

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

RELIABILITY ANALYSIS OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS

SÍLVIA CORRÊA OLIVEIRA

Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Pesquisadora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG

MARCOS VON SPERLING

Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College, Universidade de Londres. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG

Recebido: 11/09/06 Aceito: 16/10/07

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise da confiabilidade de 166 estações de tratamento de esgotos em operação no Brasil, considerando seis processos de tratamento mais usualmente adotados. Foi utilizada uma metodologia desenvolvida por Niku et al (1979) para determinação de coeficientes de confiabilidade (CDC), considerando o alcance a metas de lançamento para concentrações efluentes de DBO, DQO, SST, NT, PT e CF. A partir dos CDC obtidos, foram calculadas as concentrações de projeto necessárias para o cumprimento das metas de lançamento e os percentuais de atendimento esperados. Os resultados mostraram que poucas ETEs, nas condições de operação observadas, conseguiriam apresentar desempenhos confiáveis, em termos de cumprimento dos padrões. Para todos os constituintes e sistemas de tratamento, a variabilidade da qualidade do efluente foi muito grande.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação de desempenho, confiabilidade, qualidade de efluente, tecnologias de tratamento de esgotos.

ABSTRACT

This article presents a reliability analysis of 166 full-scale wastewater treatment plants operating in Brazil, comprising six different treatment processes usually adopted. A methodology developed by Niku et al (1979) is used for the determination of the coefficients of reliability (COR), in terms of the compliance of effluent BOD, COD, TSS, TN, TP and FC to discharge standards. The design concentrations necessary to meet the prevailing discharge standards and the expected compliance percentages have been calculated from the coefficients of reliability obtained. The results showed that few plants, under the observed operating conditions, would be able to present reliable performances in terms of compliance with the analyzed standards. For all constituents and systems, the variability of the effluent quality was very large.

KEYWORDS: Effluent quality, reliability, performance evaluation, wastewater treatment technologies.

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 uma teoria de decisão estatística-econômica, 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, dependendo 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 para determinação da confiabilidade de seis processos de tratamento de esgotos, compreendendo 166 ETEs em operação nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Estas estações de tratamento já foram objeto de avaliação em trabalhos anteriores (Oliveira e von Sperling, 2005a, 2005b), considerando o desempenho e a influência de fatores de projeto e operação na qualidade do efluente gerado. Neste trabalho, as concentrações de projeto necessárias para alcance de algumas metas de lançamento de efluentes e o percentual esperado de atendimento a estas mesmas metas foram determinados a partir dos valores de coeficientes de confiabilidade (CDC) calculados. Os seguintes processos de tratamento foram analisados: fossas-filtro, lagoas facultativas, lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lodos ativados, reatores UASB operando isoladamente e reatores UASB seguidos de pós-tratamento.

Antes da utilização do método foi efetuada uma extensa caracterização das distribuições de probabilidade dos dados efluentes de 32 estações de tratamento (Oliveira, 2006), uma vez que o estudo de confiabilidade foi desenvolvido para dados distribuídos segundo um modelo lognormal. Desta forma, serão apresentados alguns resultados relativos à caracterização das distribuições de

probabilidade dos dados efluentes, antes do estudo de confiabilidade.

A importância do estudo reside na falta de pesquisas acerca da confiabilidade destas tecnologias de tratamento, já que Niku et al (1979) se concentraram nos processos de lodos ativados e Niku et al (1982) em filtros biológicos percoladores. Na literatura pesquisada, nenhum estudo efetuou uma análise comparativa da confiabilidade de diferentes tecnologias de tratamento.

METODOLOGIA

Caracterização das distribuições de probabilidade das concentrações efluentes de esgotos

Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados

Os coeficientes de assimetria e curtose foram utilizados para uma verificação preliminar da normalidade dos dados efluentes das ETEs, como sugerido por Pearson et al (1977), D'Agostino et al (1990), Helsel e Hirsch (1992). O coeficiente de assimetria é a medida de desvio, ou afastamento da simetria, de uma distribuição, tendo valor próximo de zero quando a distribuição tem uma curva simétrica e tendendo a ser positivo quando a distribuição é assimétrica à direita. O coeficiente de curtose mede a curvatura ou o grau de achatamento de uma distribuição, apresentando um valor próximo a três para uma distribuição normal.

Testes de aderência a uma distribuição

Para a caracterização da distribuição de frequência dos indicadores DBO (demanda bioquímica de oxigênio), DQO (demanda química de oxigênio), SST (sólidos suspensos totais), NT (nitrogênio total), PT (fósforo total) e CF (coliformes fecais, ou coliformes termotolerantes) presentes nos esgotos tratados, foram aplicados testes de aderência às distribuições normal, lognormal, gama, exponencial e retangular. Os testes utilizados para verificar o ajuste destas distribuições candidatas aos dados efluentes foram Qui-quadrado (χ^2), Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors. Foram utilizados, ainda, alguns testes específicos para chegar a normalidade dos dados (Kolmogorov-Smirnov,

Lilliefors, Shapiro Wilk) e os testes gráficos "Normal Probability Plot" e "Probability-Probability Plot", para auxiliar na seleção da melhor opção. O "software" utilizado para execução dos testes foi o Statistica 6.1.

Estudo de confiabilidade das estações de tratamento de esgotos

Coefficiente de confiabilidade (CDC)

O coeficiente de confiabilidade relaciona valores das concentrações efluentes médias 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:

$$m_x = (\text{CDC}) X_s \quad (1)$$

Onde

m_x = concentração média do constituinte;

X_s = meta de qualidade ou padrão fixado por alguma legislação ou norma;

CDC = coeficiente de confiabilidade.

O coeficiente de confiabilidade (CDC) é calculado a partir da seguinte equação:

$$\text{CDC} = \sqrt{\text{CV}^2 + 1} \times \exp\left[-Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(\text{CV}^2 + 1)}\right] \quad (2)$$

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)

Ressalta-se que o CDC é expresso com base nas propriedades dos dados originais e não dos logaritmos dos dados.

Concentrações de projeto necessárias para o alcance de vários padrões ou metas especificados

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. A equação (1) foi utilizada para o cálculo das concentrações.

Percentual esperado de atendimento a metas de lançamento adotadas

Uma outra etapa consistiu no cálculo do percentual esperado de atendimento a algumas metas de lançamento adotadas, partindo dos valores de concentração efluente e CV das diversas ETes. Para isto foi utilizada a equação (4) proposta por Niku et al (1979), obtida por meio da integração da função densidade de probabilidade da distribuição lognormal, mostrada na equação (3):

$$\int_0^x \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma_y} \right) e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{\sigma_y} \ln(x) - \frac{1}{2} \frac{\mu_y}{\sigma_y} \sqrt{2} \right) \quad (3)$$

O percentual esperado de cumprimento de um determinado padrão de lançamento é obtido pela determinação da área abaixo da curva fornecida pela função (3). Utilizando as relações existentes entre as distribuições normal e lognormal e algumas manipulações algébricas que levam em conta o coeficiente de variação (CV), os autores chegaram à equação (4), mais simples e facilmente empregável:

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - \left[\ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln(1 + CV^2 x) \right]}{\sqrt{\ln(1 + CV^2 x)}} \quad (4)$$

De posse dos 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 (exemplo: Snedecor e Cochran, 1989, Lapponi, 2005). Estes valores, correspondentes à área subentendida pela curva normal central reduzida, são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização das distribuições de probabilidade de concentrações efluentes de esgotos

Estatísticas preliminares utilizadas para verificação das distribuições dos dados

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. Como o projeto URBAGUA foi desenvolvido em parceria entre a USP e a UFMG, foram coletados dados de 208 ETes em operação nos estados de São Paulo e Minas Gerais.

Neste estudo específico, desenvolvido e descrito detalhadamente por Oliveira (2006), foram selecionadas 32 ETes, de 11 diferentes modalidades, para a verificação da distribuição de probabilidade dos dados efluentes, conforme mostrado na Tabela 1. O estudo procurou verificar o comportamento de dados efluentes de ETes que apresentavam diferentes processos de tratamento e condições diversas de operação e de monitoramento. Assim, algumas ETes foram incluídas, ainda que possuíssem um número pequeno

de dados e frequência de monitoramento não definida. Tentou-se, desta forma, fazer com que grande parte das modalidades de tratamento estivesse representada no estudo.

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. Esta grande variabilidade foi considerada nas análises, que procuraram verificar a sua influência no modelo distributivo dos dados. Na Tabela 2 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 à DBO efluente, constituinte mais frequentemente monitorado e pre-

Tabela 1 – Sistemas de tratamento de esgotos utilizados para determinação das distribuições de probabilidade

Modalidade	Notação de referência	No de ETes	(%) de ETes
Escoamento superficial	ES	1	3
Filtro biológico percolador	FBP	1	3
Fossa séptica + filtro anaeróbio	FS + FA	4	11
Lagoa aerada facultativa	LAF	1	6
Lagoa aerada mistura completa	LAMC	1	3
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	LAN + LF	5	17
Lagoa facultativa	LF	7	20
Lagoa facultativa + lagoa de maturação	LF + LM	1	3
Lodos ativados	LA	8	26
Reator UASB	UASB	1	3
Reator UASB + lagoa facultativa	UASB + LF	2	6
Total	11	32	100

Tabela 2 - Frequência de amostragem de DBO efluente, praticada pelas 32 ETes investigadas

Frequência de amostragem	Nº de ETes	% de ETes
Diária	1	3
Semanal	4	13
2 vezes por mês	12	38
Mensal	4	13
Trimestral	1	3
Indefinida	10	31
Total	32	100

sente em todos os registros de operação disponibilizados.

Os coeficientes de assimetria e curtose foram calculados para as 32 ETEs apresentadas na Tabela 1. Estes coeficientes foram utilizados para uma verificação preliminar das distribuições dos dados e a Figura 1 mostra os resultados para as concentrações efluentes de DBO, DQO, SST, NT, PT e CF.

Nota-se que a maioria dos valores dos coeficientes de assimetria foi diferente de zero e positiva, indicando distribuições assimétricas à direita. Do mesmo modo, grande parte dos valores de curtose foi diferente de três, indicando que o grau de achatamento das distribuições dos dados difere do observado para uma distribuição normal. Estes resultados confirmam observações teóricas de que 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.

A Figura 2 mostra um histograma típico para concentração efluente de

DBO, selecionado dentre os dados disponibilizados pelas diversas ETEs, que evidencia o comportamento assimétrico à direita e o bom ajuste à função densidade de probabilidade (FDP) de uma distribuição lognormal.

Testes de aderência a uma distribuição

Conforme descrito no item “Metodologia”, nesta etapa, constituída de duas partes, foram aplicados testes estatísticos para verificação da normalidade dos dados e de aderência das distribuições normal, lognormal, gama, exponencial e retangular aos dados efluentes. Considerando as duas etapas, foram efetuados cerca de 2000 testes.

Para totalização dos resultados obtidos 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. É

importante ressaltar a pouca precisão mostrada pelos testes Kolmogorov-Smirnov que, em muitas situações, não rejeitavam nenhuma das opções disponíveis. Nesses casos, foi necessária uma análise dos testes gráficos (“Normal Probability Plot” e “Probability-Probability Plot”), como uma ferramenta adicional para verificação das distribuições mais adequadas.

Para cada constituinte 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 representantes dos constituintes presentes nos esgotos tratados, como mostrado na Tabela 3.

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

A distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento de todos os constituintes efluentes, por apresentar um

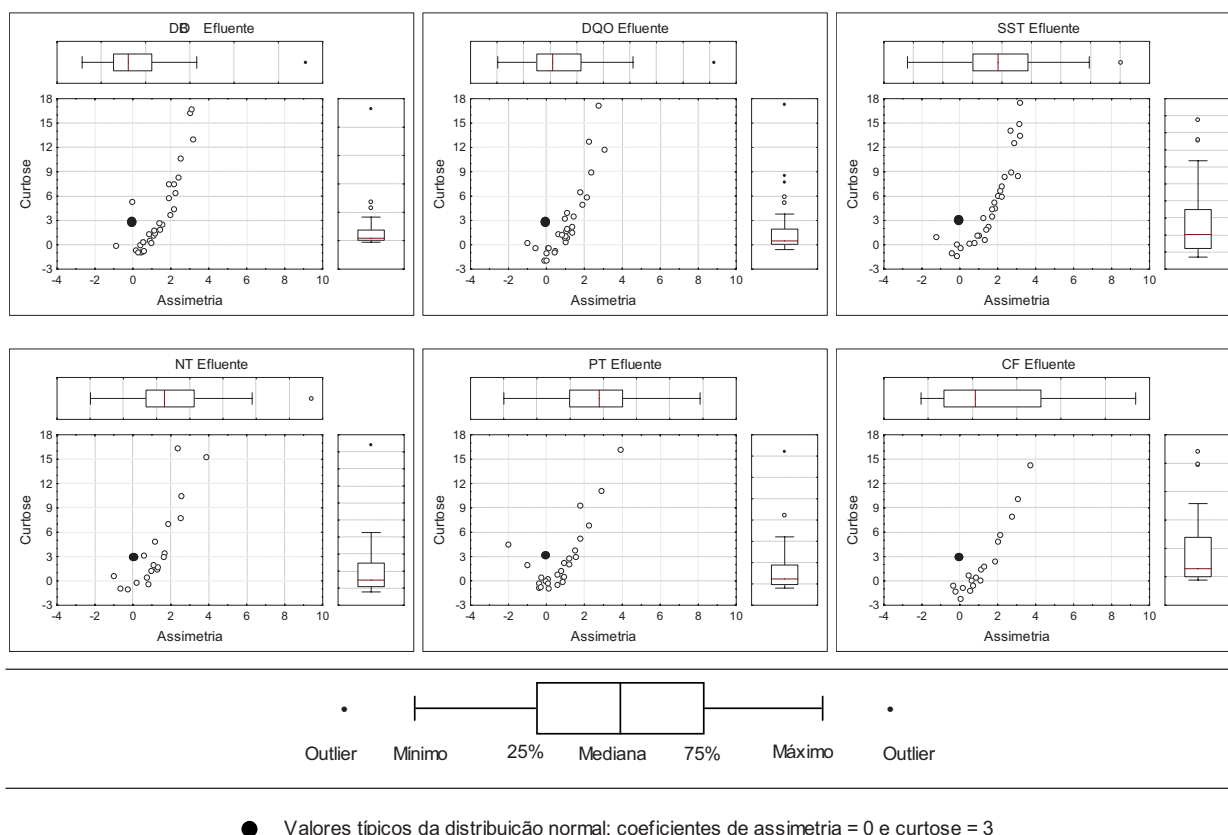


Figura 1 - Coeficientes de assimetria versus curtose das concentrações efluentes dos constituintes

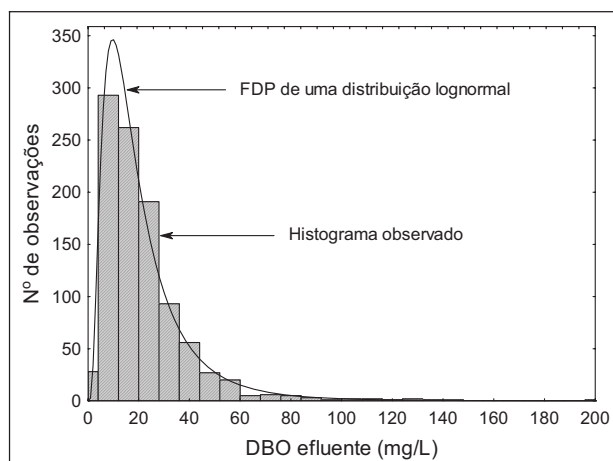


Figura 2 – Histograma típico de concentrações efluentes de DBO

Tabela 3 - 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	
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

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, 1976a; Niku et al, 1979, 1981 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 reporta apenas ao comportamento dos constituintes DBO e SST efluentes de sistemas de lodos ativados.

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 de-

finida, 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.

Estudo de confiabilidade das estações de tratamento de esgotos

A partir dos resultados obtidos na etapa anterior, foi efetuado o estudo de confiabilidade de estações de tratamento de esgotos, considerando alguns processos mais usualmente adotados no país, e para os quais havia uma maior disponibilidade de dados. As tecnologias de tratamento analisadas foram: fossas-filtro (FS+FA), lagoas facultativas (LF), 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).

Coefficiente de confiabilidade (CDC)

O número de ETEs avaliadas em cada tecnologia de tratamento, considerando todos os constituintes, é apresentado na Tabela 4. Algumas estações não monitoravam todos os constituintes de interesse, o que explica o número diferenciado de unidades dentro de uma mesma tecnologia de tratamento.

O CDC dos constituintes, considerando o coeficiente de variação (CV) das ETEs em operação, foi calculado para as seis tecnologias de tratamento, para um nível de confiabilidade de 95%. Os valores médios dos CV e CDC das diversas ETEs, considerando os constituintes de interesse, são apresentados na Tabela 5 e na Figura 3.

Pela observação da Tabela 5 e da Figura 3, percebe-se que, para todos os constituintes e todas as modalidades de tratamento, foi grande a variabilidade dos coeficientes de variação e de confiabilidade. Ficaram evidenciados, também, os maiores coeficientes de variação e os conseqüentes 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 6 e na Figura 4.

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 um melhor entendimento dos valores de CDC constantes na Tabela 6 e na Figura 4, tome-se como exemplo um valor de CV igual a 0,8 e um nível de confiabilidade de 95% ($\alpha = 0,05$), o que implicará num valor de CDC de 0,40. Isto significa que, para cumprir um determinado padrão

Tabela 4 - Número de ETEs descritas em cada modalidade, por constituinte

Constituinte	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 anaeróbio (FA); filtro biológico percolador (FBP); flotação (FLOT); lagoas facultativas (LF) e lagoas de polimento (LP).

Tabela 5 – Valores médios de CV e CDC das tecnologias de tratamento, por constituinte

Tecnologias de tratamento	Coeficientes de variação – CV						Coeficientes de confiabilidade - CDC					
	DBO	DQO	SST	NT	PT	CF	DBO	DQO	SST	NT	PT	CF
FS+FA	0,61	0,53	0,66	0,34	0,47	1,10	0,49	0,52	0,48	0,61	0,56	0,31
LF	0,58	0,38	0,58	0,50	0,44	1,05	0,50	0,63	0,51	0,57	0,58	0,36
LAN+LF	0,55	0,33	0,47	0,38	0,36	1,03	0,52	0,63	0,57	0,6	0,62	0,35
LA	0,96	0,95	1,10	0,78	0,58	3,29	0,40	0,42	0,38	0,49	0,50	0,29
UASB	0,61	0,57	0,71	0,21	0,29	1,86	0,50	0,53	0,44	0,75	0,66	0,37
UASB+POS	0,67	0,58	0,76	-	0,57	1,83	0,45	0,49	0,43	-	0,54	0,29

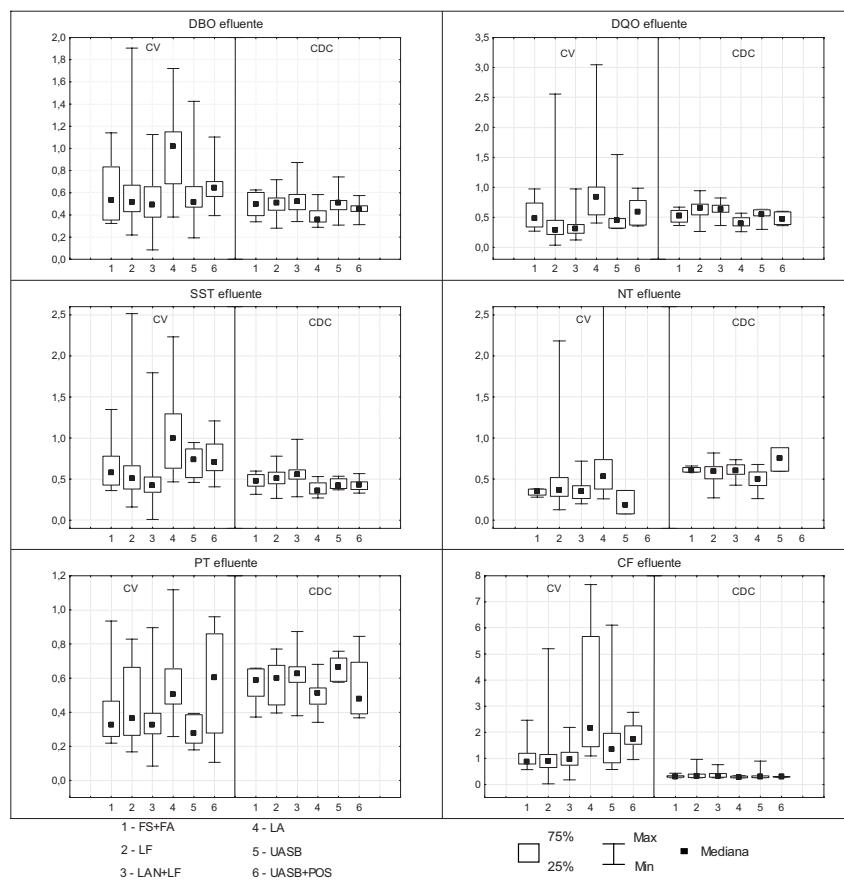


Figura 3 – Coeficientes de variação e de confiabilidade das modalidades de tratamento

Tabela 6 – 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	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
90%	1,00	0,79	0,66	0,57	0,52	0,49	0,47	0,45	0,45	0,44	0,44
95%	1,00	0,74	0,57	0,47	0,40	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28
99%	1,00	0,64	0,44	0,32	0,25	0,20	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12

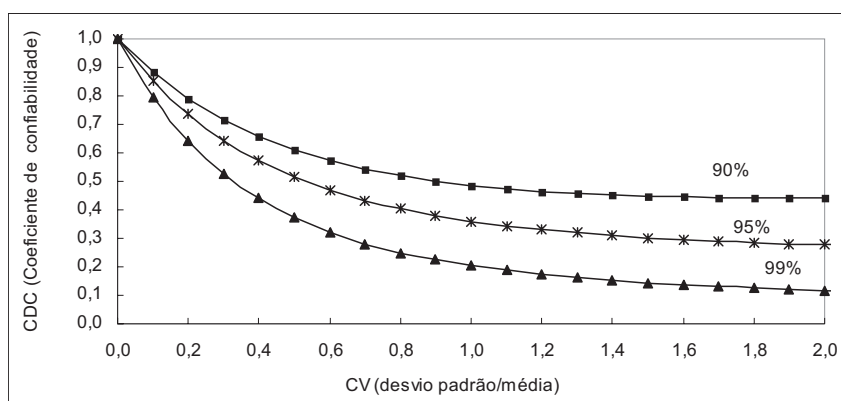


Figura 4 - Valores de CDC em função do CV, considerando diferentes níveis de confiabilidade

de lançamento durante 95% do tempo, a concentração efluente média de um dado constituinte deverá ser, de acordo com a equação (1): $m_x = (CDC).X_s = 0,40 X_s$. Para um padrão de 60 mg/L de DBO, por exemplo, isto significa que a concentração efluente de projeto deverá ser $m_x = 0,40 \times 60 = 24$ mg/L. Para uma avaliação em termos da operação de uma ETE existente, pode-se interpretar que a concentração média efluente deverá ser de 24 mg/L. Cálculos similares podem ser efetuados para diferentes valores de CV e de α .

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.

Concentrações de projeto necessárias para o alcance de vários padrões ou metas especificados

A Figura 5 mostra gráficos “Box-whisker” com as concentrações médias de projeto necessárias para que as

ETEs das modalidades de tratamento em estudo alcancem algumas metas de lançamento adotadas para os diversos constituintes. As metas adotadas correspondem, em alguns casos, a padrões hipotéticos estabelecidos para todos os constituintes, considerando alguns valores intermediários em relação aos usualmente presentes nas legislações brasileiras. As metas adotadas foram: 60 mg/L para DBO, 60 mg/L para SST, 200 mg/L para DQO, 20 mg/L para NT, 2 mg/L para PT e 10^3 NMP/100mL para CF. As concentrações efluentes médias de projeto foram calculadas por meio da equação (1).

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, decorrência dos maiores CVs apresentados pela modalidade. Deve ser ressaltado, também, o comportamento relativamente estável das lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN+LF), quando comparado com as outras modalidades, considerando quase todos os constituintes. A Figura 6 mostra gráficos “Box-whisker” para as razões entre as concentrações de projeto e as concentrações reais observadas para as modalidades de

tratamento, que levariam ao alcance das metas estabelecidas.

Observa-se que para uma razão igual a 1, a concentração efluente real observada para a ETE coincidiria com o valor de projeto necessário para garantir que 95% dos resultados atendessem às metas de lançamento adotadas. No entanto, em geral, foram observadas grandes distâncias entre as concentrações necessárias para atendimento das metas e aquelas efetivamente observadas, com maioria absoluta das ETEs apresentando valores bem abaixo de 1, para todos os constituintes. Os LA e os reatores UASB+POS mostraram os melhores desempenhos dentre as tecnologias analisadas e, em alguns casos, algumas ETEs isoladas apresentaram uma relação bem maior do que 1, mostrando que as concentrações efluentes reais atenderiam a metas de lançamento muito mais restritivas do que as adotadas.

Percentual esperado de atendimento a metas de lançamento adotadas

Como descrito no item “Metodologia”, foram calculados os percentuais de atendimento que as tecnologias de tratamento alcançariam, mantendo os mesmos parâmetros de opera-

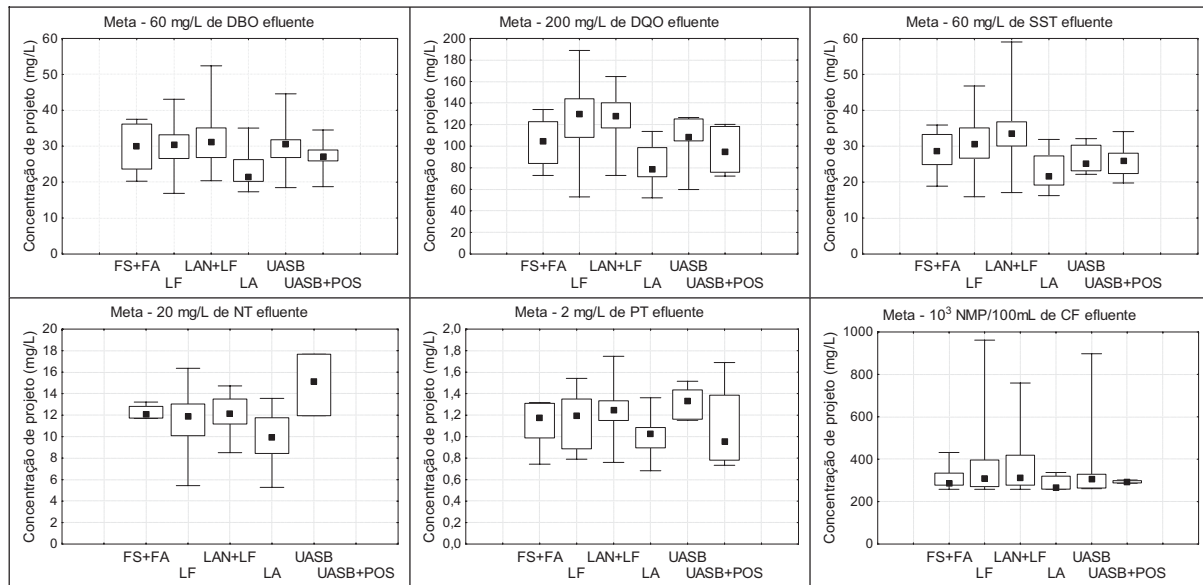


Figura 5 – Concentrações de projeto necessárias para alcance de diversas metas de lançamento de constituintes efluentes (nível de confiabilidade de 95%)

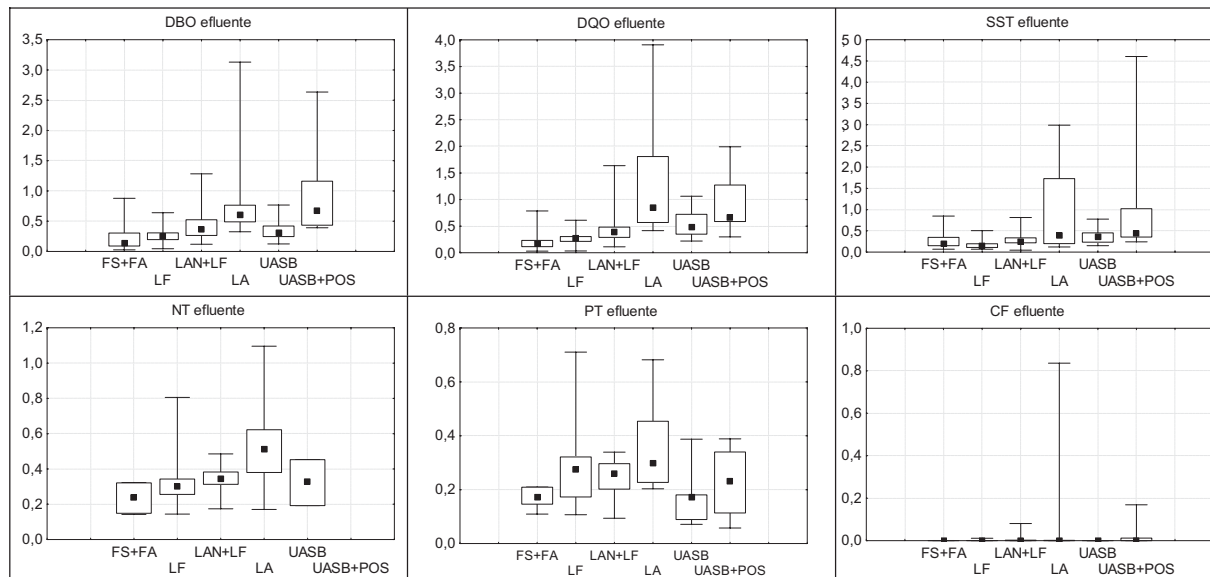


Figura 6 – Razão entre concentrações de projeto e concentrações reais observadas para alcance das diversas metas de lançamento (nível de confiabilidade de 95%)

ção, utilizando-se a equação (4). São apresentados na Figura 7, para cada tecnologia de tratamento, os percentis de atendimento projetado com base nos coeficientes de confiabilidade, a cada uma das metas de lançamento de concentrações efluentes mencionadas anteriormente.

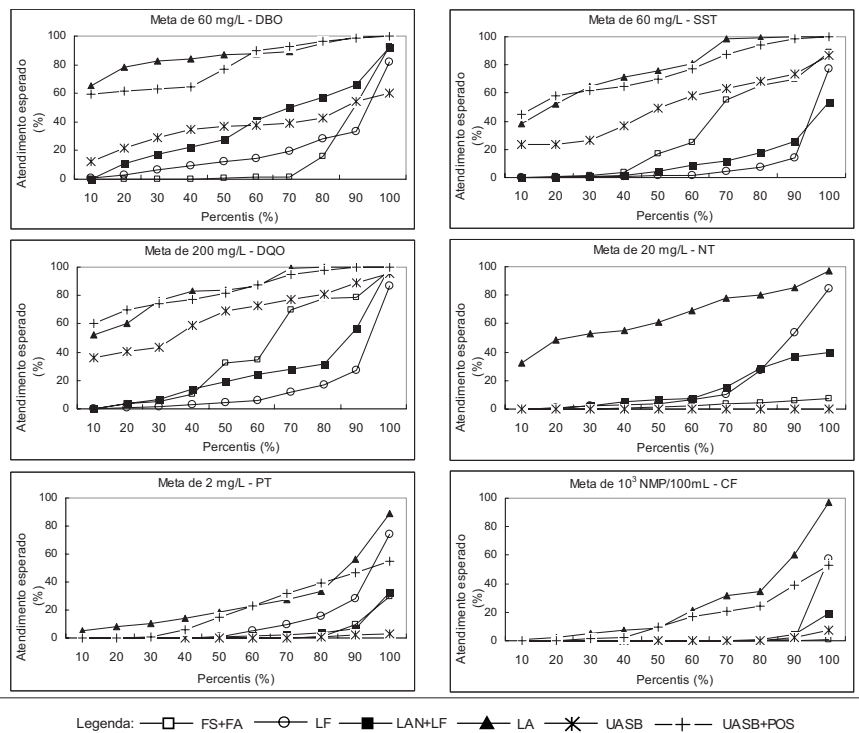
Tomando como exemplo de interpretação dos percentis as FS+FA e a meta de 60 mg/L para DBO efluente, percebe-se que 80% das ETEs desta modalidade teriam um percentual de cumprimento abaixo de 16% (ou seja, 80% das ETEs apresentariam um per-

centual 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 até 95 e 96%, respectivamente, nas condições de operação observadas. Observa-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. 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.

CONCLUSÕES

O estudo sobre a caracterização da distribuição de probabilidade dos dados efluentes de estações de tratamento de esgotos mostrou que a distribuição lognormal pode ser adotada como representante do comportamento dos constituintes DBO, DQO, SST, NT, PT e CF. Foi verificado, ainda, que o modelo distributivo que melhor descre-



Nota: Não foram disponibilizados dados de NT por nenhum dos reatores UASB seguidos de pós-tratamento analisados

Figura 7 - Concentrações de projeto necessárias para atendimento das diversas metas de lançamento

ve o comportamento dos dados efluentes não parece ter ligação com o tipo de processo empregado, mas apenas com a qualidade e quantidade de dados disponibilizados. Os dados das ETEs que praticavam uma frequência de monitoramento não definida, disponibilizando dados escassos e esparsos, forneceram informações menos conclusivas acerca da distribuição a ser adotada.

A partir do conhecimento do comportamento das concentrações efluentes, foi possível calcular os valores dos coeficientes de confiabilidade (CDC) para as 166 ETEs analisadas. Foi observada uma grande variabilidade dos coeficientes de variação (CV) e de confiabilidade, considerando todos os constituintes e todas as modalidades de tratamento. Os menores valores de CDC foram obtidos para a modalidade de lodos ativados (LA), que apresentou elevados valores de CV, fato explicado pelas baixas concentrações efluentes, em muitos casos, menores que os desvios padrão.

As menores concentrações médias de projeto necessárias para alcance das diversas metas foram observadas para

os lodos ativados (LA), consequência dos menores valores de CDC. Apesar das menores concentrações requeridas, o percentual de ETEs da modalidade LA que apresentaram concentrações efluentes médias menores ou iguais às concentrações de projeto necessárias para assegurar que 95% dos resultados atenderiam às metas de lançamento foi mais elevado que o observado para as outras tecnologias de tratamento, sendo comparável apenas aos reatores UASB+POS. As FS+FA e LF mostraram, em geral, uma grande distância entre as concentrações reais e as necessárias para atendimento às metas de lançamento.

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 razoáveis, efetivos e tecnicamente alcançáveis.

AGRADECIMENTOS

USP, FAPEMIG, CNPq, FINEP, SABESP, COPASA, FEAM e prestadores de serviços municipais.

REFERÊNCIAS

- BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G. *How to construct reference distributions to evaluate treatment plant effluent quality*. JWPCF, 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.
- CHARLES, K.J. et al. *Effluent quality from 200 on-site sewage systems: design values for guidelines*. Water Science & Technology, v. 51, n. 10, pp 163-169, 2005.
- 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, N° 4, pp. 316-321, 1990.
- DEAN, R.B.; FORSYTHE, S.L. *Estimating the reliability of advanced waste treatment*. Part 1 and 2, Water & Sewage Works, June, 1976a and 1976b.
- HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M. *Statistical methods in water resources*. Techniques of Water

Oliveira, S. C. & von Sperling, M.

Resources Investigations Series, Book 4, chapter A3, US Geological Survey, 509 p. 1992.

LAPPONI, J.C. *Estatística usando Excel*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1a ed., 476p. 2005.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th. Ed., 1819p. 2003.

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; FJ. *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. et al. *Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability*. Environmental Protection Agency, EPA Grant N° R805097-01, pp. 1 - 124. 1981.

OLIVEIRA, S. M. A. C. *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 231 f. 2006.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. *Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1. Análise de desempenho*. Engenharia Sanitária e Ambiental, (ABES), Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005a.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. *Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: Influência de fatores de projeto e operação*. Engenharia Sanitária e Ambiental, (ABES), Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, p. 358-368, 2005b.

PEARSON, E.S.; D'AGOSTINHO, R.B; BOWMAN, K.O. *Tests for Departure from Normality: Comparison of Powers*. Biometrika, n. 64, pp. 231 - 246, 1977.

SNEDECOR, G.W., COCHRAN, W.G. *Statistical Methods*. Ames: Iowa State University Press, 8th. ed., 503p. 1989.

Endereço para correspondência:

Sílvia Corrêa Oliveira
Departamento de Engenharia
Sanitária e Ambiental (DESA)
UFMG
Av. Contorno 842 - 7º andar
30110-060 - Belo Horizonte - MG
- Brasil
Tel: (031) 3238-1935
Fax: (031) 3238-1879
E-mail: silvia@desa.ufmg.br