--------------|----------------|------------------------------|-------|------------|--------------|-----------------------------------|-------|------------|--------------|
| | | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p | Subcarga | Usual | Sobrecarga | Valor de p |
| Conc. DQO | Média | 258 | 222 | - | | 258 | 222 | - | |
| | Mediana (mg/L) | 245 | 204 | - | 8,6E-01 | 245 | 204 | - | 8,6E-01 |
| Efic. DQO | Média | 58 | 61 | - | | - | - | - | - |
| | Mediana (%) | 64 | 61 | - | 1,0E+00 | - | - | - | - |
| Conc. SST | Média | 74 | 89 | - | | 74 | 89 | - | |
| | Mediana (mg/L) | 67 | 71 | - | 9,0E-01 | 67 | 71 | - | 9,0E-01 |
| Efic. SST | Média | 71 | 62 | - | | 71 | 62 | - | |
| | Mediana (%) | 67 | 61 | - | 3,0E-01 | 67 | 61 | - | 3,0E-01 |

* - indica diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos individuais (teste Fisher's LSD).

O valor de p refere-se à estatística obtida para todo o conjunto de grupos (Teste Kruskal-Wallis).

Nível de significância, α , de 5%

Não foram detectadas diferenças significativas entre os desempenhos apresentados pelos reatores UASB operando em diferentes condições, considerando os parâmetros investigados e as diferentes magnitudes de vazões tratadas e IM praticados.

Tabela 7.29 - Resultados dos testes estatísticos de Mann-Whitney para DQO e SST - reatores UASB

| Constituinte | Vazão | | | Índice de monitoramento - IM | | | | |
|--------------|----------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|
| | Efluente | | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> | 50% menores | 50% maiores | Valor de <i>p</i> |
| Conc. DQO | Média | (mg/L) | 194 | 346 | 3,7E-02 | 290 | 213 | 4,7E-01 |
| | Mediana | | 204 | 310 | | 288 | 211 | |
| Efic. DQO | Média | (%) | 66 | 48 | 5,5E-01 | 43 | 64 | 8,8E-01 |
| | Mediana | | 61 | 60 | | 40 | 58 | |
| Conc. SST | Média | (mg/L) | 65 | 105 | 6,0E-02 | 94 | 75 | 5,3E-01 |
| | Mediana | | 58 | 108 | | 105 | 71 | |
| Efic. SST | Média | (%) | 70 | 63 | 4,0E-01 | 63 | 70 | 7,5E-01 |
| | Mediana | | 65 | 57 | | 65 | 65 | |
| Conc. CF | Média | (mg/L) | 4,67E7 | 2,05E7 | 8,9E-01 | 6,15E+07 | 1,68E+07 | 3,7E-01 |
| | Mediana | | 2,63E7 | 1,47E7 | | 4,80E+07 | 1,00E+07 | |
| Efic. CF | Média | (Unid. log) | 0,75 | 0,67 | 1,0E+00 | 0,29 | 0,96 | 1,3E-01 |
| | Mediana | | 0,74 | 0,68 | | 0,27 | 0,82 | |

Nível de significância, α , de 5%

7.4 Conclusões

- A influência das condições de carga foi muito pequena e dispersa em todos os processos de tratamento. Observou-se que uma única variável ou um grupo de variáveis não pode ser usada para explicar os desempenhos diferenciados em todas as ETEs. A contribuição e a influência de cada variável parece diferir de ETE para ETE e pode ser resultado de projeto, operação ou ambos.
- Considerando as condições de operação, não foi observada uma influência expressiva do porte das estações, medida pela vazão afluente, na qualidade do efluente observada. O índice de monitoramento parece ter tido uma maior influência no desempenho das ETEs de algumas modalidades, comportamento confirmado pelos testes estatísticos.

Diante dos resultados, fica evidente que cada ETE deve ser avaliada individualmente para se tentar justificar bons ou maus desempenhos, já que estes são decorrentes de fatores diversos. É necessário, por parte do projetista e do operador, um conhecimento aprofundado e integrado de cada sistema, envolvendo não apenas as cargas hidráulica e orgânica aplicadas, mas também fatores nem sempre diretamente mensuráveis. Características específicas de cada afluente, aspectos microbiológicos nos reatores, aspectos hidráulicos nas estruturas de entrada, saída e transferência, zonas mortas, curtos-circuitos hidráulicos, condições de funcionamento dos equipamentos eletromecânicos, além de detalhes de projeto, construção e manutenção, devem ser analisados de maneira conjunta, para se tentar estabelecer e entender as várias inter-relações existentes em uma estação de tratamento de esgotos.

Outro aspecto que não deve ser negligenciado diz respeito à qualidade dos dados gerados pelas estações de tratamento, que depende diretamente da qualidade do monitoramento praticado. Investimentos em capacitação de gestores, reguladores e prestadores de serviços podem fomentar o desenvolvimento de habilidades e capacidades das instituições e das pessoas envolvidas, acarretando melhorias no controle operacional ora observado.

8 CARACTERIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DOS CONSTITUINTES

8.1 Introdução

Quando são conhecidos o modelo distributivo e os valores numéricos dos parâmetros que definem uma variável aleatória, podem ser calculadas as probabilidades associadas a quaisquer eventos definidos pelos valores da variável em questão. Ou seja, o modelo de distribuição de probabilidades pode constituir-se em uma síntese plausível do comportamento de uma variável aleatória e ser empregado para interpolar, ou extrapolar, probabilidades e/ou quantis não contidos na amostra de observações (Naghetini e Pinto, no prelo).

Daí a importância, neste estudo, do conhecimento da forma das distribuições de probabilidade dos constituintes presentes em tratamento de esgotos, para o desenvolvimento de modelos que permitam a predição de desempenhos futuros de processos, considerando sua variabilidade e confiabilidade. Com base nos resultados obtidos é apresentado, no Capítulo 9, um estudo sobre a confiabilidade das tecnologias de tratamento. Ou seja, conhecendo-se o comportamento das concentrações efluentes, qual o percentual de atendimento a um determinado padrão de lançamento pode ser assegurado, considerando-se um nível de confiança pré estabelecido.

Numerosos problemas são enfrentados na aplicação de métodos estatísticos em estudos de poluição ambiental. Estes métodos, em geral, são desenvolvidos para conjuntos de dados originados de populações que possuem distribuição normal, mas dados ambientais são freqüentemente assimétricos. Além disso, apresentam, quase sempre, autocorrelação, variância não constante, grande quantidade de erros de medição, dados próximos ou abaixo do limite de detecção, valores suspeitos ou faltantes, tendências e padrões nos níveis de concentrações, relações complexas de causa e efeito e, ainda, necessidade freqüente de se medir mais de uma variável ao mesmo tempo. Todos estes problemas estão presentes, também, no contexto das estações de tratamento de esgotos e têm sido discutidos por diversos profissionais da área (Dean & Forsythe, 1976a, 1976b; Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex et al., 1978 e 1981, Berthouex e Hunter, 1975, 1983, Gilbert, 1987, Yoo et al., 2002).

Quando os dados analisados não são distribuídos segundo um modelo normal, a utilização de testes paramétricos implicará na violação do nível de significância previamente estabelecido, alterando a probabilidade de ocorrência de erro do tipo I, ou seja, rejeição de uma hipótese nula, quando esta é verdadeira.

Algumas estatísticas preliminares, como os coeficientes de assimetria e curtose, podem ser utilizadas para verificação das distribuições dos dados, como sugerido por D'Agostino e Pearson (1973), Bowman e Shenton (1975), Pearson et al. (1977), D'Agostino et al., (1990), Helsel e Hirsch (1992). Valores do coeficiente de assimetria e curtose próximos de zero e três, respectivamente, são característicos de distribuições normais. Valores positivos do coeficiente de assimetria indicam distribuições assimétricas à direita, ou seja, os dados se agrupam mais à esquerda da moda e os valores extremos à direita.

Teoricamente, assimetrias positivas são esperadas para dados oriundos de processos de tratamento de esgotos, já que não existem valores negativos para concentrações afluentes ou efluentes e não existem limites superiores para estes dados. Dentre as distribuições que apresentam assimetria positiva, se destacam as distribuições lognormal e gama, pela frequência de uso.

Quando estas duas distribuições são candidatas, a lognormal é mais comumente usada por fornecer um melhor ajuste de dados assimétricos a uma distribuição normal utilizando-se uma simples transformação logarítmica destes. Outra justificativa para sua utilização é que as flutuações a partir da média são proporcionais e não aditivas e esta propriedade reprodutiva multiplicativa é uma característica da distribuição lognormal (Dean & Forsythe, 1976a, Crow & Shimizu, 1988).

Uma série de estudos publicados sobre a distribuição de frequência dos dados de concentração de constituintes originados de estações de tratamento de esgotos (a maioria considerando DBO e SS), relata que a distribuição lognormal é a que melhor se ajusta aos dados, (Dean & Forsythe, 1976a e 1976b, Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex e Hunter, 1981, 1983, Metcalf & Eddy, 2003, Charles et al., 2005), mas muito pouco tem sido pesquisado ou publicado sobre o comportamento destas variáveis de ETEs em operação no Brasil.

Neste trabalho, procurou-se contribuir para suprir esta lacuna através de uma série de testes que procuraram determinar a normalidade ou não normalidade dos dados, assim como verificar a aderência de amostras dos diversos constituintes a uma distribuição específica. A utilização destes testes específicos e de métodos gráficos, que checam e comparam as várias distribuições candidatas, foi necessária, já que não existe um procedimento teórico que permita a dedução analítica da distribuição mais adequada aos dados. Os testes utilizados foram Qui-quadrado - χ^2 (Cochran, 1952), Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951), Lilliefors (Lilliefors, 1967), Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) e o teste gráfico em papel de probabilidade normal, referido como “Normal Probability Plot”.

Mais de 3400 testes estatísticos foram executados, um a um, para análise do comportamento das variáveis DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, afluentes e efluentes, além da vazão, de 35 ETEs de 11 modalidades diferentes, utilizando o “software” Statistica 6.1.

Numa etapa posterior procurou-se determinar a influência da grande variabilidade da frequência de amostragem praticada pelas diversas ETEs nas distribuições de probabilidade, executando-se outros 2700 testes.

No entanto, segundo Bobée e Ashkar (1991) e Naghettini e Pinto (no prelo), para que os resultados de uma análise de frequência, que inclui testes de hipóteses, estimação de parâmetros, cálculo de quantis e testes de aderência, sejam teoricamente válidos, a série de dados analisada deve atender a certos critérios estatísticos, tais como aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade. Alguns testes, usualmente empregados na hidrologia estatística para testar estas características, foram aplicados aos conjuntos de dados em estudo antes da utilização dos testes de normalidade e aderência.

O teste de Wald-Wolfowitz (Wald e Wolfowitz, 1943) foi utilizado para verificação da independência, o teste de Spearman (Zar, 1972; Naghettini e Pinto, no prelo) para verificar a estacionariedade e o teste de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras foi aplicado para comprovar a homogeneidade dos dados. O atributo de aleatoriedade foi verificado por meio dos testes “Runs above and below the median” e “Runs up and down”, aliados ao teste de autocorrelação “Box-Pierce”, disponibilizados pelo “software” STATGRAPHICS Centurion XV.

8.2 Metodologia

8.2.1 Estatísticas preliminares para verificação das distribuições dos dados

Os coeficientes de assimetria e curtose foram utilizados para uma verificação preliminar da normalidade dos dados, como sugerido por D'Agostino e Pearson (1973), Bowman e Shenton (1975), Pearson et al. (1977), D'Agostino et al., (1990), Helsel e Hirsch (1992), e apresentados na forma de gráficos 'box-whisker' para os parâmetros afluentes e efluentes das ETEs.

O coeficiente de assimetria é a medida de desvio, ou afastamento da simetria, de uma distribuição. Este coeficiente tem valor próximo de zero quando a distribuição tem uma curva simétrica e é positivo quando a distribuição é assimétrica à direita, isto é, quando os dados encontram-se agrupados mais à esquerda da moda, com a maioria dos valores extremos situados à direita. Neste caso, o valor da média é superior à mediana, que, por sua vez, excede a moda. Quando a distribuição é assimétrica à esquerda, pode haver uma tendência de existência de valores negativos.

O coeficiente de curtose mede a curvatura ou o grau de achatamento de uma distribuição, apresentando um valor igual a três, por construção, para uma distribuição normal.

As distribuições que possuem um pico relativamente alto são denominadas leptocúrticas, enquanto que aquelas que apresentam um topo achatado são chamadas platicúrticas. A distribuição normal, que não é muito pontiaguda nem muito achatada, é denominada mesocúrtica. Os valores da curtose são iguais a três para uma distribuição mesocúrtica, maiores que três para distribuição leptocúrtica e menores que três para a platicúrtica (Spiegel, 1994).

8.2.2 Critérios estatísticos para a análise de frequência

Conforme já mencionado, a análise de frequência inclui vários procedimentos, tais como, o testes de hipóteses, a estimação de parâmetros, o cálculo de quantis e os testes de aderência. E, para que os resultados de uma análise de frequência sejam teoricamente válidos, a série de dados analisada deve atender a certos critérios estatísticos, tais como aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade, além de ter sido verificada a presença de

“outliers”. “Outliers” são observações atípicas ou infreqüentes, que parecem não seguir a distribuição característica do resto dos dados. Eles podem refletir propriedades reais do fenômeno em estudo ou serem conseqüências de erros de medição ou outras anomalias que não podem ser modeladas.

Adotando algumas definições utilizadas no contexto dos fenômenos do ciclo da água, e citadas por Naghettini e Pinto (no prelo), o termo *aleatoriedade* significa, essencialmente, que as flutuações de uma certa variável hidrológica decorrem de causas naturais. Nesse sentido, as vazões de um curso d’água regularizadas pela operação de um reservatório, a montante, constituiriam um exemplo de uma série não aleatória. Por analogia, também o seriam as concentrações efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos.

O termo *independência* significa, essencialmente, que nenhuma observação presente na amostra pode influenciar a ocorrência, ou a não ocorrência, de qualquer outra observação seguinte. Mesmo que uma série seja considerada aleatória, as observações que a constituem podem não ser independentes.

O termo *homogeneidade* implica que todos os elementos de uma certa amostra provêm de uma única e idêntica população.

O termo *estacionariedade* refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as observações amostrais são invariantes, com relação à cronologia de suas ocorrências. Os tipos de não estacionariedades incluem tendências, “saltos” e ciclos, ao longo do tempo.

Como não havia interesse, nesta pesquisa, de checar situações extremas, mas sim de se conhecer o comportamento usual dos dados, optou-se, na presente análise, pela exclusão dos “outliers”. Para isto, foi empregada uma regra empírica largamente utilizada no meio científico e todos os conjuntos de dados foram tratados como a seguir:

Observação $>$ Quartil superior + 1,5 (Quartil superior – Quartil inferior) \Rightarrow exclusão do dado

ou

Observação $<$ Quartil inferior - 1,5 (Quartil superior – Quartil inferior) \Rightarrow exclusão do dado

Onde

Quartil superior: percentil 75%

Quartil inferior: percentil 25%

Deve-se ressaltar que existem vários testes utilizados para a detecção e a identificação de “outliers” e muitos deles foram desenvolvidos ou discutidos por Grubbs (1950, 1969), Grubbs e Beck, (1972), Gentleman e Wilk (1975), Rosner (1975), Barnett, (1978, 1993), Beckman e Cook (1983) e Gilbert (1987).

Após a remoção dos “outliers”, os dados foram analisados segundo a seqüência sombreada apresentada no fluxograma da Figura 8.1.

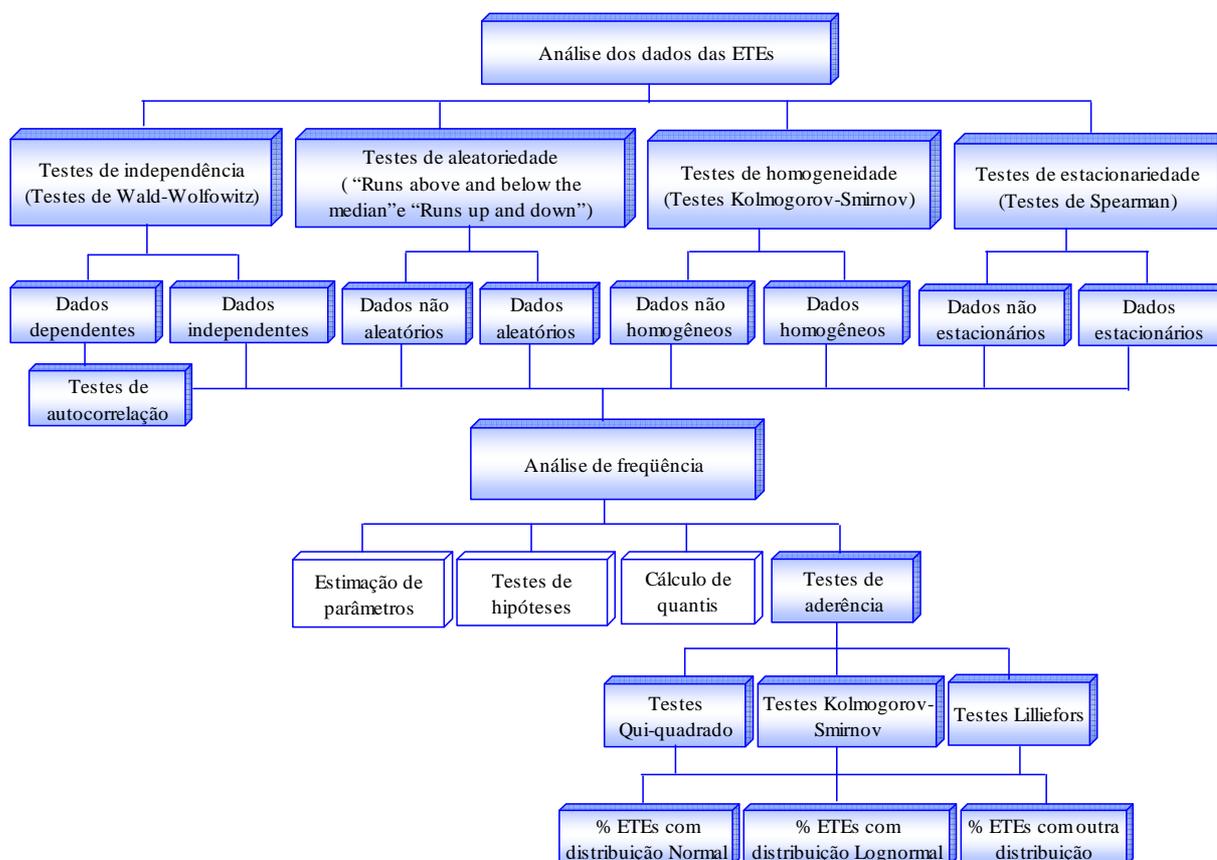


Figura 8.1 – Seqüência de testes utilizados para verificação do modelo distributivo dos dados amostrais

Todos os testes utilizados para verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência das variáveis foram não-paramétricos, uma vez que não se tinha conhecimento, *a priori*, da distribuição de probabilidade dos dados analisados.

O critério de aleatoriedade foi checado por meio dos testes “Runs above and below the median” e “Runs up and down”, aliados ao teste de autocorrelação “Box-Pierce”,

disponibilizados pelo “software” STATGRAPHICS Centurion XV. Este tipo de teste se baseia no número de valores observados na série de dados que, se maiores que a mediana, receberão um código positivo e, se menores, um negativo. O número excessivo de códigos positivos ou negativos indicará a possibilidade de não aleatoriedade.

O teste de Wald-Wolfowitz (Wald e Wolfowitz, 1943), que considera as diferenças entre as observações e a média amostral, foi desenvolvido em planilhas Excel e aplicado para verificação da independência dos dados disponibilizados pelas ETes analisadas.

Para checar a homogeneidade dos dados, foi aplicado o teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov para duas amostras, utilizando-se o “software” Statistica 6.0. A estatística deste teste tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas. Cada conjunto de dados foi dividido em duas partes e a primeira metade foi comparada com a segunda, para checar se as amostras foram retiradas da mesma população.

O teste de Spearman (Zar, 1972; Naghettini e Pinto, no prelo), que é baseado no coeficiente de correlação entre as ordens de classificação da seqüência de variáveis e os índices de tempo, foi desenvolvido em planilhas Excel e utilizado para checar a estacionariedade dos dados.

Uma vez conhecidas as condições de independência, homogeneidade e estacionariedade dos dados e de se ter assegurado a ausência de “outliers”, foram utilizados uma série de testes que procuraram determinar a normalidade ou não normalidade dos dados, assim como verificar a aderência das amostras de dados dos diversos constituintes a uma distribuição específica, como descrito a seguir.

8.2.3 Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição

A verificação da forma da distribuição de frequência dos indicadores DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, afluentes e efluentes, e da vazão afluente foi efetuada em duas etapas. O objetivo da primeira etapa foi checar apenas a normalidade dos dados originais, por meio da execução dos testes de normalidade Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro Wilk e o teste gráfico “Normal Probability Plot”.

A segunda etapa consistiu de testes de aderência às distribuições normal, lognormal, gama, exponencial e retangular, através dos testes do χ^2 , Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors. O teste gráfico “Probability- Probability Plot” foi utilizado, em alguns casos, para verificação da distribuição teórica que melhor se ajustava aos dados amostrais. O “software” utilizado para execução dos testes foi o Statística 6.1.

A utilização de testes específicos e de métodos gráficos, que checam e comparam as várias distribuições candidatas, foi necessária já que não existe um procedimento teórico para dedução analítica da distribuição que seja mais adequada aos dados.

Como o objetivo dos testes foi conhecer o comportamento dos dados de diferentes modalidades de tratamento, mesmo algumas ETes que não apresentaram um número de dados suficiente para a utilização de alguns testes e monitoramento freqüente dos parâmetros foram incluídas no estudo.

Os resultados dos testes de aderência foram computados, então, considerando as avaliações individuais de cada teste. Em alguns casos, os testes indicaram mais de uma distribuição candidata como representativa dos dados amostrais. No caso dos testes do χ^2 , os resultados eram muito influenciados pelo número de intervalos de classes (NIC) adotados. Optou-se por utilizar, sempre, o NIC determinado pelo “software” Statística, que resultava em valores bastante próximos da raiz quadrada do número de dados (\sqrt{n}).

Os testes Kolmogorov-Smirnov, usados para verificação de discrepâncias dos dados observados a partir das respectivas distribuições teóricas, mostraram-se muito pouco precisos, indicando a possibilidade de aceitação de diversas distribuições como representantes do comportamento dos dados. Em vários casos, todas as distribuições candidatas testadas (normal, lognormal, gama, exponencial e retangular), poderiam ser adotadas, considerando os resultados obtidos.

Os testes de Lilliefors, uma extensão do teste de Kolmogorov-Smirnov, mostraram-se mais precisos que o teste original, não aceitando tantas distribuições candidatas. No entanto, ainda se mostraram menos precisos que os testes do χ^2 .

Foi necessário, portanto, efetuar uma análise conjunta de todos os resultados e lançar mão, ainda, dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro Wilk) e dos testes

gráficos (“Normal Probability Plot” e “Probability- Probability Plot”) para determinação da distribuição mais representativa dos dados amostrais, como exemplificado na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Exemplo de testes efetuados para determinação da distribuição de probabilidade dos dados amostrais

| Constituinte | Testes de aderência | | | Testes de normalidade | | Análise gráfica | |
|---|---------------------|--------------------------|------------|-----------------------|--------------|--------------------|-------------------------|
| | χ^2 | Kolmogorov Smirnov (K-S) | Lilliefors | K-S e Lilliefors | Shapiro-Wilk | Normal Probability | Probability-Probability |
| ETE 01 | N, logN | N, logN, G, Exp, Ret | N, logN, G | Não normal | Não normal | Não normal | LogN |
| Legenda: N- Normal logN – lognormal G – Gama Exp – Exponencial Ret - Retangular | | | | | | | |

No exemplo utilizado, a distribuição lognormal foi selecionada como a mais ajustada aos dados de DBO efluente da ETE 01, já que a estatística de todos os testes de aderência indicaram sua não rejeição e os testes de normalidade apontaram desvios da normalidade. Neste caso, os dois testes gráficos foram utilizados para confirmação dos resultados.

Esse procedimento foi adotado para todos os constituintes, de todas as ETES, e as distribuições candidatas que mostraram um melhor ajuste aos dados, considerando todos os testes, foram computadas, para posterior seleção daquela mais representativa de cada parâmetro, como mostrado na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Seleção da distribuição candidata que melhor se ajustou aos dados

| Constituintes | Distribuição adotada a partir dos resultados dos diversos testes | | | | | % de ETES cujos dados foram representados pelas distribuições candidatas | | | | | Distribuição adotada |
|---|--|--------|--------|-------|--------|--|--------|-----|-------|---------|----------------------|
| | ETE 01 | ETE 02 | ETE 03 | ... | ETE 35 | % N | % logN | % G | % Exp | % outra | |
| Afluente | DBO | outra | N | logN | N | 28 | 34 | 0 | 0 | 38 | logN |
| | DQO | outra | N | logN | logN | 29 | 35 | 0 | 0 | 35 | logN |
| | SST | outra | outra | logN | N | 23 | 48 | 0 | 0 | 29 | logN |
| | NT | outra | logN | N | logN | 39 | 56 | 0 | 0 | 6 | logN |
| | PT | outra | N | N | N | 42 | 33 | 0 | 0 | 25 | N |
| | CF | outra | logN | exp | logN | 12 | 69 | 0 | 8 | 20 | logN |
| | Vazão | outra | N | logN | N | 19 | 50 | 0 | 0 | 31 | logN |
| Efluente | DBO | logN | logN | N | logN | 13 | 59 | 0 | 0 | 28 | logN |
| | DQO | N | logN | outra | logN | 26 | 52 | 0 | 0 | 23 | logN |
| | SST | N | N | logN | logN | 10 | 61 | 0 | 3 | 29 | logN |
| | NT | logN | logN | outra | logN | 28 | 67 | 0 | 0 | 6 | logN |
| | PT | logN | outra | N | logN | 25 | 42 | 0 | 0 | 33 | logN |
| | CF | logN | exp | outra | logN | 23 | 54 | 0 | 12 | 24 | logN |
| Legenda: N- Normal logN – lognormal G – Gama Exp – Exponencial Outra – forma indefinida | | | | | | | | | | | |

O termo “outra” foi utilizado quando nenhuma distribuição, entre os modelos propostos, se ajustava aos dados ou quando havia uma indefinição acerca da aderência às distribuições candidatas, considerando os diversos testes aplicados.

Tomando como exemplo a DBO efluente, para melhor entendimento da Tabela 8.2, verifica-se que 13% das ETEs tiveram dados amostrais melhor ajustados à distribuição normal, 59% à lognormal e 28% à nenhuma especificamente. Desta forma, como o maior percentual foi de aderência à distribuição lognormal, esta foi adotada como representante do comportamento dos dados de concentração efluente de DBO.

8.2.4 Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições

O objetivo dos testes foi verificar se as distribuições de probabilidade dos dados de uma mesma ETE sofriam algum tipo de alteração quando a frequência de monitoramento era modificada. Para isto foram extraídos alguns sub conjuntos das séries históricas de dados, onde foram selecionadas algumas variáveis relativas a dias alternados de amostragens.

Este estudo se fez necessário, também, devido à grande heterogeneidade dos dados disponibilizados pelas diversas ETEs, considerando a frequência de amostragem, como apresentado na Tabela 4.3. Foi preciso, assim, verificar a influência desta variabilidade na distribuição dos dados para confirmação da distribuição de frequência que melhor se ajustava às concentrações dos constituintes.

Algumas ETEs que possuíam um maior número de dados e que apresentavam um monitoramento mais freqüente foram selecionadas para estudo.

Para aquelas estações que possuíam frequência de amostragem diária e de duas vezes por semana foram efetuados testes de normalidade para as séries históricas de dados, para os dados de segunda, de terça, de quarta, de quinta e de sexta-feira. Para outras ETEs, que apresentavam um monitoramento semanal e quinzenal, os testes foram efetuados para cada série histórica de dados, para as semanas 1 e 3, as semanas 2 e 4, a semana 1, a semana 3 e a média das semanas.

Foram efetuados testes de normalidade e de aderência às distribuições normal, lognormal, gama, exponencial e retangular (testes χ^2 , Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors, para os dois casos).

8.3 Resultados e discussão

8.3.1 Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados

Foram selecionadas 35 ETEs, de 11 diferentes modalidades, para a verificação da distribuição de probabilidade dos dados. Como já comentado, algumas ETEs foram incluídas, ainda que possuíssem um número pequeno de dados e frequência de monitoramento não definida e três delas tiveram apenas os dados de vazão analisados. Tentou-se, desta forma, fazer com que grande parte das modalidades de tratamento estivesse representada no estudo. Procurou-se adotar um critério, dentro das limitações que a disponibilidade de dados permitia, de analisar cerca de dez por cento do número de ETEs de cada modalidade.

Assim, das 78 lagoas facultativas, por exemplo, sete foram selecionadas para estudo. No caso dos sistemas compostos por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, seis das 50 ETEs foram estudadas. No entanto, algumas modalidades foram representadas com um maior número de ETEs devido à maior disponibilidade e boa qualidade dos dados e outras não puderam ser analisadas face à precariedade destes.

A Tabela 8.3 mostra as ETEs analisadas, o número de dados dos constituintes afluentes e efluentes e de vazão afluente. Note-se, também, que várias ETEs não monitoravam todos os parâmetros de interesse, com destaque para a medição de vazão, não efetuada em muitos casos.

Os coeficientes de assimetria e curtose foram calculados para as 35 ETEs para uma verificação preliminar das distribuições dos dados. A Figura 8.2 mostra os resultados para os constituintes DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, nos esgotos brutos e tratados, e para a vazão afluente.

Tabela 8.3 – Sistemas de esgotos analisados para a caracterização da distribuição de frequência dos constituintes

| ETE | Número de dados | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|----|-------|-----------|-----|-----|-----|-----|----|
| | Afluentes | | | | | | | Efluentes | | | | | |
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| ES 01 | 11 | 11 | 10 | 0 | 8 | 9 | 0 | 11 | 9 | 9 | 0 | 6 | 10 |
| FBP 01 | 213 | 345 | 317 | 0 | 0 | 0 | 0 | 262 | 351 | 324 | 0 | 0 | 0 |
| FS + FA 01 | 43 | 43 | 43 | 41 | 43 | 38 | 12 | 44 | 44 | 44 | 41 | 43 | 39 |
| FS + FA 02 | 19 | 20 | 17 | 15 | 19 | 17 | 44 | 16 | 18 | 19 | 18 | 19 | 19 |
| FS + FA 03 | 73 | 71 | 73 | 62 | 67 | 33 | 97 | 72 | 71 | 73 | 62 | 68 | 34 |
| FS + FA 08 | 18 | 19 | 0 | 8 | 0 | 14 | 0 | 19 | 19 | 0 | 9 | 0 | 14 |
| LA 02 | 84 | 85 | 89 | 82 | 88 | 39 | 176 | 86 | 78 | 87 | 80 | 86 | 40 |
| LA 03 | 50 | 53 | 53 | 53 | 52 | 24 | 119 | 47 | 54 | 52 | 53 | 51 | 27 |
| LA 04 | 196 | 196 | 192 | 168 | 188 | 84 | 378 | 182 | 189 | 187 | 164 | 187 | 82 |
| LA 05 | 267 | 275 | 264 | 198 | 249 | 87 | 353 | 259 | 263 | 251 | 188 | 244 | 81 |
| LA 06 | 104 | 103 | 101 | 90 | 105 | 12 | 148 | 100 | 100 | 93 | 90 | 103 | 9 |
| LA 07 | 302 | 712 | 477 | 0 | 0 | 0 | 684 | 288 | 712 | 487 | 0 | 0 | 0 |
| LA 08 | 62 | 324 | 323 | 27 | 0 | 0 | 60 | 65 | 328 | 316 | 25 | 0 | 0 |
| LA 11 | 89 | 150 | 175 | 0 | 0 | 0 | 909 | 64 | 126 | 223 | | 0 | 0 |
| LAF 1 | 181 | 182 | 185 | 159 | 180 | 82 | 366 | 179 | 180 | 181 | 157 | 179 | 82 |
| LAMC 03 | 691 | 688 | 77 | 89 | 79 | 0 | 712 | 699 | 712 | 71 | 89 | 82 | 0 |
| LF 01 | 141 | 148 | 143 | 125 | 133 | 83 | 334 | 143 | 148 | 148 | 114 | 142 | 86 |
| LF 03 | 125 | 123 | 129 | 104 | 125 | 74 | 341 | 109 | 97 | 105 | 86 | 111 | 72 |
| LF 19 | 16 | 18 | 17 | 0 | 9 | 15 | 0 | 19 | 19 | 17 | 0 | 9 | 16 |
| LF 39 | 14 | 11 | 13 | 0 | 5 | 7 | 0 | 13 | 14 | 14 | 0 | 4 | 8 |
| LF 56 | 13 | 13 | 12 | 10 | 0 | 13 | 0 | 12 | 13 | 12 | 10 | 0 | 13 |
| LF 69 | 11 | 11 | 11 | 10 | 0 | 9 | 0 | 11 | 11 | 11 | 9 | 0 | 9 |
| LF 78 | 12 | 14 | 14 | 0 | 11 | 14 | 0 | 13 | 14 | 14 | 0 | 12 | 14 |
| LF+LM 01 | 141 | 148 | 143 | 125 | 133 | 83 | 364 | 130 | 135 | 135 | 111 | 134 | 69 |
| LAN+LF 03 | 55 | 53 | 22 | 0 | 0 | 0 | 30 | 55 | 54 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| LAN+LF 05 | 10 | 11 | 8 | 0 | 6 | 9 | 0 | 11 | 11 | 8 | 0 | 6 | 8 |
| LAN+LF 18 | 11 | 11 | 8 | 0 | 9 | 9 | 0 | 11 | 12 | 7 | 0 | 9 | 10 |
| LAN+LF 24 | 16 | 14 | 16 | 0 | 10 | 14 | 0 | 15 | 16 | 15 | 0 | 10 | 14 |
| LAN+LF 32 | 16 | 16 | 15 | 0 | 9 | 12 | 0 | 16 | 14 | 12 | 0 | 8 | 11 |
| UASB 03 | 180 | 182 | 181 | 140 | 185 | 47 | 162 | 173 | 176 | 175 | 129 | 184 | 44 |
| UASB+LF 01 | 218 | 0 | 240 | 0 | 17 | 31 | 120 | 218 | 0 | 235 | 0 | 16 | 27 |
| UASB+LF 02 | 45 | 46 | 55 | 0 | 11 | 34 | 0 | 44 | 43 | 51 | 0 | 9 | 29 |
| LA 15 | | | | | | | 168 | | | | | | |
| LAF 02 | | | | | | | 334 | | | | | | |
| LAN+LF 01 | | | | | | | 31 | | | | | | |

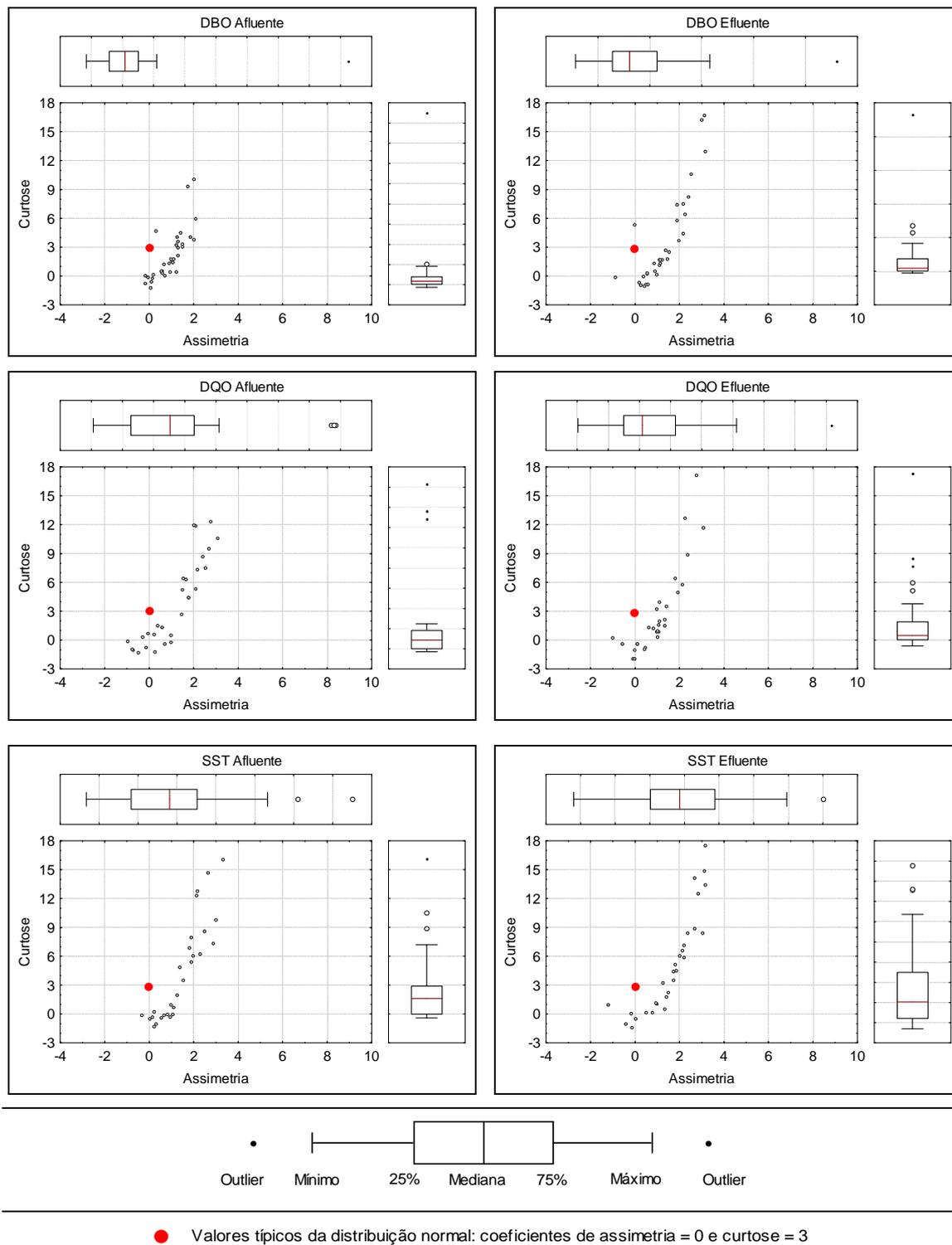


Figura 8.2 – Gráfico dos coeficientes de assimetria *versus* curtose dos diversos constituintes

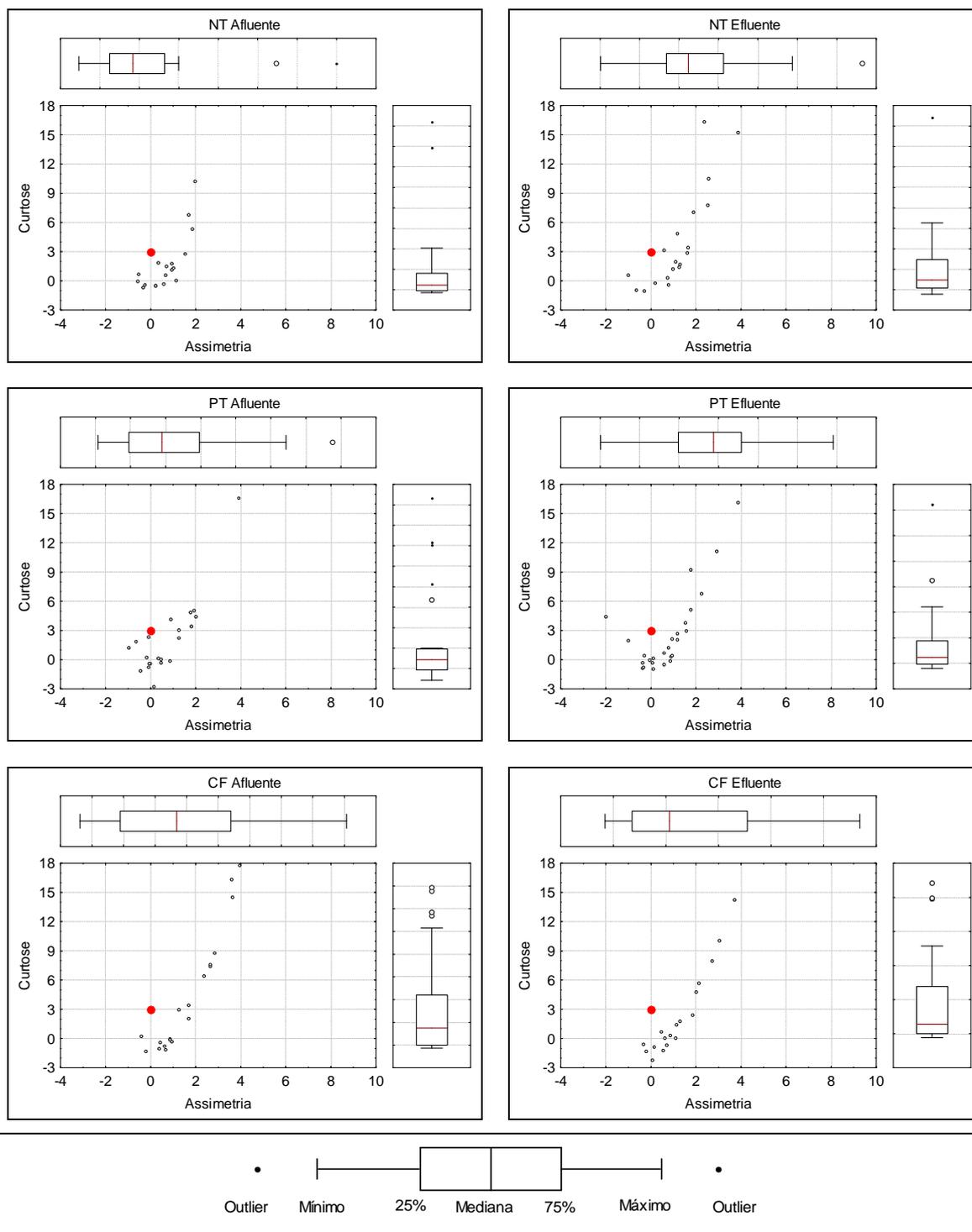


Figura 8.2 – Gráfico dos coeficientes de assimetria *versus* curtose dos diversos constituintes (Cont.)

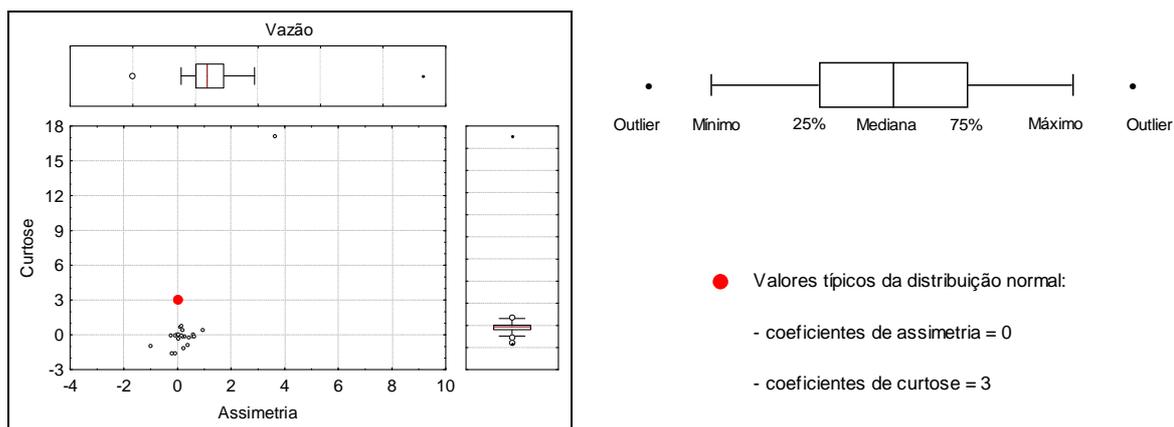


Figura 8.2 – Gráfico dos coeficientes de assimetria *versus* curtose dos diversos constituintes (Cont.)

Pela observação dos gráficos nota-se que, tanto para as variáveis afluentes quanto para as efluentes, a maioria dos valores dos coeficientes de assimetria foi positiva, indicando distribuições assimétricas à direita.

Do mesmo modo, grande parte dos valores de curtose foram diferentes de três, indicando que o grau de achatamento das distribuições dos dados difere do observado para uma distribuição normal. Os valores de todos os constituintes, afluentes e efluentes, mostraram uma grande dispersão, apresentando alguns valores de curtose máximos muito elevados, o que caracteriza distribuições leptocúrticas com picos muito altos. No entanto, a maioria das ETEs apresentou distribuições platicúrticas, isto é, com topos achatados.

8.3.2 Critérios estatísticos para a análise de frequência

Como já comentado no item “Metodologia”, para a aplicação dos métodos estatísticos a um conjunto de observações é necessário que as premissas básicas de independência, aleatoriedade, homogeneidade e estacionariedade sejam atendidas. Os resultados dos testes efetuados nos dados amostrados nas estações de tratamento de esgotos, para verificação do atendimento a estes pressupostos, são apresentados nos itens que se seguem.

8.3.2.1 Teste da hipótese de independência

O teste de Wald-Wolfowitz foi empregado para checar a hipótese de independência dos conjuntos de dados disponibilizados pelas ETEs, considerando um nível de significância (α) de 5%.

Os resultados obtidos nos testes são apresentados na Tabela 8.4, onde são listados o número e percentual de ETEs cujos dados foram considerados independentes pelo teste.

Tabela 8.4 – Número e percentual de ETEs com dados considerados **independentes** pelo teste Wald-Wolfowitz

| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão |
|----------------|---------|-----|-----|-----|----|----|----|-------|
| Esgoto bruto | Nº ETEs | 17 | 18 | 21 | 5 | 11 | 25 | 1 |
| | (%) | 53 | 58 | 68 | 28 | 46 | 96 | 5 |
| Esgoto tratado | Nº ETEs | 14 | 18 | 18 | 6 | 10 | 19 | - |
| | (%) | 44 | 58 | 58 | 33 | 42 | 73 | - |

De uma maneira geral, um maior percentual de ETEs apresentou conjuntos de dados considerados independentes, exceção feita para os nutrientes e a vazão. Diante destes resultados, que contrariam o reportado por autores que efetuaram análise de frequência de dados oriundos de tratamento de esgotos (Dean & Forsythe, 1976a, 1976b; Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex et al., 1981, Berthouex e Hunter, 1975, 1983, Gilbert, 1987, Yoo et al., 2002), procurou-se investigar, então, se os resultados estariam mais diretamente ligados à frequência de monitoramento praticado pelas ETEs. Estas frequências eram bastante variadas e foram, a título de simplificação, agregadas em dois grupos maiores, diária a semanal e acima de quinzenal, como mostrado na Figura 8.3. Ressalta-se que cerca de 30% das ETEs praticavam uma frequência de monitoramento indefinida, fornecendo dados dispersos coletados ao longo de períodos variados.

A grande maioria dos resultados que apontaram independência entre os dados dos constituintes presentes nos esgotos brutos e tratados foram observados na faixa de frequência acima de quinzenal, como pode ser melhor observado pelos gráficos apresentados na Figura 8.4. Os resultados foram bastante coerentes, já que uma maior independência entre os dados é esperada para maiores intervalos entre amostragens. Como era de se esperar, um comportamento inverso foi verificado para os dados de ETEs com menor frequência de monitoramento, onde a maioria dos resultados foi de dependência.

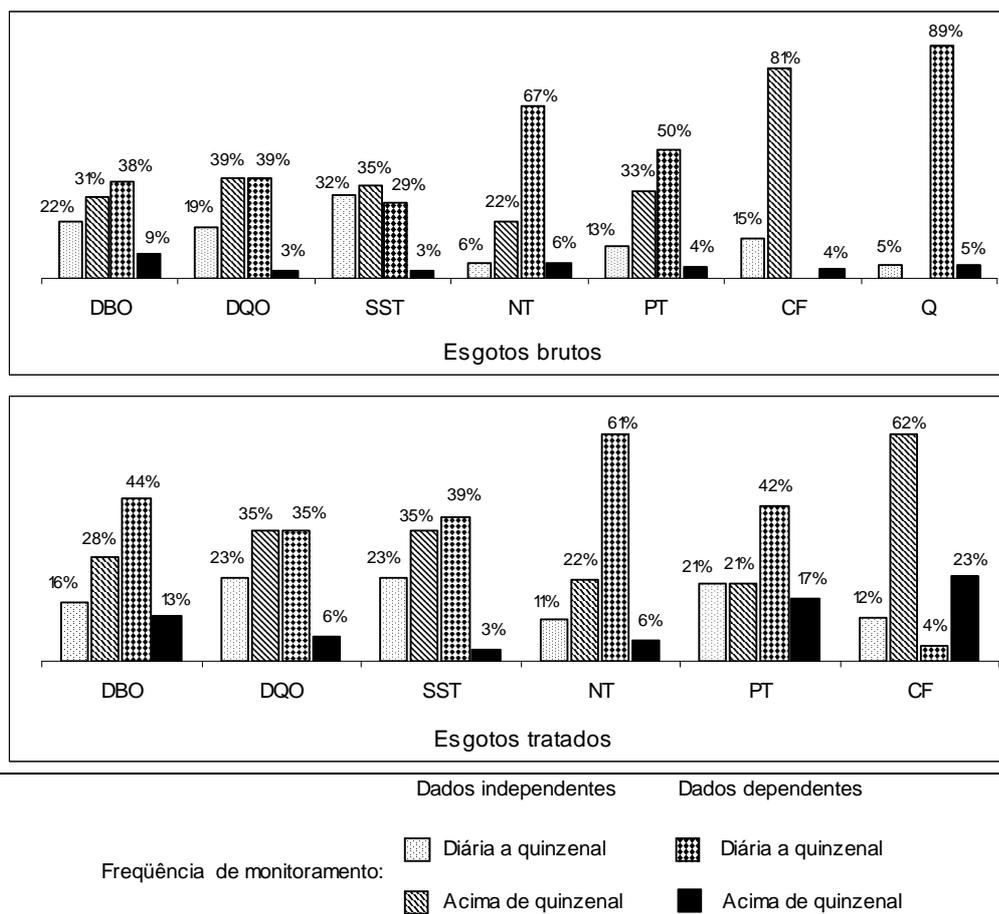


Figura 8.3 - Resultados percentuais dos testes de independência, considerando as frequências de monitoramento

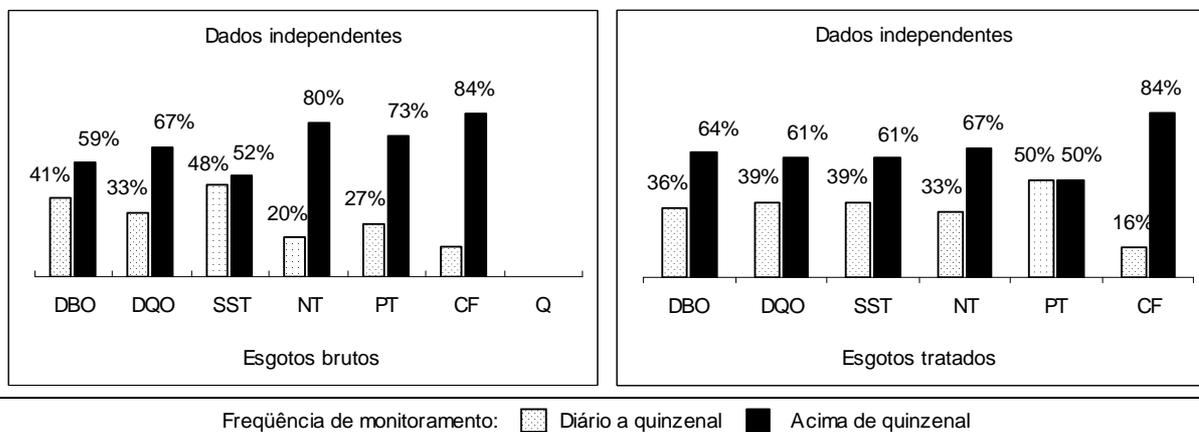


Figura 8.4 – Percentual de dados independentes, considerando as frequências de monitoramento

Para se obter um maior conhecimento da natureza dos dados analisados, procurou-se checar o “grau” de dependência existente entre as séries de dados, por meio da aplicação de testes de autocorrelação em todos os conjuntos de dados, para verificação do valor do coeficiente de correlação (r). Foi tomada uma decisão arbitrária para a definição do valor de r que seria

considerado expressivamente dependente. Tomou-se como referência o valor do coeficiente de determinação (R^2) igual a 20%, o que implicou num $r = 0,447$. O coeficiente de determinação representa a fração da variância dos dados que é explicada ou considerada pelo modelo de regressão. Os resultados dos testes de autocorrelação são apresentados na Tabela 8.5 a seguir, que apresenta o percentual de ETEs cujos dados foram considerados dependentes, mas que apresentaram coeficientes de determinação menor que 20%.

Tabela 8.5 - Percentual de ETEs com coeficientes de determinação $R^2 < 20\%$

| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão |
|--------------------|-----|-----|-----|----|----|-----|-------|
| Esgoto bruto (%) | 73 | 77 | 90 | 69 | 46 | 100 | 10 |
| Esgoto tratado (%) | 67 | 54 | 92 | 25 | 50 | 43 | |

Como pode ser visto pelos resultados apresentados na tabela, grande parte das ETEs analisadas mostrou um percentual expressivo de coeficientes de determinação menores que o valor limite adotado, considerando todos os constituintes. Exceções foram observadas para os dados de vazão, NT e CF efluente, cujos coeficientes de determinação foram, em sua maioria, acima do limite arbitrado.

8.3.2.2 Teste da hipótese de aleatoriedade

Os testes não paramétricos “Runs above and below the median” e “Runs up and down”, aliados ao teste de autocorrelação “Box-Pierce”, disponibilizados pelo “software” STATGRAPHICS, foram utilizados para checar a hipótese de aleatoriedade dos dados. Os resultados obtidos nos testes são apresentados na Tabela 8.6, onde são mostrados o número e percentual de ETEs cujos dados foram considerados aleatórios pelos testes.

Tabela 8.6 – Número e percentual de ETEs com dados considerados **aleatórios** pelos testes

| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão |
|----------------|---------|-----|-----|-----|----|----|----|-------|
| Esgoto bruto | Nº ETEs | 15 | 16 | 16 | 5 | 11 | 21 | 3 |
| | (%) | 47 | 52 | 52 | 28 | 46 | 81 | 14 |
| Esgoto tratado | Nº ETEs | 14 | 18 | 15 | 6 | 11 | 17 | - |
| | (%) | 44 | 58 | 48 | 33 | 46 | 65 | - |

Os resultados foram semelhantes aos observados para a independência dos dados. O percentual de dados aleatórios foi maior do que o reportado pela literatura, considerando os constituintes analisados. De forma análoga, procurou-se considerar a influência da frequência

de monitoramento praticada pelas ETEs, que foram agregadas nos dois grupos, diária a semanal e acima de quinzenal, como mostrado na Figura 8.5.

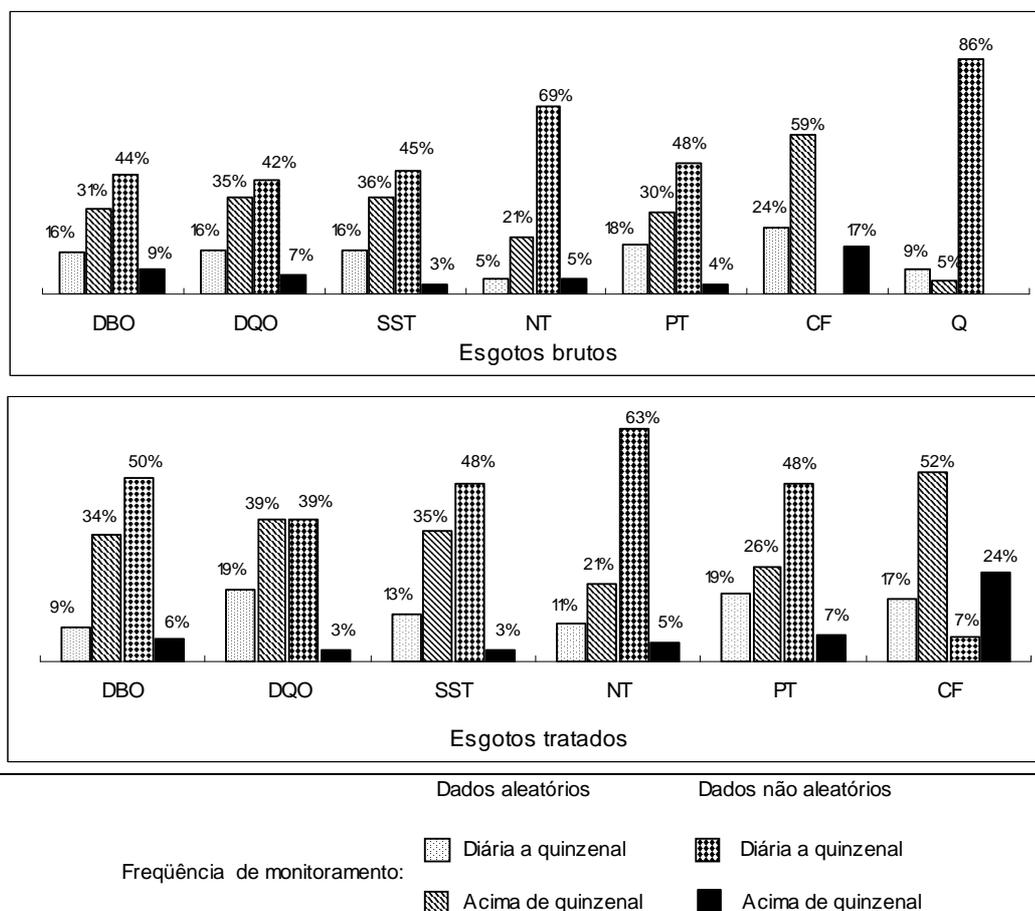


Figura 8.5 - Resultados percentuais dos testes de aleatoriedade, considerando as frequências de monitoramento

Também neste caso, ao se considerar as frequências de monitoramento, a grande maioria dos resultados indicou não aleatoriedade entre os dados dos constituintes presentes nos esgotos brutos e tratados, quando se praticava uma frequência diária a quinzenal. Do mesmo modo, quando os dados eram amostrados com uma frequência acima de quinzenal, predominou o percentual de dados aleatórios, como pode ser observado na Figura 8.6.

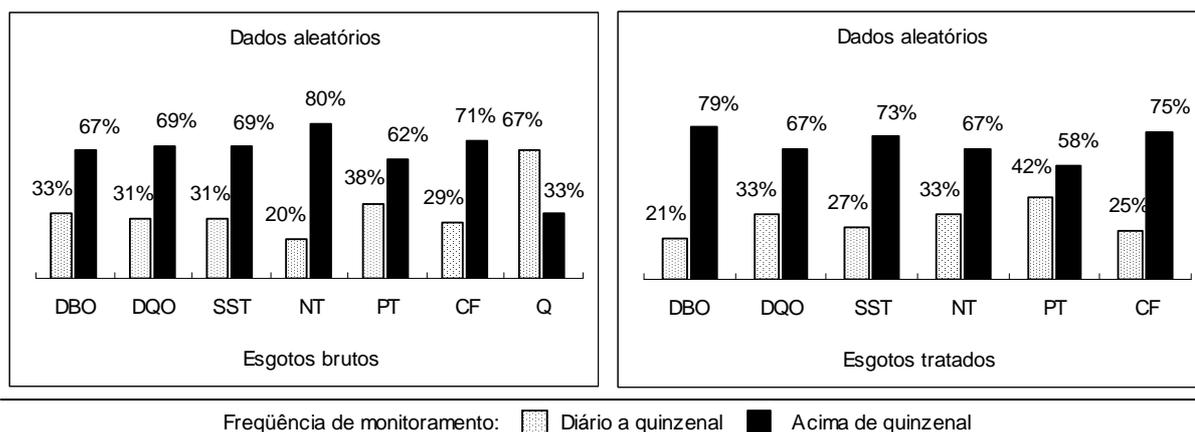


Figura 8.6 - Percentual de dados aleatórios, considerando as freqüências de monitoramento

8.3.2.3 Teste da hipótese de homogeneidade

O teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras foi utilizado para checar a hipótese de homogeneidade dos dados. O teste avalia a hipótese de que duas amostras foram retiradas de populações que diferem em algum aspecto, isto é, não apenas com respeito à forma geral das distribuições (diferença nas dispersões ou na assimetria), mas também quanto à mediana.

Todos os constituintes de todas as ETEs listadas na Tabela 8.2 foram testados, considerando a homogeneidade dos conjuntos de dados. Como mencionado no item “Metodologia” (8.2.2), cada conjunto de dados foi dividido em duas partes e a primeira metade foi comparada com a segunda, para checar se as amostras foram retiradas de populações de mesma distribuição.

Como o teste detecta tanto as diferenças entre as medianas quanto entre as formas das distribuições, foi necessária a aplicação simultânea do teste Mann-Whitney, que detecta apenas diferenças entre as medianas. Com este procedimento, foram consideradas não homogêneas as séries de dados que apresentaram diferenças significativas apenas no teste Kolmogorov-Smirnov e não em ambos. Os resultados obtidos nos testes são apresentados na Tabela 8.7, onde são mostrados o número e percentual de ETEs cujos dados foram considerados homogêneos pelos testes.

Tabela 8.7 - Número e percentual de ETEs com dados considerados **homogêneos** pelos testes

| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão |
|----------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Esgoto bruto | No ETEs | 32 | 31 | 30 | 17 | 21 | 26 | 21 |
| | (%) | 100 | 100 | 97 | 94 | 88 | 100 | 95 |
| Esgoto tratado | No ETEs | 31 | 28 | 30 | 18 | 24 | 25 | - |
| | (%) | 97 | 90 | 97 | 100 | 100 | 96 | - |

Os resultados dos testes mostraram que a quase totalidade dos dados disponibilizados pelas ETEs foi homogênea, considerando o critério de análise adotado.

8.3.2.4 Teste da hipótese de estacionariedade

O teste de Spearman, que detecta tendências temporais presentes em uma série de dados, foi empregado para checar a hipótese de estacionariedade dos dados disponibilizados pelas 35 ETEs. Os resultados são apresentados na Tabela 8.8, onde são mostrados o número e percentual de ETEs cujos dados foram considerados estacionários pelo teste, considerando um nível de significância de 5%.

 Tabela 8.8 - Número e percentual de ETEs com dados considerados **estacionários** pelo teste

| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão |
|----------------|---------|-----|-----|-----|----|----|----|-------|
| Esgoto bruto | Nº ETEs | 19 | 22 | 20 | 10 | 18 | 25 | 4 |
| | (%) | 59 | 71 | 65 | 56 | 75 | 96 | 18 |
| Esgoto tratado | Nº ETEs | 19 | 21 | 21 | 6 | 16 | 20 | |
| | (%) | 59 | 68 | 68 | 33 | 67 | 77 | |

Os resultados dos testes mostraram que a maioria dos dados analisados foi estacionária, considerando tanto o esgoto bruto quanto o tratado. As exceções verificadas foram para os dados de vazão e de concentração efluente de NT, cuja predominância foi de dados não estacionários. Não foi possível estabelecer uma relação conclusiva entre a frequência de amostragem e a estacionariedade dos dados, que pareceu sofrer uma influência muito pequena do tipo de monitoramento, como apresentado nas Figuras 8.7 e 8.8.

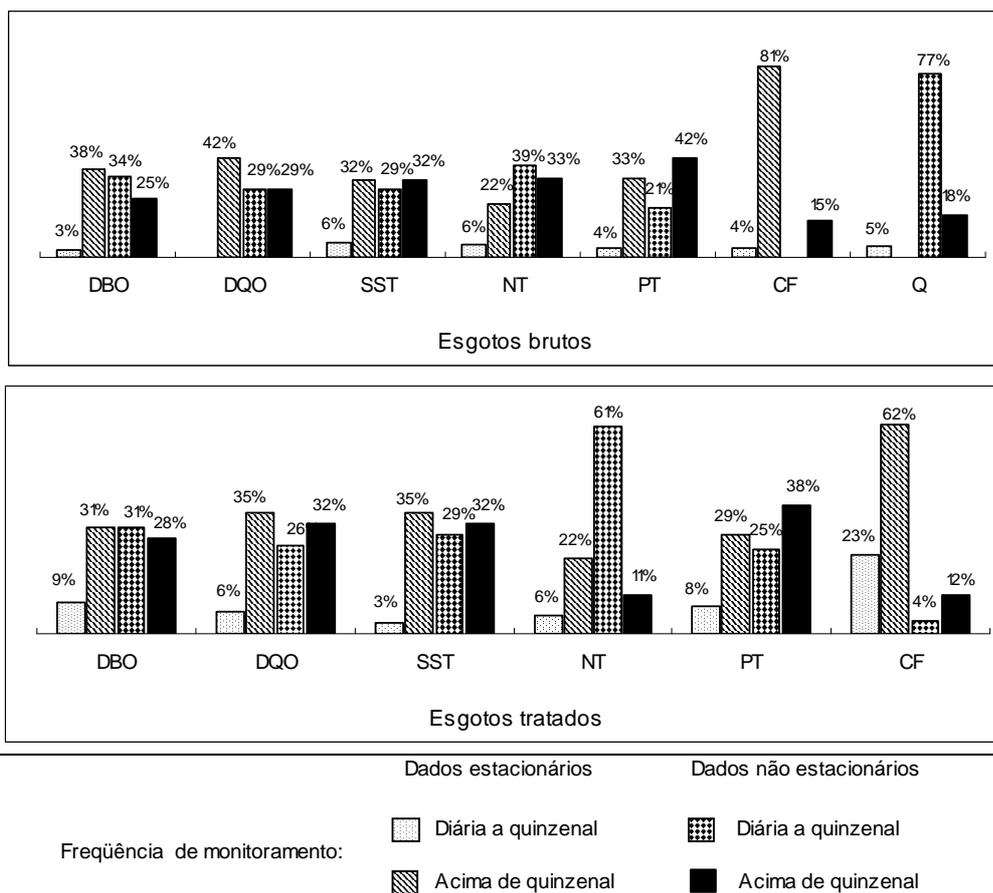


Figura 8.7 - Resultados percentuais dos testes de estacionariedade, considerando as frequências de monitoramento

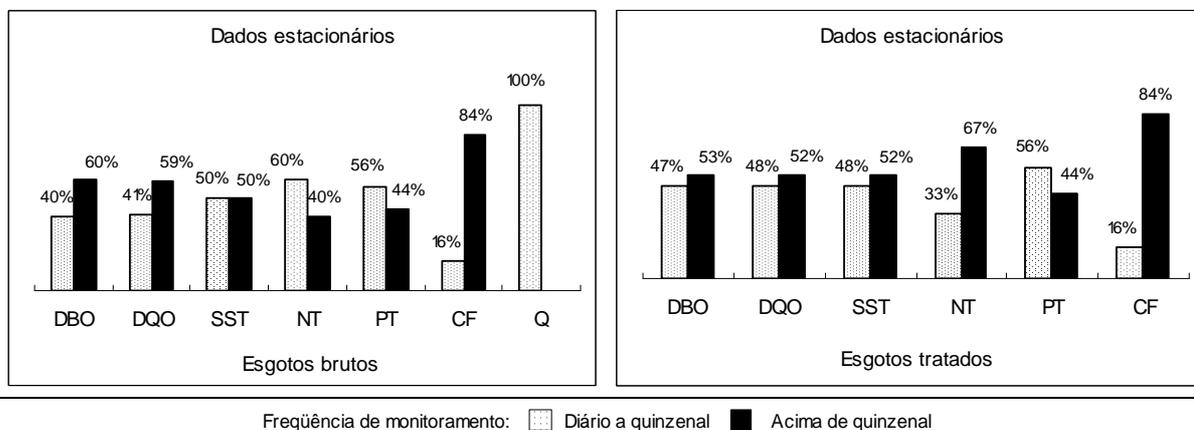


Figura 8.8 - Percentual de dados estacionários, considerando as frequências de monitoramento

8.3.2.5 Síntese dos resultados dos testes

A Tabela 8.9 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos diversos testes para verificação das hipóteses de independência, homogeneidade, aleatoriedade e estacionariedade, considerando o número e percentual de ETEs.

Tabela 8.9 - Resultados dos diversos testes para verificação dos pressupostos para a análise de frequência

| Constituintes | Nº total de ETEs analisadas | Dados independentes e dependentes com $R^2 < 20\%$ | | Dados homogêneos | | Dados aleatórios | | Dados estacionários | | |
|------------------|-----------------------------|--|-----|------------------|-----|------------------|-----|---------------------|-----|----|
| | | (No ETEs) | (%) | (No ETEs) | (%) | (No ETEs) | (%) | (No ETEs) | (%) | |
| Esgotos brutos | DBO | 32 | 28 | 88 | 32 | 100 | 15 | 47 | 19 | 59 |
| | DQO | 31 | 28 | 90 | 31 | 100 | 16 | 52 | 22 | 71 |
| | SST | 31 | 30 | 97 | 30 | 97 | 16 | 52 | 20 | 65 |
| | NT | 18 | 14 | 78 | 17 | 94 | 5 | 28 | 10 | 56 |
| | PT | 24 | 17 | 71 | 21 | 88 | 11 | 46 | 18 | 75 |
| | CF | 26 | 26 | 100 | 26 | 100 | 21 | 81 | 25 | 96 |
| | Vazão | 22 | 4 | 18 | 21 | 95 | 3 | 14 | 4 | 18 |
| Esgotos tratados | DBO | 32 | 27 | 84 | 31 | 97 | 14 | 44 | 19 | 59 |
| | DQO | 31 | 26 | 84 | 28 | 90 | 18 | 58 | 21 | 68 |
| | SST | 31 | 30 | 97 | 30 | 97 | 15 | 48 | 21 | 68 |
| | NT | 18 | 9 | 50 | 18 | 100 | 6 | 33 | 6 | 33 |
| | PT | 24 | 17 | 71 | 24 | 100 | 11 | 46 | 16 | 67 |
| | CF | 26 | 23 | 88 | 25 | 96 | 17 | 65 | 20 | 77 |

A partir da Tabela 8.9, foi elaborada a Tabela 8.10, que consolida todos os diversos resultados e apresenta o número e percentual de ETEs que atenderam às hipóteses fundamentais da análise de frequência.

Tabela 8.10 - Número e percentual de ETEs cujos dados atenderam às hipóteses fundamentais da análise de frequência

| | Afluentes | | | | | | | Efluentes | | | | | |
|---------|-----------|-----|-----|----|----|----|-------|-----------|-----|-----|----|----|----|
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| Nº ETEs | 11 | 15 | 14 | 4 | 11 | 20 | 0 | 12 | 14 | 14 | 4 | 8 | 14 |
| % | 34 | 48 | 45 | 22 | 46 | 77 | 0 | 38 | 45 | 45 | 22 | 33 | 54 |

Nota-se que o número de ETEs, cujos dados mostraram-se capazes de atender aos pressupostos fundamentais da análise de frequência, foi bastante reduzido em relação ao número original de estações analisadas. No caso dos dados de vazão, o atendimento não foi obtido por nenhuma ETE e, considerando a maioria absoluta dos constituintes, um reduzido percentual de dados atenderia a todos os testes. Se forem desconsideradas aquelas que praticavam uma frequência de monitoramento não definida, o que acarreta um número sempre pequeno de dados e um comportamento não representativo dos dados usuais de sistemas de tratamento de esgotos, o número caiu ainda mais expressivamente, como mostra a Tabela 8.11.

Tabela 8.11 - Número e percentual de ETEs que atenderam às hipóteses fundamentais da análise de frequência, desconsiderando as de frequência não definida de monitoramento

| | Afluentes | | | | | | | Efluentes | | | | | |
|---------|-----------|-----|-----|----|----|----|-------|-----------|-----|-----|----|----|----|
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| Nº ETEs | 3 | 5 | 6 | 2 | 3 | 11 | 0 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 6 |
| % | 9 | 16 | 19 | 11 | 13 | 42 | 0 | 16 | 16 | 16 | 17 | 13 | 23 |

A redução observada no número e percentual de ETEs que monitoravam os sistemas com maior frequência e que disponibilizaram um grande número de dados foi drástica. Isto mostra que os dados provenientes de estações de tratamento de esgotos, em geral, não atendem às hipóteses fundamentais da análise de frequência. No entanto, como discutido abaixo, este fato que não inviabiliza ou invalida o emprego dos testes estatísticos nela contidos, tais como os testes de hipóteses, a estimação de parâmetros, testes de aderência, entre outros.

Segundo Bobée e Ashkar (1991), este tipo de comportamento é comum, também, em dados hidrológicos e o procedimento adotado é uma maior cautela na interpretação dos resultados, especialmente quando extrapolações além da faixa dos dados se tornam necessárias. Os autores alertam, também, que testes estatísticos podem apenas indicar probabilidade de satisfação dos critérios e não dão respostas inequívocas. Deve-se ter em mente ainda, que os testes aplicados não foram desenvolvidos para variáveis ambientais, que possuem características peculiares e distintas daquelas observadas para os dados usualmente utilizados e para os quais os testes foram elaborados.

8.3.3 Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição

Nesta etapa, constituída de duas partes, foram aplicados testes para verificação da normalidade (testes Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro Wilk e o teste gráfico “Normal Probability Plot”) e para checar a distribuição que melhor se ajustava aos dados (testes χ^2 , Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors). O “software” utilizado foi o Statistica 6.0.

Nesta primeira etapa, foram gerados gráficos para todas as ETEs listadas, onde constavam os resultados relativos aos testes efetuados, conforme exemplificado na Figura 8.9, que considera a concentração de DBO nos esgotos brutos de uma das ETEs avaliadas. Era feita, então, a interpretação dos valores observados e uma análise visual dos gráficos “Probability Plot”.

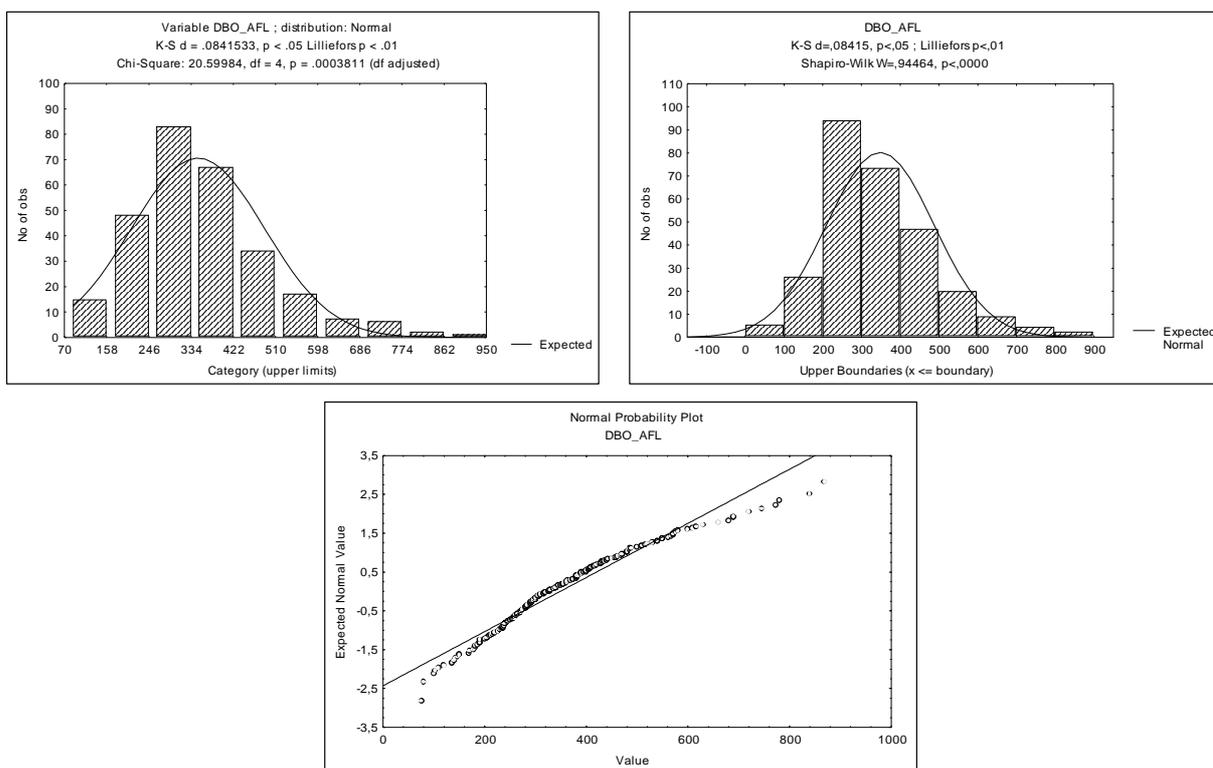


Figura 8.9 – Exemplos de gráficos gerados nos testes de verificação de normalidade dos dados

Os testes de aderência às distribuições foram aplicados para analisar os ajustes às distribuições normal, lognormal, gama, exponencial e retangular. No total, foram efetuados 3444 testes considerando as duas etapas, como mostrado na Tabela 8.12. Os resultados dos testes que checaram apenas a normalidade ou não normalidade dos dados são apresentados na Tabela 8.13.

Pela observação dos resultados apresentados na Tabela 8.13, percebe-se que houve uma grande variação nos resultados obtidos, dependendo do tipo de teste aplicado. Os resultados variaram ainda mais expressivamente quando se compara os resultados dos testes Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, considerando quase todos os constituintes. É importante ressaltar, mais uma vez, a pouca precisão mostrada pelos testes Kolmogorov-Smirnov que, em muitas situações, não rejeitavam nenhuma das opções disponíveis. A análise visual considerou, nesse caso, os resultados dos testes gráficos “Normal Probability Plot”. Em geral, os resultados dos testes de normalidade indicaram a não normalidade dos dados de concentração dos diversos constituintes afluentes. Para os dados efluentes, os resultados mostraram evidências mais conclusivas de desvios da normalidade.

Tabela 8.12 – Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição efetuados

| ETEs | Número de constituintes | Testes de normalidade | Testes de aderência | Número total de testes efetuados |
|--------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| ES 01 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| FBP 01 | 4 | 3 | 4 | 48 |
| FS + FA 01 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| FS + FA 02 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| FS + FA 03 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| FS + FA 08 | 6 | 3 | 4 | 72 |
| LA 02 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 03 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 04 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 05 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 06 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 07 | 4 | 3 | 4 | 48 |
| LA 08 | 9 | 3 | 4 | 108 |
| LA 11 | 7 | 3 | 4 | 84 |
| LAF 1 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LAMC 03 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF 01 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| LF 03 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| LF 19 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF 39 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF 56 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF 69 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF 78 | 8 | 3 | 4 | 96 |
| LF+LM 01 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| LAN+LF 03 | 5 | 3 | 4 | 60 |
| LAN+LF 05 | 9 | 3 | 4 | 108 |
| LAN+LF 18 | 9 | 3 | 4 | 108 |
| LAN+LF 24 | 9 | 3 | 4 | 108 |
| LAN+LF 32 | 9 | 3 | 4 | 108 |
| UASB 03 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| UASB+LF 01 | 10 | 3 | 4 | 120 |
| UASB+LF 02 | 11 | 3 | 4 | 132 |
| LA 15 | 1 | 3 | 4 | 12 |
| LAF 02 | 1 | 3 | 4 | 12 |
| LAN+LF 01 | 1 | 3 | 4 | 12 |
| Total | 287 | 105 | 140 | 3444 |

Nota: Número total de testes = Número de constituintes x Testes de normalidade x Testes de aderência

Tabela 8.13 – Resultados dos diversos testes de normalidade (em % de ETEs)

| Constituintes | Testes de normalidade | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|------------|------------|------------|--------------|------------|----------------|------------|--------------|-----------|------------|-----------|
| | Kolmogorov-Smirnov | | Lilliefors | | Shapiro-Wilk | | Análise Visual | | | Conclusão | | |
| | Normal | Não normal | Normal | Não normal | Normal | Não normal | Normal | Não normal | Inconclusivo | Normal | Não normal | |
| Esgotos brutos | DBO | 69 | 25 | 44 | 53 | 38 | 59 | 6 | 34 | 56 | 47 | 53 |
| | DQO | 68 | 26 | 26 | 68 | 32 | 61 | 13 | 52 | 29 | 35 | 65 |
| | SST | 55 | 42 | 35 | 61 | 32 | 65 | 35 | 23 | 42 | 48 | 52 |
| | NT | 67 | 6 | 22 | 50 | 28 | 72 | 6 | 39 | 28 | 28 | 72 |
| | PT | 67 | 17 | 42 | 42 | 38 | 58 | 13 | 33 | 42 | 50 | 50 |
| | CF | 42 | 46 | 35 | 58 | 27 | 69 | 4 | 69 | 15 | 38 | 62 |
| | Vazão | 44 | 56 | 38 | 63 | 31 | 69 | 44 | 19 | 38 | 38 | 63 |
| Esgotos tratados | DBO | 56 | 38 | 41 | 56 | 25 | 72 | 0 | 50 | 47 | 44 | 56 |
| | DQO | 61 | 32 | 45 | 48 | 42 | 52 | 10 | 55 | 29 | 55 | 45 |
| | SST | 42 | 52 | 35 | 58 | 26 | 71 | 16 | 45 | 39 | 32 | 68 |
| | NT | 39 | 33 | 11 | 61 | 6 | 83 | 0 | 50 | 22 | 22 | 78 |
| | PT | 58 | 25 | 21 | 63 | 29 | 67 | 8 | 50 | 25 | 33 | 67 |
| | CF | 46 | 46 | 23 | 69 | 27 | 69 | 4 | 62 | 23 | 31 | 69 |

Para totalização dos resultados obtidos na segunda etapa, como relatado no item Metodologia, foi necessário efetuar uma análise conjunta de todos os testes de aderência e de normalidade, para determinação da distribuição mais representativa dos dados amostrais. Em alguns casos, os resultados foram contraditórios, não rejeitando a possibilidade de várias distribuições candidatas serem adotadas como representantes dos dados. Nesses casos, foi necessário uma análise dos testes gráficos (“Normal Probability Plot” e “Probability - Probability Plot”), como uma ferramenta adicional para verificação das distribuições mais adequadas. O teste gráfico “Probability - Probability Plot” é usualmente utilizado para verificar a aderência de uma distribuição teórica aos dados observados. A função de distribuição cumulativa observada é plotada *versus* a distribuição cumulativa teórica, como exemplificado na Figura 8.10, para as distribuições normal e lognormal. Nota-se, no exemplo apresentado, que mesmo que os testes não tenham rejeitado a adoção das duas distribuições, o melhor ajuste foi obtido pela lognormal.

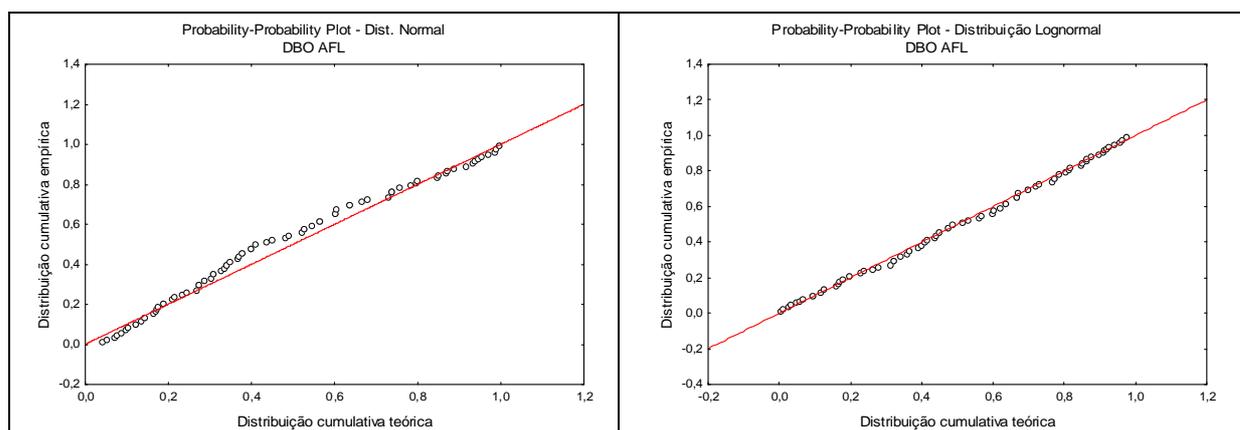


Figura 8.10 – Exemplos de gráficos “Probability - Probability” utilizados para a verificação das distribuições mais adequadas

Após a avaliação de todos os testes, as distribuições que estiveram presentes mais freqüentemente, considerando cada constituinte, afluente e efluente, foram selecionadas e classificadas de acordo com o percentual de ocorrência entre as ETEs avaliadas. As distribuições selecionadas para as ETEs analisadas, considerando os 13 parâmetros (DBO, DQO, SST, NT, PT e CF - afluentes e efluentes - e vazão) são apresentados na Tabela 8.14.

Tabela 8.14 - Resultados obtidos nos testes de aderência às distribuições

| ETE | Afluente | | | | | | | Efluente | | | | | |
|------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| ES 01 | outra | outra | outra | | outra | outra | | outra | outra | outra | | outra | N |
| FBP 01 | N | N | outra | | | | | logN | N | N | | | |
| FS + FA 01 | logN | logN | logN | N | N | exp | outra | exp | logN | logN | logN | logN | N |
| FS + FA 02 | logN | logN | outra | N | N | logN | outra | outra | outra | outra | N | logN | N |
| FS + FA 03 | logN | logN | logN | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | N | N | exp |
| FS + FA 08 | outra | outra | | outra | | outra | | outra | outra | | outra | | outra |
| LA 02 | logN | logN | N | logN | logN | logN | outra | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| LA 03 | logN | logN | logN | logN | logN | exp | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| LA 04 | N | N | logN | logN | N | logN | N | logN | logN | exp | logN | N | logN |
| LA 05 | logN | N | logN | logN | logN | logN | outra | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| LA 06 | N | logN | logN | logN | N | logN | outra | logN | logN | logN | N | logN | logN |
| LA 07 | N | outra | logN | | | | logN | logN | logN | outra | | | |
| LA 08 | logN | logN | logN | N | | | logN | logN | logN | logN | logN | | |
| LA 11 | N | N | outra | | | | logN | outra | outra | logN | | | |
| LAF 1 | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | N | logN |
| LAMC 03 | outra | N | N | N | N | | logN | logN | logN | outra | logN | N | |
| LF 01 | logN | logN | logN | N | logN | logN | outra | logN | outra | logN | logN | N | logN |
| LF 03 | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | N | logN | logN | logN | exp |
| LF 19 | outra | outra | logN | | outra | outra | | logN | outra | outra | | outra | logN |
| LF 39 | outra | outra | outra | | outra | logN | | outra | N | N | | outra | outra |
| LF 56 | outra | outra | outra | logN | | outra | | outra | outra | logN | logN | | N |
| LF 69 | outra | outra | outra | N | | outra | | outra | outra | outra | N | | outra |
| LF 78 | outra | outra | outra | | logN | logN | | outra | logN | N | | logN | logN |
| LF+LM 01 | logN | logN | logN | N | logN | exp | outra | logN | N | logN | N | N | logN |
| LAN+LF 03 | logN | logN | outra | | | | logN | logN | logN | logN | | | |
| LAN+LF 05 | outra | outra | logN | | outra | logN | | outra | outra | outra | | outra | logN |
| LAN+LF 18 | outra | outra | outra | | outra | N | | outra | N | outra | | outra | N |
| LAN+LF 24 | logN | outra | outra | | logN | logN | | N | outra | logN | | outra | logN |
| LAN+LF 32 | outra | outra | logN | | outra | N | | logN | N | N | | logN | logN |
| UASB 03 | N | logN | N | logN | N | logN | N | N | logN | logN | logN | outra | exp |
| UASB+LF 01 | logN | | logN | | N | logN | N | logN | | outra | | logN | N |
| UASB+LF 02 | N | N | logN | | logN | logN | | logN | logN | logN | | outra | logN |
| LA 15 | | | | | | | N | | | | | | |
| LAF 02 | | | | | | | N | | | | | | |
| LAN+LF 01 | | | | | | | logN | | | | | | |

Legenda: N – distribuição normal
 exp - distribuição exponencial
 logN - distribuição lognormal
 outra – nenhuma das distribuições testadas

Conforme menção anterior, o termo “outra” foi utilizado quando nenhuma distribuição, entre os modelos propostos, se ajustava aos dados ou quando havia uma indefinição acerca da aderência às distribuições candidatas, considerando os diversos testes aplicados. No entanto, para a totalização final, foram também incluídas neste termo as distribuições que foram

minoria na representação do comportamento dos dados. Assim, a ocorrência das distribuições exponencial e gama foi computada junto com aquelas consideradas indefinidas.

Para cada constituinte, portanto, foram computados os resultados obtidos por todas as ETes para verificação do percentual de ajuste a cada distribuição. Aquelas que apresentaram maior percentual foram adotadas como representante comportamento dos dados dos constituintes presentes nos esgotos brutos e tratados, como mostrado na Tabela 8.15.

Tabela 8.15 - Resultados percentuais e distribuição adotada para os constituintes analisados

| Constituintes | Distribuições selecionadas como representantes do comportamento dos dados (% de ETes) | | | Distribuição adotada | |
|------------------|---|-----------|-----------|----------------------|-----------|
| | Normal | Lognormal | Outra | | |
| Esgotos brutos | DBO | 28 | 38 | 34 | lognormal |
| | DQO | 23 | 39 | 38 | lognormal |
| | SST | 16 | 49 | 35 | lognormal |
| | NT | 39 | 56 | 5 | lognormal |
| | PT | 42 | 33 | 25 | normal |
| | CF | 8 | 62 | 30 | lognormal |
| | Vazão | 23 | 45 | 32 | lognormal |
| Esgotos tratados | DBO | 7 | 59 | 34 | lognormal |
| | DQO | 19 | 49 | 32 | lognormal |
| | SST | 13 | 55 | 32 | lognormal |
| | NT | 27 | 67 | 6 | lognormal |
| | PT | 25 | 42 | 33 | lognormal |
| | CF | 23 | 54 | 23 | lognormal |

A distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento de quase todos os parâmetros, excetuando-se apenas o PT afluente, por apresentar um percentual maior de ajuste entre os conjuntos de dados disponibilizados pelas ETes. Estes resultados corroboram as constatações de diversos autores que estudaram o comportamento de dados, oriundos de estações de tratamento de esgotos (Dean & Forsythe, 1976; Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex e Hunter, 1981, 1983, Metcalf & Eddy, 2003, Charles et al., 2005). Cabe ressaltar, mais uma vez, que grande parte destas publicações se reportam apenas ao comportamento dos constituintes DBO e SST efluentes de sistemas de lodos ativados.

Para verificação das distribuições que melhor se ajustaram aos dados disponibilizados pelas ETes das 11 modalidades analisadas, foi efetuado um levantamento individualizado dos

resultados, conforme apresentado na Tabela 8.16. Em alguns casos, apenas uma ETE representava o processo de tratamento e em outros, um maior número de unidades foi avaliada, sendo apresentados os resultados que predominaram. Para alguns constituintes, não foi possível eleger apenas uma distribuição que representasse o comportamento dos dados, já que os dados das ETEs, dentro das modalidades, se ajustaram a modelos diferentes. Este foi o caso, dentre outros, da DBO afluente aos sistemas de lodos ativados (LA), onde os dados de quatro das oito ETEs se ajustaram à distribuição lognormal e a outra metade à normal, sendo apresentados na tabela como logN/N.

Tabela 8.16 - Distribuições que, predominantemente, se ajustaram aos dados dos diversos constituintes, por modalidade de tratamento

| Modalidade | ES | FBP | FS+FA | LAF | LAMC | LAN+LF | LF | LF+LM | LA | UASB | UASB+LF | |
|--|-------|-------|---|-------|------|--------|-------------------------------------|----------|-------|--------|---------|----------|
| Nº de ETEs | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 5 | 7 | 1 | 8 | 1 | 2 | |
| Esgotos brutos | DBO | outra | N | logN | N | outra | outra | outra | logN | logN/N | N | logN/N |
| | DQO | outra | N | logN | N | N | outra | outra | logN | logN | logN | N |
| | SST | outra | outra | logN | N | N | outra | outra | logN | logN | N | logN |
| | NT | | | N | logN | N | | logN/N | N | logN | logN | |
| | PT | outra | | N | N | N | outra | logN/out | logN | logN | N | logN/N |
| | CF | outra | | logN | logN | | logN/N | logN | exp | logN | logN | logN |
| | Vazão | | | outra | logN | logN | logN | logN/out | outra | logN | N | N |
| Esgotos tratados | DBO | outra | logN | outra | logN | logN | logN/out | outra | logN | logN | N | logN |
| | DQO | outra | N | logN | logN | logN | N/out | outra | N | logN | logN | logN |
| | SST | outra | outra | logN | logN | outra | logN/out | logN | logN | logN | logN | logN/out |
| | NT | | | N | logN | logN | | logN | N | logN | logN | |
| | PT | outra | | logN | N | N | outra | logN/out | N | logN | N | logN/N |
| | CF | N | | N | logN | | logN | logN | logN | logN | exp | logN/N |
| N – distribuição normal | | | logN - distribuição lognormal | | | | N/out - distribuição normal e outra | | | | | |
| logN/N - distribuição lognormal e normal | | | logN/out - distribuição lognormal e outra | | | | | | | | | |

A definição de uma distribuição de probabilidade que seja mais adequada a um conjunto de dados extraídos de sistemas de tratamento de esgotos não parece ter ligação com o tipo de processo empregado. O que foi observado é que a qualidade e quantidade de dados disponibilizados parecem ter um impacto maior nos resultados obtidos do que o tipo de tratamento. Os dados das ETEs que praticavam uma frequência de monitoramento não definida, disponibilizando dados escassos e esparsos, representadas neste estudo, principalmente, pelas modalidades de escoamento superficial (ES) e lagoas de estabilização (tanto as LF quanto as LAN+LF), forneceram informações menos conclusivas acerca da

distribuição a ser adotada. Para reforçar a argumentação efetuada foi elaborada a Tabela 8.17, que mostra o percentual de ETEs cujos dados mostraram ajuste a outras distribuições e que praticavam frequências não definidas de monitoramento.

Tabela 8.17 – ETEs sem ajuste a uma distribuição específica e com frequências não definidas de monitoramento

| | Esgotos brutos | | | | | | | Esgotos tratados | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|----|-------|------------------|-----|-----|-----|----|----|
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| Outra distribuição (n° ETEs) | 11 | 12 | 11 | 1 | 6 | 5 | 7 | 10 | 10 | 10 | 1 | 8 | 3 |
| Freq. não definida (n° ETEs) | 9 | 10 | 6 | 1 | 6 | 3 | 0 | 7 | 6 | 4 | 1 | 6 | 2 |
| % ETEs | 82 | 83 | 55 | 100 | 100 | 60 | 0 | 70 | 60 | 40 | 100 | 75 | 67 |

Tomando-se como exemplo os dados de DBO presente nos esgotos brutos, das 11 ETEs que mostraram aderência a quaisquer outras distribuições, 9 praticavam uma frequência não definida de monitoramento, representando 82% dos resultados. Este comportamento se repetiu para a maioria dos constituintes.

Outra informação extraída foi que os dados que não mostraram adequação a um modelo distributivo específico atenderam mais facilmente aos pressupostos fundamentais da análise de frequência, considerando praticamente todos os constituintes. Isto pode ser verificado pelos resultados apresentados na Tabela 8.18, que mostra uma síntese dos resultados dos testes de aderência às distribuições, considerando o cumprimento destes pressupostos básicos. O alto percentual de ETEs, cujos dados atenderam aos pressupostos e se ajustaram a “outras” distribuições, pode ser atribuído ao fato destes dados não serem representativos dos processos de tratamento de esgotos, possuindo características distintas devido ao grande espaçamento entre as amostragens e ao pequeno número de dados disponibilizados.

Diante dos resultados encontrados nos testes de caracterização das distribuições de probabilidade dos dados das estações de tratamento de esgotos, torna-se oportuna uma discussão acerca da medida de tendência central que seja mais adequada ao tipo de comportamento verificado. Usualmente, a média aritmética tem sido utilizada, indiscriminadamente, para quantificar valores médios de dados de qualquer origem. Mesmo os padrões de lançamento preconizados por legislações ambientais se reportam a esta medida de tendência central, sem um efetivo conhecimento do comportamento dos dados efluentes.

Tabela 8.18 - Resultados dos testes de aderência às distribuições, considerando o cumprimento dos pressupostos básicos para análise de freqüência

| Resultados dos testes de aderência | Constituintes afluentes | | | | | | | Constituintes efluentes | | | | | | |
|--|-------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | Vazão | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| Total de ETEs analisadas | | 32 | 31 | 31 | 18 | 24 | 26 | 22 | 32 | 31 | 31 | 18 | 24 | 26 |
| Total de aderência à distribuição normal | (Nº ETEs) | 9 | 7 | 5 | 7 | 10 | 2 | 5 | 2 | 6 | 3 | 5 | 6 | 6 |
| | (%) | 28 | 23 | 16 | 39 | 42 | 8 | 23 | 6 | 19 | 10 | 28 | 25 | 23 |
| Normais que atenderam aos pressupostos | (Nº ETEs) | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 5 |
| | (%) | 11 | 14 | 0 | 29 | 20 | 50 | 0 | 50 | 50 | 100 | 40 | 17 | 83 |
| Total de aderência à distribuição lognormal | (Nº ETEs) | 12 | 12 | 15 | 10 | 8 | 16 | 10 | 19 | 15 | 17 | 12 | 10 | 14 |
| | (%) | 38 | 39 | 48 | 56 | 33 | 62 | 45 | 59 | 48 | 55 | 67 | 42 | 54 |
| Lognormais que atenderam aos pressupostos | (Nº ETEs) | 2 | 3 | 6 | 1 | 3 | 13 | 0 | 3 | 3 | 6 | 2 | 3 | 7 |
| | (%) | 17 | 25 | 40 | 10 | 38 | 81 | 0 | 16 | 20 | 35 | 17 | 30 | 50 |
| Total de aderência à distribuição exponencial | (Nº ETEs) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| | (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 12 |
| Exponenciais que atenderam aos pressupostos | (Nº ETEs) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 |
| Total de aderência a outras distribuições | (Nº ETEs) | 11 | 12 | 11 | 1 | 6 | 5 | 7 | 10 | 10 | 10 | 1 | 8 | 3 |
| | (%) | 34 | 39 | 35 | 6 | 25 | 19 | 32 | 31 | 32 | 32 | 6 | 33 | 12 |
| Outras distribuição que atenderam aos pressupostos | (Nº ETEs) | 8 | 11 | 8 | 1 | 6 | 4 | 0 | 8 | 8 | 5 | 0 | 4 | 1 |
| | (%) | 73 | 92 | 73 | 100 | 100 | 80 | 0 | 80 | 80 | 50 | 0 | 50 | 33 |

No entanto, a média geométrica tem sido investigada por alguns pesquisadores da área e considerada particularmente apropriada para dados distribuídos segundo um modelo lognormal (McAlister, 1879, Niku et al., 1979, 1981b, 1981c, Limpert et al., 2001, Metcalf & Eddy, 2003), devido ao impacto causado pela presença de valores elevados e atípicos (“outliers”). A probabilidade de ocorrência destas observações é relativamente alta em amostras oriundas de certas distribuições, incluindo a lognormal.

Quando se tratam dados que seguem uma distribuição normal, estes são comumente caracterizados pelos valores da média aritmética (\bar{X}) e desvio padrão (s). No entanto, em aplicações onde a distribuição lognormal descreve mais adequadamente os dados, estes parâmetros são mais difíceis de interpretar. Para dados normalmente distribuídos, o intervalo $\bar{X} \pm s$ representa a probabilidade de 68,3% dos valores estarem contidos nesta faixa, enquanto $\bar{X} \pm 2s$ compreende 95,5%. As relações correspondentes para uma distribuição

lognormal, considerando a média e desvio-padrão geométricos, são $[\bar{X}^* \times S^*, \bar{X}^* \div S^*] = \bar{X}^* \times_{\div} S^*$, que contém 68,3% dos dados e $[\bar{X}^* \times (S^*)^2, \bar{X}^* \div (S^*)^2] = \bar{X}^* \times_{\div} (S^*)^2$, representando a faixa que compreende 95,5% dos valores. A Tabela 8.19 sumariza e compara algumas propriedades das distribuições normal e lognormal.

Tabela 8.19 - Relações entre as distribuições normal e lognormal

| Propriedades | Distribuição | |
|--------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | Normal | Lognormal |
| Efeitos | Aditivo | Multiplicativo |
| Forma da distribuição | Simétrica | Positivamente assimétrica |
| Caracterização: | | |
| Média | \bar{X} , aritmética | \bar{X}^* , geométrica |
| Desvio padrão | S, aditivo | S*, multiplicativo |
| Medida de dispersão | $CV = S / \bar{X}$ | S* |
| Intervalos de confiança: | | |
| 68,3 % | $\bar{X} \pm S$ | $\bar{X}^* \times_{\div} S^*$ |
| 95,5 % | $\bar{X} \pm 2S$ | $\bar{X}^* \times_{\div} (S^*)^2$ |
| 99,7 % | $\bar{X} \pm 3S$ | $\bar{X}^* \times_{\div} (S^*)^3$ |

Nota: O símbolo \times_{\div} = limite superior: $\bar{X}^* \times S^*$; limite inferior: $\bar{X}^* \div S^*$.

Fonte: Adaptado de Limpert et al., 2001

A média geométrica é representada pela expressão:

$$\bar{X}^* = \left(\prod_{i=1}^n X_i \right)^{1/n} \Rightarrow \ln \bar{X} = \frac{1}{n} \left(\sum \ln X_i \right) \Rightarrow \bar{X} = \exp \left(\frac{\sum \ln X_i}{n} \right)$$

Onde o símbolo Π representa o produto de todas os valores amostrais e X_i representa uma amostra de observações independentes X_1, X_2, \dots, X_n . O desvio-padrão geométrico é dado por:

$$S^* = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\ln X_i - \ln \bar{X}^*)^2}{n} \right)^{1/2}$$

8.3.4 Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições

Como comentado no Item 8.2.4, o objetivo destes testes foi verificar se as distribuições de probabilidade dos dados de uma mesma ETE sofriam algum tipo de alteração quando a frequência de monitoramento era modificada.

As ETEs selecionadas para estudo foram FBP 01, LA 05, LA 07, LA 08, LAMC 03, LAF 02 e UASB+LF 01, por possuírem uma maior frequência de monitoramento e um número de dados suficiente para elaboração dos testes de aderência a uma distribuição. Entretanto, mesmo estas estações de tratamento não disponibilizaram dados para todos os parâmetros de interesse, o que inviabilizou várias análises ou, pelo menos, a comparação entre os resultados. O número de dados dos constituintes monitorados e a frequência de amostragem são apresentados na Tabela 8.20.

Tabela 8.20 - Número de dados e frequência de amostragem dos parâmetros monitorados

| ETEs | Frequência | Esgotos brutos | | | | | | Esgotos tratados | | | | | |
|------------|------------|----------------|-----|-----|-----|-----|----|------------------|-----|-----|-----|-----|----|
| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| FBP 01 | Diária | 219 | 361 | 364 | - | - | - | 263 | 360 | 364 | - | - | - |
| LA 05 | Sem/Quinz | 280 | 283 | 283 | 204 | 250 | 97 | 276 | 280 | 280 | 201 | 247 | 95 |
| LA 07 | 2 x semana | 311 | 730 | 495 | - | - | - | 311 | 730 | 495 | - | - | - |
| LA 08 | Semanal | 67 | 336 | 335 | - | - | - | 67 | 336 | 335 | - | - | - |
| LAMC 03 | Diária/Sem | 727 | 728 | 77 | 89 | 82 | - | 727 | 728 | 77 | 89 | 82 | - |
| LAF 02 | Quinzenal | 181 | 186 | 187 | 161 | 177 | 93 | 184 | 189 | 186 | 161 | 179 | 93 |
| UASB+LF 01 | Semanal | 228 | - | 249 | 21 | 19 | 32 | 225 | - | 243 | 186 | 18 | 32 |

Obs.: Sem/Quinz – parte do monitoramento efetuado semanalmente e parte quinzenalmente;
Diária/Sem - parte do monitoramento efetuado diariamente e parte semanalmente.

Diante da irregularidade das frequências apresentadas pelos monitoramentos das diversas ETEs, os testes foram divididos em duas etapas, visando efetuar o maior número possível de análises que os dados permitissem. Assim, as ETEs FBP 01, LA 07 e LAMC 03, que apresentavam frequências diária, 2 vezes por semana e diária/semanal, respectivamente, permitiram um tipo de análise e as outras, que adotavam frequência semanal ou quinzenal, foram analisadas de outro modo.

Para o primeiro grupo, um novo banco de dados foi montado utilizando os valores referentes às segundas, terças, quartas, quintas e sextas-feiras, extraídos da série histórica. Para as ETEs

do segundo grupo, os testes foram aplicados nos conjuntos de dados referentes à série histórica, semanas 1 e 3, semanas 2 e 4, semana 1, semana 3 e média das semanas. Para isto, foram checados dado a dado, considerando a data da coleta, para composição do novo banco de dados.

Em muitos casos foi verificada a ocorrência de dados faltantes, que não sofreram nenhum tipo de tratamento especial, uma vez que os testes de aderência são robustos o suficiente para não serem afetados por este fato. Para se chegar a esta percepção, foram efetuados testes de aderência com séries aleatórias geradas em vários tipos de distribuições, de onde foram extraídos alguns dados indiscriminadamente. Os resultados dos testes, em geral, não acusaram alterações na forma das distribuições, exceto quando grandes conjuntos de dados estavam ausentes, fato não verificado nas séries de dados utilizadas.

Para uma análise preliminar, foram elaborados histogramas categorizados, para uma visualização conjunta das distribuições dos dados, considerando as diversas frequências de monitoramento. A Figura 8.11 mostra, como exemplo, os gráficos elaborados para a ETE LA 05, para todos os constituintes, afluentes e efluentes. Os histogramas relativos às outras ETES não serão apresentados devido ao grande volume de gráficos gerados, mas apenas comentados no decorrer do trabalho.

Os resultados obtidos nos testes de aderência são apresentados na Tabela 8.21.

Tomando como exemplo de interpretação dos histogramas e dos testes de aderência, a ETE LA 05, percebe-se que, neste caso específico, não ocorreram alterações na forma da distribuição na maioria dos casos e, embora os parâmetros tenham se alterado, o ajuste à função densidade de probabilidade da distribuição lognormal foi mantido. Apenas as concentrações relativas aos constituintes DQO e PT afluentes, nas semanas 2 e 4, sofreram modificações em relação à série histórica de dados.

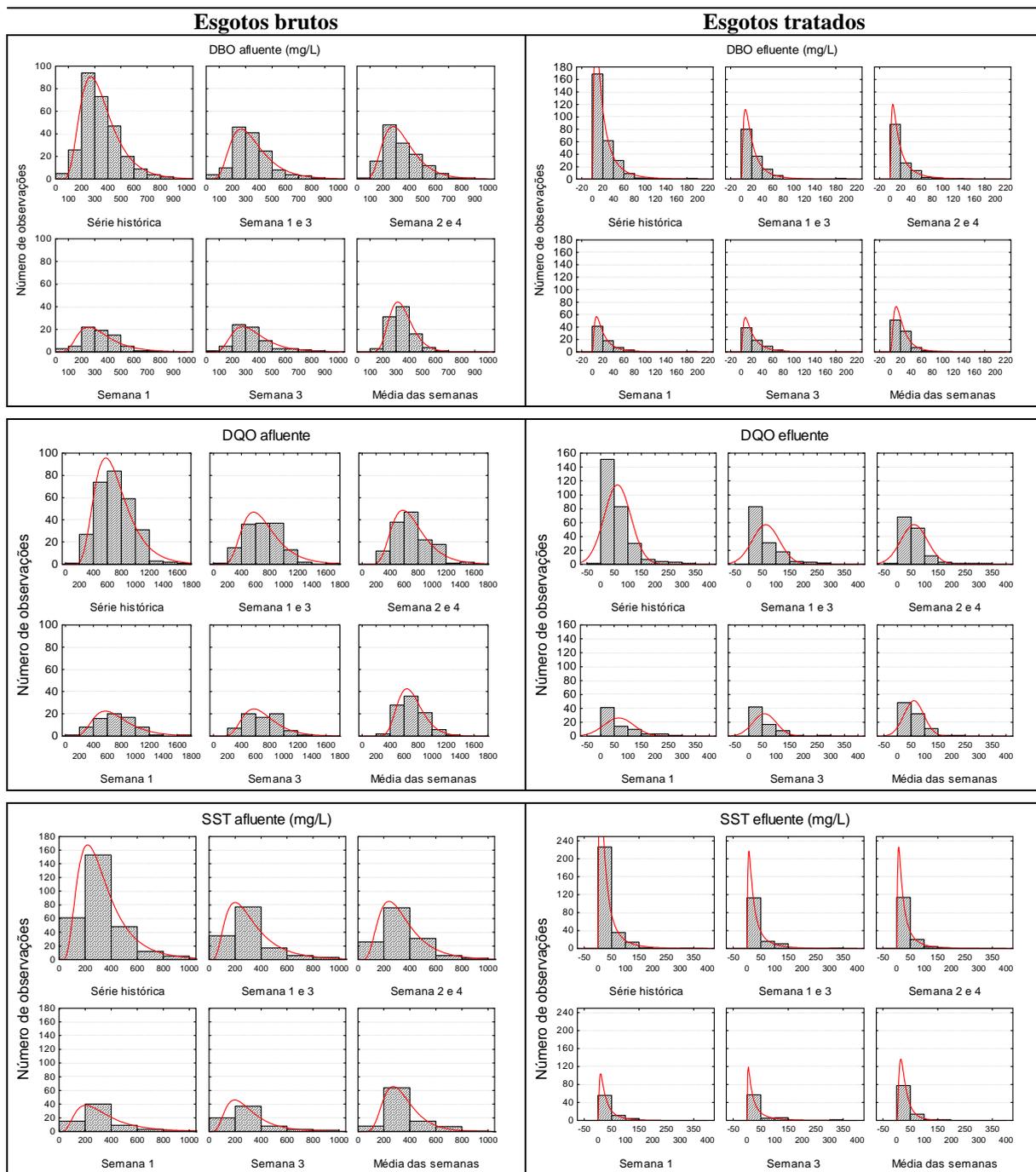


Figura 8.11 - Histogramas categorizados relativos aos constituintes da ETE LA 05
 Nota: A curva em vermelho representa a função densidade de probabilidade (f.d.p.) de uma distribuição lognormal

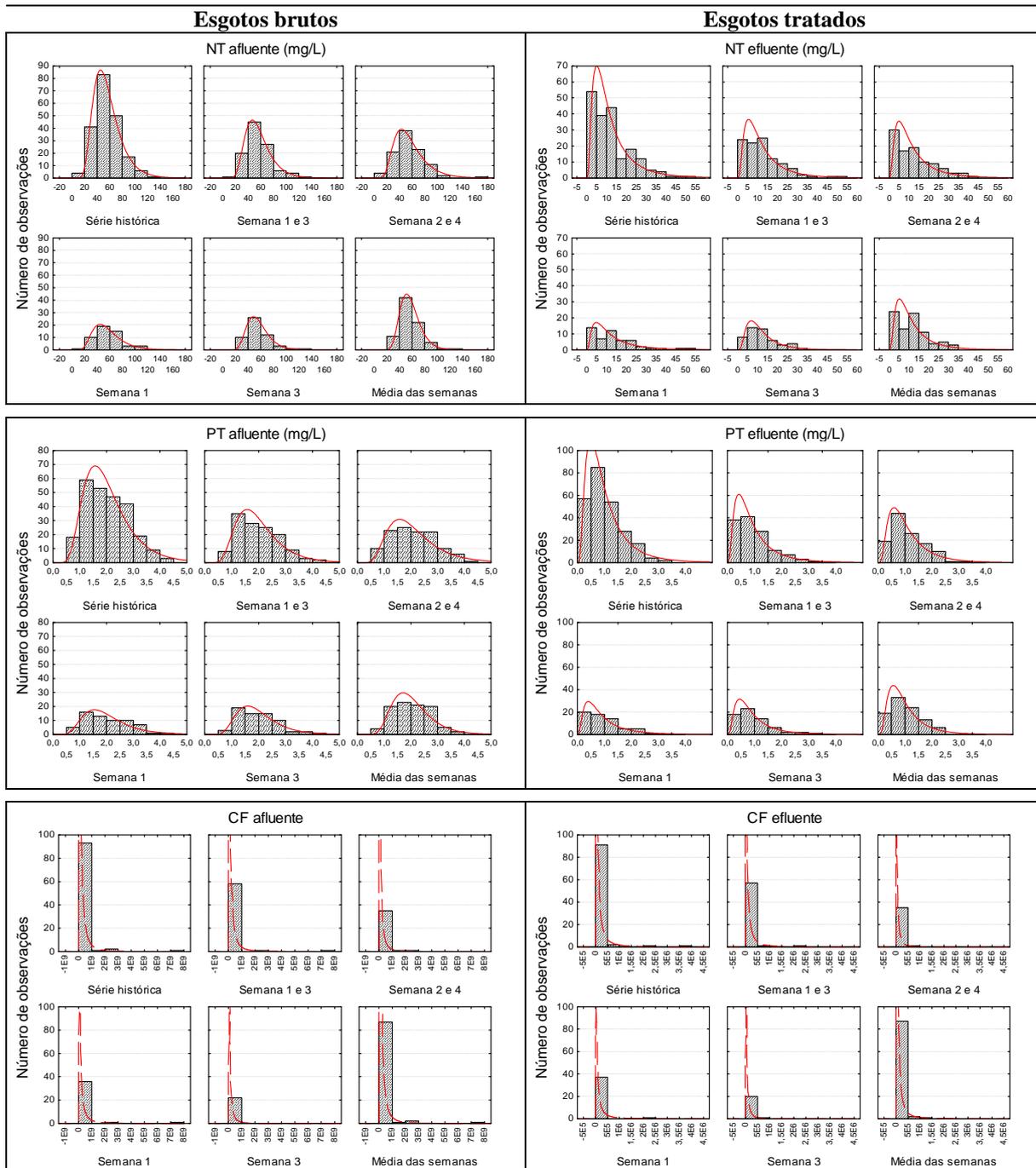


Figura 8.11 - Histogramas categorizados relativos aos constituintes da ETE LA 05 (cont.)

Tabela 8.21 – Resultados dos testes para avaliação da frequência de monitoramento nas distribuições

| ETEs | Frequência de monitoramento | Esgotos brutos | | | | | | Esgotos tratados | | | | | |
|--------------|-----------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| FBP 01 | Série histórica | N | logN | logN | | | | N | N | logN | | | |
| | 2ª - feira | N | logN | logN | | | | outra | N | logN | | | |
| | 3ª - feira | N | N | logN | | | | logN | N | logN | | | |
| | 4ª - feira | N | N | logN | | | | N | N | logN | | | |
| | 5ª - feira | logN | N | logN | | | | N | logN | logN | | | |
| | 6ª - feira | N | N | logN | | | | N | logN | logN | | | |
| LA 07 | Série histórica | N | N | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| | 2ª - feira | N | N | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| | 3ª - feira | outra | N | logN | | | | outra | logN | logN | | | |
| | 4ª - feira | N | N | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| | 5ª - feira | outra | N | logN | | | | outra | logN | logN | | | |
| | 6ª - feira | N | N | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| LAMC 03 | Série histórica | logN | logN | N | N | logN | | logN | logN | logN | N | N | |
| | 2ª - feira | logN | logN | | | | | logN | logN | outra | outra | | |
| | 3ª - feira | logN | logN | N | N | logN | | logN | logN | logN | N | N | |
| | 4ª - feira | logN | logN | N | N | N | | logN | N | logN | N | N | |
| | 5ª - feira | logN | logN | | | N | | logN | N | | | N | |
| | 6ª - feira | logN | logN | | | | | logN | logN | | | | |
| LA 05 | Série histórica | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| | Semana 1 e 3 | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| | Semana 2 e 4 | logN | logN | logN | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| | Semana 1 | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| | Semana 3 | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| | Média das semanas | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN | logN |
| LA 08 | Série histórica | logN | logN | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| | Semana 1 e 3 | logN | logN | N | | | | logN | logN | logN | | | |
| | Semana 2 e 4 | logN | logN | logN | | | | logN | logN | logN | | | |
| | Semana 1 | outra | logN | N | | | | outra | logN | logN | | | |
| | Semana 3 | outra | logN | N | | | | outra | logN | logN | | | |
| | Média das semanas | logN | outra | N | | | | outra | logN | outra | | | |
| LAF 02 | Série histórica | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | logN | gama | N | logN |
| | Semana 1 e 3 | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | logN | N | N | logN |
| | Semana 2 e 4 | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | logN | N | N | logN |
| | Semana 1 | N | N | N | logN | N | logN | N | logN | logN | N | N | logN |
| | Semana 3 | N | N | N | logN | N | logN | logN | logN | logN | logN | N | logN |
| | Média das semanas | N | N | outra | logN | N | logN | logN | logN | logN | N | N | logN |
| UASB + LF 01 | Série histórica | logN | | logN | outra | outra | logN | logN | | logN | logoN | outra | outra |
| | Semana 1, 3 e 5 | logN | | logN | outra | outra | outra | logN | | logN | logoN | outra | outra |
| | Semana 2 e 4 | logN | | logN | outra | outra | outra | logN | | logN | logoN | outra | outra |
| | Semana 1 | logN | | logN | outra | outra | outra | logN | | logN | logoN | outra | outra |
| | Semana 3 | logN | | logN | outra | outra | outra | logN | | logN | logoN | outra | outra |
| | Média das semanas | logN | | N | outra | outra | outra | logN | | logN | logoN | outra | outra |

Este comportamento, no entanto, não foi verificado para todos os dados disponibilizados pelas diversas ETEs analisadas. Isto pode ser confirmado pela observação da Tabela 8.22, que apresenta o número total de ETEs avaliadas, considerando todos os constituintes, e o número e percentual de ETEs cujos dados sofreram alteração na forma quando outros intervalos de amostragens foram considerados.

Tabela 8.22 – Percentual de ocorrência de alterações nas distribuições, considerando os diversos constituintes

| | Esgotos brutos | | | | | | Esgotos tratados | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|-----|-----|----|----|----|------------------|-----|-----|----|----|----|
| | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF | DBO | DQO | SST | NT | PT | CF |
| Nº de ETEs avaliadas | 7 | 6 | 7 | 4 | 4 | 3 | 7 | 6 | 7 | 4 | 4 | 3 |
| Distribuições alteradas (Nº ETEs) | 3 | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| Distribuições alteradas (% ETEs) | 43 | 50 | 43 | 0 | 50 | 33 | 57 | 33 | 29 | 50 | 0 | 0 |

Pela observação da tabela, percebe-se que os resultados foram bastante variados. No caso da DBO afluente, por exemplo, das sete ETEs que disponibilizaram dados, três apresentaram alteração no modelo distributivo ao se utilizar sub conjuntos extraídos das séries históricas de dados. Para os outros constituintes, o comportamento foi diferenciado. Os dados de algumas ETEs, como a LA 08 e FBP 01, tiveram a forma da distribuição da maioria dos constituintes alterada, quando foram consideradas diferentes frequências de monitoramento.

Foi efetuada uma análise do atendimento aos pressupostos de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade, considerando os dados disponibilizados, visando verificar se o atendimento ou não, afetaria os resultados. Entretanto, não foi possível estabelecer algum tipo de relação entre as características dos dados disponibilizados e as alterações observadas nas distribuições de probabilidade dos constituintes. Do mesmo modo, não foi possível a verificação da efetiva influência da frequência de monitoramento nas distribuições a partir dos estudos efetuados.

8.4 Conclusões

8.4.1 Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados

- As distribuições das concentrações dos constituintes afluentes e efluentes não foram simétricas e os valores positivos dos coeficientes de assimetria indicaram maioria das distribuições assimétricas à direita.
- Os valores de curtose foram diferentes de três, indicando que o grau de achatamento das distribuições dos dados difere do observado para uma distribuição normal.

8.4.2 Critérios estatísticos para a análise de frequência

8.4.2.1 Teste da hipótese de independência

- Os resultados obtidos nos testes de Wald-Wolfowitz apontaram um maior percentual de independência entre os dados dos constituintes quando a faixa de frequência de amostragens praticada pelas ETEs era acima de quinzenal.
- Quando os dados eram coletados com menores intervalos entre as amostragens, foi verificado um comportamento inverso, predominando o percentual de dependência.
- Os testes de autocorrelação, aplicados aos conjuntos de dados para checar o “grau” de dependência existente, mostraram que a maioria dos constituintes apresentaram coeficientes de determinação (R^2) menores que 20%.

8.4.2.2 Teste da hipótese de aleatoriedade

- A grande maioria dos resultados indicou não aleatoriedade entre os dados dos constituintes presentes nos esgotos brutos e tratados, quando se praticava uma frequência diária a quinzenal.

8.4.2.3 Teste da hipótese de homogeneidade

- Os resultados dos testes mostraram que a quase totalidade dos dados disponibilizados pelas ETEs foi homogênea, considerando o critério de análise adotado.

8.4.2.4 Teste da hipótese de estacionariedade

- A maioria dos dados analisados foi estacionária, considerando tanto o esgoto bruto quanto o tratado, com exceções verificadas para os dados vazão e de concentração efluente de NT.

- Não foi possível estabelecer uma relação conclusiva entre a frequência de amostragem e a estacionariedade dos dados, que pareceu sofrer uma influência muito pequena do tipo de monitoramento.

8.4.2.5 Síntese dos resultados dos testes

- O número de ETEs, cujos dados mostraram-se capazes de atender aos pressupostos fundamentais da análise de frequência, foi bastante reduzido em relação ao número original de estações analisadas,
- Se forem desconsideradas aquelas que praticavam uma frequência de monitoramento não definida, o que acarreta um número sempre pequeno de dados e um comportamento não representativo dos dados usuais de sistemas de tratamento de esgotos, o número cai ainda mais significativamente
- Os dados provenientes de estações de tratamento de esgotos, em geral, não atendem às hipóteses fundamentais da análise de frequência, que inclui testes de hipóteses, a estimação de parâmetros, cálculo de quantis e testes de aderência.

8.4.3 Testes de normalidade e de aderência a uma distribuição

- Os resultados dos testes de normalidade, de um modo geral, indicaram a não normalidade dos dados de concentração dos diversos constituintes afluentes.
- Para os dados efluentes, considerando quase todos os constituintes, a não normalidade dos dados foi mais evidente.
- A distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento dos parâmetros afluentes, por apresentar um percentual maior de ajuste entre os conjuntos de dados disponibilizados pelas ETEs.
- Os dados de concentração efluente mostraram um ajuste ainda melhor à distribuição lognormal.
- Estes resultados corroboram as constatações de diversos autores que estudaram o comportamento de dados oriundos de estações de tratamento de esgotos (Dean & Forsythe, 1976; Niku et al., 1979, 1981a, 1981b, 1981c e 1982, Berthouex e Hunter, 1981, 1983, Metcalf & Eddy, 2003, Charles et al., 2005).
- Não foi possível estabelecer uma relação entre a distribuição de probabilidade e o tipo de processo de tratamento de esgotos empregado. A qualidade e quantidade de dados

disponibilizados parecem ter um impacto maior nos resultados obtidos do que o tipo de tratamento.

- Os dados das ETEs que praticavam uma frequência de monitoramento não definida, forneceram informações menos conclusivas acerca da distribuição a ser adotada, apresentando aderência a “outras” distribuições.
- Os dados que não mostraram adequação a um modelo distributivo específico atenderam mais facilmente aos pressupostos fundamentais da análise de frequência.
- A média geométrica tem sido investigada por alguns pesquisadores da área e considerada particularmente apropriada para dados distribuídos segundo um modelo lognormal (McAlister, 1879, Niku et al., 1979, 1981b, 1981c, Limpert et al., 2001, Metcalf & Eddy, 2003).

8.4.4 Testes para avaliação da influência da frequência de monitoramento nas distribuições

- Os resultados dos testes de aderência foram bastante variados ao se utilizar sub conjuntos extraídos das séries históricas de dados. Apenas para alguns constituintes, de algumas ETEs, a forma da distribuição de probabilidade foi alterada, quando se considerou diferentes frequências de monitoramento.
- Não foi possível estabelecer algum tipo de relação entre as características dos dados disponibilizados, considerando o atendimento aos pressupostos para a análise de frequência, e as alterações observadas nas distribuições de probabilidade dos constituintes.
- Não foi possível, também, uma conclusão acerca da efetiva influência da frequência de monitoramento nas distribuições a partir dos estudos efetuados.

9 CONFIABILIDADE DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

9.1 *Introdução*

A confiabilidade de um sistema pode ser definida como a probabilidade de se conseguir um desempenho adequado por um período específico de tempo, sob determinadas condições.

Em termos de desempenho de uma estação de tratamento, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se conseguem as concentrações esperadas no efluente para cumprir com os padrões de lançamento. Assim, uma ETE será completamente confiável se não houver falha no desempenho, ou seja, se não houver violação dos limites preconizados pelas legislações ambientais. A falha do processo de tratamento ocorrerá sempre que o padrão de lançamento for excedido.

Devido às inúmeras incertezas presentes no projeto e operação de estações de tratamento, existem alguns riscos de falha que são inevitáveis e as ETEs devem ser projetadas com base em uma medida aceitável de risco ou violação.

A probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição da concentração efluente. Conhecida esta distribuição, uma expressão pode ser utilizada para definir a fração do tempo em que uma dada concentração foi excedida no passado e, desta forma, prever o comportamento futuro de uma ETE, desde que as variáveis do processo continuem as mesmas (Dean & Forsythe, 1976a).

A exigência mínima de confiabilidade deve ser determinada para estabelecer a magnitude da probabilidade de falha que poderá ser aceita. Para esta determinação, Niku et al. (1981b) citam a teoria de decisão estatística-econômica desenvolvida por Singh (1971), que estabelece que os custos totais de estações de tratamento, considerando a construção, a operação e o valor do custo de falha multiplicado pela probabilidade de sua ocorrência, devem ser mínimos.

Os custos inicial e operacional do processo poderão sofrer grandes alterações, a depender da confiabilidade desejada. Quando existem grandes expectativas com respeito à qualidade do efluente, poderá haver necessidade de modernos sistemas de controle, mão de obra mais

especializada, exigência de tratamento terciário e/ou expansão física da estação. Qualquer uma destas modificações aumentará o custo inicial de construção e de operação.

Se, por outro lado, a opção for pela aceitação de maiores probabilidades de falha, haverá menor necessidade de procedimentos operacionais sofisticados e, conseqüentemente, menor custo. No entanto, as conseqüências das violações devem ser consideradas e os custos tangíveis e os intangíveis a elas associados devem ser avaliados.

A confiabilidade de uma ETE é baseada no conhecimento do comportamento do processo. Devido às variações na qualidade do efluente tratado, a estação de tratamento deve ser naturalmente projetada para produzir uma concentração média efluente abaixo dos padrões de lançamento. Para determinar uma concentração média que garanta que a concentração do efluente estará abaixo de certo valor, com um determinado nível de confiabilidade, Niku et al. (1979) desenvolveram um método que relaciona a concentração média do constituinte (valor de projeto) com os valores limites a serem cumpridos, baseando-se em análises probabilísticas.

Este método foi utilizado, neste trabalho, para determinação dos coeficientes de confiabilidade dos seis processos de tratamento já analisados em capítulos anteriores.

9.2 Metodologia

9.2.1 Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)

A caracterização das distribuições de probabilidade dos indicadores, efetuada no capítulo 8, mostrou que a distribuição lognormal pode ser adotada para descrever o comportamento da maioria dos dados disponibilizados pelas ETEs.

Torna-se necessário, aqui, a introdução de alguns conceitos relativos à distribuição lognormal para o entendimento da metodologia adotada.

A distribuição lognormal pode ser definida como a distribuição de uma variável aleatória cujo logaritmo apresenta distribuição normal. Ou seja, uma variável aleatória e positiva x é dita seguir um modelo distributivo lognormal, com média μ_x e desvio padrão σ_x , se a variável $y = \ln(x)$ for normalmente distribuída com média μ_y e desvio padrão σ_y .

A função densidade de probabilidade $f(x)$ da distribuição lognormal é dada por (Crow e Shimizu, 1988):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad x > 0 \quad (9.1)$$

$$f(x) = 0 \quad x \leq 0$$

Esta distribuição é assimétrica, com uma longa cauda à direita da média. Usando a relação $y = \ln(x)$, quando μ_x e σ_x são conhecidos para x , a média e variância correspondentes para y podem ser determinadas como a seguir (Moshman, 1953, Broadbent, 1956, Crow e Shimizu, 1988, Limpert et al, 2001, Thomopoulos e Johnson, 2003):

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\mu_x^2}{\sqrt{\mu_x^2 + \sigma_x^2}}\right) \quad (9.2)$$

$$\sigma_y^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right) \quad (9.3)$$

As equações (9.2) e (9.3) foram utilizadas para desenvolver a equação de confiabilidade apresentada por Niku et al (1979). O coeficiente de confiabilidade (CDC), desenvolvido pelos autores, pode ser utilizado para estimar a confiabilidade das estações de tratamento, ou seja, a fração de tempo que a concentração efluente não excede um certo valor padrão de referência previamente fixado. Para isto, foram utilizados os coeficientes de variação (desvio padrão / média aritmética) calculados para as ETEs estudadas.

Este coeficiente de confiabilidade relaciona valores das concentrações médias (valores de projeto) ao padrão a ser alcançado em uma base probabilística. Se, por exemplo, um padrão de 60 mg/L deve ser cumprido em 90% do tempo, o processo deve ser projetado e operado para alcançar uma concentração média efluente tal que, mesmo com a variabilidade presente, este percentual seja alcançado. O valor médio do constituinte, m_x , poderá ser obtido a partir da equação:

$$m_x = (\text{CDC}) X_s \quad (9.4)$$

Onde

m_x = concentração média do constituinte;

X_s = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma;

CDC= coeficiente de confiabilidade.

Supondo que, para uma determinada probabilidade de falha α entre 0 e 1, mais perto de 0, deseja-se projetar um processo para cada variável lognormal x observada, com a propriedade

$$P(x \leq X_s) = 1 - \alpha \quad (9.5)$$

Assim, $(1 - \alpha)$ é a probabilidade que a variável x não exceda o padrão X_s .

Para o desenvolvimento da equação relativa ao coeficiente de confiabilidade, Niku et al. (1979) utilizaram algumas propriedades da distribuição lognormal padronizada, que é obtida quando a média da distribuição normal equivalente é zero ($\mu_y = 0$) e a variância é igual a um ($\sigma_y^2 = 1$). Desta forma, as tabelas elaboradas para a distribuição normal central reduzida podem ser utilizadas, após a transformação dos parâmetros, ou seja:

$$P\left(Z \leq \frac{\ln X_s - \mu_y}{\sigma_y}\right) = 1 - \alpha \quad (9.6)$$

Onde Z é uma variável normal padronizada e o termo da equação (9.6), $\frac{\ln X_s - \mu_y}{\sigma_y}$, corresponde ao valor padrão normal variado e será chamado aqui de $(Z_{1-\alpha})$, de tal modo que

$$P(Z \leq Z_{1-\alpha}) = 1 - \alpha \quad (9.7)$$

O objetivo foi desenvolver uma expressão para o coeficiente de confiabilidade, a partir do qual possa ser computado o valor médio necessário para que o processo garanta um nível de confiabilidade $(1-\alpha)$, dado um conhecido padrão X_s e um conhecido coeficiente de variação, $(CV = \sigma_x / \mu_x)$.

Os valores da média e da variância da distribuição lognormal (equações 9.2 e 9.3) foram rearranjadas para serem incorporadas a uma equação para o coeficiente de confiabilidade, ou seja:

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\mu_x^2}{\sqrt{\mu_x^2 + \sigma_x^2}}\right) = \ln(\mu_x^2) - \ln\left(\sqrt{\mu_x^2 + \sigma_x^2}\right) = 2\ln(\mu_x) - \frac{1}{2}\ln(\mu_x^2 + \sigma_x^2) \times \frac{\mu_x^2}{\mu_x^2}$$

$$2\ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \ln \left[\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \mu_x^2 \right] = 2\ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \sigma_y^2 - \frac{1}{2} \ln(\mu_x^2) = 2\ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \sigma_y^2 - \ln(\mu_x) \Rightarrow$$

$$\mu_y = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \sigma_y^2 \quad (9.8)$$

$$\sigma_y^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) = \ln(1 + CV_x^2) \quad (9.9)$$

Desta forma, substituindo-se as equações (9.8) e (9.9) na expressão 9.6, chegou-se à seguinte equação:

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - \left[\ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln(1 + CV_x^2) \right]}{\sqrt{\ln(1 + CV_x^2)}} \quad (9.10)$$

Que após algumas manipulações algébricas, tornou-se:

$$\mu_x = \sqrt{CV^2 + 1} \times \exp \left\{ -Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(CV^2 + 1)} \right\} \times X_s \quad (9.11)$$

Para, finalmente, chegar-se ao coeficiente de confiabilidade CDC:

$$CDC = \sqrt{CV^2 + 1} \times \exp \left[-Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(CV^2 + 1)} \right] \quad (9.12)$$

Onde

CV = coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média da distribuição existente)

$Z_{1-\alpha}$ = variável normal central reduzida correspondente à probabilidade de não excedência (1- α)

O CDC (equação 9.12) relaciona o valor médio do constituinte, μ_x , ao padrão X_s para um nível de confiabilidade de 1 - α . Ressalta-se que o CDC é expresso com base nas propriedades dos dados originais e não dos logaritmos dos dados.

Foram calculados os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) para todas as ETEs analisadas e, com os resultados obtidos, foi possível a determinação das concentrações de projeto que seriam necessárias para o alcance de vários padrões ou metas especificados.

9.2.2 Cálculo das concentrações de projeto e operação para diversas metas de lançamento

A determinação das concentrações médias a serem adotadas em projeto ou alcançadas na operação, seguiu os passos descritos no fluxograma apresentado na Figura 9.1.

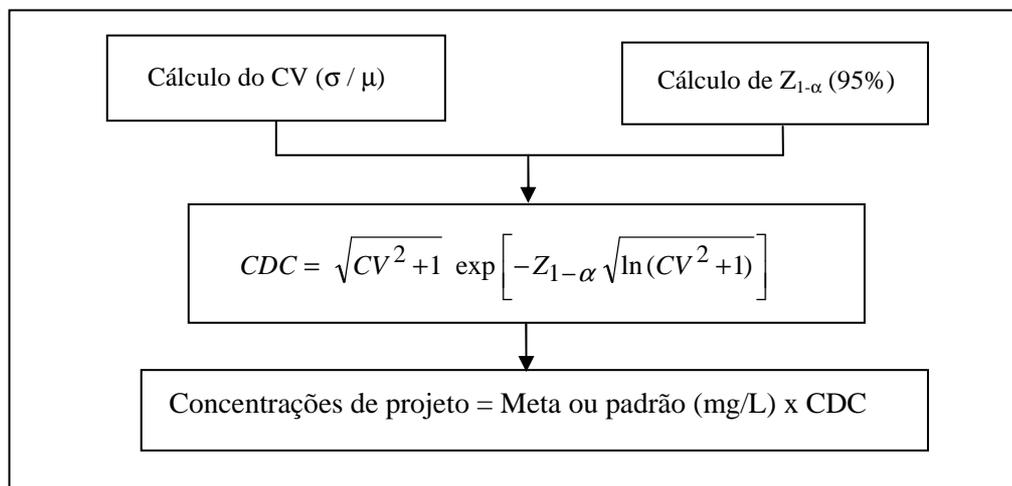


Figura 9.1 – Etapas para cálculo das concentrações de projeto

Foram calculados os coeficientes de confiabilidade e as concentrações de projeto para todas as ETEs que possuíam dados suficientes para análise e um número de unidades que permitisse a avaliação da tecnologia de tratamento. Para cada modalidade foram gerados resultados como exemplificado para lodos ativados na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Concentrações médias de DBO de projeto/operação para diversas metas ou padrões ($\alpha = 95\%$)

| ETE | Média (mg/L) | CV | 1 - α | α | Z | CDC | Metas de lançamento – DBO efluente (mg/L) | | | | |
|-------|--------------|------|--------------|----------|--------|------|---|------|------|------|------|
| | | | | | | | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| LA 01 | 46 | 1,15 | 95 | 5 | -1,645 | 0,34 | 6,7 | 13,5 | 20,2 | 26,9 | 33,7 |
| LA 02 | 36 | 0,68 | 95 | 5 | -1,645 | 0,44 | 8,8 | 17,5 | 26,3 | 35,1 | 43,8 |
| LA 03 | 36 | 1,26 | 95 | 5 | -1,645 | 0,32 | 6,5 | 12,9 | 19,4 | 25,9 | 32,3 |
| LA 04 | 30 | 1,09 | 95 | 5 | -1,645 | 0,34 | 6,9 | 13,8 | 20,7 | 27,6 | 34,5 |
| ≈ | | | | | | | | | | | |
| LA 18 | 42 | 0,93 | 95 | 5 | -1,645 | 0,37 | 7,4 | 14,9 | 22,3 | 29,8 | 37,2 |

Como exemplo de interpretação da tabela tome-se a ETE LA 01, que teve um CDC = 0,34 e que teria que ter sido projetada ou operada para uma concentração efluente média igual a 6,7 mg/L para garantir que 95% dos resultados alcançassem a meta de 20 mg/L. Outra forma de interpretação é que a operação da ETE deverá conduzir ao valor médio de 6,7 mg/L de DBO

no efluente para que, com a variabilidade inerente àquela estação, 95% dos dados estejam abaixo de 20 mg/L.

As metas utilizadas neste estudo foram as mesmas metas gerais apresentadas na Tabela 6.4 para concentrações efluentes e reproduzidas na Tabela 9.2. Foram, portanto, calculadas concentrações de projeto para todos os constituintes efluentes e para todas as metas adotadas.

Tabela 9.2 - Metas de emissão adotadas para os diversos constituintes

| DBO ₅ (mg/L) | DQO (mg/L) | SST (mg/L) | NT (mg/L) | PT (mg/L) | CF NMP/100mL |
|----------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|
| 20 | 50 | 20 | 10 | 1 | 10 ² |
| 40 | 100 | 40 | 15 | 2 | 10 ³ |
| 60 | 150 | 60 | 20 | 3 | 10 ⁴ |
| 80 | 200 | 80 | 25 | 4 | 10 ⁵ |
| 100 | 250 | 100 | 30 | 5 | 10 ⁶ |

9.2.3 Cálculo do percentual esperado de atendimento às diversas metas de lançamento

Conhecidos os valores das concentrações efluentes e dos coeficientes de variação de todas as ETEs das modalidades de tratamento estudadas, foi calculado o percentual esperado de atendimento a todas as metas de lançamento adotadas. Para isto foi utilizada a equação (9.10) e, para os valores de (1-α) resultantes, foram obtidos os valores correspondentes à probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada (distribuição Z). Estes valores foram determinados por meio da função DIST.NORMP do Excel, mas são facilmente encontrados em livros texto de estatística (Snedecor e Cochran, 1989, Spiegel, 1994, Lapponi, 2005). Estes valores, correspondentes à área subentendida pela curva normal central reduzida, são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

Ou seja, o que Niku et al. (1979) efetuaram foi a determinação da área abaixo da curva fornecida pela função densidade de probabilidade de uma distribuição lognormal. Como demonstração, foi utilizado o “software” Mathcad para a integração da equação (9.1) citada:

$$\int_0^x \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_y} \right) e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sigma_y} \ln(x) - \frac{1}{2} \frac{\mu_y}{\sigma_y} \sqrt{2} \right) \quad (9.13)$$

onde erf é a função erro do argumento.

Utilizando os dados da ETE LA 01 como exemplo prático de aplicação, com média, $\mu = 46$ mg/L, desvio-padrão, $\sigma = 52,9$ mg/L e CV = 1,15, o percentual de atendimento esperado para um padrão de lançamento de 20 mg/L será obtido pela integral da área correspondente ao padrão de lançamento dividida pela integral da função até um limite máximo, ou seja:

$$\frac{\int_0^{20} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_y} \right) e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dx}{\int_0^{1000} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_y} \right) e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dx} = 0,32694 \quad \text{ou} \quad 32,69\%$$

Onde os valores da média e variância de x , que seguem uma distribuição lognormal, devem ser transformados, conforme as equações (9.2) e (9.3):

$$\mu_y = \ln \left(\frac{46^2}{\sqrt{46^2 + 52,9^2}} \right)$$

e

$$\sigma_y^2 = \ln \left(1 + \frac{52,9^2}{46^2} \right)$$

Desta forma, nestas condições de operação, apenas 32,69% dos resultados atenderão a este padrão, considerando um nível de confiança de 95%.

A equação (9.10) proposta por Niku et al (1979), em função do CV, levou aos mesmos resultados e foi utilizada para cálculo do percentual esperado de atendimento a todas as metas de lançamento adotadas, considerando todos os constituintes efluentes das ETES.

Para determinação do percentual esperado de violação às metas de lançamento, basta considerar (100 – percentual de atendimento), que corresponde a (1 - área abaixo da curva fornecida pela função densidade de probabilidade de uma distribuição lognormal, correspondente ao percentual de atendimento alcançado).

9.3 Resultados e discussão

9.3.1 Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)

Como comentado no item “Metodologia”, os resultados da caracterização das distribuições de probabilidade mostraram que a distribuição lognormal forneceu um bom ajuste aos dados da maioria dos constituintes DBO, DQO, SST, NT, PT e CF, o que permitiu o emprego da metodologia desenvolvida e descrita por Niku et al. (1979).

A análise considerou as seis tecnologias de tratamento listadas na Tabela 4.7. Os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) para os constituintes de interesse, considerando os coeficientes de variação (CV) efetivamente apresentados pelas ETEs em operação, foram calculados para os seis processos de tratamento, para um nível de confiabilidade de 95%. Algumas estatísticas descritivas, referentes aos valores dos coeficientes de variação (CV) dos constituintes efluentes, são apresentados na Tabela 9.3.

Nota-se que, para a modalidade UASB+POS, não foram disponibilizados dados de NT ou NTK. Os valores médios de CV dos processos de lodos ativados foram sistematicamente maiores que os observados para as outras modalidades, podendo denotar uma maior instabilidade relativa destes sistemas. É importante enfatizar, no entanto, que o percentual considerável de ETEs desta tipologia que apresentou valores de CV acima de 1 pode ser explicado pelas baixas concentrações efluentes que, em muitos casos, foram menores que os desvios padrão.

Tabela 9.3 – Estatísticas descritivas referentes aos valores de CV efluentes

| Constituinte efluente | Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------------|------|--------|------|------|----------|
| | | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
| DBO | Média | 0,61 | 0,58 | 0,55 | 0,96 | 0,61 | 0,67 |
| | D. Padrão | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,40 | 0,33 | 0,20 |
| | Mediana | 0,53 | 0,51 | 0,49 | 1,02 | 0,51 | 0,64 |
| | Percentil 10% | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,57 | 0,43 | 0,50 |
| | Percentil 90% | 0,96 | 0,85 | 0,87 | 1,47 | 0,87 | 0,83 |
| DQO | Média | 0,53 | 0,38 | 0,33 | 0,95 | 0,57 | 0,58 |
| | D. Padrão | 0,23 | 0,36 | 0,16 | 0,74 | 0,44 | 0,24 |
| | Mediana | 0,49 | 0,29 | 0,31 | 0,84 | 0,45 | 0,36 |
| | Percentil 10% | 0,29 | 0,16 | 0,19 | 0,45 | 0,32 | 0,36 |
| | Percentil 90% | 0,85 | 0,58 | 0,51 | 1,08 | 0,91 | 0,86 |
| SST | Média | 0,66 | 0,58 | 0,47 | 1,10 | 0,71 | 0,76 |
| | D. Padrão | 0,33 | 0,35 | 0,31 | 0,60 | 0,17 | 0,25 |
| | Mediana | 0,58 | 0,51 | 0,42 | 0,99 | 0,74 | 0,54 |
| | Percentil 10% | 0,39 | 0,31 | 0,18 | 0,53 | 0,50 | 0,54 |
| | Percentil 90% | 1,05 | 0,88 | 0,72 | 2,20 | 0,91 | 1,03 |
| NT | Média | 0,34 | 0,50 | 0,38 | 0,78 | 0,21 | - |
| | D. Padrão | 0,05 | 0,44 | 0,15 | 0,78 | 0,14 | - |
| | Mediana | 0,35 | 0,36 | 0,35 | 0,53 | 0,18 | - |
| | Percentil 10% | 0,30 | 0,25 | 0,21 | 0,30 | 0,10 | - |
| | Percentil 90% | 0,38 | 0,68 | 0,57 | 1,36 | 0,33 | - |
| PT | Média | 0,47 | 0,44 | 0,36 | 0,58 | 0,29 | 0,57 |
| | D. Padrão | 0,25 | 0,22 | 0,16 | 0,27 | 0,10 | 0,37 |
| | Mediana | 0,37 | 0,36 | 0,32 | 0,51 | 0,28 | 0,21 |
| | Percentil 10% | 0,29 | 0,22 | 0,25 | 0,37 | 0,20 | 0,21 |
| | Percentil 90% | 0,74 | 0,78 | 0,44 | 0,84 | 0,39 | 0,90 |
| CF | Média | 1,10 | 1,05 | 1,03 | 3,29 | 1,86 | 1,83 |
| | D. Padrão | 0,54 | 0,79 | 0,45 | 2,45 | 1,79 | 0,62 |
| | Mediana | 0,88 | 0,89 | 0,98 | 2,16 | 1,33 | 1,25 |
| | Percentil 10% | 0,69 | 0,44 | 0,54 | 1,31 | 0,74 | 1,25 |
| | Percentil 90% | 1,89 | 1,63 | 1,60 | 6,47 | 3,35 | 2,51 |

Na Tabela 9.4 estão listados os valores dos coeficientes de confiabilidade obtidos para os diversos constituintes, considerando as tecnologias de tratamento analisadas.

Tabela 9.4 – Estatísticas descritivas referentes aos valores de CDC

| Constituinte efluente | Parâmetro | Tecnologia de tratamento | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------------|------|--------|------|------|----------|
| | | FS+FA | LF | LAN+LF | LA | UASB | UASB+POS |
| DBO | Média | 0,49 | 0,50 | 0,52 | 0,40 | 0,50 | 0,45 |
| | D. Padrão | 0,10 | 0,08 | 0,10 | 0,09 | 0,11 | 0,07 |
| | Mediana | 0,50 | 0,51 | 0,52 | 0,36 | 0,51 | 0,39 |
| | Percentil 10% | 0,37 | 0,39 | 0,39 | 0,31 | 0,39 | 0,39 |
| | Percentil 90% | 0,61 | 0,58 | 0,60 | 0,48 | 0,56 | 0,52 |
| DQO | Média | 0,52 | 0,63 | 0,63 | 0,42 | 0,53 | 0,49 |
| | D. Padrão | 0,10 | 0,13 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,10 |
| | Mediana | 0,52 | 0,65 | 0,64 | 0,39 | 0,54 | 0,37 |
| | Percentil 10% | 0,39 | 0,48 | 0,51 | 0,35 | 0,43 | 0,37 |
| | Percentil 90% | 0,65 | 0,79 | 0,75 | 0,54 | 0,63 | 0,60 |
| SST | Média | 0,48 | 0,51 | 0,57 | 0,38 | 0,44 | 0,43 |
| | D. Padrão | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,09 | 0,06 | 0,08 |
| | Mediana | 0,48 | 0,51 | 0,56 | 0,36 | 0,42 | 0,36 |
| | Percentil 10% | 0,36 | 0,38 | 0,43 | 0,27 | 0,38 | 0,36 |
| | Percentil 90% | 0,58 | 0,64 | 0,75 | 0,50 | 0,51 | 0,50 |
| NT | Média | 0,61 | 0,57 | 0,60 | 0,49 | 0,75 | |
| | D. Padrão | 0,04 | 0,13 | 0,09 | 0,13 | 0,14 | |
| | Mediana | 0,60 | 0,60 | 0,61 | 0,50 | 0,76 | |
| | Percentil 10% | 0,59 | 0,44 | 0,48 | 0,36 | 0,63 | |
| | Percentil 90% | 0,65 | 0,69 | 0,72 | 0,64 | 0,86 | |
| PT | Média | 0,56 | 0,58 | 0,62 | 0,50 | 0,66 | 0,54 |
| | D. Padrão | 0,11 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,21 |
| | Mediana | 0,59 | 0,60 | 0,62 | 0,51 | 0,66 | 0,38 |
| | Percentil 10% | 0,43 | 0,41 | 0,55 | 0,40 | 0,58 | 0,38 |
| | Percentil 90% | 0,66 | 0,72 | 0,69 | 0,60 | 0,74 | 0,75 |
| CF | Média | 0,31 | 0,36 | 0,35 | 0,29 | 0,37 | 0,29 |
| | D. Padrão | 0,05 | 0,14 | 0,11 | 0,03 | 0,22 | 0,01 |
| | Mediana | 0,29 | 0,31 | 0,31 | 0,27 | 0,31 | 0,29 |
| | Percentil 10% | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,29 |
| | Percentil 90% | 0,39 | 0,52 | 0,50 | 0,33 | 0,50 | 0,30 |

Como consequência dos maiores valores dos coeficientes de variação apresentados, os coeficientes de confiabilidade calculados para os LA foram os menores observados, considerando todas as modalidades de tratamento. Para uma melhor visualização das diferenças observadas entre as tecnologias avaliadas, foram elaborados gráficos “Box-whisker” com os valores dos coeficientes de variação e de confiabilidade, respectivamente apresentados nas Figuras 9.2 e 9.3.

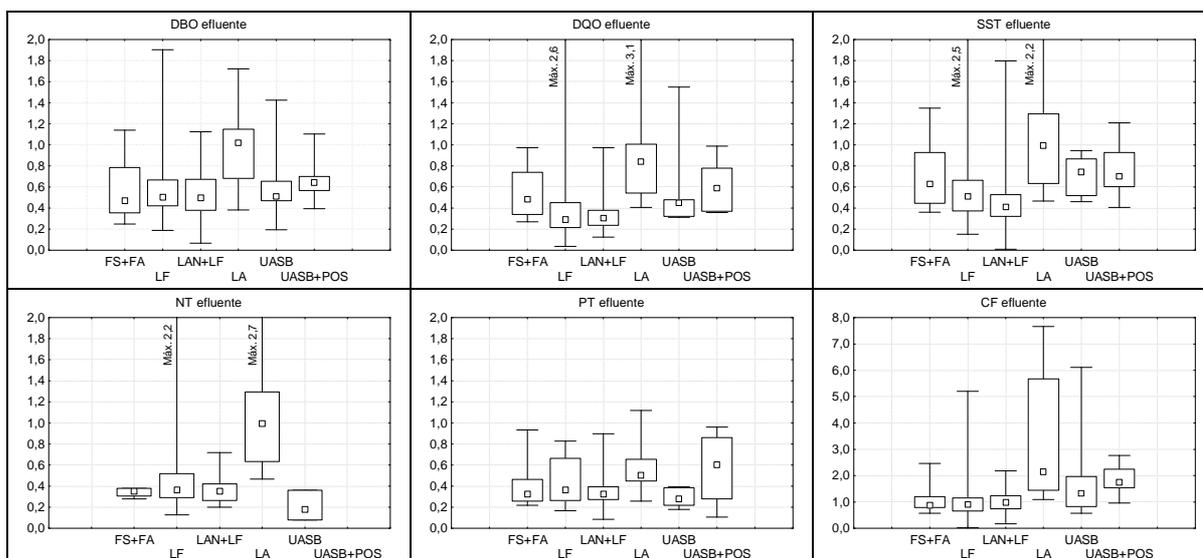


Figura 9.2 – Coeficientes de variação (CV) das modalidades de tratamento

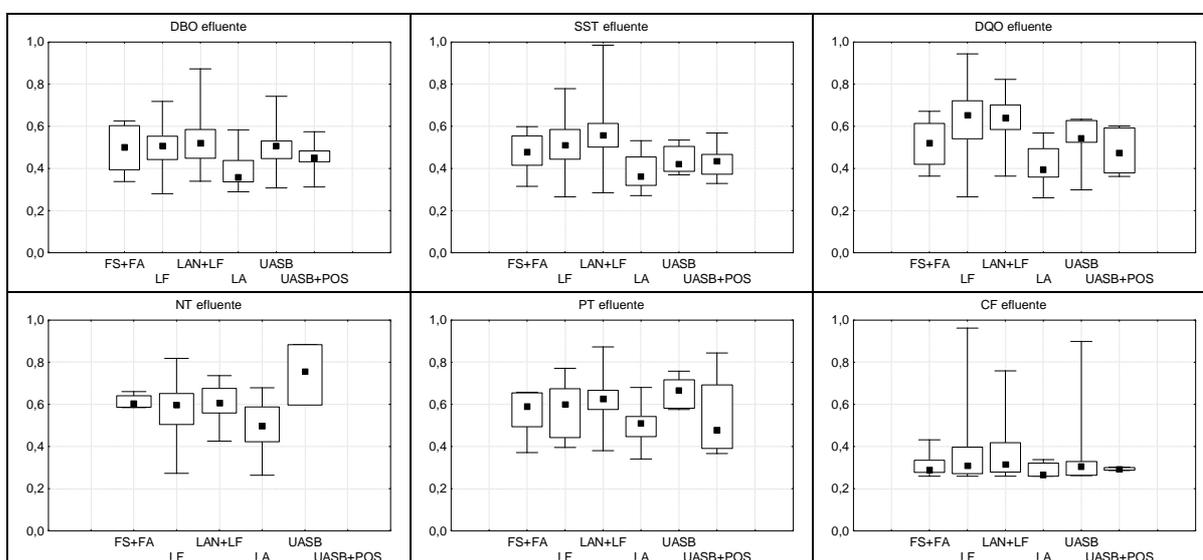


Figura 9.3 - Coeficientes de confiabilidade (CDC) das modalidades de tratamento

Pela observação dos gráficos, percebe-se que, para todos os constituintes e todas as modalidades de tratamento, foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade. Fica mais evidente, também, os maiores coeficientes de variação e os menores valores de CDC apresentados pela modalidade de LA, já que os valores de CV variam inversamente com os CDC, neste nível de confiabilidade (95%). Para uma melhor visualização desta relação, foram elaborados uma tabela e um gráfico de valores de CDC em função do CV, considerando uma faixa ampla de coeficientes de variação, muitos efetivamente observados para as diversas ETEs, para a maioria dos constituintes. Foram considerados vários níveis de confiabilidade, o que permite uma leitura direta do valor de CDC para um dado CV, conforme mostrado na Tabela 9.5 e na Figura 9.4.

Tabela 9.5 – Valores de CDC em função do CV, considerando diferentes níveis de confiabilidade

| Nível de confiabilidade | CV | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | |
| 80% | 1,00 | 0,86 | 0,78 | 0,73 | 0,71 | 0,70 | 0,71 | 0,72 | 0,73 | 0,75 | 0,77 | 0,82 | 0,88 | 0,94 | 1,00 | |
| 90% | 1,00 | 0,79 | 0,66 | 0,57 | 0,52 | 0,49 | 0,47 | 0,45 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,45 | 0,46 | 0,48 | |
| 95% | 1,00 | 0,74 | 0,57 | 0,47 | 0,40 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,27 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | |
| 99% | 1,00 | 0,64 | 0,44 | 0,32 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | |

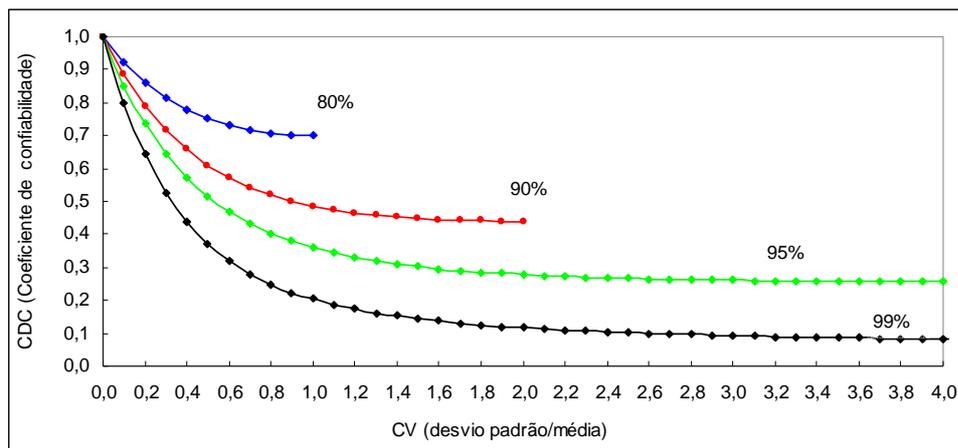


Figura 9.4 – Valores de CDC em função do CV, considerando diferentes níveis de confiabilidade

Como pode ser visto pelas curvas traçadas para diferentes níveis de confiabilidade, o comportamento se altera à medida que se elevam os graus de confiabilidade desejados. Cabe enfatizar que quanto maior o nível de confiabilidade desejado, menores deverão ser os coeficientes de variação para a obtenção de elevados coeficientes de confiabilidade. Para se ter 95% de confiabilidade que uma ETE terá um CDC igual a 0,4, por exemplo, é necessário que a estação opere com um CV médio por volta de 0,8. Para um nível de confiabilidade de apenas 80%, até valores elevados de CV são suficientes para a obtenção de altos valores de CDC. Considerando o mesmo exemplo, para um CV de 0,8, o valor do CDC será de 0,7. Uma outra particularidade que deve ser ressaltada diz respeito aos valores de CDC obtidos para os níveis de confiabilidade de 80 e 90%. Observa-se que, para um valor de CV acima de 1,0 (para o nível de 80%) e maior que 2,0 (para o nível de 90%), os CDC obtidos se elevam, o que não apresenta nenhum significado físico. Isto ocorre para os outros níveis de confiabilidade em valores de CV muito elevados, sendo igual a 4,0 para o nível de 95% e de 8,0 para 99%.

Deve-se ressaltar que baixos valores de CV e, conseqüentemente, altos valores de CDC, não implicam em bons desempenhos, mas apenas uma condição mais estável de operação. Pequenos valores de coeficientes de confiabilidade implicam em menores valores de concentrações efluentes de projeto necessárias para o cumprimento de padrões de lançamento, como será comentado mais detalhadamente a seguir.

9.3.2 Cálculo das concentrações de projeto para diversas metas de lançamento

A Figura 9.5 mostra gráficos “Box-whisker” com as concentrações médias de projeto necessárias para que ETEs das modalidades de tratamento em estudo alcancem algumas metas de lançamento adotadas para os diversos constituintes. As metas foram selecionadas da Tabela 9.2, que apresenta os padrões hipotéticos adotados para todos os constituintes, considerando alguns valores intermediários em relação aos usualmente presentes nas legislações estudadas no Capítulo 6. Ressalta-se que foram calculadas as concentrações médias de projeto, utilizando-se a equação (4), para todas as metas propostas e serão apresentadas apenas algumas devido ao volume de informações obtido.

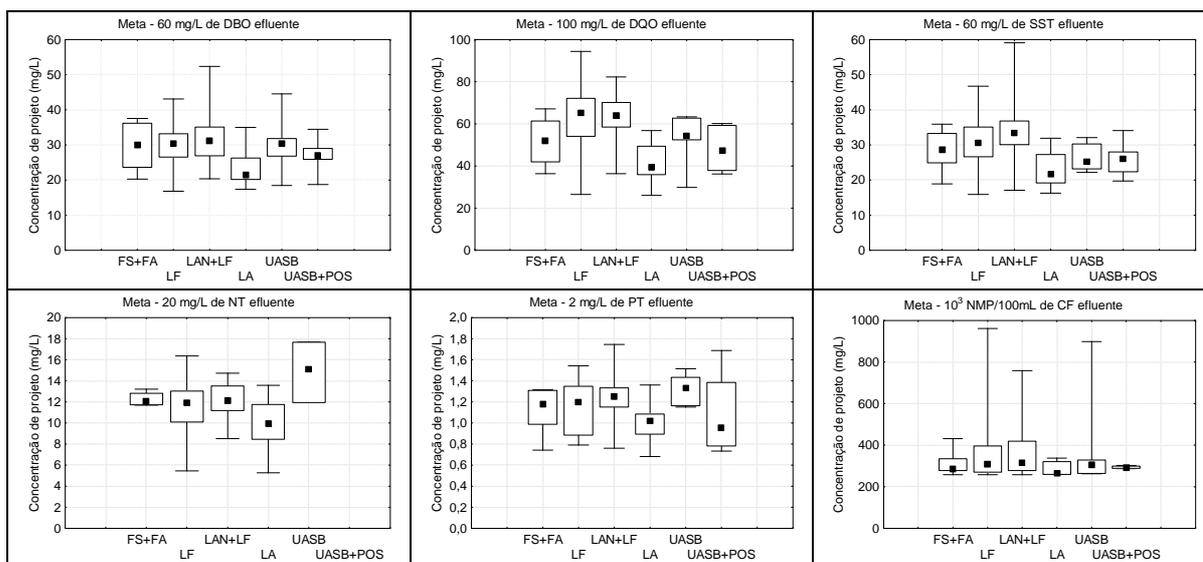


Figura 9.5 - Concentrações de projeto necessárias para o alcance de diversas metas de lançamento de constituintes efluentes (nível de confiabilidade de 95%)

Como pode ser visto pelos gráficos, as menores concentrações médias de projeto necessárias para alcance das diversas metas foram observadas para os processos de lodos ativados. Isto foi decorrência dos maiores CVs apresentados pela modalidade, fruto das baixas concentrações efluentes, como já comentado anteriormente. Deve ser ressaltado, também, o comportamento

estável das lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF), quando comparado com as outras modalidades, considerando quase todos os constituintes.

A Figura 9.6 evidencia com maior clareza o comportamento das diversas modalidades de tratamento, e permite uma visualização imediata das menores concentrações médias de projeto necessárias para que os LA alcancem as metas de lançamento de 20, 40, 60, 80 e 100 mg/L de DBO efluente.

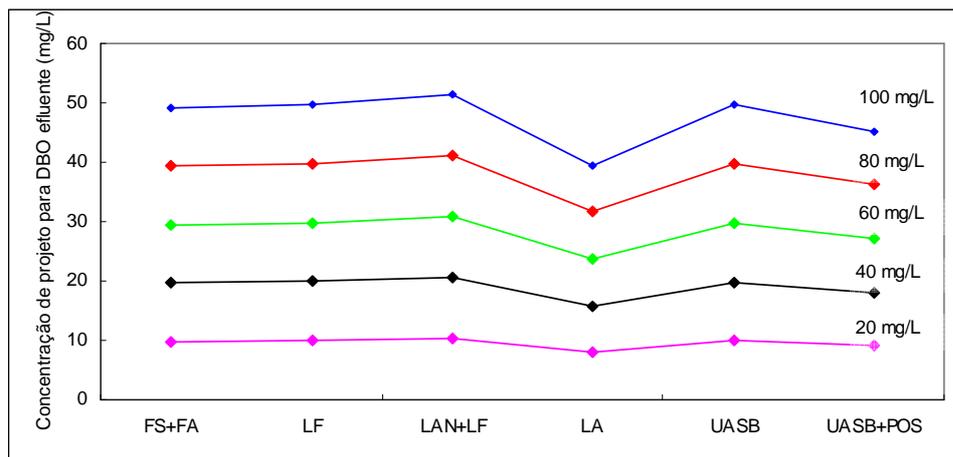


Figura 9.6 - Concentrações médias de projeto necessárias para o alcance das diversas metas de lançamento de **DBO** efluente

Apesar das menores concentrações requeridas, o percentual de ETEs da modalidade de lodos ativados que apresentaram concentrações efluentes médias menores ou iguais às concentrações de projeto necessárias para alcance das metas foi bastante elevado. Para algumas das metas de lançamento de DBO efluente, apenas os reatores UASB seguidos de pós-tratamento superaram o desempenho apresentado pelos LA, como pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 9.7.

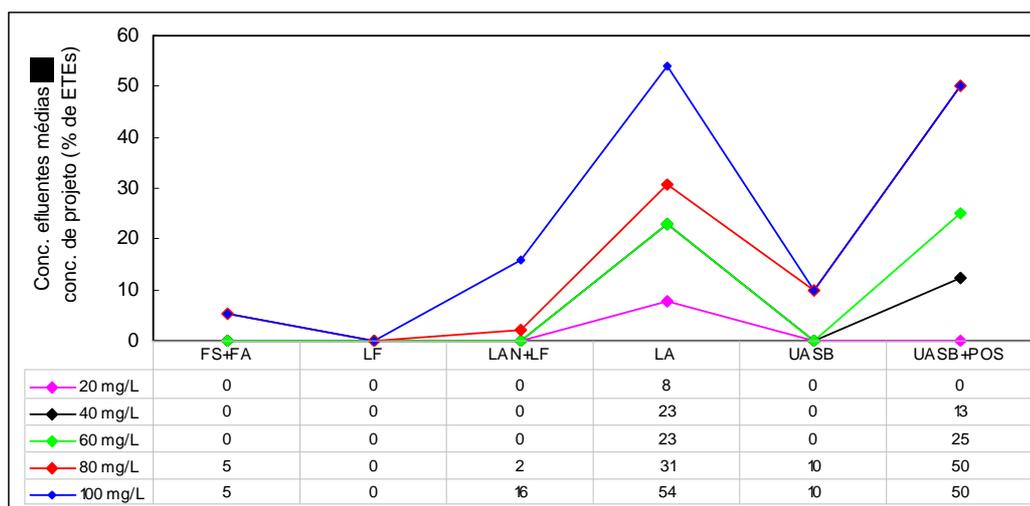


Figura 9.7 - % de ETEs com concentrações efluentes médias de DBO ≤ às concentrações de projeto necessárias para alcance das metas

Para generalizar o estudo efetuado, foram elaborados a Tabela 9.6 e o gráfico apresentado na Figura 9.8, que mostram as concentrações médias de projeto ou operação que seriam necessárias para atendimento à meta de lançamento de 60 mg/L de DBO, considerando a faixa real de coeficientes de variação (CV) observados para todas as tecnologias em estudo. Os valores foram calculados a partir dos coeficientes de confiabilidade, considerando várias opções de níveis de confiabilidade.

Tabela 9.6 – Concentrações de projeto necessárias para atendimento à meta de lançamento de 60 mg/L de DBO (mg/L)

| Nível de confiabilidade | CV | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| 80% | 60 | 52 | 47 | 44 | 43 | 42 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 49 | 53 | 56 | 60 |
| 90% | 60 | 47 | 39 | 34 | 31 | 29 | 28 | 27 | 27 | 26 | 26 | 27 | 27 | 28 | 29 |
| 95% | 60 | 44 | 34 | 28 | 24 | 22 | 20 | 19 | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 99% | 60 | 39 | 26 | 19 | 15 | 12 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 |

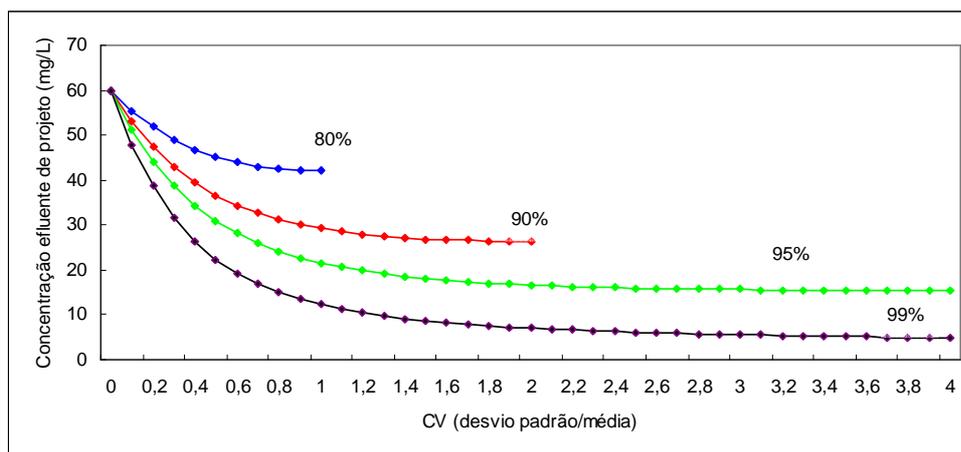


Figura 9.8 - Concentrações de projeto necessárias para atendimento à meta de lançamento de 60 mg/L de DBO, para diferentes níveis de confiabilidade

Pela observação da figura, nota-se que as concentrações de projeto ou operação são inversamente proporcionais aos valores de CV apresentados pela ETE e do nível de confiabilidade escolhido. No entanto, em virtude dos dados seguirem uma distribuição lognormal, este comportamento é diferente para menores níveis de confiabilidade, como pode ser observado para a curva correspondente a 80% que, a partir do CV igual a um, passa a ter as concentrações se elevando com o aumento dos coeficientes de variação.

Para um melhor entendimento da Figura 9.8, tome-se como exemplo os valores de CV iguais a 0,1 e 2,0. Para garantir que 90% dos resultados alcancem o atendimento ao padrão de lançamento de 60 mg/L será necessário projetar a estação de tratamento para uma concentração efluente média de 53 mg/L, caso ela apresente um coeficiente de variação médio de 0,1. No entanto, caso o CV seja de 2,0 (grandes desvios padrão em relação à média das concentrações), esta concentração de projeto deverá ser menor, chegando ao valor de 26 mg/L/.

9.3.3 Cálculo do percentual esperado de atendimento às diversas metas de lançamento

Como descrito no item “Metodologia”, foram calculados os percentuais de atendimento que as tecnologias de tratamento alcançariam, mantendo os mesmos parâmetros de operação, utilizando-se a equação (9.10).

Os resultados obtidos para DBO efluente são apresentados na Figura 9.9, considerando as metas de atendimento de 20, 40, 60, 80 e 100 mg/L. São apresentados, para cada tecnologia

de tratamento, os percentis de atendimento projetado com base nos coeficientes de confiabilidade, a cada uma destas metas de lançamento de concentrações efluentes.

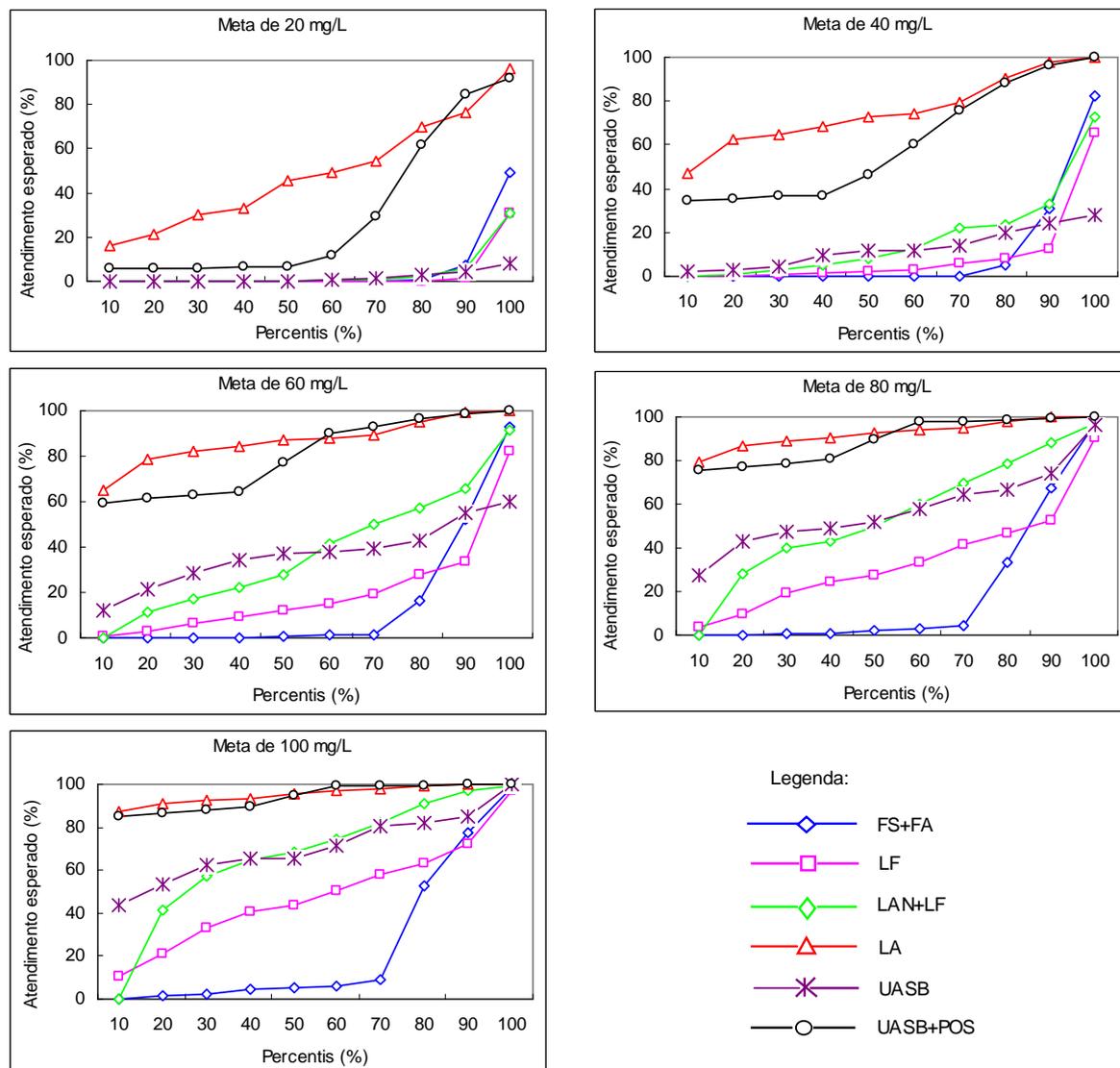


Figura 9.9 - Percentual de valores iguais ou menores ao atendimento esperado a metas de lançamento de DBO efluente (nível de confiabilidade de 95%)

Tomando como exemplo de interpretação dos percentis as FS+FA e a meta de 60 mg/L, percebe-se que 80% das ETEs desta modalidade teriam um percentual de cumprimento abaixo de 16% (ou seja, 80% das ETEs apresentariam um percentual de violação a essa meta acima de 84%), no nível de confiabilidade de 95%. Já 80% das ETEs das modalidades LA e reatores UASB+POS apresentariam um percentual de atendimento de 95 e 96%, respectivamente, nas condições de operação observadas. Ressalta-se que os maiores percentuais foram obtidos por estas duas modalidades, considerando todas as metas estipuladas e que os piores desempenhos foram apresentados pelas FS+FA, mesmo para padrões menos restritivos.

De uma forma geral, este comportamento se repetiu para todos os outros constituintes analisados e, a título de exemplificação, alguns resultados foram apresentados na Figura 9.10, para algumas metas de lançamento selecionadas.

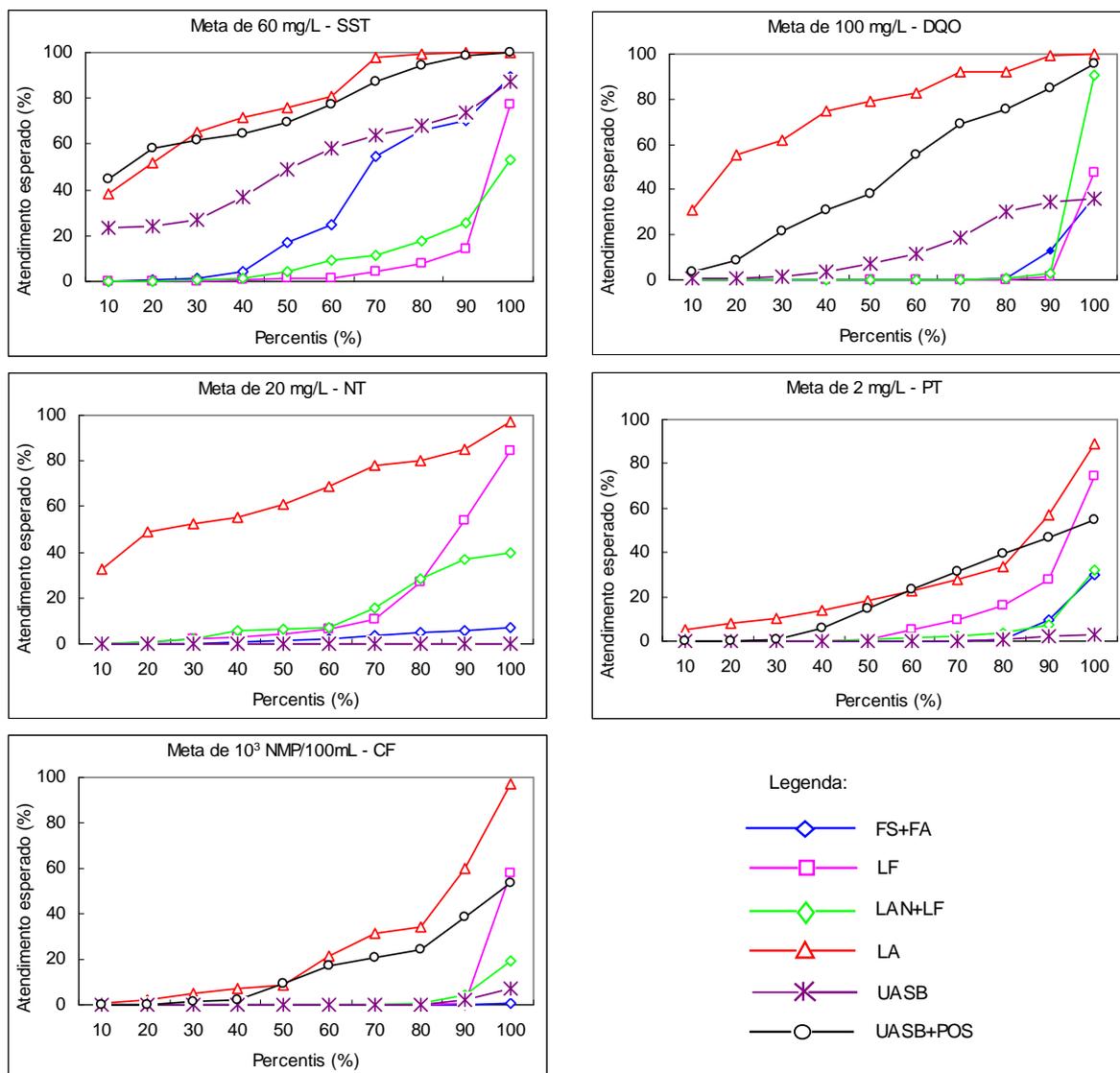


Figura 9.10 - Percentual de valores iguais ou menores ao atendimento esperado a metas de lançamento de constituintes efluentes

Como já comentado, os maiores percentuais foram obtidos, sistematicamente, pelas mesmas duas modalidades (LA e UASB+POS), exceção feita para NT, cujos dados não foram disponibilizados por nenhum dos reatores UASB seguidos de pós-tratamento analisados. Cabe ressaltar, também, que o percentual pouco expressivo de atendimento à meta de 60 mg/L de SST obtido pelos sistemas de lagoas pode ser atribuído à presença de algas no efluente.

Os percentuais esperados de violação às metas de lançamento estabelecidas, considerando as condições de operação dos diversos processos de tratamento, foram calculados para todos os

constituintes, mas apenas os resultados obtidos para DBO efluente são apresentados na Figura 9.11. Nela são apresentados, simultaneamente, os percentuais de violação e de atendimento às metas estabelecidas para concentração de DBO efluente, para uma melhor visualização dos comportamentos inversos esperados.

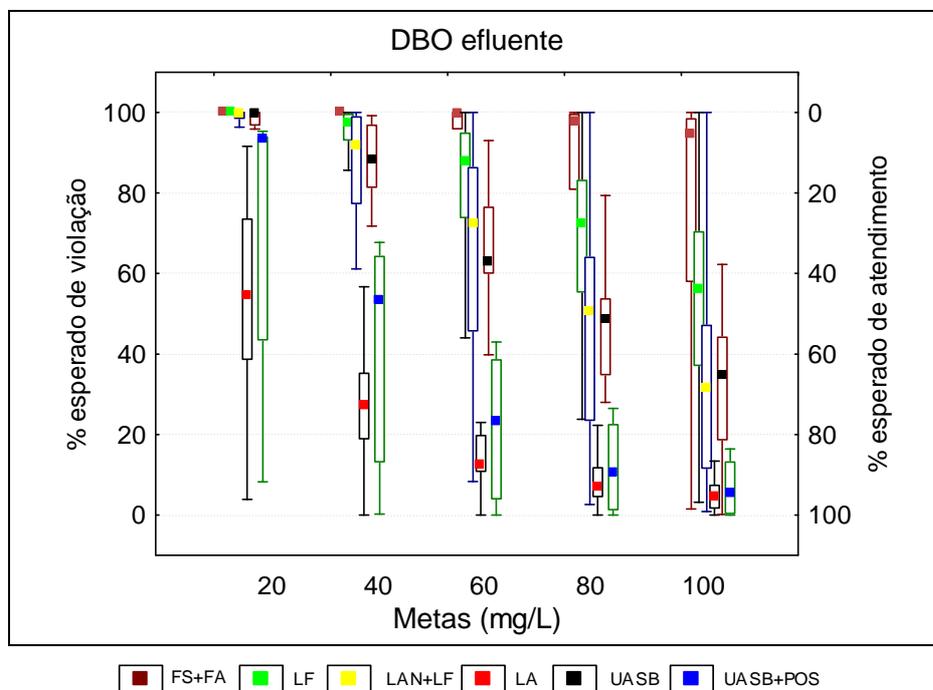


Figura 9.11 – Percentual esperado de violação às metas estabelecidas para DBO efluente

Evidentemente, as modalidades que alcançaram os maiores percentuais esperados de atendimento às metas foram aquelas que apresentaram os menores percentuais esperados de violação. O gráfico mostra, com clareza, os melhores desempenhos esperados para as modalidades LA e UASB+POS, e os piores resultados das FS+FA, em relação aos outros processos de tratamento.

Testes para comprovação da validade do modelo de confiabilidade

Para comprovar a validade das projeções de desempenho efetuadas com base nos coeficientes de confiabilidade, os percentuais de atendimento esperado foram comparados com os percentuais de atendimentos efetivamente obtidos pelas modalidades para o padrão de lançamento preconizado pela DN COPAM 010/86 para DBO efluente (60 mg/L), calculados e apresentados no Capítulo 6. Vale lembrar que, na análise anterior, os dados foram analisados um a um, enquanto nesta foram utilizados apenas a média das concentrações efluentes e o coeficiente de variação para projeção dos resultados, que são apresentados na Figura 9.12.

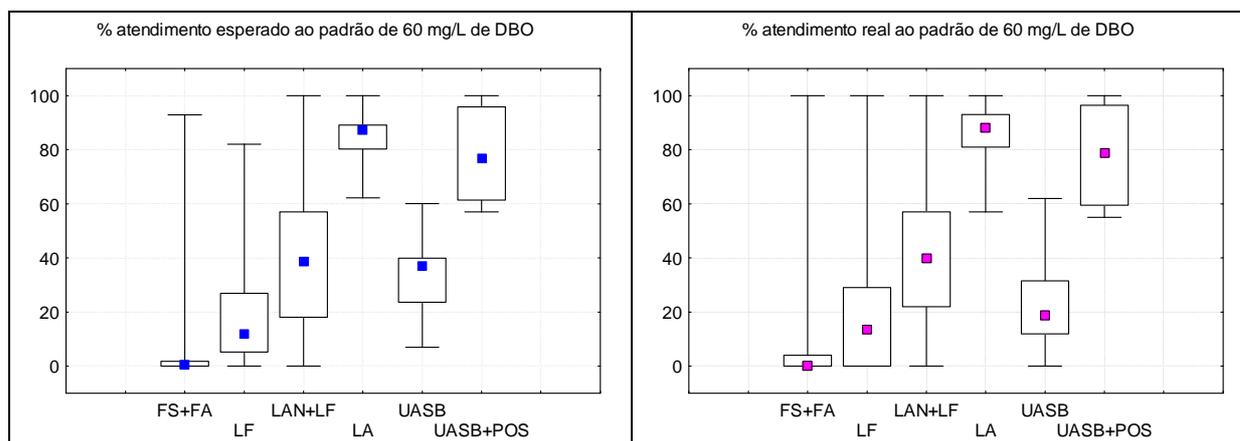


Figura 9.12 – Comparação dos resultados esperados e efetivamente obtidos para o padrão de 60 mg/L para DBO efluente

Pela comparação dos gráficos, percebe-se que o comportamento esperado de desempenho está muito próximo do comportamento observado, considerando todas as modalidades de tratamento. Isto viabiliza a utilização do modelo de confiabilidade desenvolvido por Niku et al.(1979), que efetivamente descreve o comportamento de dados que seguem uma distribuição lognormal de probabilidade.

Outro teste efetuado para verificação da validade da aplicação do modelo de confiabilidade consistiu na aplicação deste em metade dos dados disponibilizados por algumas ETEs, selecionadas por possuírem um número de dados suficiente para análise. O percentual de atendimento esperado para algumas metas de lançamento, considerando a média e CV das concentrações efluentes da primeira metade dos dados, foi comparado com o atendimento efetivamente obtido pela segunda metade. Os resultados estão listados na Tabela 9.7.

Tabela 9.7 – Resultados reais e previstos pelo modelo para atendimento a metas de lançamento de efluentes

| ETEs analisadas | Constituinte efluente | Meta (mg/L) | % atendimento efetivamente observado | % atendimento previsto pelo modelo |
|-----------------|-----------------------|-------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| LA 05 | DBO | 60 | 99 | 98 |
| LF 01 | DBO | 60 | 85 | 93 |
| UASB+LF 01 | DBO | 60 | 63 | 73 |
| LA 08 | DQO | 50 | 39 | 29 |
| UASB 03 | DQO | 100 | 2 | 0 |
| LA 07 | SST | 20 | 89 | 93 |
| LA 11 | SST | 20 | 95 | 82 |

Como pode ser melhor visualizado pela Figura 9.13, os valores percentuais estimados pelo modelo foram bastante próximos dos resultados de atendimento efetivamente observados.

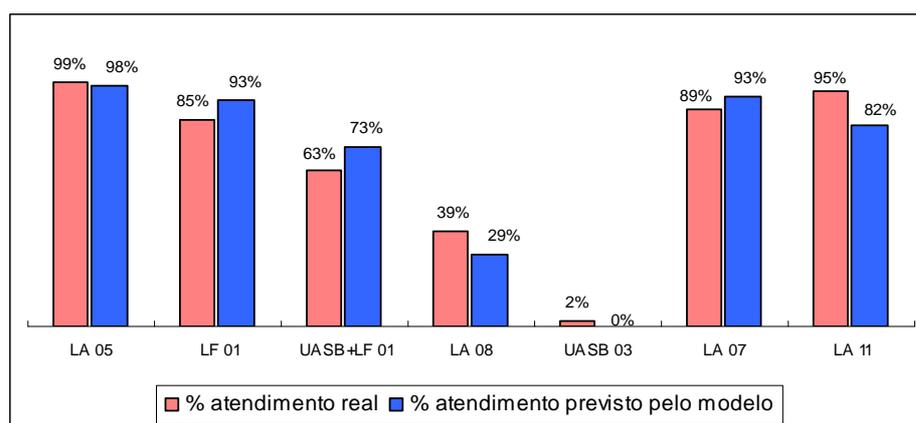


Figura 9.13 - Resultados observados e previstos pelo modelo para atendimento a metas de lançamento de efluentes

Para verificação da influência das características dos dados na previsão do modelo, foram checados, ainda, os resultados obtidos nos testes de hipóteses de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade, e o tipo de distribuição que mais se ajustou aos dados das ETEs em estudo. Os resultados, apresentados na Tabela 9.8, mostram que, ainda que os dados não atendam aos pressupostos, o modelo de confiabilidade mostrou-se robusto o suficiente para prever resultados bastante próximos dos observados, quando o modelo distributivo é lognormal. No caso da LA 07, os dados de SST efluentes não mostraram um bom ajuste a nenhuma distribuição testada, mas a segunda metade dos dados apresentou um bom ajuste ao modelo lognormal.

Tabela 9.8 - Resultados dos testes de verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência e de aderência a uma distribuição

| ETEs analisadas | Constituintes efluentes | Testes | | | | |
|-----------------|-------------------------|----------------|--------------------|----------------|-------------------|-----------|
| | | Aleatoriedade | Independência | Homogeneidade | Estacionariedade | Aderência |
| LA 05 | DBO | Não aleatórios | Dep., $R^2 < 20\%$ | Homogêneos | Não estacionários | Lognormal |
| LF 01 | DBO | Não aleatórios | Dep., $R^2 < 20\%$ | Homogêneos | Não estacionários | Lognormal |
| UASB+LF 01 | DBO | Não aleatórios | Independentes | Homogêneos | Estacionários | Lognormal |
| LA 08 | DQO | Não aleatórios | Dep., $R^2 < 20\%$ | Não homogêneos | Estacionários | Lognormal |
| UASB 03 | DQO | Aleatórios | Independentes | Homogêneos | Estacionários | Lognormal |
| LA 07 | SST | Não aleatórios | Dep., $R^2 < 20\%$ | Não homogêneos | Não estacionários | Outra |
| LA 11 | SST | Não aleatórios | Dep., $R^2 < 20\%$ | Homogêneos | Não estacionários | Lognormal |

9.4 Conclusões

9.4.1 Cálculo dos coeficientes de confiabilidade (CDC)

- Para todos os constituintes e todas as modalidades de tratamento, foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade.
- Os menores valores de CDC foram obtidos para a modalidade lodos ativados, que apresentou elevados valores de coeficientes de variação (CV), fato explicado pelas baixas concentrações efluentes, em muitos casos, menores que os desvios padrão.
- Baixos valores de CV e, conseqüentemente altos valores de CDC, não implicam em bons desempenhos, já que não foram consideradas as concentrações efluentes dos constituintes, mas apenas uma condição mais estável de operação.

9.4.2 Cálculo das concentrações de projeto para diversas metas de lançamento

- As menores concentrações médias de projeto necessárias para alcance das diversas metas foram observadas para os processos de lodos ativados, conseqüência dos menores valores de CDC.
- Apesar das menores concentrações requeridas, o percentual de ETEs da modalidade de lodos ativados que apresentaram concentrações efluentes médias menores ou iguais às concentrações de projeto necessárias para alcance das metas foi o mais elevado, dentre as modalidades.
- Para algumas das metas de lançamento de DBO efluente, apenas os reatores UASB seguidos de pós-tratamento superaram o desempenho apresentado pelos LA.
- Deve ser ressaltado, também, o comportamento estável dos sistemas compostos por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF), quando comparado com as outras modalidades, considerando quase todos os constituintes.
- As modalidades LA e UASB+POS foram as únicas que apresentaram algumas ETEs com concentrações efluentes abaixo dos valores médios de projeto ou operação que seriam necessários para assegurar que 95% dos resultados atenderiam ao padrão de lançamento para DBO, de 60 mg/L.

- As fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios (FS+FA) e lagoas facultativas (LF), mostraram uma grande distância entre as concentrações reais e as necessárias para atendimento ao padrão de lançamento de 60 mg/L de DBO.

9.4.3 Cálculo do percentual esperado de atendimento a diversas metas de lançamento

- Os maiores percentuais de atendimento às metas de lançamento adotadas para os constituintes efluentes, projetados com base nos coeficientes de confiabilidade, foram obtidos pelas modalidades LA e UASB+POS.
- Os piores resultados foram obtidos pela modalidade FS+FA, seguida pelas LF.
- Um estudo efetuado para comparação dos percentuais de atendimento esperado com os percentuais de atendimentos efetivamente obtidos pelas modalidades mostrou que o modelo de confiabilidade utilizado descreve bem o comportamento de dados que seguem uma distribuição lognormal de probabilidade.
- Outro teste efetuado consistiu na aplicação do modelo de confiabilidade em metade dos dados disponibilizados por algumas ETEs. Os valores percentuais obtidos para a segunda metade foram bastante próximos dos resultados de atendimento efetivamente observados, confirmando a viabilidade do modelo.

A contribuição do estudo sobre confiabilidade reside na geração de informações que podem ser usadas por projetistas e operadores de estações de tratamento de esgotos na avaliação e predição de desempenho de processos biológicos de tratamento, considerando a qualidade do efluente. E, ainda, pode dar subsídios às agências reguladoras para a elaboração de padrões de lançamento que sejam mais razoáveis, efetivos e tecnicamente alcançáveis.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram avaliados, de forma abrangente e aprofundada, cerca de 50.000 dados operacionais de 208 ETEs dos estados de Minas Gerais e São Paulo, compreendendo 21 processos de tratamentos. A avaliação teve como enfoque principal o desempenho das tecnologias de tratamento de esgotos, considerando o alcance a diversas metas de qualidade, a variabilidade e a confiabilidade dos sistemas.

Algumas inconsistências nos dados disponibilizados tornaram necessária a exclusão daqueles de qualidade reconhecidamente duvidosa. Para grande parte dos dados que permaneceram, não se pode dar garantia sobre sua integridade, e todas as análises, interpretações e conclusões foram baseadas nestes dados. No entanto, tais dificuldades, presentes em todos os trabalhos que empregam dados secundários, não impedem que a metodologia de análise desenvolvida seja aplicável em outras situações.

A qualidade geral do monitoramento, com sua grande variabilidade, foi motivo de preocupação e instigou reflexões adicionais sobre uma eventual correlação com a qualidade da operação e desempenho das ETEs, sendo considerada em todas as análises presentes no trabalho.

Uma grande disparidade foi verificada, com a presença de ETEs extremamente bem monitoradas, apresentando um nível de sofisticação comparável ao de países desenvolvidos, e de sistemas simplificados praticamente entregues ao abandono. Este fato foi refletido no período de monitoramento e na frequência de amostragem praticada pelas estações de tratamento. O período de monitoramento variou de um a 2879 dias entre as ETEs estudadas, considerando o intervalo entre a primeira e a última amostra disponibilizada. Cerca de 74% das estações não praticavam uma frequência definida de amostragem, enquanto outras apresentavam um monitoramento diário ou bi-semanal.

O porte das estações de tratamento também variou muito e as vazões declaradas pelas ETEs variaram de 0,05 L/s, tratada por uma lagoa facultativa, a 6.838 L/s, afluyente a um sistema de lodos ativados.

Uma extensa caracterização dos esgotos brutos e tratados foi efetuada e buscou comparar as concentrações de DBO, DQO, SST, NT, PT e CF observadas com os valores considerados

típicos pela literatura especializada. Os resultados mostraram que os esgotos brutos apresentaram uma concentração mais elevada do que usualmente expresso na literatura para esgotos predominantemente domésticos, em termos dos constituintes DBO, DQO, SST e NT.

Os esgotos tratados foram avaliados para seis processos de tratamento, fossas-filtro (FS+FA), lagoas facultativas (LF), sistemas combinados por lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF), lodos ativados (LA), reatores UASB operando isoladamente (UASB) e reatores UASB seguidos de pós-tratamento (UASB+POS), sistemas estes mais usualmente adotados no país, e que possuíam um número de ETEs considerado suficiente para análise.

Para estas tecnologias de tratamento, que compreenderam 166 ETEs e cerca de 42.000 dados, foram propostos novos critérios de avaliação de desempenho, por meio de algumas abordagens alternativas e ainda pouco usuais na área de tratamento de esgotos. Foram efetuadas investigações acerca da influência de condições operacionais das estações de tratamento na qualidade do efluente gerado, do modelo distributivo que melhor descreve o comportamento dos dados afluentes e efluentes e da confiabilidade dos sistemas, medida pela probabilidade de desempenho adequado de uma ETE ou, em outros termos, pelo percentual de tempo em que as concentrações efluentes atendem aos padrões de lançamento.

Em geral, o conhecimento sobre o desempenho de tecnologias de tratamento de esgotos em operação no país é relativamente esparso, havendo poucas consolidações estruturadas em termos de uma avaliação global. E, considerando a grande escala de avaliação efetuada neste trabalho, não foram encontradas publicações similares em âmbito nacional ou internacional, o que torna a pesquisa inédita e de grande relevância para a área de tratamento de esgotos.

Os resultados obtidos mostraram que, em geral, o desempenho dos sistemas simplificados (FS+FA, LF e reatores UASB sem pós-tratamento), considerando as concentrações efluentes e eficiências de remoção de grande parte dos constituintes, ficou aquém dos valores considerados típicos para estes processos de tratamento. Os melhores desempenhos foram observados para os reatores UASB seguidos por variados tipos de pós-tratamento e para os sistemas de lodos ativados.

A avaliação do atendimento aos critérios adotados pela ANA – Agência Nacional de Águas, por meio do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – Prodes, mostrou que a maioria de ETEs em operação na região em estudo não alcançaria um desempenho

satisfatório, considerando os padrões de eficiência de remoção estabelecidos. Cabe ressaltar, no entanto, que a implementação de programas como o Prodes poderia contribuir muito para a reversão do quadro observado, por ser um fator catalisador de boa qualidade de monitoramento das ETEs. Os critérios bem definidos adotados para as amostragens, incluindo frequências mínimas de coleta e tipos de amostragens do afluente e efluente, aliados a um programa rígido de monitoramento e fiscalização, acarretariam melhorias na qualidade de operação e manutenção das ETEs, o que seria, certamente, refletido em melhores desempenhos.

A análise de atendimento a padrões de lançamento de efluentes vigentes nos dois Estados mostrou que, também neste caso, os melhores resultados foram obtidos pelos processos LA e UASB+POS, considerando os três critérios utilizados.

Diversas metas hipotéticas de lançamento foram também avaliadas, baseadas em legislações de diversos estados brasileiros e da Comunidade Européia, considerando concentrações efluentes e eficiências de remoção dos constituintes DBO, DQO, SST, NT, PT e CF. Os sistemas de lodos ativados mostraram-se capazes de atender a algumas metas bastante restritivas, adotadas por países desenvolvidos e, de modo geral, apresentaram desempenhos superiores a todas as outras modalidades, exceção feita, no caso de SST e CF, para os reatores UASB+POS.

A influência de fatores de projeto e de operação no desempenho das estações de tratamento de esgotos foi pouco expressiva e dispersa em todos os processos. Não foi possível a identificação de uma única variável ou mesmo de um grupo de variáveis que justificasse os desempenhos diferenciados observados em todos os sistemas. Diante dos resultados, ficou evidente que cada ETE deve ser avaliada individualmente, por meio de uma abordagem ampla e integrada, onde aspectos diversos sejam considerados. Deve-se ter em mente que as cargas aplicadas, as condições ambientais e os parâmetros operacionais são probabilísticos por natureza e estão sujeitos a variações aleatórias na sua magnitude, composição e simultaneidade de ocorrência. Todas estas variáveis podem afetar o tratamento biológico de esgotos, com subseqüentes efeitos no desempenho do processo e na qualidade do efluente, sendo necessário que projetistas e operadores tenham consciência da complexidade de fatores envolvidos para se tentar estabelecer e entender as várias inter-relações existentes.

Os dados de alguns constituintes afluentes e efluentes de tratamento de esgotos foram analisados para checar se possuíam características de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade, pressupostos necessários para a análise de distribuição de frequência. Os testes aplicados mostraram que, em geral, os dados provenientes de estações de tratamento de esgotos não atendem às hipóteses fundamentais da análise de frequência, sendo necessária uma maior cautela na interpretação dos resultados, especialmente quando extrapolações além da faixa dos dados são requeridas. Vários testes estatísticos foram empregados para a determinação do modelo distributivo que melhor descrevesse o comportamento dos dados. A distribuição lognormal mostrou ser a mais adequada para representar o comportamento dos dados dos diversos constituintes, por apresentar um percentual maior de ajuste entre os conjuntos de dados disponibilizados pelas ETEs.

Com base nos resultados obtidos na caracterização das distribuições de probabilidade, foi efetuado um estudo sobre a confiabilidade das tecnologias de tratamento. A partir do conhecimento do comportamento das concentrações efluentes, foi possível calcular os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) para todas as ETEs analisadas e, com os resultados obtidos, a determinação das concentrações de projeto que seriam necessárias para o alcance de vários padrões ou metas especificados. Foram determinados, ainda, o percentual de atendimento e de violação a um determinado padrão de lançamento, considerando-se um nível de confiança pré-estabelecido e as condições de operação de cada ETE. Os resultados mostraram que a maioria absoluta das ETEs, de todas as modalidades, apresentaram condições instáveis de operação, o que implica na incapacidade de se assegurar o cumprimento aos padrões de lançamento de efluentes e em conseqüentes elevados percentuais de violação.

É importante enfatizar que os resultados apresentados retratam a realidade ora vivenciada, mas não o potencial de cada uma das tecnologias investigadas, que podem atingir desempenhos superiores aos apresentados. Os resultados obtidos em todas as avaliações efetuadas no presente estudo corroboram esta constatação, já que bons resultados foram obtidos por ETEs individuais de todas as tecnologias, mostrando que as limitações não devem ser atribuídas aos processos de tratamento mas, provavelmente, a eventuais problemas de projeto, operação e manutenção das unidades.

11 RECOMENDAÇÕES

- Efetuar a determinação do tempo de falha de ETEs individuais. Uma tentativa de determinação do tempo de falha de ETEs de diversos processos foi efetuada, no presente trabalho, mas a qualidade dos dados, coletados com frequências intermitentes ou sem critérios definidos, inviabilizou um estudo comparativo. Os estudos devem ser feitos para cada ETE individualmente, constituindo-se numa ferramenta específica para cada unidade, não podendo ser extrapolados, já que o tempo de falha será individual e independente do tipo de tecnologia de tratamento.
- Empregar as análises de Cluster, que reúne amostras pelas similaridades ou diferenças observadas, e de Componentes Principais, utilizadas para reduzir a dimensão de um conjunto de dados pela explicação da correlação entre um grande conjunto de variáveis em termos de um pequeno número de fatores, para avaliação de desempenho de algumas tecnologias de tratamento e da influência de fatores de projeto e operação na qualidade do efluente gerado. Tais técnicas não puderam ser utilizadas, no presente trabalho, para uma avaliação comparativa, devido à grande diversidade de número e qualidade dos dados disponibilizados pelas ETEs, mas poderiam ser utilizadas para algumas estações de tratamento selecionadas.
- Considerar o emprego de análises de regressão múltipla corrigida (Ridge regression) para estabelecimento de uma relação matemática entre variáveis de operação e qualidade do efluente gerado. Tal ferramenta estatística se mostrou promissora para a avaliação de dados que apresentam multicolinearidade entre as variáveis independentes, situação usualmente presente em dados oriundos de tratamentos de esgotos. Também neste caso não foi possível uma avaliação comparativa, devido ao número e qualidade diferenciados dos dados relativos aos parâmetros operacionais.
- Tendo por base as características das distribuições de probabilidade obtidas no presente estudo, analisar o impacto de lançamentos de efluentes em corpos d'água, quando padrões de lançamento são excedidos com frequências e magnitudes diversas.
- Utilizar ferramentas de Controle Estatístico de Processo (CEP) para a avaliação de desempenho de estações de tratamento.
- Avaliar a utilização da metodologia de “benchmarking” para caracterização do desempenho das estações de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIS, K. L., MARA, D. D. Research on waste stabilisation ponds in the United Kingdom - initial results from pilot-scale facultative ponds. *Water Science & Technology*, v. 48, n. 2, p. 1-7, 2003.
- ACRE. Lei Estadual n.º 1.500/03. Institui a política estadual de recursos hídricos. *Acre*, Rio Branco, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). *Manual de operação - versão 2002.0*. Programa de despoluição de bacias hidrográficas – PRODES. 149p., 2002.
- ALAGOAS. Decreto n. 6200, de 01 de março de 1985. Estabelece medidas de proteção ambiental na área de implantação do Pólo Cloroquímico de Alagoas e dá outras providências. *Alagoas*, Maceió, 01 mar. 1985.
- AMAZONAS. Lei Estadual n.º 2712/01. Estabelece a política estadual de recursos hídricos. *Amazonas*, Manaus, 2001.
- ANDRADE NETO, C.O. *Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários*. Experiência brasileira. ABES. 302 p. 1997.
- ASCE/EPA. Determining Urban Stormwater Best Management Practice (BMP) Removal Efficiencies. TASK 3.4 - Final data exploration and evaluation report, 2000.
- BARNETT, V. The Study of Outliers: Purpose and Model. *Applied Statistics*, v. 27, n. 3, pp. 242-250, 1978.
- BARNETT, V. The Identification of Multiple Outliers: Comment. *Journal of the American Statistical Association*, v. 88, n. 423, pp. 795-796, Sep., 1993.
- BECKMAN, R. J.; COOK, R. D. Outlier.....s. *Technometrics*, v. 25, n. 2, pp. 119-149, May, 1983.
- BERTHOUEX, P.M., FAN, R. Evaluation of treatment plant performance: causes, frequency, and duration of upsets. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 58, n. 5, p.368 – 375, 1986.
- BERTHOUEX, P.M., HUNTER, W.G. How to construct reference distributions to evaluate treatment plant effluent quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 55, n. 12, p. 1417-1424, 1983.
- BERTHOUEX, P.M., HUNTER, W.G. Simple statistics for interpreting environmental data. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 53, n. 2, p. 167-175, 1981.
- BERTHOUEX, P.M., HUNTER, W.G. Treatment plant monitoring programs: A preliminary analysis. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 47, n. 8, p. 2143-2156, 1975.
- BERTHOUEX, P.M., HUNTER, W.G.; PALLESEN, L. Monitoring sewage treatment plants: some quality control aspects. *Journal of Quality Technology*, v. 10, n. 4, p. 139-149, 1978.
- BIRNBAUM, Z.W. Numerical tabulation of the distribution of Kolmogorov's statistics for finite sample size. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, p. 425 – 441, 1952.
- BOBÉE, B.; ASHKAR, F. *The Gamma family and derived distributions*. Water Resources Publications, Colorado, USA, 1991, 203 p.
- BORSUK, M.E., STOW, C.A., RECKHOW, K.H. Predicting the frequency of water quality Standard violations: a probabilistic approach for TMDL development. *Environmental Science & Technology*, v. 36, n. 10, p.2109 –2115, 2002.
- BOWMAN, K. O.; SHENTON, L. R.Omnibus Test Contours for Departures from Normality Based on $\sqrt{b_1}$ and b_2 . *Biometrika*, Vol. 62, No. 2, pp. 243-250, Aug., 1975.
- BROADBENT, S. R. Lognormal Approximation to Products and Quotients. *Biometrika*, v. 43, n. 3/4, pp. 404-417., 1956.

- CAMPOS, J.R. (coordenador). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. PROSAB/ FINEP, Rio de Janeiro, 1999. 435 p.
- Canadian Council of Minister of the Environment (CCME). *Environmental Risk-Based Approaches for municipal wastewater development Committee Terms of Reference*. Minnow Environmental Inc. project n°. 2114, 2005.
- CEARÁ. Portaria SEMACE/CE 097 de 03 de abril de 1996. Estabelece condições para lançamento dos efluentes líquidos gerados em qualquer fonte poluidora. *Ceará*, Fortaleza, 30 abr.1996.
- CHARLES, K.J.; ASHBOLT, N.J.; ROSER, D.J.; MCGUINNESS, R.; DEERE, D.A. Effluent quality from 200 on-site sewage systems: design values for guidelines. *Water Science & Technology*, v. 51, n. 10, pp 163-169, 2005.
- CHERNICHARO, C.A.L. (coordenador) *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. 1.ed. Belo Horizonte: FINEP/PROSAB, 2001. c. 7. p.377-454.
- CHERNICHARO, C.A.L. *Reatores anaeróbios*. 1.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. 245 p. (Princípio do tratamento biológico de águas residuárias, 5).
- CHORAFAS, D.N. *Statistical processes and reliability engineering*. Van Nostrand Company, ch. 39, 339, 1960 apud NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. Environmental Protection Agency, EPA Grant N° R805097-01, 1981b, pp. 1 - 124.
- COCHRAN, W.G. The chi square test of goodness of fit. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 23, issue 3, 315 – 345, 1952.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n. 357 de 17 de março de 2005.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Council directive of 21 mai 1991 concerning urban waste water treatment (91/271/EEC). *Official Journal of the European Communities*, No L135/40 – 52, 30 may 1991.
- CRITES, R., TCHOBANOGLOUS, G. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogotá, Colombia: Mcgraw-Hill Interamericana S.A., 2000. 776 p.
- CROW, E. L. & SHIMIZU, K. *Lognormal distributions: theory and applications*. Series: Statistics, textbooks and monographs, v. 88. New York: Marcel Dekker, Inc., 1988, 387p.
- D'AGOSTINO, R. B.; BELANGER, A.; D'AGOSTINO JR, R.B. A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. *The American Statistician*, Vol. 44, No. 4., pp. 316-321, 1990.
- D'AGOSTINO, R.; PEARSON, E.S. Tests for Departure from Normality, Empirical Results for the Distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$. *Biometrika*, v. 60, Issue 3, pp. 613 – 622, 1973.
- DEAN, R.B., FORSYTHE, S.L. Estimating the reliability of advanced waste treatment. Part 1, *Water & Sewage Works*, p. 87 - 89, June, 1976a.
- DEAN, R.B., FORSYTHE, S.L. Estimating the reliability of advanced waste treatment. Part 2, *Water & Sewage Works*, July, p. 57 - 60, 1976b.
- FRANZ, A., NOWAK, O., KROISS, H. Mödling WWTP - treatment efficiency and relationship to receiving water quality. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 12, pp 47–55, 1996.
- GENTLEMAN, J.F. AND WILK, M.B. Detecting Outliers, II. Supplementing the Direct Analysis of Residuals. *Biometrics*, Volume 31, Issue 2. Jun. 1975. 387 – 410.
- GILBERT, R. O. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987, 320p.

- GOIÁS. Decreto n. 1.745, de 06 de dezembro de 1979. Aprova o Regulamento da Lei n.º 8.544, de 17 de outubro de 1978, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. *Goiás, Goiânia*, 06 dez. 1979.
- GRUBBS, F.E. Sample criteria for testing outlying observations", *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 21, n. 1, p. 27-58, 1950.
- GRUBBS, F.E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-21, Feb., 1969.
- GRUBBS, F.E., BECK, G. Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations. *Technometrics*, v. 14, n. 4, pp. 847-854, Nov., 1972.
- HELSEL, D.R., HIRSCH, R.M. *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water Resources Investigations Series, Book 4, chapter A3, US Geological Survey, 1992, 509 p.
- JAMRAH, A. I. Assessment of characteristics and biological treatment technologies of Jordanian wastewater. *Bioprocess Engineering*, n. 21, p. 331 – 340, 1999.
- JOHNSTONE, D.W.M., HORAN, N.J. Standards, costs and benefits: an international perspective. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, v. 8, n. 5, p. 450 – 458, 1994.
- JOHNSTONE, D. W. M., HORAN, N. J. Institutional developments, standards and river quality: a UK history and some lessons for industrialising countries. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 3, p. 211–222, 1996.
- JOHNSTONE, D.W.M., NORTON, M.R. Development of standards and their economic achievement and regulation in the 21st century. In: *C.I.W.E.M./AQUA ENVIRO JOINT MILLENNIUM CONFERENCE*. University of Leeds, April, 2000.
- KIRKWOOD, S. Yannawa wastewater treatment plant (Bangkok, Thailand): design, construction and operation, *Water Science & Technology*, Vol 50, No 10, pp 221–228, 2004.
- LAPPONI, J.C. *Estatística usando Excel*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1ª ed., 2005. 476p.
- LILLIEFORS, H.W. The Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, v. 62, p. 399 – 402, 1967.
- LIMPERT, E.; STAHEL, W. A.; ABBT, M. Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. *Bioscience*, v. 51, n. 5, pages 341–352, 2001.
- MARA, D. D. Waste stabilization ponds: effluent quality requirements and implications for process design. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 7, p. 23–31, 1996.
- MASSEY Jr., F.J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, v. 46, p. 68 – 78, 1951.
- MATO GROSSO DO SUL. Deliberação CECA/MS n. 003, de 20 de Junho de 1997. Dispõe sobre a preservação e utilização das águas das bacias hidrográficas do Estado de Mato Grosso do Sul, e dá outras providências. *Mato Grosso do Sul*, Campo Grande, 20 jun. 1997.
- McALISTER, D. The Law of the Geometric Mean. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 29, pp. 367-376, 1879.
- McBRIDE, G.B., ELLIS, J.C. Confidence of compliance: a Bayesian approach for percentile standards. *Water Research*, v. 35, n. 5, p. 1117 – 1124, 2001.
- McBRIDE, G.B. Confidence of compliance: parametric versus nonparametric approaches. *Water Research*, v. 37, p. 3666 – 3671, 2003.
- METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th. Ed., 2003, 1819p.
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa n. 10 de 16 de dezembro de 1986. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências. Belo Horizonte: Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM, 1986.

- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa n. 46, de 9 de agosto de 2001. Estabelece alteração no limite de eficiência de remoção em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio para os sistemas de tratamento de esgotos domésticos e de percolado de aterros sanitários municipais, e dá outras providências. Belo Horizonte: Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM, 2001.
- MINES JR., R. O., BEHREND, G. R., BELL IV, G. H. Assessment of AWT systems in the metro Atlanta area. *Journal of Environmental Management*, v. 70, issue 4, p. 309 – 314, 2004.
- MONTGOMERY, D., RUNGER, G. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2ª ed., 2003, 467 p.
- MOSHEMAN, J. Critical Values of the Log-Normal Distribution. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 48, No. 263. (Sep., 1953), pp. 600-609.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*, Boletim Técnico CPRM, no prelo.
- NASCIMENTO, L.V., VON SPERLING, M. Comparação entre padrões de qualidade das águas e critérios para proteção da vida aquática e da saúde humana e animal. In: XXVI CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, AIDIS, Lima, *Anais...* Lima: [s.n.], 1 - 6 Nov., 1998.
- NASCIMENTO, L.V., VON SPERLING, M. Comparação entre os limites de detecção dos métodos analíticos e os padrões de qualidade das águas e de lançamento de efluentes da Resolução CONAMA 20/86. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. *Anais...*Rio de Janeiro: [s.n.], 10 - 14 Maio, p. 2407 – 2412, 1999a.
- NASCIMENTO, L.V., VON SPERLING, M. Padrões nacionais e internacionais de lançamentos de efluentes líquidos em corpos d'água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, 1999, Belo Horizonte, MG. *Anais...*Belo Horizonte: [s.n.], 1999b.
- NAVAL, L.P., WANDERLEY, T.F. Avaliação de um reator (UASB) em fase de partida sem inóculo, utilizando-se parâmetros físico-químicos e aplicando modelo probabilístico. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D. Factors affecting effluent variability from activated sludge processes. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 53, n. 5, p. 546 - 559, May, 1981a.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D., HAUGH, R.S. Reliability and stability of trickling filter processes. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 54, n. 2, p. 129 - 134, Feb. 1982.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process and reliability-based design. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 51, n. 12, p. 2841 - 2857, Dec., 1979.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. Environmental Protection Agency, EPA Grant N° R805097-01, pp. 1 – 124, 1981b.
- NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. Environmental Protection Agency, EPA – 600/S2 – 81 – 227., pp. 1 – 11, 1981c.
- PARAÍBA. Norma Técnica COPAM 301/88. Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. *Paraíba*, João Pessoa, 1988.
- PEARSON, E.S. D'AGOSTINHO, R.B. AND BOWMAN, K.O. Tests for Departure from Normality: Comparison of Powers. *Biometrika*, n. 64, pp. 231 – 246, 1977.
- PERNAMBUCO. Norma Técnica CPRH N 2.002 de 21/02/00. Critérios e padrões de lançamento de carga orgânica não – industrial. *Pernambuco*, Recife, 2000.

- PORTO, M. Nota técnica sobre a nova estruturação normativa na área de gestão da qualidade dos corpos d'água superficiais. 28 de agosto de 2002.
- RIO DE JANEIRO. DZ.215.R-1 - Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial. Aprovada pela Deliberação CECA nº 3.154, de 26 de abril de 1994. *Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 26 abr. 1994.
- RIO GRANDE DO SUL. Portaria SSMA No 05/89. Aprova a norma técnica SSMA No 01/89, que dispõe sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lancem seus efluentes nos corpos d'água interiores do estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 29 de março de 1989.
- RONDÔNIA. Decreto Estadual 7.903 de 01/07/97. Regulamenta a Lei nº 547, de 30 de dezembro de 1993, que dispõe sobre a preservação e controle da poluição ambiental e estabelece normas disciplinadoras da espécie. *Rondônia*, Porto Velho, 1997.
- ROSNER, B. On the Detection of Many Outliers. *Technometrics*, v. 17, n. 2, pp. 221-227, May, 1975.
- SANTA CATARINA. Decreto n. 14.250, de 5 de Junho de 1981. Regulamenta dispositivos da Lei nº 5.793, de 15 de outubro de 1980, referentes à Proteção e a Melhoria da Qualidade Ambiental. *Santa Catarina*, Florianópolis, 05 jun. 1981.
- SÃO PAULO. Decreto n. 8468, de 8 de setembro de 1976. 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. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1976.
- SHAPIRO, S.S., WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SHAPIRO, S.S., WILK, M.B., CHEN, H.J. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American statistical association*, v. 63, Issue 324, p. 1343-1372, 1968.
- SINGH, A. How reliable is the factor of safety in foundation engineering. *Statistics and probability in civil engineering*. Proceedings of the first international conference on applications of statistics and probability to soil and structural engineering. Hong Kong, 390, 1971. apud NIKU, S., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G., SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability. Environmental Protection Agency, EPA Grant N° R805097-01, 1981b, pp. 1 - 124.
- SMITH, E.P., KEYING, YE, HUGHES, C., SHABMAN, L. Statistical assessment of violations of water quality standards under Section 303 (d) of the Clean Water Act. *Environmental Science & Technology*, v. 35, n. 3, p.606 – 612, 2001.
- SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. *Statistical Methods*. Ames: Iowa State University Press, 8th. ed., 1989. 503p.
- SPIEGEL, M. *Estatística*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 3. ed., 1994. 643p.
- THOMOPOULOS, N. AND JOHNSON, A., Tables and Characteristics of the Standardized Lognormal Distribution. *Proceedings of the Decision Sciences Institute*, n. 103:1-6, 2003.
- TUNG, T.K., HATHHORN, W.E. Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 6, p. 1421-1435, 1988.
- U.S. EPA. Results of the Nationwide urban runoff program. Volume 1 – Final Report. Water Planning Division, U.S. EPA, Washington, DC. 1983.
- UNEP/WHO/HABITAT/WSSCC: Guidelines on Municipal Wastewater Management. UNEP/GPA, Coordination Office, The Hague, The Netherlands, 2004.
- VAN BUREN M.A., WATT, W.E., MARSALEK, J. Applications of the log-normal and normal distributions to stormwater quality parameters. *Water Research*, v. 31, n. 1, p. 95 – 104, 1997.

VAUGHAN, W.J. and RUSSELL, C.S. Monitoring point sources of pollution: answers and more questions from statistical quality control. *The American Statistician*, v. 37, Issue 4, Part 2: Proceedings of the Seventh Symposium on Statistics and the Environment, p. 476 – 487. Nov., 1983.

VON SPERLING, M. Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 1, pp. 111-132, Jan/Mar 1998.

VON SPERLING, M. Associação entre a legislação brasileira de qualidade da água (Resolução CONAMA 20/86) e a seleção de processos de tratamento de esgotos. *Engenharia Sanitária e Ambiental* (ABES), Ano 3, v 3, n. 1/2, p. 67-73, Jan/Jun 1998a.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005, 243p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 1).

VON SPERLING, M. *Lagoas de estabilização*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2002. 196p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 3).

VON SPERLING, M. *Lodos ativados*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. 415p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 4).

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C.A.L. A comparison between wastewater treatment processes in terms of compliance with effluent quality criteria standards. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre. *Anais...*Porto Alegre: AIDIS, 2000.

VON SPERLING, M., CHERNICHARO, C.A.L. Urban wastewater treatment technologies and the implementation of discharge standards in developing countries. *Urban Water*, v. 4. p. 105-114, 2002.

VON SPERLING, M., FATTAL, B. Implementation of guidelines: some practical aspects. Organizado por FEWTRELL, L.; BARTRAM, J. *Water quality: guidelines, standards and health. Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*. Londres, p. 361 – 376, 2001.

VON SPERLING, M., NASCIMENTO, L.V., A Resolução CONAMA 20/86 e as legislações estaduais de classificação das águas e lançamento de efluentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999, Rio de Janeiro. *Anais...*Rio de Janeiro: [s.n.], p. 2413-2419, 1999.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. *The Annal of Mathematical Statistics*, v. 14, n. 4, p. 378 – 388, 1943.

YOO, C. K.; CHOI, S. W.; LEE, I. Disturbance detection and isolation in the activated sludge process. *Water Science & Technology*, v. 45, n. 4-5, pp 217–226, 2002.

ZAR, J. H. Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient. *Journal of the American Statistical Association*, v. 67, Issue 339, pp. 578 – 580, Sep. 1972.