

**APLICAÇÃO DO PROJETO ÓTIMO ROBUSTO À OPERAÇÃO  
DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR  
LODOS ATIVADOS**

**ANA MARIA ROBERTO MOREIRA**

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

**ORIENTADOR: Prof. DR. Fazal Hussain Chaudhry**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100035893

São Carlos, 1996



Class.	TESE - EESC
Cutt.	3688
Tombo	177/96

Hidráulica e Saneamento

17 0745447

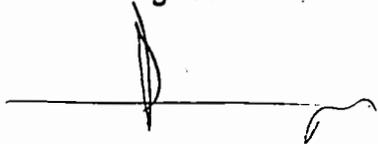
M838a Moreira, Ana Maria Roberto  
Aplicação do projeto ótimo robusto à operação de sistema de tratamento de esgotos por lodos ativados / Ana Maria Roberto Moreira.--São Carlos, 1996.  
148p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1996.  
Orientador: Prof. Fazal Hussain Chaudhry

1. Robustez. 2. Lodos Ativados. 3. Otimização. 4. Análise de Sensibilidade I. Título

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Dissertação defendida e aprovada em 22-08-1996  
pela Comissão Julgadora:



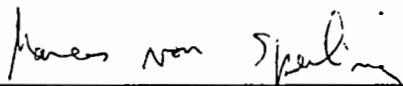
---

**Prof. Doutor FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY - Orientador-**  
**(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)**



---

**Profa. Doutora LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS**  
**(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)**



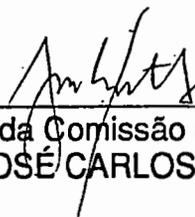
---

**Prof. Doutor MARCOS VON SPERLING**  
**(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)**



---

**Coordenador da área "Hidráulica e Saneamento"**  
**Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES**



---

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

*"Deus cria e permite ao homem realizar obras  
nos caminhos do progresso e da civilização,  
mas deseja que o criador e as obras da criatura  
se unam no amor, em benefício da humanidade".*

**Meu Pai**

*Dedico,*

*Aos meus pais, Valdimar e Audira, que me ensinaram o verdadeiro sentido da vida e sempre me incentivaram com muito amor;*

*Aos meus irmãos: Aparecida, Graça, Rejane, Rosângela e Júnior, amigos do lado esquerdo do peito;*

*A minha prima Socorro; aos meus cunhados Edinho, Paulo e Luciana;*

*Ao Guto que com carinho e dedicação esteve ao meu lado durante este trabalho e, por ser meu “porto seguro” nos momentos mais difíceis .*

## AGRADECIMENTOS

---

A Deus, Senhor de minha vida, a quem devo tudo;

Ao Professor Fazal Hussain Chaudhry, pela paciência e dedicação e, que com sua orientação segura e precisa, sua experiência e capacidade, tornou possível a realização deste trabalho;

À Professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pelo incentivo e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho;

Aos Professores José Roberto Campos e Sérgio Cordeiro pelas valiosas contribuições;

À University of Cincinnati, em especial ao Professor James G. Uber pelo fornecimento do código computacional GRG2/SC;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsa de estudo;

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), em especial as Eng.<sup>a</sup> Maria Carolina e Vera, pelo fornecimento de dados operacionais da ETE - BARUERI;

Ao técnico de operação da ETE - BARUERI, Carlos Medeiros Coelho, pela atenção dispensada e esclarecimentos sobre o funcionamento operacional da estação;

Aos meus amigos Isabel, Ky, Marcia, Rosana e Válter pela amizade e apoio em todos os momentos;

A todas as pessoas que estiveram ao meu lado, ou mesmo distante, torcendo pelo meu sucesso. Entre as quais não posso deixar de citar: Deize, Bertini, Fábio, Luana, Marconi, Ocileide e os membros da Pastoral Universitária, Cláudia, Marcelo, Marisa e Silmara

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

## SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
RESUMO .....	xiii
<i>ABSTRACT</i> .....	xiv
1 INTRODUÇÃO .....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	04
2.1 Modelos de otimização de lodos ativados .....	04
2.2 Funções de custos de sistemas de lodos ativados .....	25
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA .....	29
3.1 Princípios Básicos de Funcionamento de uma ETE Lodos Ativados .....	29
3.2 Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri .....	32
3.2.1 Características Gerais .....	32
3.2.2 Descrição das Áreas de Operação da ETE - Barueri .....	33
4 OBJETIVOS .....	38

5 MÉTODOS.....	39
5.1 Estrutura do Projeto Ótimo Robusto.....	39
5.1.1 Seleção das Variáveis de Projeto.....	49
5.1.2 Valores dos Pesos.....	50
5.1.3 Modelos em Regime Permanente e Sistemas Dinâmicos.....	51
5.2 Funções Tecnológicas.....	52
5.2.1 Decantador Primário.....	54
5.2.2 Lodos Ativados.....	56
5.2.3 Decantador Secundário.....	60
5.2.4 Adensador Gravitacional.....	62
5.2.5 Digestor Anaeróbio.....	64
5.2.6 Filtro Prensa.....	67
5.2.7 Reciclagem dos Sobrenadantes da Fase Sólida.....	69
5.2.8 Disposição do Lodo.....	70
5.3 Funções de Custos.....	71
6 ESTIMATIVA DOS VALORES NOMINAIS DOS PARÂMETROS $\hat{u}$ DO MODELO.....	81
6.1 Sedimentação Primária.....	81
6.2 Características de Sedimentação do lodo.....	83
6.2.1 Lodo Primário.....	83
6.2.2 Lodo Secundário.....	85
6.2.3 Lodo Proveniente do AG.....	87
6.3 Cinética do sistema de lodos ativados.....	90
6.4 Sedimentação Secundária.....	92
6.5 Aeração.....	94
6.6 Adensador Gravitacional.....	96
6.7 Digestor Anaeróbio.....	97
6.8 Filtro Prensa.....	101
6.9 Condições do Esgoto Afluente à ETE.....	101

7 APLICAÇÃO: RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	102
7.1 Estrutura do Projeto Ótimo Robusto na ETE - Barueri .....	102
7.2 Estratégia de Otimização .....	109
7.3 Geração de Alternativas de Operação .....	112
7.3.1 Fator de Ponderação $\alpha = 1$ .....	113
7.3.2 Fator de Ponderação $\alpha = 0$ .....	120
7.3.3 Fator de Ponderação $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	127
7.4 Estudo Comparativo entre Várias Estratégias de Operação .....	134
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO.....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
OBRAS CONSULTADAS .....	145

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 01 - Esquema justificativo para a utilização da robustez do sistema	03
Figura 02 - Esquemas dos sistemas dinâmicos .....	07
Figura 03 - Relação entre o custo anual total do sistema e a robustez da qualidade do efluente .....	18
Figura 04 - Fluxograma simplificado da ETE - Barueri.....	30
Figura 05 - Esquema simplificado das características básicas do POR .....	40
Figura 06 - Resposta da performance de um sistema hipotético para o caso de um único parâmetro e dois projetos alternativos (Fonte: UBER et al., 1991a) .....	48
Figura 07 - Configuração esquemática da ETE - Barueri.....	53
Figura 08 - Esquema simplificado do processo de desidratação de lodos por filtro prensa de placas da ETE - Barueri .....	68
Figura 09 - Variação da relação de sólidos afluentes remanescentes no efluente primário ( $X_{T1} / X_{T2}$ ) com a taxa de aplicação superficial ( $OR_p$ ) observada na ETE - Barueri e as curvas de ajuste para diversos valores de concentrações de SST afluente ao DP ( $X_{T1}$ ) .....	82

Figura 10 - Dados da figura 09 com os valores das constantes $v_1$ , $v_2$ e $v_3$ de UBER et al. (1991b) .....	82
Figura 11 - Variação da concentração de SST do lodo primário ( $X_{T8}$ ) com ( $A_p/Q_8$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste.....	84
Figura 12 - Dados da figura 11 com os valores das constantes $a_p$ e $n_p$ de UBER et al. (1991b) .....	84
Figura 13 - Variação da concentração de SST do lodo secundário ( $X_{T5}$ ) com ( $A_s/Q_5$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste.....	86
Figura 14 - Dados da figura 13 com os valores das constantes $a_w$ e $n_w$ de UBER et al. (1991b) .....	86
Figura 15 - Variação da concentração de SST no fundo do AG ( $X_{T11}$ ) com ( $A_g/Q_{11}$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste.....	88
Figura 16 - Dados da figura 15 com o valor de $a_2$ de UBER et al. (1991b)..	89
Figura 17 - Variação da concentração de SST efluente do DS ( $X_{T4}$ ) com ( $Q_3/A_s$ ) observada na ETE - Barueri e as curvas de ajuste para diversos valores de concentrações de SST afluente ao DS ( $X_{T3}$ ).....	93
Figura 18 - Dados da figura 17 com os valores das constantes $c_1$ , $c_2$ e $c_3$ de UBER et al. (1991b) .....	93
Figura 19 - Variação da concentração de SST do lodo digerido e adensado no DIG2 ( $X_{T14}$ ) com ( $A_d/Q_{14}$ ) observada na ETE e a curva de ajuste.....	99
Figura 20 - Dados da figura 19 com os valores das constantes $a_d$ e $n_d$ de UBER et al. (1991b) .....	100

- Figura 21 - Relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez para  $\alpha = 1$  ... 113
- Figura 22 - Análise dos custos individuais  $CT_p$ ,  $CT_{ta}$ ,  $CT_s$  e  $CT_{sl}$  ( $\alpha = 1$ ).... 115
- Figura 23 - Variações percentuais dos parâmetros  $OR_p$ ,  $La$ ,  $\theta$  e  $OR_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$ ..... 117
- Figura 24 - Variações percentuais dos parâmetros SSVLM,  $r$  e  $\theta_c$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$ ..... 117
- Figura 25 - Variações percentuais dos parâmetros  $F/M$  e  $L_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$ ..... 118
- Figura 26 - Variações percentuais dos parâmetros  $T_d$ ,  $\theta_d$  e  $L_d$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$ ..... 119
- Figura 27 - Variações percentuais dos parâmetros  $L_g$  e  $L_f$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$ ..... 120
- Figura 28 - Relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez para  $\alpha = 0$  ... 122
- Figura 29 - Análise dos custos individuais  $CT_p$ ,  $CT_{ta}$ ,  $CT_s$  e  $CT_{sl}$  ( $\alpha = 0$ ).... 123
- Figura 30 - Variações percentuais dos parâmetros  $OR_p$ ,  $La$ ,  $\theta$  e  $OR_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{SST'}$  para  $\alpha = 0$  ..... 124
- Figura 31 - Variações percentuais dos parâmetros SSVLM,  $r$  e  $\theta_c$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{SST'}$  para  $\alpha = 0$  ..... 124
- Figura 32 - Variações percentuais dos parâmetros  $F/M$  e  $L_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{SST'}$  para  $\alpha = 0$  ..... 125

Figura 33 - Variações percentuais dos parâmetros $T_d$ , $\theta_d$ e $L_d$ da fase sólida do tratamento em função de $R_{SST}$ para $\alpha = 0$ .....	126
Figura 34 - Variações percentuais dos parâmetros $L_g$ e $L_f$ da fase sólida do tratamento em função de $R_{SST}$ para $\alpha = 0$ .....	126
Figura 35 - Relações entre $CT^{max}$ e as medidas de robustez para $\alpha = \frac{1}{2}$ ..	127
Figura 36 - Relação do fator de ponderação ( $\alpha$ ) entre $R_{DBO'}$ e $R_{SST}$ para $CT^{max} = 2187880,00$ US\$/ano .....	129
Figura 37 - Análise dos custos individuais $CT_p$ , $CT_{ta}$ , $CT_s$ e $CT_{sl}$ ( $\alpha = \frac{1}{2}$ ) ...	130
Figura 38 - Variações percentuais dos parâmetros $OR_p$ , $La$ , $\theta$ e $OR_s$ da fase líquida do tratamento em função de $R_{DBO'}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	131
Figura 39 - Variações percentuais dos parâmetros $OR_p$ , $La$ , $\theta$ e $OR_s$ da fase líquida do tratamento em função de $R_{SST}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	131
Figura 40 - Variações percentuais dos parâmetros SSVLM, $r$ e $\theta_c$ da fase líquida do tratamento em função de $R_{DBO'}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	132
Figura 41 - Variações percentuais dos parâmetros $F/M$ e $L_s$ da fase líquida do tratamento em função de $R_{DBO'}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	132
Figura 42 - Variações percentuais dos parâmetros $T_d$ , $\theta_d$ e $L_d$ da fase sólida do tratamento em função de $R_{DBO'}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	133
Figura 43 - Variações percentuais dos parâmetros $L_g$ e $L_f$ da fase sólida do tratamento em função de $R_{DBO'}$ para $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	133

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 01 - Sumário de projeto ótimos de custo mínimo e robustos.....	20
Tabela 02 - Resumo comparativo dos trabalhos relacionados com a otimização de lodos ativados .....	22
Tabela 03 - Vantagens e desvantagens do sistema de lodos ativados .....	31
Tabela 04 - Principais características das unidades da ETE - Barueri .....	37
Tabela 05 - Valores de $v_1$ , $v_2$ e $v_3$ .....	83
Tabela 06 - Valores de $a_p$ e $n_p$ .....	85
Tabela 07 - Valores de $a_w$ e $n_w$ .....	87
Tabela 08 - Valor de $a_2$ .....	89
Tabela 09 - Coeficientes cinéticos .....	90
Tabela 10 - Valores de $c_1$ , $c_2$ e $c_3$ .....	94
Tabela 11 - Valores de $a_d$ e $n_d$ .....	100
Tabela 12 - Parâmetros de projeto .....	106
Tabela 13 - Variáveis de projeto.....	107

Tabela 14 - Parâmetros $u$ do sistema.....	108
Tabela 15 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri com $\alpha = 1$ .....	114
Tabela 16 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri com $\alpha = 0$ .....	121
Tabela 17 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri com $\alpha = \frac{1}{2}$ .....	128
Tabela 18 - Resumo de alternativas de operação robusta da ETE - Barueri .....	135

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

- adim. - adimensional
- AAD - aerador por ar difuso
- AG - adensador gravitacional
- BFS - bombeamento do sobrenadante da fase sólida
- BLP - bombeamento do lodo primário
- BLS - bombeamento do lodo secundário
- DAERP - Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto
- DFU - descarga de fundo das unidades
- DIG1 - digestor primário
- DIG2 - digestor secundário
- DL - disposição do lodo
- DP - decantador primário
- DS - decantador secundário
- ETE - estação de tratamento de esgotos
- FP - filtro prensa
- LA - lodo ativado
- POR - projeto ótimo robusto
- POT - projeto ótimo tradicional
- PL - programação linear
- RMSP - rede metropolitana de São Paulo
- SABESP - Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo
- SCNLP - programação não linear com restrição de sensibilidade
- USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

- $a_1$  - constante de regressão do modelo de adensamento, adim.
- $a_2$  - constante de regressão do modelo de adensamento, adim.
- $a_c$  - constante do modelo de adensamento do lodo combinado, adim.
- $a_d$  - constante de decantação do lodo digerido total, adim.
- $a_p$  - constante da sedimentação para o lodo primário, adim.
- $a_w$  - constante de decantação do lodo ativado, adim.
- $A_d$  - área superficial do DIG2,  $m^2$
- $A_f$  - área de filtragem do FP,  $m^2$
- $A_g$  - área superficial do AG,  $m^2$
- $A_p$  - área da superfície do DP,  $m^2$
- $A_s$  - área do DS,  $m^2$
- AFR - vazão de ar,  $m^3/d$
- $b$  - coeficiente de decaimento endógeno,  $d^{-1}$
- $C$  - concentração de OD mantida no TA,  $g/m^3$
- $c_1$  - constante do modelo do DS, adim.
- $c_2$  - constante do modelo do DS, adim.
- $c_3$  - constante do modelo do DS, adim.
- $C_s$  - concentração de OD saturado a 20°C,  $g/m^3$
- $C_{DBO}$  - fator de conversão de  $DBO_5$  para  $DBO_L$ ,  $g\ DBO_L/g\ DBO_5$
- $C_{SSV}$  - fator de conversão teórico de SSV para  $DBO_L$ ,  $g\ DBO_L/g\ SSV$
- CECH<sub>4</sub> - custo anual total de energia produzida pelo CH<sub>4</sub>, US\$/ano
- CEE - custo anual total de energia elétrica, US\$/ano
- CM - coeficiente de manutenção que representa o número médio de horas necessárias pelos funcionários da ETE para realizar a referida atividade em um ano na unidade de processamento em estudo, h/ano
- CMT - custo anual total de manutenção, US\$/ano

CO - coeficiente de operação que representa o número médio de horas necessárias pelos funcionários da ETE para realizar a referida atividade em um ano na unidade de processamento em estudo, h/ano

COT - custo anual total de operação, US\$/ano

CS - custo de reposição de peças e acessórios por ano na unidade de processamento em estudo, US\$/ano

CST - custo anual total de reposição de peças e acessórios, US\$/ano

CT - custo anual total da ETE por todos ativados, US\$/ano

CT<sub>p</sub> - custo anual total referente ao DP, o BLP e a energia elétrica necessária para o BLP, US\$/ano

CT<sub>s</sub> - custo anual total referente ao DS, o BLS e a energia elétrica necessária para o BLS, US\$/ano

CT<sub>sl</sub> - custo anual total referente ao BFS, a energia elétrica necessária para o BFS, o AG, o DIG1, o DIG2, o FP, a DL e a energia produzida pelo CH<sub>4</sub>, US\$/ano

CT<sub>ta</sub> - custo anual total referente ao AAD, US\$/ano

DBO - demanda bioquímica de oxigênio, g/m<sup>3</sup>

DBO<sub>5</sub> - DBO 5 dias a 20°C, g/m<sup>3</sup>

f - fração de células microbianas que são degradáveis, adim.

F/M - relação alimento / microorganismos, kg DBO<sub>5</sub> / kg SSVLM-d

h - vetor de m sistema de equações (funções tecnológicas)

H<sub>man</sub> - altura manométrica de recalque, m

IC<sub>CH<sub>4</sub></sub> - índice de custo do trabalho produzido pelo CH<sub>4</sub> no DIG1, US\$/10<sup>6</sup>kJ

IC<sub>EC</sub> - índice de custo de energia elétrica devido a energia consumida no sistema, US\$/kWh

IC<sub>PI</sub> - índice de custo de energia elétrica devido a potência instalada no sistema, US\$/kW

IC<sub>POM</sub> - índice de custo de pessoal que realizam a operação e a manutenção do sistema, US\$/h

k - taxa máxima de utilização do substrato, d<sup>-1</sup>

K - coeficiente da taxa de 1º ordem do DIG1, d<sup>-1</sup>

K<sub>s</sub> - constante de velocidade média (constante de saturação), g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>

- $L_a$  - carga orgânica no tanque de aeração, kg DBO<sub>5</sub> / m<sup>3</sup>.d  
 $L_d$  - carga de sólidos no DIG2, kg/m<sup>2</sup>.h  
 $L_f$  - rendimento do FP (taxa de filtração), kg/m<sup>2</sup>.h  
 $L_g$  - carga de sólidos do AG, kg/m<sup>2</sup>.h  
 $L_s$  - carga de sólidos do DS, kg/m<sup>2</sup>.h  
 $m$  - número de sistemas de equações  
 $n$  - número de variáveis de projeto  
 $n_1$  - constante de regressão do modelo de adensamento, adim.  
 $n_c$  - constante do modelo de adensamento do lodo combinado, adim.  
 $n_d$  - constante de decantação do lodo digerido, adim.  
 $n_p$  - constante da sedimentação para o lodo primário, adim.  
 $n_w$  - constante de decantação do lodo ativado, adim.  
NetEnergy - energia líquida produzida pelo gás metano  
 $n_p$  - número de medidas de performance do sistema  
OR - oxigênio requerido, kg/d  
OR<sub>p</sub> - taxa de aplicação superficial do DP, m/h  
OR<sub>s</sub> - taxa de aplicação superficial do DS, m/h  
 $p$  - vetor de  $n_p$  medidas da performance do sistema que constitui os objetivos do projeto  
 $p^{\max}$  - vetor de  $(n_p-1)$  limites superiores que restringem os valores máximos das medidas de performance do sistema  
 $P$  - pressão aplicada no FP, N/m<sup>2</sup>  
 $Q_j$  - vazão, m<sup>3</sup>/h  
 $Q_{BFS}$  - vazão dos sobrenadantes das unidades da fase sólida, m<sup>3</sup>/h  
 $Q_{BLP}$  - vazão de lodo primário a ser bombeada para o adensador, m<sup>3</sup>/h  
 $Q_{BLS}$  - vazão de lodo secundário a ser bombeada, m<sup>3</sup>/h  
 $r$  - número de parâmetros do modelo  
 $r_1$  - constante da taxa de reação do DIG1, adim.  
 $r_2$  - constante da taxa de reação do DIG1, adim.  
 $R$  - resistência específica, m/kg  
 $R^{\max}$  - vetor de  $n_p$  limites superiores que restringem os valores máximos da medida de robustez

$R(p_i)$  - medida de robustez do sistema em função da medida de performance

$p_i$

rec - taxa de recirculação, % ou adim.

$S_j$  - concentração de  $DBO_5$  solúvel no ponto j,  $g/m^3$

$S'$  - Substrato total utilizado no processo de LA,  $g/m^3$

SSVLM - sólidos suspensos voláteis no líquido misturado,  $g/m^3$

SST - sólidos suspensos totais,  $g/m^3$

t - tempo de um ciclo, min

$T_L$  - temperatura do líquido no TA, °C

$T_d$  - temperatura de fermentação (digestão anaeróbia), °C

u - vetor de r parâmetros do modelo

$V_d$  - volume do DIG1,  $m^3$

$V_t$  - Volume do TA,  $m^3$

$w_j$  - peso escalar constante positivo associado ao parâmetro  $u_j$ , adim.

W - peso de sólidos secos por unidade de volume filtrado,  $kg/m^3$

x - vetor de m variáveis de decisão do modelo (variáveis dependentes)

$X_{Aj}$  - concentração da biomassa ativa no ponto j,  $g/m^3$

$X_{Dj}$  - concentração de SSV biodegradáveis no ponto j,  $g/m^3$

$X_{Fj}$  - concentração de SS fixos do líquido misturado no ponto j,  $g/m^3$

$X_{Ij}$  - concentração de SSV inertes do líquido misturado no ponto j,  $g/m^3$

$X_{Tj}$  - concentração dos SST no ponto j,  $g/m^3$

y - vetor de n variáveis de projeto do modelo (variáveis independentes)

Y - coeficiente de produção máxima durante um período finito do crescimento logarítmico e definido como a razão entre a massa de células formadas e a massa de substrato utilizado,  $kg\ células/kg\ DBO_5$

$\alpha$  - fator de correção, adim.

$\beta$  - fator de correção, adim.

$\chi$  - tempo de formação da torta por tempo de ciclo, adim.

$\delta$  - fator de redução da velocidade de sedimentação do lodo digerido visto que a produção de gás no digestor secundário pode ser suficientemente alta para causar turbulência suficiente que venha a reduzir a velocidade de sedimentação do lodo digerido, adim.

- $\gamma$  - fração de peso do oxigênio no ar, adim.
- $\eta$  - requerimento mínimo de mistura,  $\text{m}^3$  de ar/  $\text{m}^3 \cdot \text{d}$
- $\eta_B$  - rendimento do conjunto motor bomba, adim
- $\mu$  - viscosidade do líquido filtrado,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
- $v_1$  - constante do modelo de clarificação do DP, adim.
- $v_2$  - constante do modelo de clarificação do DP, adim.
- $v_3$  - constante do modelo de clarificação do DP, adim.
- $\theta$  - tempo de detenção hidráulica, d ou h
- $\theta_c$  - tempo médio de residência celular, d ou h
- $\theta_d$  - idade do lodo, d
- $\rho$  - densidade do ar,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $\xi$  - eficiência de transferência de oxigênio, adim.

## RESUMO

---

MOREIRA, A.M.R. *Aplicação do projeto ótimo robusto à operação de sistema de tratamento de esgotos por lodos ativados*. São Carlos, 1996. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O projeto de sistemas de tratamento de esgotos é baseado em diversos parâmetros dos processos e operações envolvidas. Tais parâmetros no entanto, dependem das condições operacionais variáveis que os tornam incertos. Os projetos desenvolvidos com parâmetros fixos, mesmo quando se utilizam modelos de otimização, são pouco realistas frente a estas incertezas. Uma abordagem geral, chamada projeto ótimo robusto (UBER et al., 1991), é aplicada neste trabalho à operação da ETE-Barueri, cujo sistema de tratamento da fase líquida é de lodos ativados. O projeto ótimo robusto integra modelo de otimização não-linear com função objetivo baseada na sensibilidade de primeira ordem como medida da robustez do sistema. Robustez é aqui definida como a capacidade do sistema em manter bom nível de performance, mesmo se os valores dos parâmetros reais são diferentes dos valores assumidos. Assim, projetos menos sensíveis à incerteza dos parâmetros deverão ser mais robustos. Neste estudo, as funções tecnológicas das unidades de tratamento são desenvolvidas baseadas em dados observados e as funções de custo adaptadas para otimizar a operação da ETE-Barueri. As operações robustas incluindo o custo total de operação e manutenção como restrição e a operação de custo mínimo são comparadas. A robustez é formulada com base nas medidas de qualidade do efluente de DBO e SST, individualmente e somadas ponderadamente. Os resultados mostraram uma significativa relação entre custo operacional e robustez. Verificou-se também que os parâmetros operacionais indicados pela otimização robusta são mais consistentes com relação aos recomendados na prática.

Palavras-chave: Robustez; Lodos ativados; Otimização; Análise de sensibilidade.

## **ABSTRACT**

---

MOREIRA, A.M.R. *Application of Robust Design to Activated Sludge waste treatment System*, São Carlos, 1996. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The design of waste treatment systems is generally based on a variety of parameters of the processes and operations involved. These parameters, however, depend on the variable operational conditions which make them rather uncertain. The designs developed on the basis of fixed parameters even if obtained through cost minimization, are unrealistic due to the parameter uncertainty. The technique called Optimal Robust Design (ORD) proposed by Uber et al. (1991a) is applied in this study to the operation of Waste Treatment Plant of Barueri, São Paulo, which is of the activated sludge type. The ORD is a nonlinear optimization model with objective function based on the first order sensitivities of the system variables as measures of the design robustness. Here, robustness is defined as the capacity of the system to operate optimally even when the actual parameter values are different from those assumed in the design of the system. Thus the design and operation which are less sensitive to parameter uncertainty, are more robust. In this study, technological functions of the treatment units are developed on the basis of observed data and cost functions adapted in order to optimize the operation of Barueri treatment plant. Robust operation constrained by total cost of operation and maintenance and the least cost operation are compared. Robustness is formulated on the basis of effluent BOD and TSS, individually and jointly. The results show significant relationship between the robustness and operational cost. The operational parameters indicated by the robust optimization are more consistent in relation to those recommended in practice.

Keywords: Robustness; Activated Sludge; Optimization; Sensitivity Analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

---

Dentre os serviços de saneamento, o do tratamento de esgotos destaca-se pela sua importância, pois a disposição adequada dos esgotos é essencial para a proteção da saúde pública, e a preservação do meio ambiente. Dependendo da carga orgânica que se lança, os esgotos, podem contaminar a água, o alimento, o solo, entre outros, e trazer inúmeras doenças para a vida humana. As substâncias presentes nos esgotos exercem ação deletéria nos mananciais: a matéria orgânica pode ocasionar a exaustão do oxigênio dissolvido com morte de peixes e outros organismos aquáticos, escurecimento da água e aparecimento de maus odores. Portanto, os efluentes tratados devem ter qualidade compatível com o corpo receptor, obedecendo tanto os padrões de emissão como os padrões de qualidade indicados na normalização vigente. Daí a sua importância sanitária e ambiental.

Define-se os sistemas de tratamento de esgotos como conjuntos de operações e processos unitários empregados com a finalidade de seus efluentes estarem aptos para o reuso ou para o lançamento no meio.

No entanto, os sistemas de tratamento de esgotos representam um custo relativamente alto para indústrias e entidades públicas, tendo em vista as outras prioridades das mesmas. Torna-se, portanto, fundamental a necessidade de se identificar soluções econômicas que viabilizem a implantação e operação de sistemas de tratamento com objetivo de evitar a disposição inadequada, respeitando, assim, o homem e a natureza, visto que o impacto sobre a saúde, qualidade de vida da população e o meio ambiente é altamente preocupante. Assim, em estações de tratamento de esgotos (ETEs) procura-se otimizar os processos e reduzir os custos, para que se obtenha a maior eficiência possível, respeitando às restrições

impostas para a proteção do corpo receptor e pelas limitações dos recursos disponíveis.

Para o projeto das unidades das ETEs existem inúmeras soluções que atendem as exigências de qualidade do efluente e outras restrições físicas, as quais delimitam a região viável das variáveis de decisão. Nesta região de soluções viáveis, aquela que minimizar o custo (função objetivo) é chamada de solução ótima. Dentro deste contexto, a solução ótima então visa um tratamento adequado e eficiente a custo mínimo. Dessa forma, os modelos de otimização são ferramentas úteis para determinar os projetos de custo mínimo. Tais projetos são solucionados para condições operacionais fixas.

Portanto, o projeto na área de engenharia requer três estudos básicos, que interagem na busca de um sistema otimizado. Os estudos técnico, econômico e ambiental do sistema se completam e permitem que o projetista possa avaliar, dentro do campo de viabilidade técnica e ambiental, a alternativa de solução que melhor reflita os anseios econômicos.

Entretanto, muitas vezes, encontramos soluções advindas dos modelos de otimização não condizentes com a prática recomendada por pesquisadores e técnicos da área de saneamento, além do que a operação real enfrenta condições variáveis, ou seja, modelos de projeto ótimo são geralmente limitados na prática devido à incerteza nos valores dos parâmetros do modelo. Tais incertezas podem, por exemplo, resultar de erros de medida, dados inadequados, variabilidade natural ou a combinação destes fatores, verificando-se, assim, uma busca da literatura por métodos capazes de considerar explicitamente estas incertezas dentro das restrições e da função objetivo, e ao mesmo tempo identificar o projeto ótimo.

Uma nova metodologia, Projeto Ótimo Robusto (POR), desenvolvida por UBER et al. (1991a) é apresentada neste trabalho. O projeto ótimo robusto integra modelo de otimização não-linear com função objetivo baseada na sensibilidade de primeira ordem como medida da robustez do sistema. A robustez é definida como a capacidade do sistema em manter bom nível de performance mesmo se os valores dos parâmetros reais são

diferentes dos valores assumidos. Assim, projetos menos sensíveis deverão ser mais robustos.

De forma simplificada, na figura 01 é ilustrada uma justificativa da necessidade do uso da robustez no sistema:

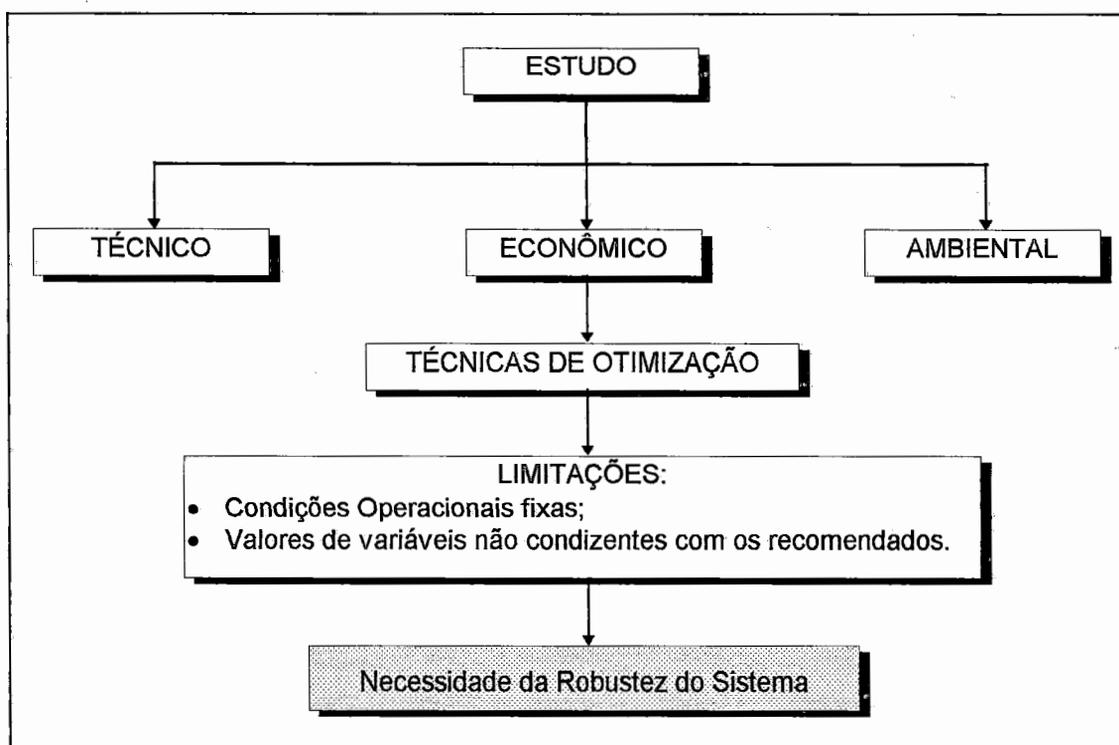


Figura 01 - Esquema justificativo para a utilização da robustez do sistema

É finalidade deste trabalho investigar a aplicabilidade do Projeto Ótimo Robusto à operação do sistema de lodos ativados da Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri que simultaneamente busque um emprego eficiente de recursos ao planejamento (operação e manutenção) e leve em consideração também a sensibilidade dos parâmetros do modelo às condições variáveis a que estarão sujeitos na fase operacional. Para alcançar esse objetivo, será definida a formulação matemática das funções tecnológicas e das funções de custos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Tendo como objetivo apresentar publicações técnicas que tratam do assunto em estudo, abordando os métodos e os elementos necessários ao trabalho proposto, apresenta-se a seguir uma revisão sucinta dos trabalhos que deram subsídios básicos ao desenvolvimento desta proposta, no que concerne a modelos de otimização e funções de custos de sistemas de lodos ativados.

### 2.1 Modelos de Otimização de Sistemas de Lodos Ativados:

A aplicabilidade de métodos de otimização utilizando os recursos da análise de sistemas e da pesquisa operacional tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. Dentre os inúmeros trabalhos relacionados a otimização de sistemas de lodos ativados, são analisados os seguintes:

A programação linear (PL) é utilizada por LYNN et al. (1962) como um método para otimização dos sistemas de lodos ativados. Segundo os autores, os métodos de programação linear são usualmente aplicados para determinar o projeto ótimo satisfazendo certas exigências. O problema é estabelecido na forma de uma função objetivo a ser otimizada (minimizada ou maximizada), sujeita a restrições. Sabe-se, entretanto, que um problema de PL caracteriza-se por função objetivo e restrições lineares das respectivas variáveis de decisão. Tais problemas possibilitam o emprego de um método de otimização no qual todas as soluções possíveis que satisfazem às restrições podem ser comparadas, e a solução particular (ou soluções) que otimiza(m) a função objetivo pode(m) ser obtida(s). Esse método tem uma limitação rigorosa, uma vez que todas as funções devem

ser lineares. E, sabe-se que as equações dos modelos de lodos ativados possuem alta não-linearidade.

MIDDLETON & LAWRENCE (1976) apresentam no seu trabalho, um método para otimizar um sistema de tratamento de esgotos de lodos ativados. Este método consiste em uma técnica gráfica de otimização sobre toda a região factível do projeto, que os autores denominam de espaço do projeto. Essa região é usada como elemento básico na solução do problema de otimização, e é definida como o conjunto de todas as combinações possíveis de valores das variáveis de projeto do sistema. Em cada ponto dessa região, os valores de todos os parâmetros do sistema são fixados, tal que esse ponto corresponde a um único valor da função objetivo. Este conjunto de valores forma superfícies de custo correspondente à região factível. Dentro da região factível, determina-se a região viável pela introdução das equações de restrições de projeto.

O projeto ótimo é então determinado pela localização do ponto de custo mínimo na região viável.

A função objetivo é definida como a soma dos custos de capital com o valor presente dos custos de operação anual para o período de projeto. Segundo os autores, as equações de custo são, geralmente, funções tanto das dimensões como das capacidades das unidades de tratamento, e estas são funções do tempo de detenção celular ( $\theta_c$ ), concentração de sólidos suspensos voláteis do líquido misturado, taxa de recirculação, concentração de sólidos suspensos, eficiência de remoção dos sólidos suspensos no decantador primário e tempo de retenção celular no digestor. Estas variáveis são denominadas variáveis de projeto. A solução ótima determina valores para cada uma destas variáveis, de modo que a qualidade do efluente seja garantida e o valor da função objetivo (custo total) seja mínimo.

Com o intuito de reduzir a complexidade do problema, a eficiência de remoção dos sólidos suspensos no decantador primário foi mantida constante, portanto excluindo-a das variáveis de projeto.

O ótimo global é determinado ao resolver os dois subsistemas de otimização (fase líquida e sólida) para um intervalo de  $\theta_c$ , assim, o custo

total mínimo é obtido na região viável da idade do lodo, sendo que esse ponto ótimo, para cada valor de  $\theta_c$ , é a soma dos custos ótimos para o tratamento da fase líquida e para o tratamento da fase sólida.

O método possui os inconvenientes da imprecisão nos resultados, como todo método gráfico, apesar de sua fácil aplicação, e, as condições operacionais foram mantidas fixas.

O método de projeto de custo mínimo em sistemas de lodos ativados (tanque de aeração e sedimentador secundário) proposto por LAURIA et al. (1977) fundamenta-se no cálculo diferencial. Os autores admitem que, geralmente, os custos de construção e operação (C) de determinada unidade do sistema sejam dependentes de sua capacidade (z), e que possam ser expressos matematicamente como:

$$C = \alpha \cdot z^\beta \quad (2.01)$$

onde:

$\alpha$  : constante positiva;

$\beta$  : constante ( $0 \leq \beta \leq 1$ )

A função objetivo é composta pela soma dos custos das unidades, e somente a taxa de recirculação de lodo e a concentração de sólidos na recirculação como variáveis independentes.

Atribuindo valores numéricos para os parâmetros, os quais incluem a eficiência, a função objetivo pode ser usada para determinar os valores ótimos das variáveis de decisão. Isto é obtido resolvendo-se as primeiras derivadas da função objetivo em relação às variáveis independentes, igualadas a zero. Técnicas numéricas, tal como o método de Newton, são viáveis para a solução dessas equações, pois é impossível resolver explicitamente para ambas as variáveis. Para que este método seja válido é necessário que todas as funções e suas derivadas sejam contínuas e sem restrições.

LAURIA et al. (1977) não têm como intuito apresentar funções tecnológicas e de custos adequadas que atendam ao domínio no qual são válidas. Isto torna o método deficiente, pois estas funções são empíricas e válidas para uma faixa de domínio restrita.

Segundo tais autores, alguns dos resultados deste artigo, provavelmente, são errôneos, pois as funções tecnológicas utilizadas não se aplicam para todos os valores da eficiência de remoção da DBO.

Com a finalidade de aperfeiçoar o modelo, os autores propuseram inserir ao mesmo, o tanque de sedimentação primária, digestor e o retorno do sobrenadante do mesmo ao tanque de aeração. Basicamente, é necessária uma função tecnológica e uma equação de custo correspondente para cada unidade de tratamento, ambos em termos de variáveis de decisão e parâmetros.

O estudo referente à aplicação da técnica de programação dinâmica foi considerado por diversos autores. Dentre eles, vale ressaltar o trabalho proposto por GRADY, JR (1977), por ter uma apresentação bastante simples, onde todos os passos do desenvolvimento dessa programação são facilmente perceptíveis.

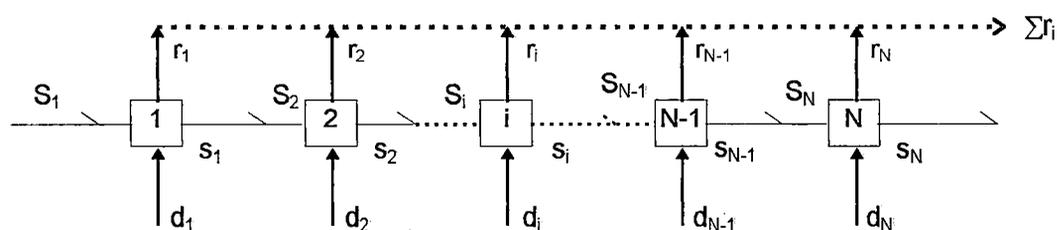


Figura 02 - Esquema dos sistemas dinâmicos

A programação dinâmica, segundo GRADY, JR (1977) é um método de otimização que simplifica a tomada de decisão em projetos de sistemas seriados, isto é, aqueles onde o fluxo de informações se processa de um extremo ao outro, sem uma recirculação de informações. Um sistema tal como mostrado na figura 02 representa o esquema dos sistemas dinâmicos,

cuja característica é de que a saída de um elemento ou estágio representa a entrada do elemento seguinte.

As funções de transformação são funções que transformam as variáveis de estado, através de decisões que modificam o comportamento dos elementos do sistema. Assim, o esquema da figura 02 exhibe a variável de estado  $S_i$  no início do estágio  $i$ , tendo seu valor modificado para  $S_{i+1}$  pela decisão  $d_i$ , cujo retorno  $r_i$  é a respectiva contribuição daquele estágio à função objetivo. Para um processo industrial normal, a função objetivo é normalmente o lucro e a otimização procura maximizá-la. No caso do tratamento de esgotos, usualmente é o custo anual (custos de instalação, manutenção e reposição, energia elétrica, entre outros), e neste caso a otimização procura minimizá-lo.

GRADY, JR (1977) considerou somente a fase líquida do tratamento e propõe que se tome a idade do lodo como um parâmetro de projeto, e de valor mínimo necessário de modo a alcançar, teoricamente, a eficiência de remoção da carga orgânica necessária a ajustar a DBO do efluente da ETE às restrições que possam ser impostas neste aspecto. O autor concluiu que o custo do sistema é mínimo quando a idade do lodo é a mínima possível.

No seu trabalho de Mestrado na EESC, DINIZ (1981) utilizou a metodologia desenvolvida por GRADY, JR (1977) para otimização de sistemas de lodos ativados. O desenvolvimento do método de otimização escolhido, a programação dinâmica, não teve características inovadoras, mas foi possível ao autor prestar uma colaboração no trabalho original de GRADY, JR (1977), testando a ampliação de sua aplicabilidade, visto que foi considerado além do tratamento da fase líquida, o tratamento da fase sólida.

Segundo DINIZ (1981), nas tentativas de adaptação do método proposto por GRADY, JR (1977), verificou-se que considerando o acréscimo de duas unidades (adensador gravitacional e digestor anaeróbio) referentes à fase sólida, tem-se também um adicional de duas variáveis, permitindo que o método continue a ser simples. Mas, ao incorporar a idade do lodo como variável, deparou-se com um sistema de  $n$  estágios e  $n+1$  variáveis, e

também com problemas de reciclagem de informações, fazendo com que o método se torne complexo. Após esta análise, o autor verificou que a maneira pela qual se respeitaria a simplicidade do método, seria a de se tomar a idade do lodo como variável principal do sistema. Assim, trabalhando com valores dentro do seu campo de viabilidade, com as condições operacionais fixas, e aplicando o processo simples de  $n$  estágios e  $n$  variáveis a cada um desses valores, DINIZ (1981) obteve um custo total mínimo para cada idade do lodo correspondente, gerando projetos alternativos.

Um método para determinar o custo operacional mínimo de uma ETE de lodos ativados é executado por HUGHEY et al. (1982). As unidades de tratamento estudadas são caixa de areia aerada, decantador, tanque de aeração, adensador por flotação, leitos de secagem, digestor anaeróbio, filtros de areia gravitacional, aterro e unidade de cloração. Apesar da otimização ser aplicada a sistemas em regime permanente com as condições operacionais fixas, a mesma ocorre para vários períodos de tempo (por exemplo, meses do ano). Assim, durante a operação do sistema, a vazão afluente varia de período a período, fazendo com que a otimização seja realizada para uma seqüência de vazões afluentes para vários períodos de tempo. É empregada uma técnica de busca numérica multivariada não linear codificada em FORTRAN IV, cujo algoritmo é simples e suporta as restrições de desigualdade lineares ou não, entretanto, não há a garantia do ótimo global. É necessário o conhecimento somente do resultado da última iteração. Assim, não é necessária uma grande memória computacional.

Os métodos de busca em geral iniciam-se com um valor estimado como ótimo para o projeto. Um incremento de busca é estabelecido e as variáveis são perturbadas uma a uma para explorar uma região próxima do ponto inicial. As variações que produzem uma redução no custo são armazenadas e usadas para determinar um "padrão de movimento", pois é admitido que movimentos na direção que leva a menores custos poderão ser mais atraentes. Se o padrão de movimento continua a reduzir o custo

total, a busca permanecerá nessa direção. Caso contrário, o incremento de busca será reduzido e novas explorações serão feitas para determinar se uma mudança na direção será necessária, para que assim, a busca continue dirigida para alcançar o mínimo.

Devido à busca do ótimo explorar somente uma região da superfície de custo, pode-se considerar a possibilidade de múltiplos pontos ótimos (ótimos locais). Um desses ótimos locais seria o ótimo global.

Um modelo de um sistema de tratamento de esgotos de lodos ativados convencional em regime permanente é apresentado por TANG et al. (1987b). Tanto a fase sólida como a líquida são consideradas no modelo. Também é contemplada a recirculação dos sobrenadantes das unidades de tratamento da fase sólida (adensadores, digestores e filtros a vácuo). O custo total do sistema (custo de capital, operação e manutenção) é minimizado (função objetivo). O projeto de cada processo unitário é determinado de forma seqüencial usando as suas funções tecnológicas, mas devido à recirculação existente no sistema, um processo iterativo é necessário. As equações de balanço de massa são recalculadas em cada iteração para obter um novo conjunto das condições do efluente da ETE. Tal processo continua até que o critério de convergência adotado seja satisfeito. A função custo pode ser minimizada sujeita às restrições dadas pelas funções tecnológicas do projeto, que definem região viável de projeto. Três abordagens de otimização foram examinadas: uma abordagem de decomposição desenvolvida especificamente para este problema, o algoritmo do gradiente reduzido (GRG) e o algoritmo da programação geométrica (IGGP).

A aplicação do modelo de TANG et al. (1987b) foi realizada em uma ETE hipotética, cujo afluente possui as características de um típico esgoto doméstico. A solução obtida dessa aplicação demonstrou que as condições operacionais são mantidas constantes e, determinadas variáveis de projeto tiveram seus valores fora da faixa recomendada por pesquisadores e técnicos da área de saneamento, conforme analisado por UBER et al. (1991b).

O método apresentado por CRAIG et al. (1978) determina o projeto de custo mínimo de um processo de lodo ativado, e utiliza técnicas de busca para otimizar a função de custo não-linear. O método de busca e os procedimentos computacionais empregados advém do "algoritmo Box-Complex". Tal algoritmo é um método de busca numérica multivariada com restrições, usado para determinar o mínimo (ou máximo) de uma função não-linear, com N variáveis independentes sujeitas a M restrições.

O algoritmo Box-Complex proposto por CRAIG et al. (1978) é um procedimento eficiente para a determinação do projeto ótimo de uma ETE com o processo de lodos ativados. O procedimento permite o uso da função objetivo e das restrições descontínuas não lineares. Entretanto, o modelo é solucionado para condições operacionais fixas.

AKÇA et al. (1993) desenvolveram um modelo para o projeto ótimo de sistemas de lodos ativados fazendo uso do algoritmo Box-Complex. Tal sistema estudado consiste de decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário com bombeamento do lodo recirculado e o subsistema de tratamento da fase sólida. Apesar do subsistema de tratamento da fase sólida contemplar as unidades de adensamento gravitacional, digestor anaeróbio e filtro à vácuo, estas unidades são incluídas no modelo somente nas funções de custo, sendo desprezadas nas funções tecnológicas. Os custos considerados são os de capital, operação e manutenção. Neste estudo, AKÇA (1993) tentou descrever os efeitos dos parâmetros de sedimentação do lodo no projeto do sistema de lodos ativados. Tal modelo introduz as interações entre o tanque de aeração e o decantador secundário, e sugere que a eficiência de sedimentação do lodo seja maior com o aumento da idade do lodo ( $\theta_c$ ). Também é analisado que, a concentração de OD no tanque de aeração deve variar com  $\theta_c$ . Para baixos valores de  $\theta_c$ , a concentração de OD deverá ser maior e, vice-versa. A otimização foi realizada para várias concentrações de oxigênio dissolvido no tanque de aeração, sendo que as condições operacionais foram mantidas fixas. Os resultados gerados pelo modelo, quando comparados

com os parâmetros sugeridos por vários pesquisadores, apresentaram uma boa afinidade.

O método de busca multivariada é estudado por BERTHOUEX & POLKOWSKI (1970) em um sistema de tratamento constituído de decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário e digestor anaeróbio. Os autores consideram os fatores estocásticos que normalmente agem sobre os parâmetros de projeto, ou seja, o método propõe avaliar as diferentes fontes de incertezas sobre os parâmetros de projeto e introduzir estas avaliações no esquema de otimização do sistema. O algoritmo utilizado pelos autores foi desenvolvido por HOOKE & JEEVES (1961). Através deste método de busca do valor ótimo pode-se determinar um "vale" (ponto de mínimo) ou um "espigão" (ponto de máximo) na superfície definida pelos contornos do sistema de custos. O método é baseado na conjectura de que qualquer ajustamento na direção da variável de projeto que tenha tido sucesso durante as explorações anteriores, será considerado compensador, independente do número de explorações efetuadas.

A restrição que se coloca sobre o método de busca multivariada estudado por BERTHOUEX & POLKOWSKI (1970) é que o processamento é extremamente trabalhoso e, assim como outros métodos de otimização, não há a garantia do ótimo.

CHEN et al. (1970) estudaram uma estratégia para atenuar os possíveis erros de projeto causados pelas incertezas nos valores dos parâmetros. Na prática, os parâmetros estão sujeitos a variações devido às incertezas nas avaliações experimentais, variações operacionais e condições ambientais. Neste estudo, CHEN et al. (1970) discutiram como incorporar tais fatores de incerteza nos procedimentos de projetos baseados em fundamentos quantitativos ao usar a teoria de decisão estatística. A determinação do projeto ótimo deu-se através de um método de busca. Primeiramente foi realizada uma análise de sensibilidade no projeto ótimo do sistema de lodos ativados com o objetivo de identificar os parâmetros mais sensíveis ao sistema. Para efeito de validação, os autores modelaram um sistema de lodos ativados composto de dois tanques de aeração de

mistura completa em série seguidos por um decantador secundário. E, concluiu-se que dentre os parâmetros, o tempo de residência celular,  $\theta_c$ , foi o mais sensível às variações. Em ordem decrescente,  $\theta_c$  foi mais sensível à eficiência do adensador, taxa de recirculação e taxa de crescimento máximo. Várias estratégias de projeto ótimo que levam em consideração a incerteza nos parâmetros foram propostas. Uma delas, o critério do valor esperado foi usado para encontrar novos resultados ótimos e fatores quantitativos satisfatórios. Em geral, o tempo de residência celular aumentou na razão direta com o intervalo de incerteza.

Segundo TARRER et al. (1976), os modelos empregados para representar as operações no processo devem descrever adequadamente suas funções. Usualmente, tais modelos contêm um número de parâmetros que devem ser avaliados experimentalmente. Isto em conjunto com a natureza variável das características do esgoto, introduz um grau de incerteza no projeto. O objetivo real da qualidade do efluente, introduzindo tanto o material solúvel como o sólido, deve ser selecionado e combinado com a incerteza, tal que o processo resultante deverá encontrar o objetivo com o grau desejado de confiança. O custo total do processo (capital, operação e amortização) é a função objetivo a ser minimizada. Restrições realistas, necessárias pelos limites dos intervalos de aplicabilidade dos modelos, deverão ser introduzidas no modelo de otimização. A proposta deste estudo foi o desenvolvimento de um procedimento de otimização, introduzindo as características anteriormente citadas, para o processo de tratamento da fase líquida do sistema de lodos ativados. O sistema de tratamento consiste de decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário com recirculação do lodo e unidade de cloração. O método de otimização empregado foi o método dos gradientes conjugados de Powell. Tal modelo de otimização incorpora restrições de ordem prática e contempla a incerteza dos parâmetros. A aplicação se deu em uma ETE típica de esgotos domésticos. TARRER et al. (1976) concluíram que o custo de tratamento é bastante sensível à variabilidade dos valores dos parâmetros.

SUIDAN et al. (1983) desenvolveram um estudo para avaliar a sensibilidade do projeto ótimo aos valores selecionados de vários parâmetros e restrições sobre a qualidade do efluente da ETE. As unidades do sistema consideradas na simulação são decantador primário, seguido por um tanque de aeração de mistura completa e decantador secundário, para a redução de DBO e nitrificação. Os lodos primário e secundário são combinados e condicionados quimicamente, para em seguida serem levados para um filtro a vácuo e depois incinerados. As concentrações de  $DBO_5$ , SSV e SST, bem como a de amônia são monitoradas durante o processo, e o projeto ótimo é determinado para um conjunto de restrições e parâmetros. O critério qualidade desejada para o efluente visa valores de  $DBO_5$ , SST e concentrações de amônia-nitrogênio. A função objetivo do modelo foi minimizar o custo total composto de custos de amortização de capital, operação e manutenção. Tais custos contemplam não somente as unidades da fase líquida como também as da fase sólida.

O modelo empregado neste estudo foi determinado pelo controle de 3 variáveis de decisão: taxa de aplicação superficial do DP,  $OR_p$ ; tempo de residência celular,  $\theta_c$ ; taxa de recirculação do lodo, rec. Nenhuma tentativa foi realizada para otimizar o decantador primário, portanto a  $OR_p$  foi mantida como uma variável de entrada.

Inicialmente o modelo foi solucionado para uma malha fechada em que cada ponto na grade representa uma combinação única entre  $\theta_c$  e rec. A superfície resultante foi unimodal e não foram encontrados picos.

Devido à ausência de picos e a característica unimodal da superfície de resposta, a técnica de busca univariada foi selecionada para resolver o modelo e encontrar o projeto de custo mínimo. Este método selecionado permite explorar uma variável de decisão a cada vez, mantendo as outras variáveis constantes. Tal procedimento continua até que a redução do custo não seja mais possível. A técnica escolhida para conduzir à otimização de uma simples variável foi a busca Fibonacci.

A análise de sensibilidade considerada por SUIDAN et al. (1983) é implícita com relação ao modelo, pois a mesma não é avaliada através de

um coeficiente de sensibilidade, e sim através da variabilidade dos parâmetros de vazões e concentrações afluentes, adensamento, biocinéticos, nitrificação, transferência de oxigênio, oxigênio dissolvido e  $DBO_5$  afluente. Isto é, para cada parâmetro alterado é gerado um projeto de custo mínimo. Portanto, foi possível estabelecer que variáveis afetam mais significativamente o projeto do sistema.

Segundo VON SPERLING (1993), recentemente um número de estratégias de controle do processo de lodos ativados tem sido desenvolvido baseado na utilização de modelos dinâmicos do processo. Junto com a identificação da estrutura do modelo, as estimativas dos valores dos parâmetros são o centro da performance do modelo, e, como uma consequência, da estratégia de controle e principalmente da qualidade do efluente. Uma ferramenta adicional em todo procedimento de identificação da estrutura do modelo e estimativa dos parâmetros é representada pela análise de sensibilidade, que proporciona uma indicação da sensibilidade relativa do modelo para variações nos valores dos parâmetros. Os métodos desenvolvidos para a estimativa dos valores dos parâmetros de sistemas bem definidos (aqueles no qual a estrutura do modelo é conhecida e os valores dos parâmetros podem ser especificados com precisão) não poderão ser aplicados a sistemas considerados como mal-definidos, tais como processo biológico de tratamento de esgoto. O sistema de lodos ativados pode ser considerado mal-definido devido: dificuldade na quantificação das várias reações bioquímicas complexas envolvidas; dificuldade na representação hidráulica dos reatores; dificuldade em armazenar todos os dados requeridos; o enorme número de parâmetros e variáveis de estado incluídas no modelo; a alta não-linearidade nas equações do modelo; e a falta de representatividade de algumas equações semi-empíricas. O método mais usual para a estimativa dos parâmetros do modelo em que tais parâmetros são mantidos constantes durante o processo, é a minimização de uma função objetivo representada pelo somatório dos quadrados dos erros. Entretanto, este procedimento requer a

concordância com certas hipóteses sobre a distribuição dos erros, como por exemplo a distribuição normal.

O trabalho de VON SPERLING (1993) descreve uma adaptação da análise de sensibilidade baseada nas simulações de Monte Carlo para a estimativa dos parâmetros e análises de sensibilidade de uma ETE de lodos ativados. O procedimento descrito deve ser usado quando os dados observados são avaliados para a calibração do modelo, mas mesmo assim é limitado devido aos problemas inerentes às ETEs de lodos ativados (incerteza e falta de representatividade). A seleção entre a boa e a má performance do modelo é julgada com base no coeficiente de determinação. A aplicação do procedimento em um modelo dinâmico de lodos ativados com 11 parâmetros e 4 variáveis de estado usados no controle operacional foi considerada satisfatória. Na modelagem proposta por VON SPERLING (1993), o intervalo final dos valores dos parâmetros foi considerado satisfatório, visto que aumentos futuros no coeficiente de determinação eram apenas marginais. O método é simples, contudo robusto.

Riscos e incertezas são características da maioria das situações na área de planejamento. Sabe-se que projetos de Recursos Hídricos são muitas vezes de grande porte e caros. E, planejamento de investimentos em ETEs não é uma exceção.

É impossível prever a demanda atual que um determinado projeto de investimento deverá atender no futuro. Contudo, na fase de projeto e operações de sistemas podem ser suficientemente flexíveis ao permitir suas adaptações para um amplo intervalo de possíveis condições de demanda com um pequeno custo adicional. Tais sistemas podem ser chamados robustos (HASHIMOTO, 1982).

Outros pesquisadores usaram o termo robustez em planejamento de Recursos Hídricos para descrever se os valores dos parâmetros de projeto ótimo deverão permanecer inalterados caso as condições de demanda futura forem diferentes das admitidas na fase de projeto. Portanto, os valores dos parâmetros de projeto ótimo podem ser muito sensíveis às condições de demanda futura assumidas, podendo não envolver grandes

custos adicionais (LOUCKS et al., 1981). Em decorrência do que foi relatado acima, é apropriado definir a robustez do sistema em termos da sensibilidade do custo total.

De acordo com o trabalho de HASHIMOTO et al. (1982), o critério de robustez é proposto como uma medida da probabilidade de que o custo atual de um projeto específico não deva exceder a uma fração do custo determinado pelo projeto de custo mínimo para um condição de demanda futura realizada. Aplicando o projeto com várias frações do custo mínimo é possível gerar projetos alternativos que proporcionarão o projeto mais robusto.

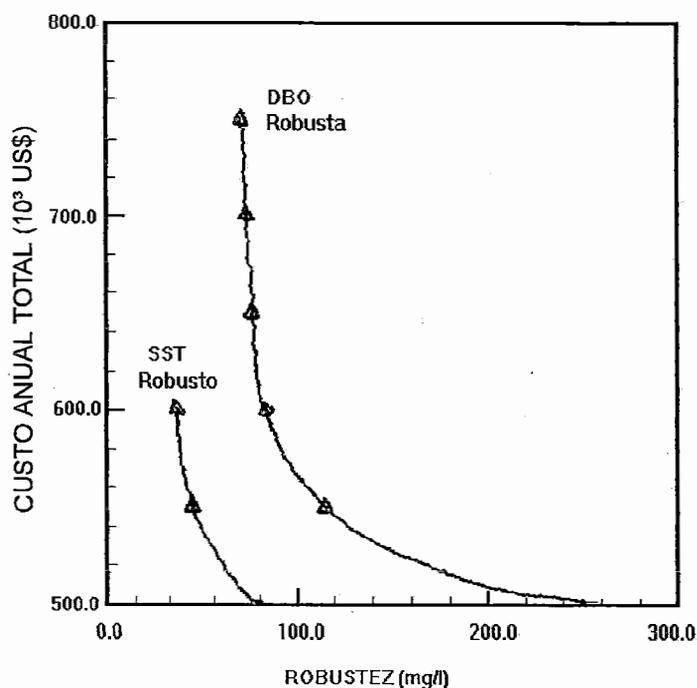
Um novo modelo desenvolvido na área de projeto de estação de tratamento de águas residuárias, trata-se do *Projeto Ótimo Robusto (POR)*, proposto por UBER et al. (1991a), que considera uma importante fonte de incerteza nos resultados do modelo proveniente dos valores dos parâmetros. Tais incertezas devem, por exemplo, resultar de erros de medidas, dados inadequados, variabilidade natural ou a combinação destes fatores. O POR unifica padrões de otimização não-linear e técnicas de análise de sensibilidade do sistema.

A robustez do sistema é uma característica de projeto, e é definida como a capacidade do sistema em manter um determinado nível de performance constante, mesmo se os valores reais dos parâmetros do modelo sejam diferentes dos valores assumidos no projeto.

A estrutura do POR é um caso particular de uma forma geral para o projeto ótimo submetido a parâmetros que contemplam a incerteza, chamada de Programação Não-linear com Restrições de Sensibilidade (SCNLP), apresentada por UBER et al. (1988), a qual é desenvolvida para resolver modelos de programação não-linear que incluem funções de sensibilidade ao sistema, para levar em conta as variações nos valores dos parâmetros. Usando a SCNLP, funções baseadas na sensibilidade de 1ª ordem podem ser formuladas. Assim, com a SCNLP é possível gerar projetos alternativos que resultem em resultados consistentes comparados com projetos advindos da prática.

Tal metodologia é explicada mais detalhadamente no capítulo 5 do presente trabalho.

UBER et al. (1991b) aplicaram o projeto ótimo robusto em uma indústria de papel que possui um sistema de tratamento de lodos ativados, com 55 valores de parâmetros incertos. O projeto ótimo robusto foi usado para gerar projetos alternativos que representam uma relação entre o custo total e a robustez da qualidade da água do efluente do sistema. Quando comparados com o projeto de custo mínimo desenvolvido por TANG et al. (1987b), concluiu-se que os projetos robustos são mais consistentes, e, estas soluções geradas pelo POR quando cotejadas com os parâmetros recomendados advindos da prática, por pesquisadores como METCALF & EDDY (1991), se enquadraram dentro dos limites.



Fonte: UBER et al. (1991b)

Figura 03 - Relação entre o custo anual total do sistema e a robustez da qualidade do efluente

A relação de custo e robustez da qualidade da água do efluente é mostrada na figura 03. A curva "DBO robusta" foi obtida minimizando a medida de robustez de  $DBO_5$  do efluente, tendo o custo total como uma restrição e a robustez de SST ignorada. A curva "SST robusto" foi obtida de modo similar, minimizando a medida de robustez de SST do efluente e não contemplando a robustez de DBO. O projeto com um custo total de \$500.000 / ano é o projeto de custo mínimo obtido por TANG et al. (1987b). Os valores plotados na abcissa da figura 03 são os valores das medidas de robustez  $R(DBO)$  e  $R(SST)$ , dependendo da curva. É sabido que quanto menor for a medida de robustez mais robusto será o projeto. Portanto, os projetos mais robustos na figura 03 são os locados à esquerda da abcissa.

Os resultados mostram uma significativa relação entre o custo e a robustez, tanto da DBO como dos SST. Projetos alternativos quando comparados com o projeto de custo mínimo, resultam em um pequeno adicional de investimento (\$ 50.000/ano ou 10% do custo mínimo) e grandes decréscimos na medida da robustez (57% na  $R(DBO)$  e 43% na  $R(SST)$ ). Outra análise é o indicativo de que a concentração de  $DBO_5$  do efluente é provavelmente mais sensível as perturbações dos parâmetros do que a concentração de SST do efluente.

A tabela 01 apresenta quatro projetos alternativos que representam a relação entre o custo e a robustez da qualidade da água do efluente.

O projeto robusto (DBO+SST) foi obtido minimizando a soma de  $R(DBO)$  e  $R(SST)$  (função objetivo) tendo o custo total como uma das restrições. Como era de esperar, o projeto (DBO+SST) robusto obteve um grande aproveitamento na robustez da DBO e SST para um adicional de \$150.000/ano. Isto significa que o POR proporciona um grande aproveitamento na robustez da DBO e SST para um aumento considerável de custo (30%).

A tabela 01 sugere, também, que minimizando a medida de robustez em termos de SST não necessariamente implica em um aproveitamento na robustez da DBO, e vice-versa. Ao contrário, a solução para o projeto com

SST robusto mostra uma significativa deteriorização na robustez da DBO, quando comparado com o projeto de custo mínimo.

Tabela 01 - Sumário de projetos ótimos de custo mínimo e robustos

Parâmetros de Projeto	Mínimo Custo	Robusto SST	Robusto DBO	Robusto (SST+DBO)	Recomendado	
					Metcalf and Eddy (Wastewater 1991)	Por Great Lakes-Upper Mississippi River Board (1978)
<b>Decantador Primário</b>						
ORp (m/h)	6.0 <sup>o</sup>	6.0 <sup>o</sup>	6.0 <sup>o</sup>	3.3	1.3 - 2.0	< 1.7
<b>Aeração</b>						
F/M (kg DBO5/kg SSVLM-d)	0.92	1	0.39	0.35	0.2 - 0.4	0.2 - 0.5
La (kg DBO5 /m3-d)	1	0.82	0.62	0.41	0.3 - 0.6	0.64
SSVLM (g/m3)	1088	804	1598	1169	1500 - 3000	1000 - 3000
rec (%)	12.5	3.5	25.6	4.7	25 - 50	15 - 75
$\theta$ (h)	3.8	4.6	6.1	9.1	4.0 - 8.0	---
$\theta_c$ (d)	2.2	2.0 <sup>b</sup>	5.2	6.0 <sup>o</sup>	5.0 - 15.0	---
<b>Decantador Secundário</b>						
ORs (m/h)	2.2	0.98	1.7	0.56	0.67 - 1.33	< 2.0 <sup>a</sup>
Ls (kg/m2-h)	3.8	1.1	4.9	0.96	3.0 - 6.0	< 10.2
<b>Funções Objetivo</b>						
CT (\$1000/ano)	500.4	550	550	650	---	---
R(DBO)	271	317	115	86	---	---
R(SST)	79	45	75	42	---	---
<b>Qualidade do Efluente</b>						
DBO (mg/l)	30.0 <sup>o</sup>	25.9	17.7	9.6	---	---
SST (mg/l)	30.0 <sup>o</sup>	11	29.4	7.9	---	---

Nota:

<sup>a</sup> Baseado na vazão afluyente do sedimentador secundário; para comparação aproximada de OR<sub>s</sub> por  $(1 + r / 100)$

<sup>b</sup> Valor do parâmetro de projeto x = valor do limite inferior

<sup>c</sup> Valor do parâmetro de projeto x = valor do limite superior

Fonte: Adaptado de UBER et al. (1991b).

Outra análise importante é a relação entre a robustez da DBO e  $\theta_c$ . Historicamente, o projeto de custo mínimo tem especificado valores mínimos de  $\theta_c$ . Os resultados aqui sugerem, entretanto, que o aproveitamento da robustez de DBO está associado com valores altos de  $\theta_c$ . Tais resultados são também consistentes com o intervalo de  $\theta_c$  recomendado por outros autores na área de saneamento.

Como foi visto, a importância da incerteza é muitas vezes desprezada nos modelos de projeto ótimo, e os projetos alternativos gerados que usam tais modelos não são necessariamente ótimos para um problema de projeto real. Para contornar tal dificuldade, o POR aproveita a estrutura do projeto

ótimo tradicional e inclui explicitamente a incerteza sobre os resultados do modelo. Os projetos alternativos gerados pelo POR refletem o real interesse sobre várias fontes de incerteza e ajudam a entender a complexa relação entre os efeitos contrários possíveis desta incerteza e outras importantes variáveis e objetivos do sistema.

A seguir, é apresentado em forma de tabela, um resumo comparativo dos trabalhos analisados nesta revisão bibliográfica e que estão relacionados com a otimização de sistemas de lodos ativados:

Tabela 02 - Resumo comparativo dos trabalhos relacionados com a otimização de lodos ativados

Autor(es) / Ano	Sistema a ser Otimizado	Método de Otimização	Principais Conclusões
LYNN et al. (1962)	2 tipos de DP (diferenciados por suas taxas de aplicação superficial) + TA + filtro adensador	Programação Linear	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento detalhado de um método geral para otimizar a combinação do processo de tratamento com dada remoção de DBO;</li> <li>• Todas as funções devem ser lineares.</li> </ul>
MIDDLETON & LAWRENCE (1976)	DP + TA + DS + AG + DIG + FV	Técnica gráfica bidimensional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de uma região ótima (ao invés de um ponto ótimo) é recomendada e facilmente representada por técnica gráfica;</li> <li>• O custo é relativamente insensível à idade do lodo, assim, altas idades do lodo são recomendadas por razões de segurança;</li> <li>• O método possui o inconveniente de imprecisão nos resultados;</li> <li>• Condições operacionais fixas.</li> </ul>
LAURIA et al. (1977)	TA + DS	Cálculo diferencial + Método de Newton-Raphson	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Importância dos parâmetros cinéticos no adensamento do lodo;</li> <li>• Técnica de otimização simples;</li> <li>• Todas as funções, bem como suas derivadas devem ser contínuas e irrestritas (inadequadas à aplicação prática).</li> </ul>
GRADY, JR (1977)	DP + TA + DS	Programação Dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A programação dinâmica é usada como um ferramenta didática, permitindo uma fácil comparação do ótimo com soluções intermediárias;</li> <li>• O custo do sistema é mínimo quando a idade do lodo é a mínima possível;</li> <li>• Análise somente da fase líquida.</li> </ul>
CRAIG et al. (1978)	DP + TA + DS + AG + DIG + FV	Técnica de busca multivariada (algoritmo Box-Complex)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de uma região ótima (ao invés de um ponto ótimo);</li> <li>• O custo é relativamente insensível à idade do lodo, assim, altas idades do lodo são recomendadas por razões de segurança;</li> <li>• Permite o uso das funções objetivo e das restrições descontínuas e não lineares;</li> <li>• Condições operacionais fixas.</li> </ul>

Tabela 02 - Resumo comparativo dos trabalhos relacionados com a otimização de lodos ativados (continuação)

Autor(es) / Ano	Sistema a ser Otimizado	Método de Otimização	Principais Conclusões
DINIZ (1981)	DP + TA + DS + AG + DIG	Programação Dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análise da fase líquida e sólida;</li> <li>Aplicação de um processo simples de n estágios e n variáveis;</li> <li>Custo total mínimo para cada idade do lodo</li> <li>Condições operacionais fixas.</li> </ul>
HUGHEY et al. (1982)	DP + TA + AF + DIG + filtro de areia gravitacional + unidade de cloração	Técnica de Busca Multivariada não Linear	<ul style="list-style-type: none"> <li>A otimização pode ocorrer para um seqüência de vazões afluentes para vários períodos de tempo;</li> <li>Algoritmo simples com restrição de desigualdade não lineares;</li> <li>Não há garantia do ótimo.</li> </ul>
SUIDAN et al. (1983)	DP + TA + DS + FV	Técnica de Busca Univariada (Método de Fibonacci)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Através da variabilidade dos parâmetros de vazões e concentrações afluentes, adensamento, biocinéticos, nitrificação, transferência de oxigênio, oxigênio dissolvido e DBO<sub>5</sub> afluente é realizada a análise de sensibilidade implícita;</li> <li>O DP não foi considerado no processo de otimização.</li> </ul>
TANG et al. (1987b)	DP + TA + DS + AG + DIG + FV	Abordagem de decomposição + Algoritmo do gradiente reduzido (GRG) + Algoritmo de Programação Geométrica (IGGP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consideração da fase líquida e sólida;</li> <li>Condições operacionais fixas;</li> <li>Determinadas variáveis tiveram seus valores fora da faixa recomendada por pesquisadores da área de saneamento.</li> </ul>
AKÇA et al. (1993)	DP + TA + DS com recirculação + AG + DIG + FV	Algoritmo Box-Complex	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avaliação do modelo para várias concentrações de OD;</li> <li>As unidades da fase sólida são incluídas no modelo somente nas funções de custo, sendo desprezadas nas funções tecnológicas;</li> <li>Condições operacionais fixas.</li> </ul>

Tabela 02 - Resumo comparativo dos trabalhos relacionados com a otimização de lodos ativados (continuação)

Autor(es) / Ano	Sistema a ser Otimizado	Método de Otimização	Principais Conclusões
CHEN et al. (1970)	TAs em série + DS + Incerteza	Técnica de busca "Golden"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análise de sensibilidade;</li> <li>A eficiência do adensador, a taxa de recirculação e a taxa de crescimento específico, em ordem decrescente, afetaram o projeto ótimo.</li> </ul>
BERTHOUEX & POLKOWSKI (1970)	DP + TA + DS + DIG + Incerteza	Técnica de busca multivariada	<ul style="list-style-type: none"> <li>A incerteza implicou em um aumento de 3 a 8% do custo ótimo;</li> <li>Processamento extremamente trabalhoso e não há garantia do ótimo.</li> </ul>
TARRER et al. (1976)	DP + TA + DS com recirculação do lodo + unidade de cloração + Incerteza	Método do Gradiente Conjugado de Powell + Método de Busca "Golden"	<ul style="list-style-type: none"> <li>O valor ótimo da idade do lodo resultou das restrições de sedimentação;</li> <li>Importância de um modelo de clarificação para o DS;</li> <li>A consideração da incerteza implicou em uma variação no custo total (<math>\leq 8\%</math>), mas o projeto ótimo foi afetado significativamente e com o grau de confiança desejado.</li> </ul>
VON SPERLING (1993)	Lodos Ativados + Análise de Sensibilidade	Simulações (Método de Monte Carlo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>A análise de sensibilidade proporcionou uma indicação da sensibilidade relativa do modelo para variações nos valores dos parâmetros;</li> <li>O intervalo final dos valores dos parâmetros foi considerado satisfatório, visto que aumentos futuros no coeficiente de determinação eram apenas marginais;</li> <li>O método é simples, contudo robusto.</li> </ul>
UBER et al. (1991b)	DP + TA + DS + AG + DIG + FV + Incerteza	Programação Não Linear (método do gradiente reduzido) + Técnica de Análise de Sensibilidade (Robustez do Sistema)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consideração de fonte de incerteza nos valores dos parâmetros;</li> <li>Significativa relação entre o custo e a robustez, tanto da DBO como do SST;</li> <li>Projetos robustos quando comparados com o projeto de custo mínimo (TANG et al., 1987b) resultaram em um pequeno adicional de custo e grandes decréscimos na medida de robustez.</li> </ul>

Nota: DP: decantador primário; TA: tanque de aerção; DS: decantador secundário; AG: adensador gravitacional; AF: adensador por flotação; DIG: digestor anaeróbio; FV: filtro a vácuo.

## 2.2 Funções de Custos de Sistemas de Lodos Ativados:

A grande maioria dos trabalhos consistentes relacionados a custos das unidades dos sistemas de lodos ativados é de procedência estrangeira. Por outro lado, trabalhos estrangeiros refletem características diversas da realidade brasileira e, por essa razão apresentam valores que, ao serem transportados para as condições brasileiras, necessitam ser adequadamente interpretados.

Portanto, a adaptação de equações de custos mais precisas e condizentes com a realidade do Brasil é fundamental, uma vez que nos sistemas de esgotamento sanitário as estações de tratamento representam parte significativa do orçamento.

Dentre a bibliografia que trata do assunto de custos, o trabalho de LOGAN et al. (1962) apresenta uma análise dos fatores econômicos que agem nos sistemas de tratamento de esgotos. Tal trabalho determina as equações de custos de cada unidade em função de sua capacidade.

De acordo com WPCF (1976), o custo unitário (custo total dividido pelo volume a ser tratado) de tratamento decresce à medida que aumenta o volume tratado. Entretanto, DAJANI & GEMMER (1973) mencionam que economias de escala obtidas com o aumento de volume de esgotos tratados poderão ser superadas por deseconomias na rede de coleta, afetadas pela forma e estrutura das áreas servidas.

Segundo ECKENFELDER (1980), as funções de custo de estações de tratamento de esgotos apresentam a seguinte forma:

$$C = a \cdot Q^b \quad (2.02)$$

onde:

C : custo total de investimento, operação e manutenção;

Q : vazão de esgotos;

a : coeficiente empírico;

b : coeficiente empírico que depende de Q, representando a economia de escala.

No sistema de lodos ativados, conforme WHITLACH & RAVELLE (1976), b deve variar entre 0,35 e 0,76. A economia de escala é mais acentuada para vazões entre 200 e 1000  $\ell/s$ . Acima deste valor, os custos unitários não decrescem tão rapidamente, pois a configuração da estação tenderá a incluir unidades de tratamento idênticas (WPCF, 1976).

Para IMHOFF (1986), devido à dificuldade de disposição econômica dos grandes volumes de lodos formados, o decréscimo nos custos unitários fica menos acentuado.

MIGLINO<sup>1</sup> apud BENETTI & LUCA (1993) apresenta a curva de custos unitários para vazões de 100 a 1500  $\ell/s$  de uma ETE da SABESP, na qual verifica-se que os custos unitários decrescem rapidamente entre 100 e 500  $\ell/s$  e, a partir de 1000  $\ell/s$  passam a ser praticamente constantes.

PRIOLI et al. (1993) com base em dados de custos de instalação de ETEs por lodos ativados executadas nos EUA e adequando o câmbio oficial da moeda americana a um câmbio específico para ETEs, obtiveram uma curva de custo de instalação em função da vazão a ser tratada. No sistema de lodos ativados estudado foram consideradas as seguintes unidades de processamento: bombeamento do afluente, tratamento preliminar, decantação primária, tanque de aeração, decantação secundária, cloração do efluente, disposição do efluente, espessamento por gravidade, digestão aeróbia, desidratação mecânica, edifícios de administração e laboratórios. Contudo, o emprego desta função de custo para a pesquisa aqui proposta não teria aplicação porque, além de tratar-se de custos de investimento, e não de manutenção e operação, os valores dos custos não estão separados para cada unidade de tratamento, fato que é de suma importância na otimização do sistema de lodos ativados.

---

<sup>1</sup> MIGLINO, L.C.P. (1984) *Industrial wastewater management in metropolitan São Paulo*. Cambridge, Harvard University. 187p. Tese Doutorado apud BENETTI & LUCA (1993).

Estimativas de custos de tratamento de esgotos para o sistema de lodos ativados são apresentadas por BENETTI & LUCA (1993). O tratamento biológico é constituído por gradeamento, remoção de areia, decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário, adensador de lodo, digestor (primário e secundário) e leitos de secagem. A análise de custos foi realizada a partir de projetos de estações com capacidade de 50, 100, 500 e 1000  $\ell/s$ , e incluem custos de investimento e operação das estações. Nos custos de investimento são contemplados os custos de construção e equipamentos. Enquanto os custos de operação compõem-se de mão-de-obra, energia elétrica e remoção do lodo.

BENETTI & LUCA (1993) empregando a equação geral  $C = a \cdot Q^b$  apresentaram a seguinte expressão para o sistema de lodos ativados:

$$C = 44,64 \cdot Q^{0,68} \quad (2.03)$$

onde a vazão (Q) está em  $\ell/s$  e o custo de investimento somado com o custo de operação (C) em  $10^3$  US\$.

Verifica-se que o valor de b igual a 0,68 encontra-se na faixa mencionada por WHITLACH & RAVELLE (1976) para o sistema de lodos ativados.

A nível nacional não foi possível encontrar pesquisas mais elaboradas sobre funções ou dados de custos de operação e manutenção de cada unidade de tratamento, em separado, do sistema por lodos ativados.

Assim, para contornar tal problema optou-se por adotar as funções de custos sugeridas por PATTERSON & BANKER<sup>2</sup> apud UBER et al. (1988) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Nestas equações são contemplados de cada unidade de processamento os custos

<sup>2</sup>PATTERSON, W.L.; BANKER, R.F. (1976) *Costs and manpower requirements for conventional wastewater treatment facilities*. Report Nº 17090 DAN 10/71, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., Oct. apud UBER et al. (1988).

de operação, manutenção, reposição de peças e acessórios, energia elétrica e a energia do metano produzida durante a digestão anaeróbia do lodo. E, as unidades de processamento são: decantação primária, bombeamento do lodo primário, tanque de aeração, aeradores por ar difuso, decantação secundária, bombeamento do lodo secundário, bombeamento do sobrenadante da fase sólida, adensador gravitacional, digestores anaeróbios primário e secundário, filtro prensa e disposição do lodo.

No entanto, como descrito no início deste item, trabalhos de procedência estrangeira refletem características diversas da realidade brasileira, havendo então a necessidade de adequar as funções de custos da USEPA às características de custos de operação e manutenção das ETEs por lodos ativados no Brasil.

Em virtude disso, para contornar esse problema obteve-se coeficientes de custos tais como custo de pessoal (US\$/h), índice de custo de energia elétrica consumida (US\$/kWh) e índice de custo de energia elétrica por potência instalada (US\$/kW) junto ao Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto (DAERP) de um sistema idêntico à ETE - Barueri. Tal estudo trata-se de uma proposta tarifária de uma ETE por lodos ativados.

A apresentação das funções de custo da USEPA com as devidas adaptações será realizada no item 5.3 do capítulo Métodos.

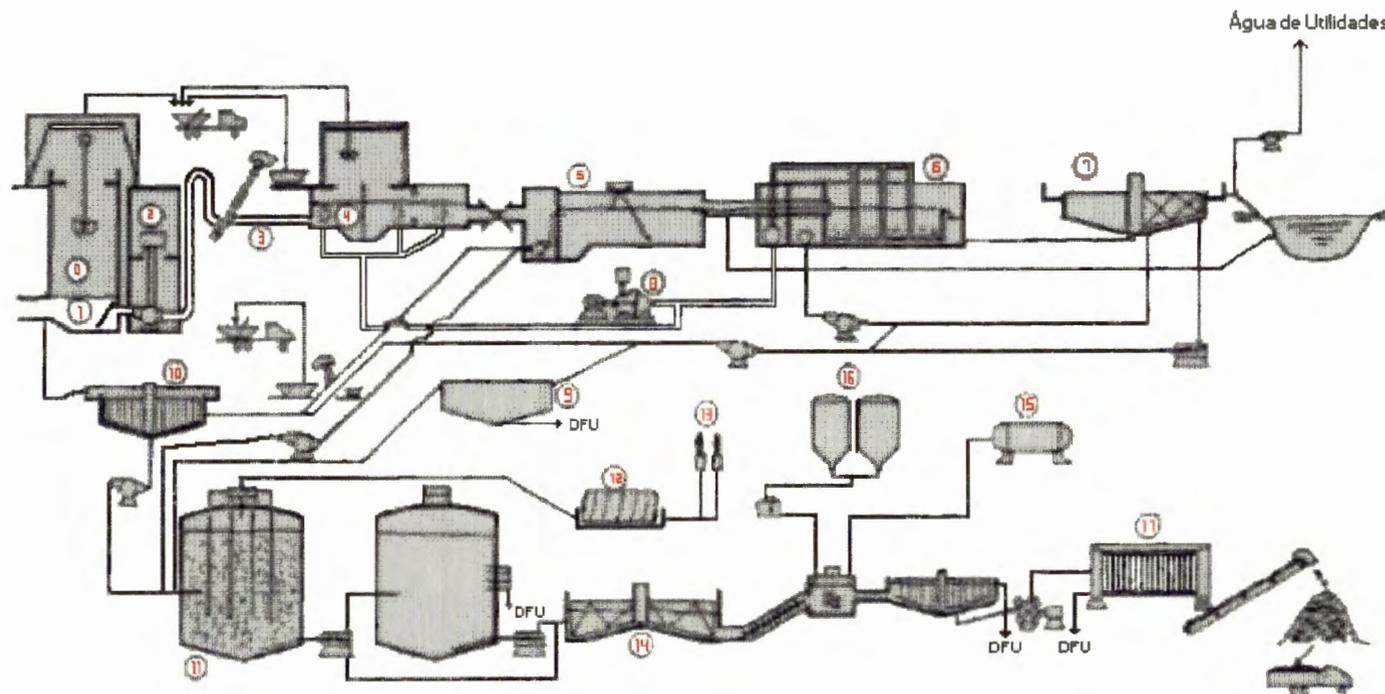
### 3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

---

Para o estudo operacional de um sistema, escolheu-se a estação de tratamento de esgotos de Barueri, apresentada na figura 04, cujo processo de tratamento biológico do esgoto ocorre pelo processo de lodos ativados e no tratamento da fase sólida é realizado o adensamento, a estabilização, o condicionamento, a desidratação e a disposição final. Para um maior entendimento serão discutidos no item 3.1 os princípios básicos de uma ETE de lodos ativados. E, no item 3.2, serão descritos em itens diferentes as informações importantes referentes à ETE - Barueri.

#### 3.1 Princípios Básicos de Funcionamento de uma ETE Lodos Ativados:

Segundo VON SPERLING (1994b, 1995), no sistema de tratamento de lodos ativados convencional a concentração da biomassa no reator é bastante elevada, devido à recirculação dos sólidos (bactérias) sedimentados no fundo do decantador secundário. A biomassa lá permanece mais tempo do que o líquido, o que garante uma elevada eficiência de remoção de DBO, pois quanto mais bactérias houver em suspensão, maior será a avidéz por alimento, ou seja, maior será a assimilação da matéria orgânica presente no esgoto bruto. Este é o princípio básico do sistema de lodos ativados, em que os sólidos são recirculados do fundo da unidade de decantação, por meio de bombeamento, para a unidade de aeração. A biomassa consegue ser separada no decantador secundário devido à sua capacidade de flocular. Tal fato se deve à propriedade das bactérias possuírem uma matriz gelatinosa, que permite a aglutinação das mesmas. O floco possui maiores dimensões, o que facilita a sedimentação.



Legenda dos pontos: 0 - poço de distribuição; 1 - grade grosseira; 2 - estação elevatória de esgoto bruto; 3 - grade mecanizada média; 4 - caixa de areia aerada; 5 - decantador primário; 6 - tanque de aerção; 7 - decantador secundário; 8 - compressores; 9 - adensadores por flotação; 10 - adensadores por gravidade; 11 - digestor anaeróbio; 12 - gasômetro; 13 - queimadores de gás; 14 - tanque de estocagem de lodo; 15 - sistema de estocagem e dosagem de cloreto férrico; 16 - sistema de dosagem e extinção de cal viva; 17 - filtro prensa.

Fonte: ETE - Barueri.

Figura 04 - Fluxograma simplificado da ETE - Barueri

No tanque de aeração, devido à entrada contínua de alimento, na forma de DBO dos esgotos, as bactérias crescem e se reproduzem continuamente. Caso fosse permitido que a população de bactérias crescesse indefinidamente, elas tenderiam a atingir concentrações excessivas no tanque de aeração, dificultando a transferência de oxigênio a todas as células. Ademais, o decantador secundário ficaria sobrecarregado, e os sólidos não teriam mais condições de sedimentar satisfatoriamente, vindo a sair com efluente final, deteriorando a sua qualidade. Para manter o sistema em equilíbrio, é necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por produção. Este é, portanto o *lodo biológico excedente*, que pode ser extraído diretamente do reator ou da linha de recirculação. O lodo excedente necessita de uma estabilização na etapa de tratamento do lodo. O fornecimento de oxigênio é feito por aeradores mecânicos ou por ar difuso. A montante do reator há uma unidade de decantação primária, de forma a remover os sólidos sedimentáveis do esgoto bruto.

O fluxograma do sistema é complicado, requerendo uma elevada capacitação para sua operação. Tal sistema possui as seguintes vantagens e desvantagens:

Tabela 03 - Vantagens e desvantagens do sistema de lodos ativados

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Nitrificação usualmente obtida;</li> <li>• Possibilidade de remoção biológica de Nitrogênio e Fósforo;</li> <li>• Baixos requisitos de área;</li> <li>• Processo confiável, desde que supervisionado;</li> <li>• Reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado consumo de energia;</li> <li>• Necessidade de operação sofisticada;</li> <li>• Elevados custos de implantação e operação;</li> <li>• Elevado índice de mecanização;</li> <li>• Relativamente sensível a descargas tóxicas;</li> <li>• Necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final;</li> <li>• Possíveis problemas ambientais com ruído e aerossóis.</li> </ul>

Fonte: VON SPERLING (1995).

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados nas unidades que compõem o sistema de lodos ativados é uma etapa essencial do tratamento dos esgotos. Ainda que o lodo possa na maior parte das etapas do seu manuseio ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distinguí-lo do fluxo do líquido tratado. De maneira geral, são os seguintes os subprodutos sólidos gerados no tratamento biológico dos esgotos: material gradeado, areia, espuma, lodo primário e lodo secundário. Destes subprodutos, o principal em termos de volume e importância é representado pelo lodo. Os fluxogramas dos sistemas de tratamento do lodo possibilitam diversas combinações de operações e processos unitários, compondo distintas seqüências. As etapas do tratamento de um sistema de lodos ativados, com os respectivos objetivos, podem ser:

- Adensamento: remoção de umidade (redução de volume);
- Estabilização: remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- Condicionamento: preparação para a desidratação mecânica;
- Desidratação: remoção de umidade (redução de volume);
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

### 3.2 Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri:

#### 3.2.1 Características Gerais:

A estação de tratamento de esgotos de Barueri, denominada pela sigla ETE - Barueri, localiza-se no município de Barueri, na margem esquerda do Rio Tietê, em terreno limitado por este curso d'água e pela estrada de ferro da FEPASA. Essa estação, conforme citada, pertence à SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). O projeto da ETE - Barueri faz parte do plano diretor de esgotos para a região metropolitana de São Paulo (RMSP), aprovado em 1977. Sua construção foi programada em módulos e a operação de seu 1º módulo iniciou-se em 1988, com vazão média de 3.50 m<sup>3</sup>/s. Atualmente, a vazão afluyente à

estação e o tempo de detenção hidráulica total são de aproximadamente  $4.50 \text{ m}^3/\text{s}$  e 11 horas, respectivamente, sendo que sua capacidade máxima é de  $7.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.2.2 Descrição das Áreas de Operação da ETE - Barueri:

A ETE - Barueri é subdividida em 9 áreas de operação. Para fins de estudo da operação desta ETE, considerar-se-ão as unidades que participam dos processos de lodos ativados e da fase sólida, estando as características básicas dessas áreas descritas sucintamente a seguir, de acordo com as informações fornecidas pela SABESP.

#### a) Decantadores Primários:

A remoção da maior parte dos sólidos em suspensão é realizada em 6 unidades de decantação primária de forma retangular, com 95 metros de comprimento, 18 metros de largura e 3,5 metros de altura útil. O material sedimentado e a espuma são encaminhados para a cabeceira dos tanques, através de pontes removedoras de funcionamento contínuo e conduzidos, por conjuntos elevatórios, ao tratamento da fase sólida.

#### b) Tanques de Aeração:

O esgoto decantado é conduzido a 4 tanques de aeração de forma retangular com 130m de comprimento, 25m de largura e 6m de altura útil. Nessas unidades a biomassa, composta por bactérias, fungos e protozoários, promove a decomposição aeróbia da matéria orgânica remanescente do tratamento primário. Junto ao fundo, uma malha de 8500 difusores de bolha fina promove a aeração do fluido. Os tanques de aeração foram projetados para operar pelo sistema de mistura completa, havendo entretanto, possibilidades físicas de operação sob regime de fluxo de pistão.

O suprimento de ar para os tanques de aeração e tratamento preliminar é efetuado por 4 compressores do tipo centrífugo multi-estágio de 60.000 SCFM (102.000 Nm<sup>3</sup>/h). Os 4 compressores instalados têm capacidade para atender à demanda de 2 módulos de tratamento, sendo que, nesta fase é suficiente o funcionamento de apenas uma unidade.

c) Decantadores Secundários:

A separação da massa biológica produzida nos tanques de aeração se realiza em 8 clarificadores circulares com diâmetro interno de 46m e 4m de profundidade. A extração de lodo do fundo se dá por dispositivos de sucção (por gradiente hidráulico), sistema esse que permite a retirada do lodo ao longo de todo o fundo do decantador, reduzindo os riscos de anaerobiose. O lodo assim recolhido é encaminhado às estações elevatórias de lodo ativado, sendo recirculado, em parte, para o tanque de aeração e, o excesso para os adensadores por gravidade.

As elevatórias de recirculação de lodo ativado estão dimensionadas para trabalhar com taxas de recirculação na faixa de 30% a 90%. A taxa de recirculação é fixada e controlada automaticamente por intermédio de instrumentação apropriada. Existem, ainda, dispositivos que permitem a automação do controle do descarte do lodo em excesso, através de derivação da linha de retorno ou diretamente do "mixed liquor" (descarte hidráulico). Quando se utiliza a primeira forma de descarte, o lodo é conduzido para o tratamento da fase sólida por bombeamento em conjuntos elevatórios, especialmente destinados a esse fim (elevatória de excesso de lodo). Por outro lado, quando se utiliza o descarte hidráulico (via "mixed liquor"), o lodo é recirculado por gravidade para o início do tratamento. Os clarificadores contam, ainda, com sistema de retirada e bombeamento de espuma.

#### d) Adensadores, Digestores e Gasômetro:

O projeto prevê o adensamento do lodo primário em adensadores por gravidade e do lodo secundário em adensadores por flotação. Entretanto, os dados técnicos obtidos em Barueri, mostravam que os adensadores por flotação não estavam em funcionamento. Assim, tanto o lodo primário como o lodo secundário são adensados gravitacionalmente.

Estão instalados 4 adensadores por gravidade, circulares de diâmetro interno de 29m e profundidade da lâmina d'água de 3,54m (lateral). Foram previstos dispositivos para a adição de água de diluição ao lodo, de modo a garantir uma taxa de aplicação superficial adequada à prevenção de odores. O controle da vazão de diluição é efetuado através de sistema de instrumentação apropriado.

O líquido retirado na operação retorna à entrada da ETE via descarga de fundo das unidades (DFU), os lodos acumulados no fundo são conduzidos por gravidade até os poços de lodo, a partir dos quais são bombeados para a digestão.

O lodo adensado por gravidade é estabilizado em 8 digestores de cobertura fixa e volume unitário útil de 10.492 m<sup>3</sup>. Dentre estes 8 digestores, 6 unidades funcionam como primário e 2 como secundário. As unidades de digestão foram projetadas de modo a proporcionar grande flexibilidade operacional. A mistura do conteúdo dos digestores é efetuada através de recirculação por compressores de parte do gás produzido.

O gás resultante da decomposição biológica não tem aproveitamento energético e é encaminhado para o gasômetro e daí para os queimadores.

#### e) Desidratação e Condicionamento Químico do Lodo:

O lodo digerido se caracteriza por apresentar baixa concentração de sólidos (cerca de 4%), tornando-se necessário passar por um processo de desidratação, de modo a reduzir o volume de transporte até seu destino final (atualmente aterro sanitário). Desta forma, o lodo digerido é enviado

por bombeamento ou gravidade para o tanque de acumulação e daí, através de bombas parafuso, para as câmaras de floculação, onde são adicionados em dosagens adequadas, cal e cloreto férrico. O lodo já condicionado segue para um tanque, de onde é bombeado por 6 unidades de alta pressão para 3 filtros-prensa com 150 placas cada de dimensões de 2 x 2m a uma pressão de filtração máxima 16 kgf/cm<sup>2</sup>. O lodo desidratado é transportado em correias para o pátio. E esse lodo estocado no pátio é transportado para um aterro sanitário através de caminhões.

Através da SABESP foram obtidas as principais características físicas das unidades de tratamento da ETE - Barueri, dentre elas as quantidades existentes no projeto original e as em operação no ano de 1994, assim como as dimensões das unidades. Tais características são apresentadas na tabela 04:

Tabela 04 - Principais características físicas das unidades da ETE - Barueri

UNIDADES	QUANTIDADE		CARACTERÍSTICAS						
	TOTAL	OPERAÇÃO	COMP. (m)	LARG. (m)	ALTURA (m)	DIÂMETRO (m)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOL. ÚTIL (m <sup>3</sup> )	
Decantadores Primários	08	06	95,00	18,00	3,50	---	1710,00	5985,00	
Tanques de Aeração	08	04	130,00	25,50	6,00	---	3315,00	19552,00	
Decantadores Secundários	12	08	---	---	<sup>(1)</sup> 4,00	46,00	1662,00	6648,00	
Adensadores por Gravidade	04	04	---	---	<sup>(1)</sup> 3,54	29,00	660,50	2832,00	
Digestores	08	<sup>(4)</sup> 08	---	---	<sup>(1)</sup> 10,00	33,00	855,30	10492,00	
Filtro Prensa <sup>(2)</sup>	03	03	---	---	---	---	<sup>(3)</sup> 1080,00	19,50	

Nota:

<sup>(1)</sup> Altura da seção cilíndrica;<sup>(2)</sup> Filtro com 150 placas de (2,00m x 2,00m);<sup>(3)</sup> Área de filtragem de um filtro com 150 placas e, com uma espessura da torta de 36mm;<sup>(4)</sup> Dentre estes 8 digestores, 6 funcionam como primários e 2 como secundários.

Fonte: Adaptado da ETE - Barueri.

## 4 OBJETIVOS

---

Os objetivos do presente trabalho são:

- a) Apresentar uma nova metodologia de otimização, denominada Projeto Ótimo Robusto (POR), desenvolvida por UBER et al. (1991a);
- b) Verificar a aplicabilidade do Projeto Ótimo Robusto (POR) à operação da estação de tratamento de esgotos de Barueri - SABESP.

## 5 MÉTODOS

---

Este capítulo tem como objetivos: descrever a estrutura do projeto ótimo robusto; explicitar as funções tecnológicas empregadas no modelo; e finalmente, compor as funções de custos adequadas às necessidades do problema.

### 5.1 Estrutura do Projeto Ótimo Robusto:

A estrutura do Projeto Ótimo Robusto (POR) aqui estudada foi formulada por UBER et al. (1991a). A formulação matemática do Projeto Ótimo Tradicional (POT), ou projeto de custo mínimo, é primeiramente apresentada e, em seguida uma medida de robustez é inserida no sistema para avaliar as variações nos valores dos parâmetros sujeitos a incerteza, como uma restrição no POT. Tal medida de robustez é baseada na sensibilidade das medidas de performance do sistema com relação às variações nos valores dos parâmetros do modelo.

Vale ressaltar que a estrutura do POR é um caso particular de uma estrutura mais geral de projeto ótimo submetido aos parâmetros de incerteza, denominada programação não linear com restrições de sensibilidade (SCNLP) proposta por UBER et al. (1988). Isto porque no caso da SCNLP há uma variedade de funções baseadas na sensibilidade que podem ser inseridas no modelo, e, a robustez é uma delas.

A figura 05 ilustra um esquema simplificado das características básicas do projeto ótimo robusto.

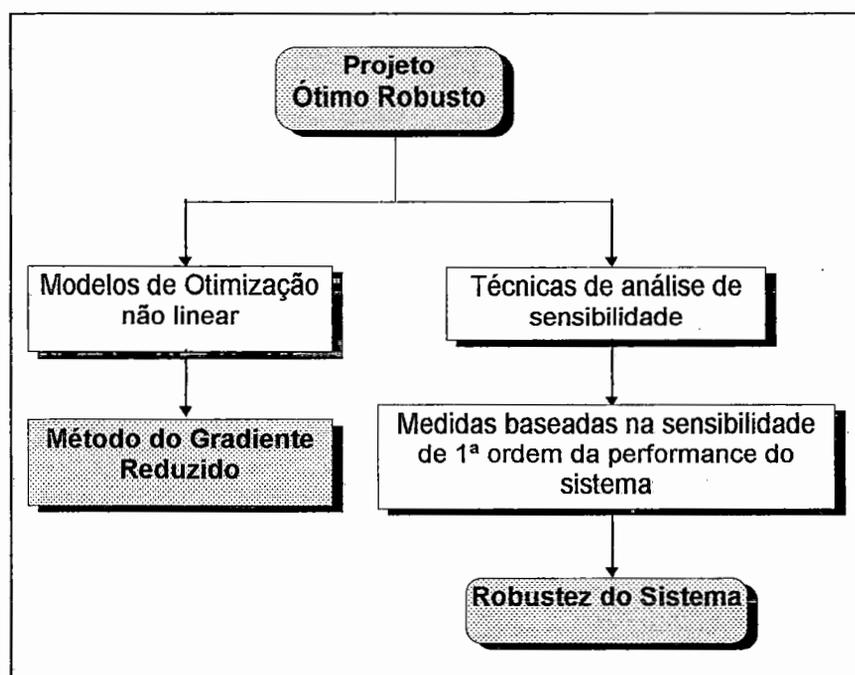


Figura 05 - Esquema simplificado das características básicas do POR

O problema de projeto ótimo multiobjetivo tradicional pode ser definido da seguinte forma:

$$\min_{x,y} p_0(x, y, \hat{u}) \quad (5.01)$$

sujeito a:

$$h(x, y, \hat{u}) = 0 \quad (5.02)$$

$$p_i(x, y, \hat{u}) \leq p_i^{\max}, \quad i=1, \dots, np-1 \quad (5.03)$$

onde:

$p = (p_0, p_1, \dots, p_{np-1})^T$  : vetor de  $np$  medidas da performance do sistema que constitui os objetivos do projeto;

$T$  : indica a operação de transposição;

$h = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$  : vetor de  $m$  equações do sistema (funções tecnológicas);

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  : vetor de  $m$  variáveis de decisão do modelo (variáveis dependentes);

$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  : vetor de  $n$  variáveis de projeto do modelo (variáveis independentes);

$u = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$  : vetor de  $r$  parâmetros do modelo;

$np$  : número de medidas de performance do sistema;

$m$  : número de equações do sistema;

$n$  : número de variáveis de projeto;

$r$  : número de parâmetros do modelo;

$p^{\max} = (p_1^{\max}, p_2^{\max}, \dots, p_{np-1}^{\max})$  : vetor de  $(np-1)$  limites superiores que restringem os valores máximos das medidas de performance do sistema;

A designação de certas variáveis do modelo como dependentes ( $x$ ) e outras como independentes ( $y$ ) é apenas uma conveniência matemática. Teoricamente, as equações do sistema podem ser empregadas com as variáveis dependentes em função das variáveis independentes e dos parâmetros do modelo.

Somente as variáveis do modelo são otimizadas nas eqs.(5.02) e (5.03), e os valores nominais dos parâmetros são denotados por  $\hat{u}$ , os quais são constantes conhecidas pelo projeto proposto. Além disso, tanto as medidas de performance  $p_i$  como as equações do sistema  $h$  são, em geral, não lineares com relação às variáveis e aos parâmetros do modelo.

O problema de POT definido nas eqs.(5.02) e (5.03) pode ser solucionado por uma variedade de métodos de otimização com restrições não lineares, por exemplo, o método do gradiente reduzido (LASDON et al., 1978). A solução para tais equações fornecerá os valores das variáveis de estado e de projeto que minimizem  $p_0$  (função objetivo) sobre uma região viável, a qual é definida pelo sistema de equações e as restrições de performance, para valores dos parâmetros  $\hat{u}$  e limites superiores  $p^{\max}$  conhecidos.

As eqs.(5.02) e (5.03) podem também ser solucionadas parametricamente para diferentes valores dos limites superiores  $p^{\max}$ , com o objetivo de gerar projetos alternativos com diversos níveis de performance.

Conjuntamente, estes projetos alternativos caracterizam o projeto relacionado com as várias medidas de performance.

Na otimização dos projetos de ETEs, por exemplo, as medidas de performance devem ser o custo total do sistema e as concentrações dos contaminantes (DBO e SST) do efluente. As equações do sistema serão as funções tecnológicas dos processos unitários e, os balanços de massa e vazão entre as unidades de tratamento. A solução para tal modelo de otimização consistirá dos valores das concentrações dos contaminantes (DBO e SST), vazões e dimensões das unidades, que venha a minimizar o custo total e satisfaça aos padrões de qualidade do efluente requeridos pelos órgãos governamentais. Projetos alternativos de ETEs gerados para vários níveis de qualidade do efluente deverão estimar a relação entre o custo total e as concentrações de DBO e SST do efluente.

Embora as soluções geradas pelo POT possam proporcionar projetos viáveis, tais soluções não contemplam qualquer consideração explícita dos efeitos gerados pela incerteza nos valores nominais dos parâmetros  $\hat{u}$ . Entretanto, de acordo com UBER et al. (1991a), a estrutura do POT pode ser ampliada ao incluir as medidas de incerteza, que são baseadas nas funções de sensibilidade de 1ª ordem do sistema. Assim, abordagens de otimização multiobjetivo podem então ser empregadas para obter importantes relações entre as medidas de incerteza e outras variáveis de projeto. Para muitos sistemas complexos a natureza dessas relações é desconhecida, não é intuitiva e, provavelmente não será obtida por qualquer outro método.

Funções de sensibilidade de 1ª ordem do sistema consistem das derivadas parciais de 1ª ordem da performance do sistema com relação aos parâmetros do modelo. Estas derivadas parciais, ou coeficientes de sensibilidade do sistema são definidos matematicamente como:

$$\left. \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \right|_{y,a}, \quad \forall i, j \quad (5.04)$$

onde:

$$p'_i(y, u) = p_i[x(y, u), y, u] \quad (5.05)$$

$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{u})$  : é um ponto da região viável definida pelos valores das variáveis de estado e de projeto tal que  $h(\hat{x}, \hat{y}, \hat{u}) = 0$ , ou seja, os coeficientes de sensibilidade do sistema são definidos e podem ser avaliados para qualquer projeto viável do sistema.

As funções  $p'_i$  são conhecidas como medidas reduzidas de performance, e, como mostra a eq.(5.05), as mesmas são obtidas das medidas de performance  $p_i$  ao substituir as expressões de  $x(y, u)$  que definem a dependência das variáveis de estado  $x$  sobre as variáveis de projeto  $y$  e os parâmetros do modelo  $u$ . Conforme dito anteriormente as variáveis de estado  $x$  são consideradas dependentes, visto que existem  $m$  variáveis de estado e  $m$  sistema de equações. Assim, o sistema de equações pode ser usado para solucionar os valores de  $x$ , para conhecidos valores de  $y$  e  $u$ . A eq.(5.05) também mostra que a sensibilidade da performance do sistema às variações dos valores dos parâmetros depende dos valores nominais dos parâmetros ( $\hat{u}$ ) e das variáveis de projeto ( $\hat{y}$ ). Dessa forma, os valores dos coeficientes de sensibilidade variarão dentro da região viável de projeto definida pelas eqs.(5.02) e (5.03).

Geralmente as funções  $x(y, u)$  são conhecidas somente implicitamente, isto é, elas são definidas implicitamente pelo sistema de equações  $h$ . Assim, na maioria das vezes, não é possível determinar as expressões analíticas para  $x(y, u)$ . Conseqüentemente, a avaliação dos coeficientes de sensibilidade do sistema é raramente determinada pela diferenciação parcial analítica. Então, para determinar os coeficientes de sensibilidade pode-se usar, por exemplo, o método das diferenças finitas, o qual será descrito abaixo:

$$\left. \frac{\partial p'_i}{\partial u_j} \right|_{\hat{y}, \hat{u}} \approx \frac{p_i[x(\hat{y}, \hat{u} + \alpha \cdot \Delta u_j), \hat{y}, \hat{u} + \alpha \cdot \Delta u_j] - p_i[x(\hat{y}, \hat{u}), \hat{y}, \hat{u}]}{\Delta u_j} \quad (5.06)$$

onde:

$\alpha$  : vetor unitário r dimensional com elementos  $\alpha_k = 1$ , para  $k = j$  e,  $\alpha_k = 0$  para  $\forall k \neq j$ ;

$\Delta u_j$  : tamanho do passo escalar que incrementa o valor nominal de  $u_j$ .

Avaliando a eq.(5.06), os valores das variáveis de estado são obtidos pela solução apropriada do sistema de equações, ou seja,  $x(\hat{y}, \hat{u} + \alpha \cdot \Delta u_j)$  é encontrado ao solucionar o sistema  $h(x, \hat{y}, \hat{u} + \alpha \cdot \Delta u_j) = 0$  em  $x$  e,  $x(\hat{y}, \hat{u})$  ao solucionar o sistema  $h(x, \hat{y}, \hat{u}) = 0$  em  $x$ . Desta forma, mais uma vez os valores dos coeficientes de sensibilidade dependem dos valores das variáveis de projeto e dos valores nominais dos parâmetros. De modo geral, a estimativa dos coeficientes de sensibilidade usando o método das diferenças finitas da eq.(5.06), requer pelo menos r soluções do sistema de equações não lineares. A precisão de tal estimativa depende da magnitude do tamanho do passo  $\Delta u_j$  e da acurácia do método empregado para a solução do sistema não linear.

Uma alternativa para o método das diferenças finitas é obtida mediante a diferenciação de ambos os lados da eq.(5.05) com relação ao parâmetro  $u_j$ :

$$\frac{\partial p_i}{\partial u_j} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial p_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial u_j} + \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \quad (5.07)$$

onde todas as derivadas são avaliadas em um ponto viável  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{u})$ . Os coeficientes de sensibilidade das variáveis de estado,  $(\partial x_k / \partial u_j)$ , são derivados da k-ésima função implícita  $x_k(y, u)$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ). Apesar das funções  $x(y, u)$  serem implícitas, suas derivadas podem ser obtidas ao diferenciar ambos os lados (teorema da função implícita) do sistema de equações  $h[x(y, u), y, u] = 0$  com relação ao parâmetro  $u_j$ . Diferenciando o sistema de equações supracitado na forma de equações algébricas lineares têm-se:

$$\sum_{k=1}^m \frac{\partial h_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial u_j} + \frac{\partial h_i}{\partial u_j} = 0, \quad \text{para } i = 1, \dots, m \quad (5.08)$$

ou, na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial x_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial u_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_m}{\partial u_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial h_1}{\partial u_j} \\ \vdots \\ -\frac{\partial h_m}{\partial u_j} \end{bmatrix} \quad (5.09)$$

onde, novamente, todas as derivadas são avaliadas em um ponto viável  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{u})$ . Os coeficientes de sensibilidade das variáveis de estado  $(\partial x_k / \partial u_j)$  são obtidos através da eq.(5.09) e os coeficientes de sensibilidade da função performance  $(\partial p_i / \partial u_j)$  desejados são obtidos pela eq.(5.07). Portanto, as eqs.(5.07) e (5.09) podem ser combinadas em uma notação mais compacta de vetor-matriz para proporcionar uma simples expressão para os coeficientes de sensibilidade da função performance, como é apresentado na eq.(5.10).

$$\frac{\partial p_i}{\partial u_j} = - \left( \frac{\partial p_i}{\partial x} \right)^T \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \quad (5.10)$$

onde:

$(\partial p_i / \partial x)$  e  $(\partial h / \partial u_j)$  : vetores coluna;

$(\partial h / \partial x)$  : matriz quadrada;

subscrito  $^T$  : representa a operação de transposição;

subscrito  $^{-1}$  : representa a inversa da matriz.

A matriz dos coeficientes  $(\partial h / \partial x)$  da eq.(5.10) (matriz jacobiana) é independente do parâmetro particular  $u_j$  ou da medida de performance  $p_i$ . Esta importante observação permite que o conjunto dos coeficientes de sensibilidade da função performance  $(\partial p_i / \partial u_j)$ , para  $\forall j$ , seja obtido

eficientemente ao inverter  $(\partial h/\partial x)$  uma vez e armazenar o resultado (na prática ao aplicar a eliminação Gaussiana, os elementos das matrizes triangulares superiores e inferiores da matriz dos coeficientes são armazenados, ao invés da inversa da matriz dos coeficientes.).

Assim, em geral, é mais eficiente computacionalmente determinar os coeficientes de sensibilidade usando a eq.(5.10) ao invés do método das diferenças finitas da eq.(5.06). Se o sistema de equações é linear em  $x$  e a matriz dos coeficientes depende somente de  $y$ , então a eq.(5.06) deverá ser mais vantajosa, visto que a inversa da matriz dos coeficientes independe dos parâmetros.

A acurácia dos coeficientes de sensibilidade obtidos usando o método das diferenças finitas, eq.(5.06), está sujeita a erros de truncamento que dependem da magnitude do tamanho do passo  $\Delta u_i$ , enquanto que o método da eq.(5.10) é teoricamente um método exato que evita tais erros. Contudo, na prática, parece ser mais conveniente estimar as derivadas parciais da eq.(5.10) utilizando diferenças finitas, porém os erros de truncamento deverão ser significativamente pequenos ao empregar a eq.(5.10).

Segundo UBER et al. (1991a), os coeficientes de sensibilidade da função performance podem ser usados para gerar uma medida de robustez do sistema. A robustez do sistema é uma característica de projeto, e é definida como a capacidade do sistema em manter um nível de performance mesmo se os valores atuais dos parâmetros do modelo sejam diferentes dos valores nominais. Portanto, melhorias na robustez do sistema deverão ser associadas com decréscimos na sensibilidade da função performance, isto é, decréscimos nas magnitudes dos coeficientes de sensibilidade do sistema. Um conceito simples da medida de robustez é definido como o somatório ponderado das magnitudes absolutas dos coeficientes de sensibilidade da função performance. Tal conceito de robustez é representado matematicamente pela seguinte equação:

$$R(p_i) = \sum_{j=1}^r w_j \left| \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \right| \quad (5.11)$$

Substituindo a eq.(5.10) na eq.(5.11), a mesma pode ser obtida da seguinte forma:

$$R(p_i) = \sum_{j=1}^r w_j \left| - \left( \frac{\partial p_i}{\partial x} \right)^T \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \right| \quad (5.12)$$

onde:

$R(p_i)$  : medida da robustez do sistema em função da medida de performance  $p_i$ ;

$w_j$  : peso escalar constante positivo associado ao parâmetro  $u_j$ .

Decréscimos no valor de  $R(p_i)$  deverão estar associados com a eficiência da robustez para a medida de performance  $p_i$ , visto que  $p_i$  torna-se menos sensível às variações (em uma soma linear de valor absoluto). Assim, quanto menor a  $R(p_i)$ , mais robusto o projeto. Verifica-se isto em um caso hipotético de um único parâmetro ilustrado pela figura 06, cuja medida reduzida de performance  $p'$  é mostrada como uma função do parâmetro  $u$ , para dois projetos alternativos  $y_1$  e  $y_2$ . Como mostra a figura 06, o projeto  $y_1$  é mais robusto do que o projeto  $y_2$ , e a diferença na robustez é medida aproximadamente pelo coeficiente de sensibilidade de 1ª ordem da função performance.

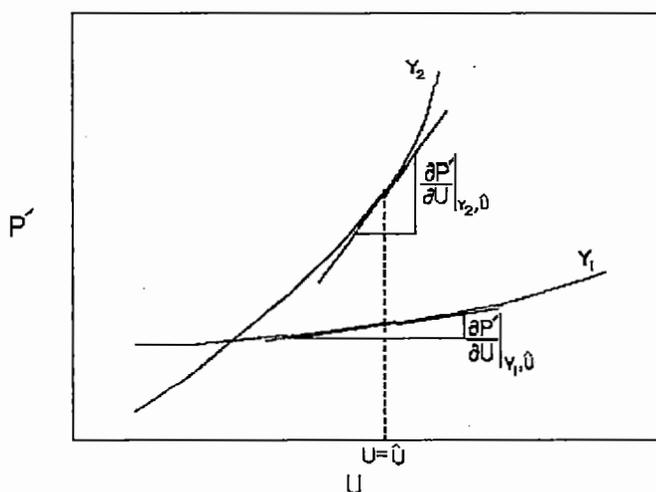


Figura 06 - Resposta da performance de um sistema hipotético para o caso de um único parâmetro e dois projetos alternativos (Fonte: UBER et al., 1991a)

Portanto, uma estrutura geral para o POR é obtida ao introduzir a eq.(5.12) como uma restrição no problema de POT, podendo o mesmo ser descrito da seguinte maneira:

$$\min_{x,y} p_0(x, y, \hat{u}) \quad (5.13)$$

sujeito a:

$$h(x, y, \hat{u}) = 0 \quad (5.14)$$

$$p_i(x, y, \hat{u}) \leq p_i^{\max}, \quad i=1, \dots, np-1 \quad (5.15)$$

$$R(p_i) = \sum_{j=1}^r w_j \cdot \left| -\left(\frac{\partial p_i}{\partial x}\right)^T \left[\frac{\partial h}{\partial x}\right]^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial u_j}\right) + \frac{\partial p_i}{\partial u_j} \right| \leq R_i^{\max} \quad (5.16)$$

$$i = 0, \dots, np - 1$$

onde:

$R^{\max} = (R_0^{\max}, R_1^{\max}, \dots, R_{np-1}^{\max})^T$  : vetor de np limites superiores que restringem os valores máximos das medidas de robustez.

As eqs.(5.13) a (5.16) são em geral, problemas de projeto ótimo não linear multiobjetivo, onde  $n_p$  dos objetivos são medidas baseadas na sensibilidade de 1ª ordem da robustez da performance do sistema às variações nos valores dos parâmetros incertos do modelo. Tais equações devem ser solucionadas parametricamente para vários valores dos vetores  $p^{\max}$  e  $R^{\max}$  para gerar projetos alternativos que definem a relação entre a performance e a robustez do projeto. A solução não é simples (direta), entretanto, as restrições de robustez incluem coeficientes de sensibilidade que variam através do espaço de decisão.

Algoritmos de otimização não lineares são procedimentos iterativos. Quando tais algoritmos são baseados no método do gradiente, e este é um método potente neste tipo de otimização, a performance do algoritmo é influenciada pela precisão das funções gradientes avaliadas (derivadas parciais de 1ª ordem dos objetivos e das restrições com relação às variáveis  $x$  e  $y$ ). As funções gradientes são usadas em cada iteração para estimar as variações nas variáveis do modelo que produzirão um projeto viável aperfeiçoado. Baixa precisão na avaliação das funções gradientes pode fazer com que o algoritmo de otimização termine prematuramente, e o projeto gerado será pobre com relação aos objetivos do modelo. No presente trabalho optou-se utilizar o método do gradiente reduzido (GRG2) proposto por LASDON et al. (1978) dentro do POR.

#### 5.1.1 Seleção das Variáveis de Projeto:

A seleção das variáveis de projeto deverá considerar as relações entre os parâmetros e as variáveis. Dada a interpretação mencionada anteriormente sobre a medida de robustez, os valores das variáveis de projeto deverão ser invariáveis às variações dos valores dos parâmetros. Assim, em projeto de ETEs, o tamanho físico das unidades de tratamento é logicamente independente dos parâmetros (por exemplo, as variáveis de projeto são independentes da vazão afluyente à ETE ou das constantes cinéticas). Assim, as dimensões das unidades de tratamento deverão ser

variáveis de projeto independentes na estrutura do POR. Por razões similares, outras variáveis tais como cargas de sólidos e taxas de aplicação superficiais são variáveis dependentes dos valores dos parâmetros.

Para o projeto proposto, pode ser necessário considerar variáveis de controle como variáveis independentes (por exemplo, vazões de descarga do lodo secundário). Neste caso, a medida de robustez, a qual assume que as variáveis de projeto sejam invariáveis às variações nos valores dos parâmetros, é interpretada como a variação máxima na performance para um determinado regime operacional dado pelos valores das variáveis de projeto. Assim, as medidas de robustez deverão ser conservativas se as variáveis de controle são consideradas independentes. Opções de controle diferentes não são consideradas como um meio de atenuar os efeitos adversos das perturbações nos parâmetros. A estrutura geral SCNLP permite restrições que incluam as derivadas parciais da performance com relação às variáveis de projeto. Portanto, a eq.(5.12) ou uma variação desta poderá servir como uma medida mais geral da robustez, cujos valores das variáveis de projeto podem variar em resposta às perturbações dos parâmetros. Neste caso as perturbações das variáveis de projeto poderão ser variáveis de um modelo do POR.

### 5.1.2 Valores dos Pesos:

Visto que os projetos gerados pelas eqs.(5.14) a (5.16) são invariáveis para um escalonamento das restrições de robustez, não necessariamente pode-se estimar as exatas perturbações dos parâmetros, no sentido de designar os valores para os pesos. Tais pesos devem ser selecionados por qualquer método conveniente desde que seus valores relativos sejam consistentes com as magnitudes relativas da incerteza nos valores nominais dos parâmetros. Por exemplo, os pesos poderão ser proporcionais às estimativas dos desvios padrões dos parâmetros. Uma análise de sensibilidade deve também ser usada para obter projetos alternativos correspondentes aos valores diferentes dos pesos. A medida de



robustez é uma estimativa linear das variações da performance, e é projetada para ser usada com uma técnica de geração de projeto. Uma vez que uma variedade de projetos alternativos são gerados, eles deverão normalmente ser avaliados também pelo julgamento qualitativo e outras possíveis técnicas quantitativas.

### 5.1.3 Modelos em Regime Permanente e Sistemas Dinâmicos:

Segundo UBER et al. (1991a), a estrutura do POR se aplica tanto a sistemas dinâmicos como a sistemas em regime permanente. No caso do regime permanente, as variáveis de estado  $x$  e as medidas de performance  $p$  representam um sistema comportado (para um projeto particular  $\hat{y}$ ) quando os valores nominais dos parâmetros  $\hat{u}$  são constantes no tempo. A resposta estimada de  $x$  e  $p$  para uma variação em  $\hat{u}$  representa um novo regime permanente que é obtido depois do desaparecimento de quaisquer efeitos dinâmicos. Modelos em regime permanente são algumas vezes representados pelo sistema tempo-médio, cujo comportamento corresponde aos valores dos parâmetros do modelo em um tempo médio. Matematicamente, apesar desta hipótese não ser estritamente correta, em alguns casos tem seus méritos como uma interpretação heurística dos resultados do modelo considerando o regime permanente.

No caso dos sistemas dinâmicos, as variáveis de estado  $x$ , as medidas de performance  $p$  e os parâmetros do modelo  $u$ , dependem do tempo  $t$ , e  $t$  é considerado uma variável independente ( $t \in y$ ). Diferentemente do caso do regime permanente, a resposta estimada de  $x$  e  $p$  às variações de  $\hat{u}$  representa o comportamento do sistema dinâmico em um tempo  $T_i$ .

Os coeficientes de sensibilidade da função performance ( $\partial p / \partial u$ ) calculados em um modelo dinâmico podem ser aproximadamente a resposta da performance às variações nos valores dos parâmetros do modelo para um projeto particular em um tempo  $T_i$ . Portanto, os coeficientes de sensibilidade calculados pelo regime permanente podem ser

aproximadamente a resposta da performance às variações nos valores dos parâmetros em um tempo que seja suficiente para que o sistema tenha reencontrado um novo regime permanente (equilíbrio).

É importante que a diferença entre os coeficientes de sensibilidade do modelo dinâmico e os calculados pelo modelo em regime permanente seja estabelecida, pois a medida de robustez calculada no projeto em regime permanente ignora qualquer efeito transitório das variações nos valores dos parâmetros do modelo, e assim, um projeto que é robusto no regime permanente não é necessariamente robusto se os efeitos dinâmicos são significativos. Mas se tais efeitos dinâmicos são desprezíveis, é possível desenvolver projetos heurísticos úteis para sistemas particulares que relacionam a dinâmica e as características da performance em regime permanente. Tal abordagem é usual em projetos de ETEs, como por exemplo, o tempo médio de residência celular que é um parâmetro em regime permanente, e é muitas vezes atribuído heurísticamente para estabelecer a qualidade do efluente da estação que é uma característica de performance dinâmica.

## 5.2 Funções Tecnológicas:

A representação da modelagem dos processos unitários presentes no sistema de lodos ativados e, tratamento e disposição do lodo da ETE-Barueri, cuja representação esquemática é ilustrada na figura 07, é apresentada neste item.

Para um maior entendimento do que será descrito nesta seção, definir-se-ão as características do esgoto (fase líquida e sólida) nos vários pontos de controle  $j$ , enumerados de 0 a 16 na figura 07. Tais características são:

- vazão,  $Q_j$ ;
- concentração de  $\text{DBO}_5$  solúvel,  $S_j$ ;
- concentração da biomassa ativa,  $X_{A_j}$ ;
- concentração de SSV biodegradáveis,  $X_{D_j}$ ;

- concentração de SSV inertes,  $X_{Ij}$ ;
- concentração de sólidos suspensos inorgânicos ou fixos,  $X_{Fj}$ ;
- concentração de SST,  $X_{Tj}$ .

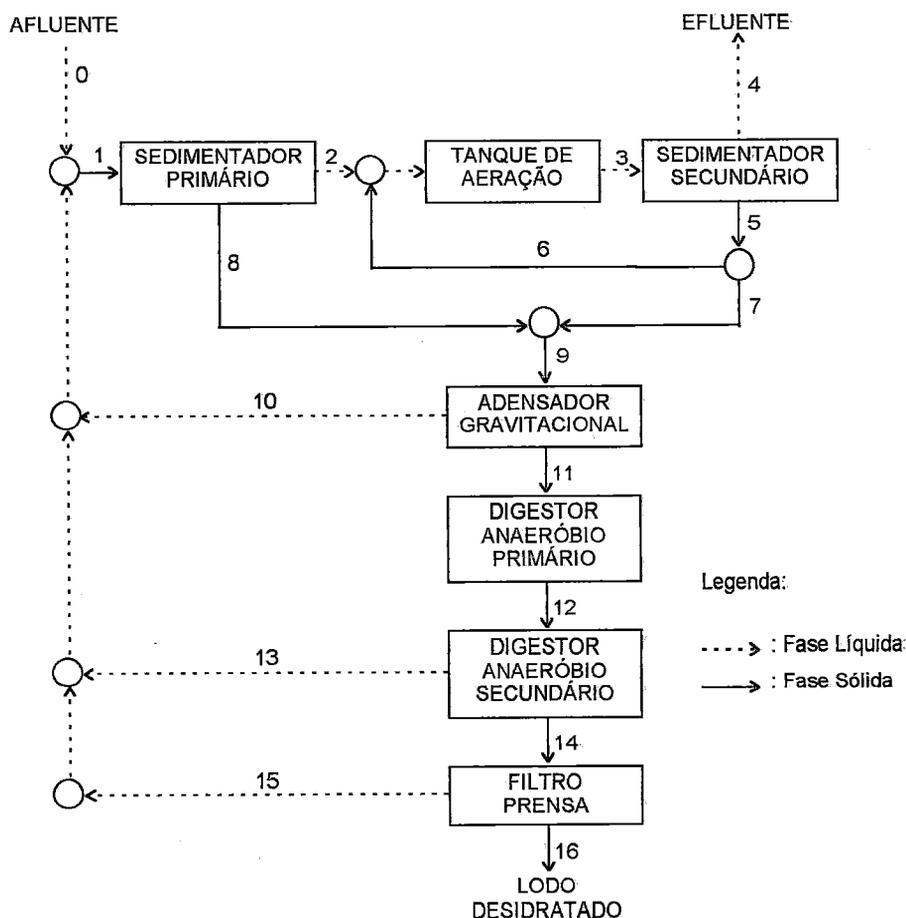


Figura 07 - Configuração esquemática da ETE - Barueri

No presente trabalho, através de pesquisa bibliográfica, uma minuciosa revisão dos modelos matemáticos descrevendo o desenvolvimento de típicos processos unitários envolvidos no tratamento de esgoto foi realizada. Dentre os analisados, vale ressaltar os seguintes: TYTECA et al. (1977), TANG et al. (1987b), VOSHEL & SAK (1968), METCALF & EDDY (1991), PFEFFER (1968), CHAPMAN (1983), LAWRENCE & McCARTY (1970) e ECKENFELDER et al. (1985).

Vários modelos foram desenvolvidos para descrever o desempenho dos processos unitários. Obviamente, o modelo do processo adequado para

o projeto deverá ser capaz de descrever o desempenho do processo unitário sobre um amplo intervalo das condições operacionais e do afluente. Tais modelos deverão simular as condições reais de operação, e contemplar todas as variáveis de projeto relevantes que afetam o desempenho do processo. Procurou-se estudar os modelos desenvolvidos a partir dos princípios fundamentais supracitados para serem empregados no sistema global. Modelos aplicados em estudos de ETE-piloto foram então considerados, seguidos de modelos desenvolvidos em laboratório.

### 5.2.1 Decantador Primário:

A taxa de aplicação superficial ( $OR_p$ ) e a concentração de sólidos do afluente ( $X_{T1}$ ) foram identificadas por pesquisadores como duas importantes variáveis que afetam a eficiência de remoção dos sólidos no decantador primário (DP). Segundo modelos empíricos baseados em estudos de ETE ou escala-piloto, a porcentagem de remoção de sólidos aumenta com o aumento da concentração de sólidos do afluente e decresce com o acréscimo da taxa de aplicação superficial. Assim, o modelo de VOSHEL & SAK (1968) foi usado para ser aplicado no sistema global. Em tal modelo, a relação de sólidos afluente remanescentes no efluente primário pode ser expressa pela eq.(5.17):

$$\frac{X_{T2}}{X_{T1}} = 1 - v_1 X_{T1}^{v_2} \cdot OR_p^{-v_3} \quad (5.17)$$

onde:

$v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  : constantes do modelo de clarificação do DP (adim.);

$X_{Tj}$  : concentração dos SST nos pontos 1 e 2 ( $g/m^3$ );

índice 1 : afluente do DP;

índice 2 : efluente do DP;

$$OR_p = \frac{Q_2}{A_p} \quad (5.18)$$

$OR_p$  : taxa de aplicação superficial (m/h);

$A_p$  : área da superfície do DP (m<sup>2</sup>);

$Q_2$  : vazão efluente do DP (m<sup>3</sup>/h).

A concentração do lodo primário de descarga do fundo do DP tem sido modelada por duas hipóteses. A primeira assume que esta concentração é controlada pelas limitações hidráulicas do mecanismo de descarga do lodo. Como resultado, uma concentração constante é assumida para o lodo primário. A segunda hipótese emprega a técnica de adensamento diferencial, a qual é baseada na teoria do fluxo limite, para calcular a concentração do lodo primário. Adensamentos constantes para o lodo primário podem ser obtidos através de testes de sedimentação tipo batelada. Tal abordagem foi escolhida para este estudo. Assim, a concentração de SST do lodo primário,  $X_{T8}$ , baseada no adensamento diferencial proposto por DICK & SUIDAN<sup>3</sup> apud TANG et al. (1987b) pode ser calculada como:

$$X_{T8} = [a_p(n_p - 1)]^{1/n_p} \cdot \left( \frac{n_p}{n_p - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_p}{Q_8} \right)^{1/n_p} \quad (5.19)$$

onde:

$X_{T8}$  : concentração de SST do lodo primário (kg/m<sup>3</sup>);

$a_p$  e  $n_p$  : constantes da sedimentação para o lodo primário (adim.);

$Q_8$  : vazão de descarga do fundo do DP (m<sup>3</sup>/h).

<sup>3</sup>DICK, R.I.; SUIDAN, M.T. (1975) *Modeling and simulation of clarification and thickening process*. In: T.M. Keinath and M.P. Wanielista, eds. *Mathematical modeling for water pollution control process*. pp.147-191 apud TANG et al. (1987b).

A DBO total no efluente primário foi modelada ao considerar as partes solúveis e suspensas. A DBO solúvel foi admitida inalterada pela sedimentação primária. A forma de distribuição dos sólidos suspensos no efluente primário é calculada admitindo que esta distribuição é a mesma do afluente primário.

O projeto do DP requer o emprego das eqs.(5.17) a (5.19) e das relações de balanço de massa e vazão que envolvem o decantador.

### 5.2.2 Lodos Ativados:

Modelos biocinéticos consagrados tais como o de LAWRENCE & McCARTY (1970) e o de ECKENFELDER et al. (1985) são amplamente aceitáveis na prática para o projeto de lodos ativados (LA). Para usar estes modelos, o tanque de aeração deve ser modelado como um reator de mistura completa (ou uma série deles). A estabilização do esgoto foi admitida ocorrer somente no tanque de aeração (TA), e os sólidos voláteis biodegradáveis foram assumidos serem completamente consumidos no processo.

As eqs.(5.20) a (5.24) foram usadas no sistema total, baseadas no modelo de LAWRENCE & McCARTY (1970). Assim a DBO<sub>5</sub> solúvel do efluente do TA, S<sub>3</sub> em g/m<sup>3</sup>, é:

$$S_3 = \frac{K_s(1 + b\theta_c)}{\theta_c(Yk - b) - 1} \quad (5.20)$$

onde:

K<sub>s</sub> : constante de velocidade média em (g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>);

k : taxa máxima de utilização do substrato (d<sup>-1</sup>);

Y : coeficiente de produção máxima durante um período finito do crescimento logarítmico e definido como a razão entre a massa de células formadas e a massa de substrato utilizado (kg células/kg DBO<sub>5</sub>);

b : coeficiente de decaimento endógeno (d<sup>-1</sup>);

$$\theta_c = \left( \frac{1}{24} \right) \frac{X_{A3} V_t}{Q_4 X_{A4} + Q_7 X_{A7} - Q_2 X_{A2}} \quad (5.21)$$

$\theta_c$  : tempo de residência celular médio (d);

$V_t$  : volume do tanque de aeração ( $m^3$ );

$Q_j$  : vazão nos pontos 2, 3, 4 e 7 ( $m^3/h$ );

$X_{Aj}$  : concentrações da biomassa ativa nos pontos 2, 3, 4 e 7 ( $g/m^3$ );

índice 2 : afluente ao TA;

índice 3 : efluente do TA;

índice 4 : efluente do DS;

índice 7 : lodo secundário que vai para o AG (lodo em excesso).

A concentração da biomassa ativa no TA,  $X_{A3}$ , pode ser derivada da relação do balanço de massa do substrato, cuja representação matemática é vista a seguir:

$$X_{A3} = \frac{Y}{1 + b\theta_c} \left( \frac{\theta_c}{\theta} \right) S' \quad (5.22)$$

onde:

$$\theta = \frac{V_t}{24Q_2} \quad (5.23)$$

$\theta$  : tempo de detenção hidráulica (d);

$$S' = S_2 + \left( \frac{C_{SSV}}{C_{DBO}} \right) \cdot X_{D2} - S_3 \quad (5.24)$$

$S'$  : substrato utilizado no processo do LA ( $g/m^3$ );

$DBO_L$  : DBO última ( $g/m^3$ );

$S_2$  : concentração de  $DBO_5$  solúvel afluente do TA ( $g/m^3$ );

$S_3$  : concentração de  $\text{DBO}_5$  solúvel efluente ao TA ( $\text{g}/\text{m}^3$ );

$X_{\text{D}2}$  : concentração de SSV biodegradáveis afluente ao TA ( $\text{g}/\text{m}^3$ );

$C_{\text{SSV}}$  : fator de conversão teórico de SSV para  $\text{DBO}_L$  ( $\text{g DBO}_L / \text{g SSV}$ );

$C_{\text{DBO}}$  : fator de conversão de  $\text{DBO}_5$  para  $\text{DBO}_L$  ( $\text{g DBO}_L / \text{g DBO}_5$ ).

A concentração de sólidos suspensos voláteis inertes no líquido misturado,  $X_{\text{I}3}$ , pode ser derivada das relações do balanço de massa e da hipótese de que as composições dos sólidos permanecem inalteradas ao passar pelo decantador secundário (ECKENFELDER et al., 1985).

$$X_{\text{I}3} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta_c}{\theta}\right) \cdot \left(\frac{X_{\text{A}2}}{X_{\text{A}3}}\right)} \left[ X_{\text{I}2} \left(\frac{\theta_c}{\theta}\right) + (1-f)b\theta_c X_{\text{A}3} \right] \quad (5.25)$$

onde:

$f$  : fração de células microbianas degradáveis (adim.).

Analogamente, a concentração de sólidos suspensos fixos no líquido misturado,  $X_{\text{F}3}$ , é:

$$X_{\text{F}3} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta_c}{\theta}\right) \cdot \left(\frac{X_{\text{A}2}}{X_{\text{A}3}}\right)} X_{\text{F}2} \left(\frac{\theta_c}{\theta}\right) \quad (5.26)$$

Novamente, através do balanço de massa da biomassa em torno do tanque de aeração, tem-se:

$$X_{\text{A}5} = \left(1 + \frac{1}{r} - \frac{\theta}{r\theta_c}\right) \cdot X_{\text{A}3} - \frac{1}{r} X_{\text{A}2} \quad (5.27)$$

onde:

$$r = \frac{Q_6}{Q_2} \quad (5.28)$$

$r$  : razão de recirculação do lodo (adim.);

índice 5 : descarga total do DS;

índice 6 : descarga do DS que retorna ao TA.

A aeração é uma operação unitária de fundamental importância em um grande número de processos aeróbios de tratamento de esgotos. Desde que o líquido esteja deficiente de um gás, há uma tendência natural do gás passar da fase gasosa, onde se encontra em quantidade satisfatória, para a fase líquida, onde está deficiente. O oxigênio é um gás que se dissolve mal no meio líquido. Por esta razão, há em vários sistemas a necessidade de se acelerar o processo natural, de forma que o fornecimento de oxigênio possa se dar em uma taxa mais elevada, equivalente à taxa do seu consumo pelas bactérias (VON SPERLING, 1996). Entre os processos de tratamento de esgotos a utilizarem a aeração artificial encontra-se o de lodos ativados com aeração por ar difuso (ETE - Barueri).

O oxigênio necessário (requerido) para a aeração é estimado através do modelo de LAWRENCE & McCARTY (1970), como pode ser visto na eq.(5.29):

$$OR = 24 \times 10^{-3} Q_2 S' \cdot \left[ C_{DBO} - C_{SSV} \cdot \left( \frac{Y}{1 + b\theta_c} \right) \right] \quad (5.29)$$

onde:

OR : oxigênio requerido (kg/d).

A vazão de ar é representada matematicamente baseada também nos estudos de LAWRENCE & McCARTY (1970):

$$AFR = \frac{C_s \cdot OR}{\gamma \alpha (\beta C_s - C) (1024)^{T_L - 20} \xi \rho} \quad (5.30)$$

onde:

AFR : vazão de ar (m<sup>3</sup>/dia);

$\alpha$  e  $\beta$  : fatores de correção para a aeração (adim.);

$\gamma$  : fração de peso do oxigênio no ar (adim.);

$C_s$  : concentração de oxigênio dissolvido (OD) saturado a 20° C (g/m<sup>3</sup>);

$C$  : concentração de OD mantida no tanque de aeração (g/m<sup>3</sup>);

$\xi$  : eficiência de transferência de oxigênio (adim.);

$T_L$  : temperatura do líquido no tanque de aeração (°C);

$\rho$  : densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);

A concentração de OD mantida no tanque de aeração (TA) deve ser tal que a atividade biológica de um sistema de lodos ativados não deva ser inibida. O requerimento mínimo para proporcionar a mistura do ar com o esgoto no TA, como pode ser visto na eq.(5.31), é necessário para manter o escoamento no TA tipo mistura completa.

$$\frac{AFR}{V_t} \geq \eta \quad (5.31)$$

onde:

$\eta$  : requerimento mínimo de mistura (m<sup>3</sup> de ar / m<sup>3</sup>.dia).

### 5.2.3 Decantador Secundário:

O projeto do decantador secundário (DS) é baseado na clarificação ou no adensamento. A eficiência da clarificação no DS é um fator crítico na determinação da eficiência do sistema de tratamento de esgoto para a remoção de DBO e sólidos suspensos. A DBO efluente do DS consiste de orgânicos solúveis e sólidos suspensos biodegradáveis no efluente.

Dependendo das condições operacionais do processo de lodos ativados, os sólidos suspensos devem contabilizar mais da metade da DBO total do efluente.

As condições de projeto do TA e do DS afetam a eficiência da clarificação. PARKER (1983) pesquisou como estas condições de projeto influenciam a eficiência de remoção de sólidos. E, que devido à complexidade envolvida na modelagem da performance desta unidade, um modelo que descreve a eficiência do clarificador baseado em mecanismos fundamentais não permite uma avaliação correta. Daí a idéia de empregar um modelo empírico.

Há vários modelos empíricos que determinam o desempenho da clarificação dos decantadores secundários. O modelo desenvolvido por CHAPMAN (1983) foi o selecionado para ser aplicado no sistema global porque seu estudo foi conduzido em uma ETE-piloto. O modelo de Chapman contempla a eficiência de clarificação em função da vazão afluyente, da concentração de SSLM e da lâmina d'água. A lâmina d'água admitida foi de 1.94m porque durante o estudo em escala-piloto a altura variou em um pequeno intervalo (1.48 a 1.94m). Além do mais, a concentração de sólidos do efluente não é muito sensível a este intervalo de profundidade. Assim, o modelo resultante para o DS é:

$$X_{T4} = -c_1 + c_2 X_{T3} + c_3 \frac{Q_3}{A_s} \quad (5.32)$$

onde:

$X_{T4}$  : concentração de SST do efluente do DS ( $g/m^3$ );

$A_s$  : área da superfície do DS ( $m^2$ );

$c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  : constantes do modelo do DS (adim.).

As composições de sólidos e da  $DBO_5$  solúvel foram admitidas inalteradas pelo DS. A qualidade da água do efluente exigida com relação a

DBO<sub>5</sub> e SST pode ser formulada da seguinte maneira (ECKENFELDER et al., 1985):

$$S_3 + \left( \frac{C_{SSV}}{C_{DBO}} \right) \cdot fX_{A4} \leq DBO_5^{\max} \quad (5.33)$$

$$X_{T4} \leq SST^{\max} \quad (5.34)$$

O adensamento de lodo é uma importante parte do projeto do decantador secundário, assim novamente, o modelo do adensamento diferencial de Dick & Suidan, adotado no item 5.2.1, foi empregado. Desta forma, a concentração de sólidos no fundo do DS, X<sub>T5</sub> em kg/m<sup>3</sup>, pode ser expressa pela eq.(5.35):

$$X_{T5} = [a_w(n_w - 1)]^{1/n_w} \cdot \left( \frac{n_w}{n_w - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_s}{Q_5} \right)^{1/n_w} \quad (5.35)$$

onde:

a<sub>w</sub> e n<sub>w</sub> : constantes de decantação do lodos ativados (adim.).

#### 5.2.4 Adensador Gravitacional:

Os lodos dos decantadores primário e secundário foram admitidos serem combinados antes de entrarem no adensador gravitacional (AG). As características de decantação do lodo combinado foram estudadas por SUIDAN<sup>4</sup> apud TANG et al. (1987b) usando dados operacionais de projeto. Em tal estudo, os dados experimentais foram usados para desenvolver modelos de regressão que relatam as constantes de sedimentação em função da fração de massa do lodo primário ou do lodo secundário. As relações empíricas desenvolvidas por Suidan para determinar as constantes

<sup>4</sup>SUIDAN, M.T. (1982) *Comunicação Pessoal apud TANG et al. (1987b)*.

de adensamento do lodo combinado são apresentadas nas eqs.(5.36) a (5.38):

$$a_c = a_w + a_1 \cdot p^{a_2} \quad (5.36)$$

$$n_c = n_w e^{n_1 \cdot p} \quad (5.37)$$

onde:

$$p = \frac{Q_8 X_{T8}}{Q_7 X_{T7} + Q_8 X_{T8}} \quad (5.38)$$

$$a_1 = a_p - a_w \quad (5.39)$$

$$n_1 = \ln(n_p/n_w) \quad (5.40)$$

$p$  : fração de massa do lodo primário (adim.);

índice 8 : lodo primário;

índice 7 : lodo em excesso;

$a_1$  e  $n_1$  : constantes de regressão do modelo de adensamento (adim.);

$a_2$ : constante de regressão do modelo de adensamento (adim.);

$a_c$  e  $n_c$  : constantes do modelo de adensamento do lodo combinado (adim.).

A concentração de sólidos no fundo do adensador é também calculada pelo modelo de adensamento diferencial de Dick & Suidan (ver item 5.2.1):

$$X_{T11} = [a_c(n_c - 1)]^{1/n_c} \cdot \left( \frac{n_c}{n_c - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_g}{Q_{11}} \right)^{1/n_c} \quad (5.41)$$

onde:

$X_{T11}$  : concentração de SST no fundo do AG ( $\text{kg/m}^3$ );

$A_g$  : área superficial do AG ( $m^2$ );

índice 11 : lodo efluente do AG.

A carga de sólidos do adensador ( $L_g$ ) é por definição:

$$L_g = \frac{Q_{11} X_{T11}}{A_g} \quad (5.42)$$

Portanto, a concentração de sólidos no fundo do AG,  $X_{T11}$ , pode ser determinada através da carga de sólidos ao combinar as eqs.(5.41) e (5.42):

$$X_{T11} = [a_c (n_c - 1)]^{1/(n_c-1)} \cdot \left( \frac{n_c}{n_c - 1} \right)^{n_c/(n_c-1)} \cdot L_g^{-1/(n_c-1)} \quad (5.43)$$

Não há modelos que avaliem a concentração de sólidos do sobrenadante,  $X_{T10}$ , do adensador. Para contornar tal situação, é admitido que  $X_{T10}$  seja um parâmetro conhecido do modelo. Os sólidos existentes no sobrenadante e no lodo do fundo do adensador podem ser calculados das relações de balanços de massa, sendo que é admitido que o adensador não afeta a composição de sólidos. E, a DBO solúvel é considerada inalterada pelo AG.

#### 5.2.5 Digestor Anaeróbio:

Projetos convencionais de um digestor anaeróbio usam sistemas de dois estágios (digestor primário e digestor secundário). O lodo primário é geralmente misturado e aquecido até a temperatura de fermentação. A maior parte da estabilização do lodo ocorre nesta primeira unidade (DIG1). No digestor secundário (DIG2), o lodo digerido não é misturado e sim adensado. Neste estudo, o DIG1 foi modelado como um reator de mistura completa onde toda a estabilização do lodo se dá nesta unidade. Enquanto que o DIG2 foi modelado como um adensador gravitacional.

O lodo de esgoto é uma mistura de sólidos orgânicos complexos, e foi estudado por PFEFFER (1968), que exceto para taxas de cargas muito altas, a hidrólise dos sólidos orgânicos e a fermentação não metânica são as taxas limitantes. Foi considerada a taxa de estabilização como de 1ª ordem com relação aos sólidos voláteis degradáveis anaerobicamente. PFEFFER<sup>5</sup> apud TANG et al. (1987b) relatou também que o coeficiente da taxa de 1ª ordem é uma função da temperatura da digestão.

O efeito da temperatura na estabilização anaeróbia de uma variedade de substratos foi estudado por vários pesquisadores. TANG et al. (1987b), baseado em um grande número de dados experimentais, desenvolveu o seguinte modelo matemático para o projeto do DIG1:

$$K = r_1 \exp \left[ 7.675 \left( r_2 - \frac{1000}{T_d + 273} \right) \right] \quad (5.44)$$

onde:

K: coeficiente da taxa 1ª ordem do DIG1 (d<sup>-1</sup>);

T<sub>d</sub>: temperatura de fermentação (digestão anaeróbia) (°C);

r<sub>1</sub> e r<sub>2</sub>: constantes da taxa de reação do DIG1 (adim.);

Assim, a eq.(5.44) foi utilizada como base para o projeto do digestor primário. A composição dos sólidos do lodo digerido é calculada admitindo que: os sólidos voláteis do lodo digerido são não-degradáveis quando eles saem do DIG1 e retornam ao ambiente aeróbio; o material suspenso volátil resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica é apenas a fração inerte; e os sólidos inorgânicos não são afetados pela digestão anaeróbia. Representando matematicamente tais hipóteses, tem-se:

$$X_{A12} = 0 \quad (5.45)$$

$$X_{D12} = 0 \quad (5.46)$$

<sup>5</sup> PFEFFER, J.T. (1981) *Methane fermentation - engineering aspects of reactor design*. International Conference on CEBEDEAU, held at liege, Belgium apud TANG et al. (1987b).

$$X_{I12} = \frac{X_{A11} + X_{D11} + X_{I11}}{1 + K\theta_d} \quad (5.47)$$

$$X_{F12} = X_{F11} \quad (5.48)$$

onde:

$$\theta_d = \frac{V_d}{24Q_{11}} \quad (5.49)$$

$\theta_d$  : idade do lodo (d);

$V_d$  : volume do digestor primário (m<sup>3</sup>);

índice 11 : afluente do DIG1;

índice 12 : efluente do DIG1.

O tempo de retenção hidráulica, para este sistema de digestão, é equivalente à idade do lodo, pois não há recirculação de sólidos.

O modelo cinético de primeira ordem para a eliminação dos sólidos voláteis usado para descrever o desempenho do digestor primário não permite calcular a concentração de DBO<sub>5</sub> solúvel. Portanto, a DBO<sub>5</sub> solúvel foi considerada um parâmetro conhecido no modelo.

A produção de gás metano durante a digestão e seu valor energético são calculados no modelo. O calor necessário para elevar a temperatura do lodo afluente para a temperatura de digestão e a perda de calor do digestor são estimados. É admitido que o metano é consumido no local.

O DIG2 foi modelado como um adensador gravitacional com a fermentação não metânica. Assim, empregando novamente o modelo do adensamento diferencial proposto por Dick & Suidan (ver item 5.2.1), a concentração de sólidos no fundo do DIG2 é:

$$X_{T14} = [\delta a_d (n_d - 1)]^{1/n_d} \cdot \left( \frac{n_d}{n_d - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_d}{Q_{14}} \right)^{1/n_d} \quad (5.50)$$

onde:

$X_{T14}$  : concentração de SST no fundo do DIG2 ( $\text{kg/m}^3$ );

$A_d$  : área superficial do DIG2 ( $\text{m}^2$ );

$a_d$  e  $n_d$  : constantes de decantação do lodo digerido total (adim.);

$\delta$  : fator de redução da velocidade de sedimentação do lodo digerido visto que a produção de gás no digestor secundário pode ser suficientemente alta para causar turbulência suficiente que venha a reduzir a velocidade de sedimentação do lodo digerido (adim.);

índice 13 : sobrenadante do DIG2;

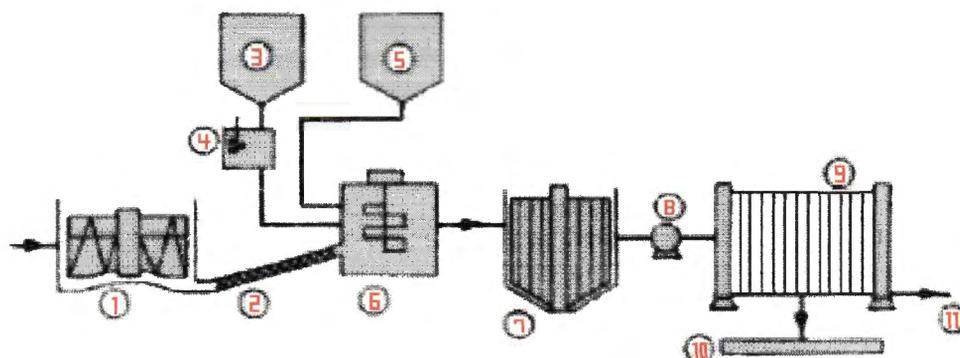
índice 14 : descarga do fundo do DIG2.

O modelo do adensamento gravitacional usado no projeto do DIG2 não permite calcular a concentração de sólidos suspensos no sobrenadante do digestor ( $X_{T13}$ ). Portanto, tal concentração foi tratada como um parâmetro conhecido do modelo. A  $\text{DBO}_5$  e a composição de sólidos foram admitidas inalteradas pelo DIG2. As equações do balanço de massa e vazão são também necessárias para o projeto do digestor secundário.

#### 5.2.6 Filtro Prensa de Placas:

Os filtros prensa são sistemas mecânicos de separação de líquidos e sólidos em massa ou lodos, utilizando pressões diferenciais positivas aplicadas ao meio. O funcionamento básico envolve duas operações: a primeira é a aplicação de uma força sobre a massa (lodo) e a segunda é a filtração do líquido contido na massa. O sistema funciona de maneira intermitente (regime de bateladas). A constituição é uma série de placas verticais mantidas na fase de desidratação e separadas na fase de descarga da torta produzida. Segundo ALMEIDA & GONÇALVES (1993), a figura 08 representa um esquema simplificado do processo de desidratação de lodos por filtros prensa de placas da ETE - Barueri, que é um subsistema da figura 04. O condicionamento é feito com cloreto férrico e cal. ALMEIDA & GONÇALVES (1993) relataram também que, o lodo é bombeado para o

espaço existente entre as placas e uma pressão é aplicada forçando o líquido a passar pelo tecido filtrante, ficando os sólidos retidos entre as placas. O filtrado é coletado pelas ranhuras das placas e conduzido para fora do filtro através de dutos, retornando ao início da estação.



Legenda dos pontos: 1 - tanque de estocagem do lodo digerido; 2 - bombas parafusos; 3 - sistemas de carregamento e estocagem de cal; 4 - sistema de dosagem e extinção de cal viva; 5 - sistema de estocagem e dosagem de cloreto férrico; 6 - câmara de floculação com misturadores mecânicos; 7 - tanque de estocagem de lodo floculado; 8 - bomba diafragma do lodo condicionado; 9 - filtro prensa de placas; 10 - esteira rolante de lodo desidratado; 11 - efluente filtrado que retorna para o início da estação.

Fonte: ALMEIDA & GONÇALVES (1993)

Figura 08 - Esquema simplificado do processo de desidratação de lodos por filtro prensa de placas da ETE - Barueri

Ao analisar várias teorias de filtração COAKLEY & JONES (1956) concluíram que o modelo de Carman se ajusta aos dados experimentais mais adequadamente. Desta forma, a seguinte equação para calcular o rendimento do filtro prensa (FP) foi empregada:

$$L_f = 657,3 \cdot \left( \frac{\chi P}{\mu R t} \right)^{1/2} \cdot W^{1/2} \quad (5.51)$$

onde:

$L_f$  : rendimento do filtro (taxa de filtração) (kg de sólidos secos/m<sup>2</sup>/h);

$\chi$  : tempo de formação da torta por tempo de ciclo (adim.);

P : pressão aplicada ( $\text{N/m}^2$ );

$\mu$  : viscosidade do líquido filtrado ( $\text{Ns/m}^2$ );

R : resistência específica ( $\text{m/kg}$ );

t : tempo de um ciclo (min);

$$W = \frac{Q_{16} X_{T16}}{Q_{15}} \quad (5.52)$$

W : peso de sólidos secos por unidade de volume filtrado ( $\text{kg/m}^3$ );

índice 15 : sobrenadante do FP;

índice 16 : descarga do FP.

CHRISTENSEN (1983) determinou valores de resistência específica (R) para uma variedade de lodos. A área de filtragem do filtro  $A_f$  em  $\text{m}^2$ , é:

$$A_f = \frac{Q_{16} X_{T16}}{L_f} \quad (5.53)$$

A modelagem matemática para o FP não permite calcular a concentração de sólidos suspensos do líquido filtrado ( $X_{T15}$ ). Portanto, tal concentração foi tratada como um parâmetro conhecido do modelo. A  $\text{DBO}_5$  solúvel e a composição de sólidos foram admitidas inalteradas. As equações do balanço de massa e vazão são também necessárias para esta unidade.

### 5.2.7 Reciclagem dos Sobrenadantes da Fase Sólida:

Os sobrenadantes gerados do tratamento da fase sólida são reciclados para o início da estação, para a remoção da matéria orgânica e dos sólidos suspensos. Para obter um projeto em regime permanente do sistema, vazões e balanços de massa devem ser realizados onde houver a

reciclagem desses sobrenadantes. Sete equações de balanço de massa e vazão foram incluídas no sistema total, como pode ser visto a seguir:

$$Q_1 = Q_0 + Q_{10} + Q_{13} + Q_{15} \quad (5.54)$$

$$Q_1 S_1 = Q_0 S_0 + Q_{10} S_{10} + Q_{13} S_{13} + Q_{15} S_{15} \quad (5.55)$$

$$Q_1 X_{A1} = Q_0 X_{A0} + Q_{10} X_{A10} \quad (5.56)$$

$$Q_1 X_{D1} = Q_0 X_{D0} + Q_{10} X_{D10} \quad (5.57)$$

$$Q_1 X_{I1} = Q_0 X_{I0} + Q_{10} X_{I10} + Q_{13} X_{I13} + Q_{15} X_{I15} \quad (5.58)$$

$$Q_1 X_{F1} = Q_0 X_{F0} + Q_{10} X_{F10} + Q_{13} X_{F13} + Q_{15} X_{F15} \quad (5.59)$$

$$X_{T1} = X_{A1} + X_{D1} + X_{I1} + X_{F1} \quad (5.60)$$

Nas eqs.(5.56) e (5.57) não existe a fração de sólidos  $X_{Aj}$  e  $X_{Dj}$  dos sobrenadantes das unidades do digestor secundário e filtro prensa porque no digestor primário tais sólidos são totalmente consumidos no processo de digestão anaeróbia (ver item 5.2.5).

### 5.2.8 Disposição do Lodo:

A disposição final do lodo é uma parte integrante do sistema de tratamento de resíduos, e múltiplas opções foram estudadas exaustivamente por vários pesquisadores. De acordo com a descrição do sistema de Barueri (ver capítulo 3), a disposição do lodo se dá em aterro sanitário. A área de terra necessária foi estimada usando equações desenvolvidas por DICK et al.<sup>6</sup> apud TANG et al. (1987b). A massa do lodo a ser aterrada foi calculada

<sup>6</sup> DICK, R.I.; SIMMONS, D.L.; BALL, R.O.; PERLIN, K. (1978) *Process selection for optimal management for regional wastewater residue*. Department of Civil Engineering, Delaware University, Newark, Del., Aug. apud TANG et al. (1987b).

admitindo um peso específico de 1.04 para o lodo seco. Equações similares podem ser desenvolvidas a partir do estudo de Dick para outros esquemas de disposição de lodo e, podem ser incorporadas no modelo do sistema sem maiores problemas para a otimização matemática.

### 5.3 Funções de Custo:

Este tópico tem por finalidade compor as funções de custos adequadas às necessidades do problema em estudo. Conforme discutido no item 2.2, serão empregadas as funções de custo da USEPA com a adequação de coeficientes de custos tais como o custo de pessoal, o índice de custo de energia elétrica consumida e o índice de custo de energia elétrica por potência instalada obtidos junto ao DAERP. Quanto à reposição de peças na ausência de informações locais, mantiveram-se as funções de custo sugeridas por PATTERSON & BANKER<sup>7</sup> apud UBER et al. (1988).

Custos de capital serão excluídos da função objetivo porque pretende-se otimizar a fase operacional. Portanto os custos considerados são de operação, manutenção, reposição de peças e acessórios, energia elétrica e a energia de metano produzida durante a digestão anaeróbia do lodo, enquanto que as unidades de processamento são decantação primária, bombeamento do lodo primário, tanque de aeração, aeradores por ar difuso, decantação secundária, bombeamento do lodo secundário, bombeamento do sobrenadante da fase sólida, adensador gravitacional, digestores anaeróbios primário e secundário, filtro prensa e disposição do lodo.

Algumas funções de custos dependentes das variáveis relativas ao dimensionamento (área e volume) serão mantidas apesar da otimização independer dessas variáveis.

Desta forma, ter-se-ão as seguintes equações:

---

<sup>7</sup> PATTERSON, W.L.; BANKER, R.F. (1976) *Costs and manpower requirements for conventional wastewater treatment facilities*. Report N° 17090 DAN 10/71, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., Oct. apud UBER et al. (1988).

## a) Decantador Primário (DP):

Se ( $A_p \geq 279$ ) então faça

$$CO_{DP} = 17,15.A_p^{0,6} \quad (5.61)$$

$$CM_{DP} = 9,23.A_p^{0,6} \quad (5.62)$$

Senão faça

$$CO_{DP} = 92,45.A_p^{0,3} \quad (5.63)$$

$$CM_{DP} = 106.A_p^{0,14} \quad (5.64)$$

$$CS_{DP} = 8,62.A_p^{0,76} \quad (5.65)$$

onde:

 $A_p$  : área da superfície do decantador primário ( $m^2$ );

CO : coeficiente de operação que representa o número médio de horas necessárias pelos funcionários da ETE para realizar a referida atividade em um ano, na unidade de processamento em estudo (h / ano);

CM : coeficiente de manutenção que representa o número médio de horas necessárias pelos funcionários da ETE para realizar a referida atividade em um ano, na unidade de processamento em estudo (h / ano);

CS : custo de reposição de peças e acessórios por ano, na unidade de processamento em estudo (US\$ / ano);

índice DP : decantador primário.

## b) Bombeamento do Lodo Primário (BLP):

$$Q_{BLP} = Q_8 \quad (5.66)$$

$$CO_{BLP} = 374.Q_{BLP}^{0,41} \quad (5.67)$$

$$CM_{BLP} = 166.Q_{BLP}^{0,43} \quad (5.68)$$

$$CS_{BLP} = 385.Q_{BLP}^{0,64} \quad (5.69)$$

onde:

$Q_8$  : vazão de descarga do fundo do decantador primário ( $m^3/h$ );

$Q_{BLP}$  : vazão de lodo primário a ser bombeada para o adensador ( $m^3/h$ );

índice BLP : bombeamento do lodo primário.

c) Aerador por Ar Difuso (AAD):

$$CO_{AAD} = 187.AFR^{0,48} \quad (5.70)$$

$$CM_{AAD} = 74,4.AFR^{0,55} \quad (5.71)$$

onde:

AFR : vazão de ar ( $m^3/min$ );

índice AAD : aerador por ar difuso.

d) Decantador Secundário (DS):

Se ( $A_s \geq 279$ ) então faça

$$CO_{DS} = 17,15.A_s^{0,6} \quad (5.72)$$

$$CM_{DS} = 9,23.A_s^{0,6} \quad (5.73)$$

Senão faça

$$CO_{DS} = 92,45.A_s^{0,3} \quad (5.74)$$

$$CM_{DS} = 106.A_s^{0,14} \quad (5.75)$$

$$CS_{DS} = 8,62.A_s^{0,76} \quad (5.76)$$

onde:

$A_s$  : área da superfície do decantador secundário ( $m^2$ );

índice DS : decantador secundário.

e) Bombeamento do Lodo Secundário (BLS):

$$Q_{BLS} = Q_5 \quad (5.77)$$

$$CO_{BLS} = 0,333 \cdot Q_{BLS} \quad (5.78)$$

$$CM_{BLS} = 0,2375 \cdot Q_{BLS} \quad (5.79)$$

Se ( $Q_{BLS} < 158$ ) então faça

$$CS_{BLS} = 300 \quad (5.80)$$

Senão se ( $Q_{BLS} < 631$ ) então faça

$$CS_{BLS} = 40,57 \cdot Q_{BLS}^{0,52} \quad (5.81)$$

Senão se ( $Q_{BLS} < 1580$ ) então faça

$$CS_{BLS} = 5,97 \cdot Q_{BLS}^{0,87} \quad (5.82)$$

Senão faça

$$CS_{BLS} = 1,105 \cdot Q_{BLS} \quad (5.83)$$

onde:

$Q_5$  : vazão de descarga total do fundo do decantador secundário ( $m^3/h$ );

$Q_{BLS}$  : vazão de lodo secundário a ser bombeada ( $m^3/h$ );

índice BLS : bombeamento do lodo secundário.

f) Bombeamento do Sobrenadante da Fase Sólida (BFS):

$$Q_{BFS} = Q_{10} + Q_{13} + Q_{15} \quad (5.84)$$

$$CO_{BFS} = 0,333 \cdot Q_{BFS} \quad (5.85)$$

$$CM_{BFS} = 0,2375 \cdot Q_{BFS} \quad (5.86)$$

Se ( $Q_{BFS} < 158$ ) então faça

$$CS_{BFS} = 300 \quad (5.87)$$

Senão se ( $Q_{BFS} < 631$ ) então faça

$$CS_{BFS} = 40,57 \cdot Q_{BFS}^{0,52} \quad (5.88)$$

Senão se ( $Q_{BFS} < 1580$ ) então faça

$$CS_{BFS} = 5,97 \cdot Q_{BFS}^{0,87} \quad (5.89)$$

Senão faça

$$CS_{BFS} = 1,105 \cdot Q_{BFS} \quad (5.90)$$

onde:

$Q_{10}$  : vazão do sobrenadante do adensador gravitacional ( $m^3/h$ );

$Q_{13}$  : vazão do sobrenadante do digestor anaeróbio secundário ( $m^3/h$ );

$Q_{15}$  : vazão do sobrenadante do filtro prensa ( $m^3/h$ );

$Q_{BFS}$  : vazão dos sobrenadantes das unidades da fase sólida ( $m^3/h$ );

índice BFS : bombeamento do sobrenadante da fase sólida.

g) Adensador Gravitacional (AG):

Se ( $A_g \geq 279$ ) então faça

$$CO_{AG} = 17,15 \cdot A_g^{0,6} \quad (5.91)$$

$$CM_{AG} = 9,23 \cdot A_g^{0,6} \quad (5.92)$$

Senão faça

$$CO_{AG} = 92,45 \cdot A_g^{0,3} \quad (5.93)$$

$$CM_{AG} = 106 \cdot A_g^{0,14} \quad (5.94)$$

$$CS_{AG} = 8,62 \cdot A_g^{0,76} \quad (5.95)$$

onde:

$A_g$  : área superficial do AG ( $m^2$ );

índice AG : adensador gravitacional.

h) Digestor Anaeróbio Primário (DIG1):

Se ( $V_{d1} \geq 5678$ ) então faça

$$CO_{DIG1} = 1,29.V_{d1}^{0,83} \quad (5.96)$$

$$CM_{DIG1} = 0,83.V_{d1}^{0,82} \quad (5.97)$$

Senão se ( $V_{d1} \geq 1968$ ) então faça

$$CO_{DIG1} = 14.V_{d1}^{0,55} \quad (5.98)$$

$$CM_{DIG1} = 8,5.V_{d1}^{0,55} \quad (5.99)$$

Senão faça

$$CO_{DIG1} = 192.V_{d1}^{0,20} \quad (5.100)$$

$$CM_{DIG1} = 113.V_{d1}^{0,21} \quad (5.101)$$

Se ( $V_{d1} \geq 2839$ ) então faça

$$CS_{DIG1} = 14,4.V_{d1}^{0,66} \quad (5.102)$$

Senão faça

$$CS_{DIG1} = 142.V_{d1}^{0,37} \quad (5.103)$$

onde:

$V_{d1}$ : volume do digestor primário ( $m^3$ );

índice DIG1 : digestor anaeróbio primário.

i) Digestor Anaeróbio Secundário (DIG2):

Se ( $V_{d2} \geq 5678$ ) então faça

$$CO_{DIG2} = 1,29.V_{d2}^{0,83} \quad (5.104)$$

$$CM_{DIG2} = 0,83.V_{d2}^{0,82} \quad (5.105)$$

Senão se ( $V_{d2} \geq 1968$ ) então faça

$$CO_{DIG2} = 14.V_{d2}^{0,55} \quad (5.106)$$

$$CM_{DIG2} = 8,5.V_{d2}^{0,55} \quad (5.107)$$

Senão faça

$$CO_{DIG2} = 192.V_{d2}^{0,20} \quad (5.108)$$

$$CM_{DIG2} = 113.V_{d2}^{0,21} \quad (5.109)$$

Se ( $V_{d2} \geq 2839$ ) então faça

$$CS_{DIG2} = 14,4.V_{d2}^{0,66} \quad (5.110)$$

Senão faça

$$CS_{DIG2} = 142.V_{d2}^{0,37} \quad (5.111)$$

onde:

$V_{d2}$ : volume do digestor secundário ( $m^3$ );

índice DIG2 : digestor anaeróbio secundário.

j) Filtro Prensa (FP):

$$CO_{FP} = 197,55.(Q_{16}.X_{T16})^{0,58} \quad (5.112)$$

Se ( $Q_{16}.X_{T16} \geq 519$ ) então faça

$$CM_{FP} = 5,57.(Q_{16}.X_{T16})^{0,84} \quad (5.113)$$

Senão se ( $Q_{16}.X_{T16} \geq 103$ ) então faça

$$CM_{FP} = 20.(Q_{16}.X_{T16})^{0,63} \quad (5.114)$$

Senão faça

$$CM_{FP} = 41,5.(Q_{16}.X_{T16})^{0,48} \quad (5.115)$$

$$CS_{FP} = 230.(Q_{16}.X_{T16})^{0,71} + 182.(Q_{16}.X_{T16})^{0,86} \quad (5.116)$$

onde:

$Q_{16}$  : vazão de descarga do FP ( $m^3/h$ );

$X_{T16}$  : concentração de SST do lodo desidratado pelo FP ( $kg/m^3$ );

índice FP : filtro prensa.

k) Disposição do Lodo (DL):

$$CO_{DL} = 8024.(Q_{16})^{0,667} \quad (5.117)$$

onde:

índice DL : disposição do lodo.

Assim, agrupando os custos individuais obtém-se os seguintes custos totais para uma ETE por lodos ativados:

$$COT = IC_{POM} \cdot (CO_{DP} + CO_{BLP} + CO_{AAD} + CO_{DS} + CO_{BLS} + CO_{BFS} + CO_{AG} + CO_{DIG1} + CO_{DIG2} + CO_{FP} + CO_{DL}) \quad (5.118)$$

$$CMT = IC_{POM} \cdot (CM_{DP} + CM_{BLP} + CM_{AAD} + CM_{DS} + CM_{BLS} + CM_{BFS} + CM_{AG} + CM_{DIG1} + CM_{DIG2} + CM_{FP}) \quad (5.119)$$

$$CST = (CS_{DP} + CS_{BLP} + CS_{DS} + CS_{BLS} + CS_{BFS} + CS_{AG} + CS_{DIG1} + CS_{DIG2} + CS_{FP}) \quad (5.120)$$

$$CEE = [8760 \cdot IC_{EC} + IC_{PI}] \cdot \left[ \frac{9,8}{3600} \cdot \frac{(Q_{BLP} + Q_{BLS} + Q_{BFS}) \cdot H_{man}}{\eta_B} \right] \quad (5.121)$$

$$CECH_4 = IC_{CH_4} \cdot \left[ \frac{3,6 \cdot 10^3}{1,055} \cdot NetEnergy \right] \quad (5.122)$$

$$CT = (COT + CMT + CST + CEE - CECH_4) \quad (5.123)$$

onde:

$IC_{POM}$  : índice de custo de pessoal que realizam a operação e a manutenção do sistema (US\$/h);

$IC_{EC}$  : índice de custo de energia elétrica devido a energia consumida no sistema (US\$/kWh);

$IC_{PI}$  : índice de custo de energia elétrica devido a potência instalada no sistema (US\$/kW);

$IC_{CH_4}$  : índice de custo do trabalho produzido pelo  $CH_4$  no DIG1 (US\$/ $10^6$ kJ);

$H_{man}$  : altura manométrica de recalque (m);

$\eta_B$  : rendimento do conjunto motor bomba (adim);

NetEnergy : energia líquida produzida pelo gás metano;

COT : custo anual total de operação (US\$/ano);

CMT : custo anual total de manutenção (US\$/ano);

CST : custo anual total de reposição de peças e acessórios (US\$/ano);

CEE : custo anual total de energia elétrica (US\$/ano);

CECH<sub>4</sub> : custo anual total de energia produzida pelo  $CH_4$  (US\$/ano);

CT : custo anual total da ETE por lodos ativados (US\$/ano).

Os índices de custo  $IC_{POM}$ ,  $IC_{EC}$  e  $IC_{PI}$  foram obtidos junto ao DAERP e, são **12,14 US\$/h**, **0,0455 US\$/kWh** e **6,87765 US\$/kW**, respectivamente. O  $IC_{CH_4}$  será admitido igual a **0,0 US\$/ $10^6$ kJ**, cuja justificativa é apresentada no item 6.7 do presente trabalho.

As relações entre o custo e a robustez devem ser analisadas em um nível tal que se possa examinar os custos associados com os processos de tratamento individuais ou o conjunto de processos relatados. Para isto, o custo anual total pode também ser dividido entre as seguintes maiores áreas de custos:

- $CT_p$  : custo anual total referente ao DP, o BLP e a energia elétrica necessária para o BLP (US\$/ano);
- $CT_{ta}$  : custo anual total referente ao AAD (US\$/ano);
- $CT_s$  : custo anual total referente ao DS, o BLS e a energia elétrica necessária para o BLS (US\$/ano);

- $CT_{sl}$  : custo anual total referente ao BFS, a energia elétrica necessária para o BFS, o AG, o DIG1, o DIG2, o FP, a DL e a energia produzida pelo  $CH_4$  (US\$/ano).

Portanto, pode-se escrever matematicamente os custos acima da seguinte forma:

$$CT_p = IC_{POM} \cdot (CO_{DP} + CM_{DP} + CO_{BLP} + CM_{BLP}) + (CS_{DP} + CS_{BLP}) + [8760 \cdot IC_{EC} + IC_{PI}] \cdot \left[ \frac{9,8}{3600} \cdot \frac{Q_{BLP} \cdot H_{man}}{\eta_B} \right] \quad (5.124)$$

$$CT_{ta} = IC_{POM} \cdot (CO_{AAD} + CM_{AAD}) \quad (5.125)$$

$$CT_s = IC_{POM} \cdot (CO_{DS} + CM_{DS} + CO_{BLS} + CM_{BLS}) + (CS_{DS} + CS_{BLS}) + [8760 \cdot IC_{EC} + IC_{PI}] \cdot \left[ \frac{9,8}{3600} \cdot \frac{Q_{BLS} \cdot H_{man}}{\eta_B} \right] \quad (5.126)$$

$$CT_{sl} = IC_{POM} \cdot (CO_{BFS} + CM_{BFS} + CO_{AG} + CM_{AG} + CO_{DIG1} + CM_{DIG1} + CO_{DIG2} + CM_{DIG2} + CO_{FP} + CM_{FP} + CO_{DL}) + (CS_{BFS} + CS_{AG} + CS_{DIG1} + CS_{DIG2} + CS_{FP}) + [8760 \cdot IC_{EC} + IC_{PI}] \cdot \left[ \frac{9,8}{3600} \cdot \frac{Q_{BFS} \cdot H_{man}}{\eta_B} \right] - CECH_4 \quad (5.127)$$

Desta forma, o custo anual total da ETE por lodos ativados, definido na eq.(5.123), pode também ser calculado da seguinte maneira:

$$CT = (CT_p + CT_{ta} + CT_s + CT_{sl}) \quad (5.128)$$

## 6 ESTIMATIVA DOS VALORES NOMINAIS DOS PARÂMETROS $\hat{u}$ DO MODELO

---

Este capítulo tratará de justificar os valores nominais dos parâmetros  $\hat{u}$  do modelo, empregados no projeto ótimo robusto, cuja aplicação na ETE - Barueri é descrita no capítulo 7. Para este fim foram analisados os dados operacionais da ETE - Barueri no período de 02/03/94 a 25/01/95 com leituras semanais e, trabalhos de pesquisadores da área de saneamento, tais como: METCALF & EDDY (1991), TANG et al. (1987b), UBER et al. (1991b) e VON SPERLING (1995 e 1996).

### 6.1 Sedimentação Primária:

Como descrito no item 5.2.1, a relação de sólidos afluente remanescentes no efluente primário é calculada pelo modelo de Voshel-Sak:

$$\frac{X_{T2}}{X_{T1}} = 1 - v_1 X_{T1}^{v_2} OR_p^{-v_3} \quad (5.17)$$

Nesta equação  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  são as constantes do modelo de clarificação do DP, que são determinadas através de análise de regressão. O software EXCEL foi empregado para realizar a análise de regressão da equação supracitada. Para isto foram necessários da ETE - Barueri os dados da concentração de SST afluente ( $X_{T1}$ ) e efluente ( $X_{T2}$ ) do DP, assim como a sua taxa de aplicação superficial ( $OR_p$ ).

Os dados de  $X_{T1}$ ,  $X_{T2}$  e  $OR_p$  observados na ETE - Barueri, e a curva de ajuste do modelo de Voshel-Sak para vários valores de  $X_{T1}$ , foram plotados no seguinte gráfico:

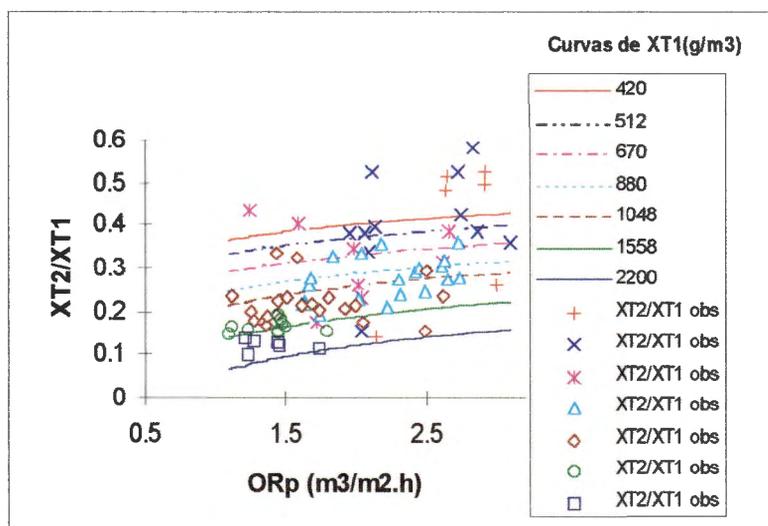


Figura 09 - Variação da relação de sólidos afluentes remanescentes no efluente primário ( $X_{T1} / X_{T2}$ ) com a taxa de aplicação superficial ( $OR_p$ ) observada na ETE - Barueri e as curvas de ajuste para diversos valores de concentrações de SST afluente ao DP ( $X_{T1}$ )

Na figura 10, os dados de Barueri são plotados novamente em conjunto com a eq.(5.17), porém, com os valores das constantes  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  sugeridos por UBER et al. (1991b).

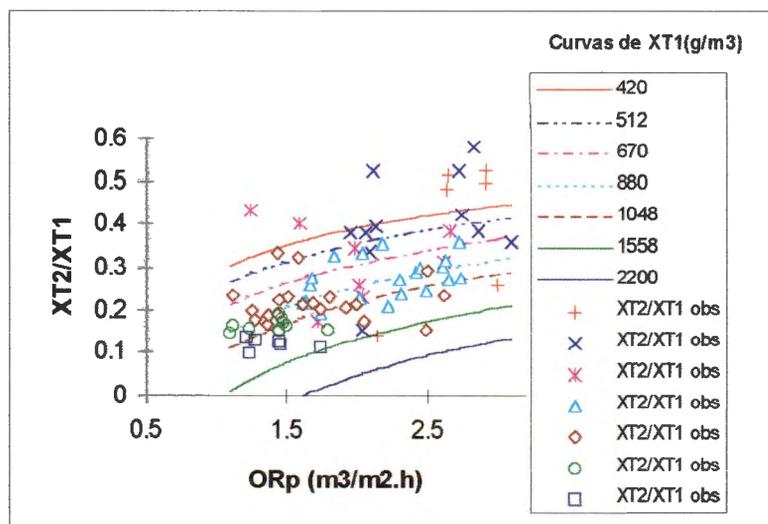


Figura 10 - Dados da figura 09 com os valores das constantes  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  de UBER et al. (1991b)

Os valores dos coeficientes  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  encontrados e sugeridos por UBER et al. (1991b) são apresentados na tabela 05.

Tabela 05 - Valores de  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$v_1$	0.158	0.139
$v_2$	0.232	0.27
$v_3$	0.098	0.22
Coef. de Determinação	0.561	---

Verifica-se das figuras 09 e 10 que os valores dos parâmetros determinados pela análise de regressão se ajustaram melhor aos dados do DP da ETE - Barueri, sendo então, os valores a serem utilizados no POR.

## 6.2 Características de Sedimentação do Lodo:

### 6.2.1 Lodo Primário:

Tal estudo foi baseado na hipótese de adensamento diferencial, a qual é fundamentada na teoria de fluxo limite (ver item 5.2.1). Desta forma, a concentração do lodo primário ( $X_{T8}$ ) pode ser calculada como:

$$X_{T8} = [a_p (n_p - 1)]^{1/n_p} \cdot \left( \frac{n_p}{n_p - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_p}{Q_8} \right)^{1/n_p} \quad (5.19)$$

As variáveis  $a_p$  e  $n_p$  são as constantes de sedimentação para o lodo primário a serem determinadas através de análise de regressão pelo software EXCEL. Os dados usados para este fim foram a concentração de SST de lodo primário ( $X_{T8}$ ), a área do DP ( $A_p$ ) e a vazão de descarga do fundo do DP ( $Q_8$ ).

Juntamente com tais dados e a curva de ajuste da eq.(5.19) obteve-se a figura 11:

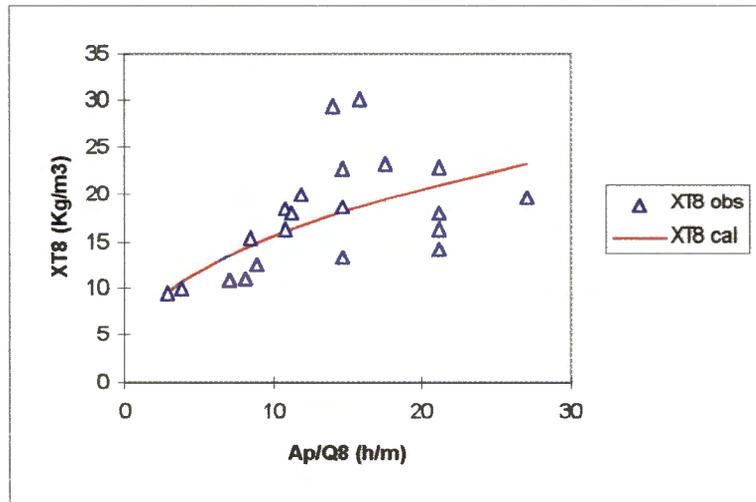


Figura 11 - Variação da concentração de SST do lodo primário ( $X_{T8}$ ) com ( $A_p/Q_8$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste

Representando mais uma vez em forma gráfica os dados da ETE - Barueri com a eq.(5.19), entretanto, com os valores de  $a_p$  e  $\eta_p$  sugeridos por UBER et al. (1991b), obteve-se a seguinte figura:

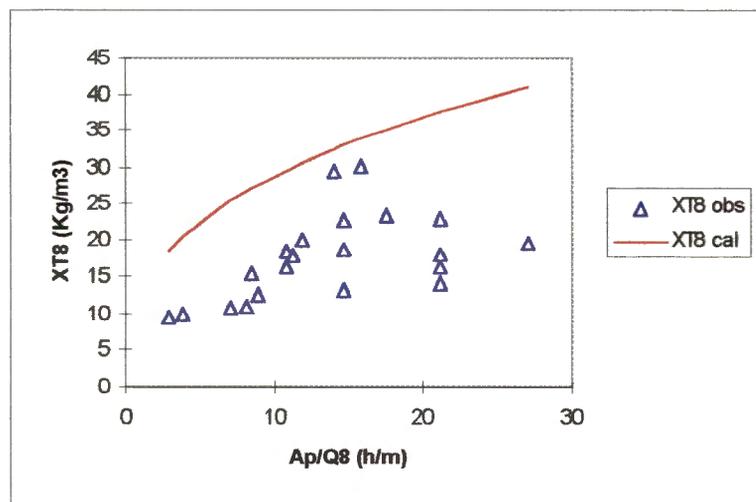


Figura 12 - Dados da figura 11 com os valores das constantes  $a_p$  e  $\eta_p$  de UBER et al. (1991b)

Na tabela 06 são apresentados os valores dos coeficientes  $a_p$  e  $n_p$  ajustados e sugeridos por UBER et al. (1991b).

Tabela 06 - Valores de  $a_p$  e  $n_p$

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$a_p$	17.007	198.7
$n_p$	2.478	2.803
Coef. de Determinação	0.470	---

Serão empregados no POR os valores de  $a_p$  e  $n_p$  determinados pelo ajuste de curva obtido da ETE, que apesar do coeficiente de determinação baixo, apresentam um melhor ajuste aos dados da ETE - Barueri do que os parâmetros utilizados por UBER et al. (1991b).

#### 6.2.2 Lodo Secundário:

Como descrito no item 5.2.3, o modelo de adensamento diferencial foi empregado para representar matematicamente o adensamento do lodo secundário. Assim,  $X_{T5}$  é:

$$X_{T5} = [a_w(n_w - 1)]^{1/n_w} \cdot \left( \frac{n_w}{n_w - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_s}{Q_5} \right)^{1/n_w} \quad (5.35)$$

Com o auxílio do software EXCEL, através de análise de regressão, determinou-se as constantes  $a_w$  e  $n_w$  da eq.(5.35). Os dados da ETE - Barueri necessários nesta análise são a concentração de SST no fundo do DS ( $X_{T5}$ ), a área do DS ( $A_s$ ) e a vazão da descarga no fundo do DS ( $Q_5$ ).

Os dados acima e a curva de ajuste do modelo de adensamento do lodo secundário são plotados na figura 13.

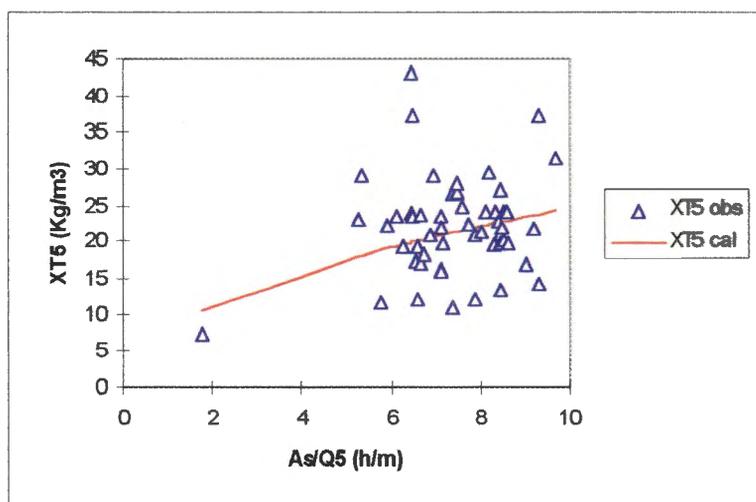


Figura 13 - Variação da concentração de SST do lodo secundário ( $X_{T5}$ ) com ( $A_s/Q_5$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste

Na figura 14, os dados da ETE - Barueri são plotados novamente em conjunto com a eq.(5.35), contudo, utilizando os valores sugeridos por UBER et al. (1991b).

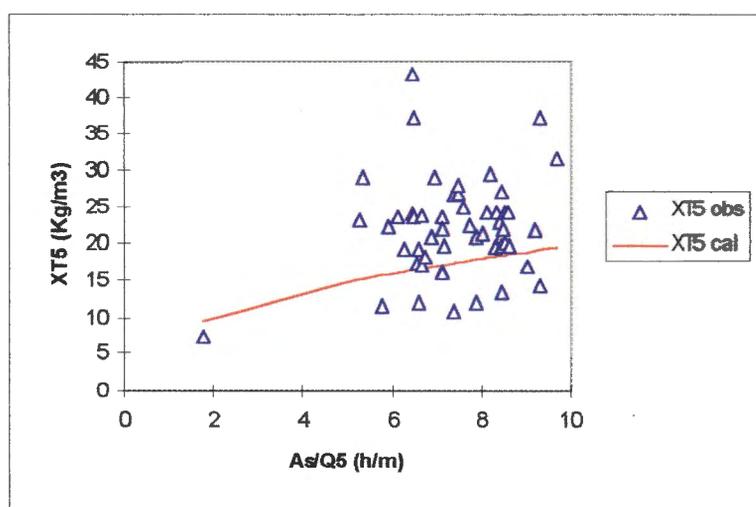


Figura 14 - Dados da figura 13 com os valores das constantes  $a_w$  e  $n_w$  de UBER et al. (1991b)

Os valores dos parâmetros  $a_w$ ,  $n_w$  ajustados e sugeridos por UBER et al. (1991b) são apresentados na tabela 07:

Tabela 07 - Valores de  $a_w$  e  $n_w$ 

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$a_w$	16.614	24.2
$n_w$	2.031	2.375
Coef. de Determinação	0.145	---

Observa-se das figuras 13 e 14 que a curva correspondente a eq.(5.35) aproxima os dados do DS da ETE tanto com os valores dos parâmetros apresentados por UBER et al. (1991b) quanto com os determinados pela análise de regressão obtida dos dados da ETE. Os parâmetros  $a_w$  e  $n_w$  obtidos com os dados de Barueri serão utilizados no POR. Deve-se reconhecer que os dados observados de adensamento apresentam grande dispersão responsável pelo coeficiente de determinação baixo.

### 6.2.3 Lodo Proveniente do AG:

Baseada também na hipótese de adensamento diferencial, a qual é fundamentada na teoria de fluxo limite. A concentração do lodo combinado (lodo primário com o secundário) sedimentado no fundo do AG ( $X_{T11}$ ) pode ser expressa como (ver item 5.2.4):

$$X_{T11} = [a_c(n_c - 1)]^{1/n_c} \cdot \left(\frac{n_c}{n_c - 1}\right) \cdot \left(\frac{A_g}{Q_{11}}\right)^{1/n_c} \quad (5.41)$$

Os parâmetros  $a_c$  e  $n_c$  dependem da sedimentação para o lodo combinado em função da fração de massa do lodo primário ( $p$ ) e das constantes dos modelos de adensamento do lodo primário ( $a_p$  e  $n_p$ ) e secundário ( $a_w$  e  $n_w$ ), como pode ser observado nas seguintes equações:

$$a_c = a_w + a_1 \cdot p^{a_2} \quad (5.36)$$

$$n_c = n_w e^{n_1 \cdot p} \quad (5.37)$$

$$p = \frac{Q_8 X_{T8}}{Q_7 X_{T7} + Q_8 X_{T8}} \quad (5.38)$$

$$a_1 = a_p - a_w \quad (5.39)$$

$$n_1 = \ln(n_p/n_w) \quad (5.40)$$

Ao fazer uso da análise de regressão com o software EXCEL nos dados da concentração de SST no fundo do AG ( $X_{T11}$ ), da área do AG ( $A_g$ ) e da vazão do lodo efluente do AG ( $Q_{11}$ ) da ETE - Barueri,  $a_2$  é a constante a ser obtida, visto que  $a_p$  e  $n_p$  e,  $a_w$  e  $n_w$  foram determinadas anteriormente nas unidades do DP e DS, respectivamente.

Expressando em forma gráfica os dados da ETE - Barueri e a curva de ajuste determinou-se a figura 15.

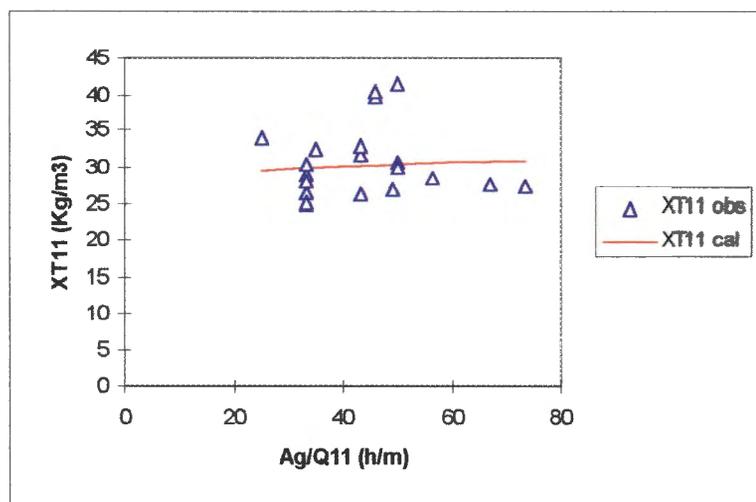


Figura 15 - Variação da concentração de SST no fundo do AG ( $X_{T11}$ ) com ( $A_g/Q_{11}$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste

Plotando-se mais uma vez os dados de Barueri com a eq.(5.41), entretanto, com os valores sugeridos por UBER et al. (1991b), obteve-se a figura 16. Os dados observados na ETE não revelam a acentuada variação indicada pelos parâmetros especificados por UBER et al. (1991b).

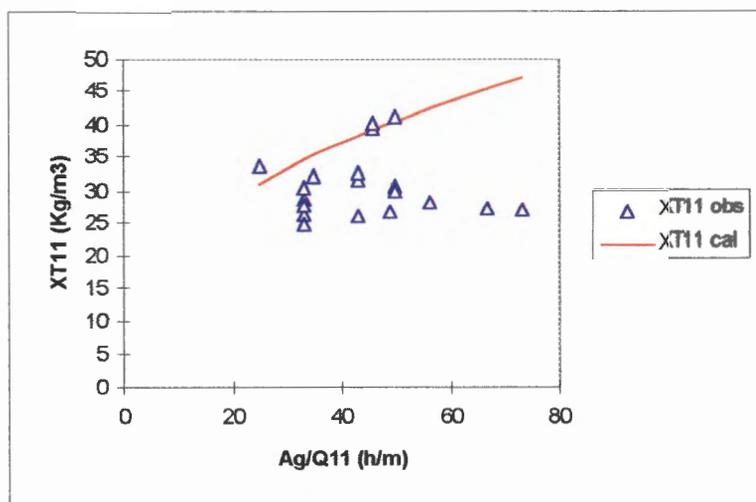


Figura 16 - Dados da figura 15 com o valor de  $a_2$  de UBER et al. (1991b)

Na tabela 08 são apresentados os valores dos coeficientes  $a_2$  ajustado e sugerido. Vê-se que o valor de  $a_2$  obtido com dados da ETE - Barueri é negativo e muito alto ( $\approx -93.07$ ) em comparação com 2.5 de UBER et al. (1991b).

Tabela 08 - Valor de  $a_2$

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$a_2$	-93.067	2.50
Coef. de Determinação	0.030	---

Apesar da curva de ajuste da análise de regressão estar mais próxima aos dados da ETE, parecem ser inconsistentes. Como pode-se observar na figura 15, a maioria dos dados da ETE mostra ser independente da relação  $A_g/Q_{11}$ . A concentração de sólidos suspensos no fundo do AG ( $X_{T11}$ ) não se altera, permanecendo na faixa de  $30 \text{ kg/m}^3$ . Vale ressaltar também que, mediante discussões com técnicos que operam o sistema da ETE - Barueri, ficou a impressão de que os dados referentes à concentração de sólidos das unidades de tratamento da fase sólida (AG, DIG e FP) são pouco confiáveis. Assim, para manter certa coerência física (o modelo tem

que retratar o comportamento físico observado), optou-se pelo valor de  $a_2$  sugerido por UBER et al. (1991b) de 2,5.

### 6.3 Cinética do Sistema de Lodos Ativados:

Na cinética do sistema de lodos ativados há vários parâmetros a considerar que podem ser determinados experimentalmente em laboratório, ou então, advir da experiência prática (valores típicos). Dentre eles podemos citar: coeficiente de produção máxima ( $Y$ ), constante de velocidade média ( $K_s$ ), taxa de utilização do substrato ( $k$ ), coeficiente de decaimento endógeno ( $b$ ) e a fração de células microbianas degradáveis ( $f$ ).

Os valores de tais parâmetros adotados na concepção do projeto da ETE - Barueri e a faixa recomendada desses valores por pesquisadores da área de saneamento, são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 09 - Coeficientes cinéticos

Parâmetro	BARUERI	Faixa Recomendada
$Y$ (kg célula / kg DBO <sub>5</sub> )	0.49	0.4 - 0.8 <sup>a</sup>
$K_s$ (g DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> )	60.0	25 - 100 <sup>a</sup>
$k$ (d <sup>-1</sup> )	5.0	1.2 - 6.0 <sup>a</sup>
$b$ (d <sup>-1</sup> )	0.075	0.03 - 0.08 <sup>a</sup>
$f$	0.77	0.75 - 0.81 <sup>b</sup>

Nota:

<sup>a</sup> Valores recomendados por METCALF & EDDY (1991);

<sup>b</sup> Valores recomendados por ECKENFELDER et al. (1985).

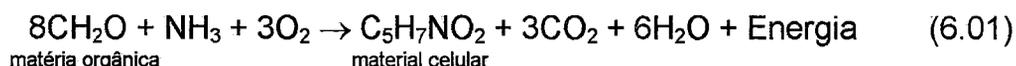
Como todos os valores considerados na concepção do projeto da ETE estão dentro dos valores recomendados, estes serão adotados no POR.

A necessidade de admitir um modelo que contemple a incerteza nos valores dos parâmetros pode ser demonstrada neste caso, pois os parâmetros supracitados podem variar de acordo com condições de operação compatíveis com as características do esgoto afluente.

O fator de conversão teórico ( $C_{SSV}$ ) de SSV para  $DBO_L$  pode ser obtido de um forma simplificada e desprezando mecanismos intermediários. De acordo com VON SPERLING (1996), as reações aeróbias para a estabilização da matéria orgânica carbonácea comportam-se, em um sistema fechado, em uma seqüência, na qual predominam os seguintes dois principais mecanismos:

- Etapa Inicial: predominância da síntese (anabolismo)

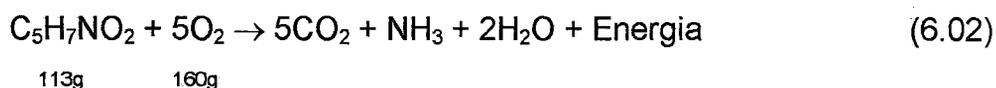
No início a matéria orgânica presente na água residuária é utilizada pelos microrganismos para as suas atividades metabólicas de crescimento e obtenção de energia, predominando, portanto, as atividades de síntese. Esta fase resulta no consumo de oxigênio e no aumento da população de microrganismos, podendo ser representada pela equação genérica:



Nesta equação,  $\text{CH}_2\text{O}$  representa a matéria orgânica e o material celular (SSV) é expresso pela fórmula empírica  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  (sem incluir o fósforo).

- Etapa subsequente: predominância da respiração endógena (catabolismo)

Quando a matéria orgânica originalmente presente na água residuária encontra-se em sua maior parte removida, há a predominância dos mecanismos da segunda fase da oxidação. No início desta fase a população de microrganismos se encontra em seu máximo e, devido à baixa disponibilidade de substrato no meio, a principal fonte de alimento passa a ser o próprio protoplasma celular. Nesta fase predominam, portanto, os mecanismos de auto-oxidação ou de respiração endógena. A equação simplificada representativa de tal fase é:



Naturalmente que em um sistema de cultura mista, como de fato o são os reatores utilizados no tratamento de esgotos, há microrganismos com diferentes taxas de crescimento e de decaimento. Em conseqüência, algumas espécies de microrganismos podem estar em uma determinada etapa da síntese ou respiração endógena, enquanto outras espécies estão em fases mais atrasadas ou adiantadas. A representação acima diz respeito às condições médias prevalentes no reator para os microrganismos heterotróficos.

O oxigênio total consumido em ambas as fases é definido como a demanda última ( $DBO_L$ ). Portanto, o fator de conversão teórico é:

$$C_{SSV} = \frac{DBO_L}{SSV} = \frac{g O_2}{g \text{ celula}} = \frac{160}{113} = 1.42$$

A relação  $DBO_L / DBO_5$ , segundo VON SPERLING (1995), desde o esgoto concentrado ao efluente do decantador secundário possui como faixa típica de 1.1 a 3.0. Sendo assim, adotou-se o valor de **1.5**. Isto é, se a  $DBO_5$  for 300 mg/l, a  $DBO_L$  será 450 mg/l.

#### 6.4 Sedimentação Secundária:

Como descrito no item 5.2.3, o modelo aplicado para representar matematicamente a clarificação do lodo secundário foi proposto por Chapman. Assim,  $X_{T4}$  é:

$$X_{T4} = -c_1 + c_2 X_{T3} + c_3 \frac{Q_3}{A_s} \quad (5.32)$$

Com os dados da ETE - Barueri da concentração de SST do afluente ( $X_{T3}$ ) e do efluente ( $X_{T4}$ ) do DS, da vazão afluente do DS ( $Q_3$ ) e da área do DS ( $A_s$ ), as constantes do modelo de clarificação do lodo secundário  $c_1$ ,  $c_2$  e

$c_3$  são determinadas através de análise de regressão com o auxílio do software EXCEL.

Plotando os dados da ETE - Barueri e as curvas de ajuste para vários valores de  $X_{T3}$ , obteve-se a figura 17.

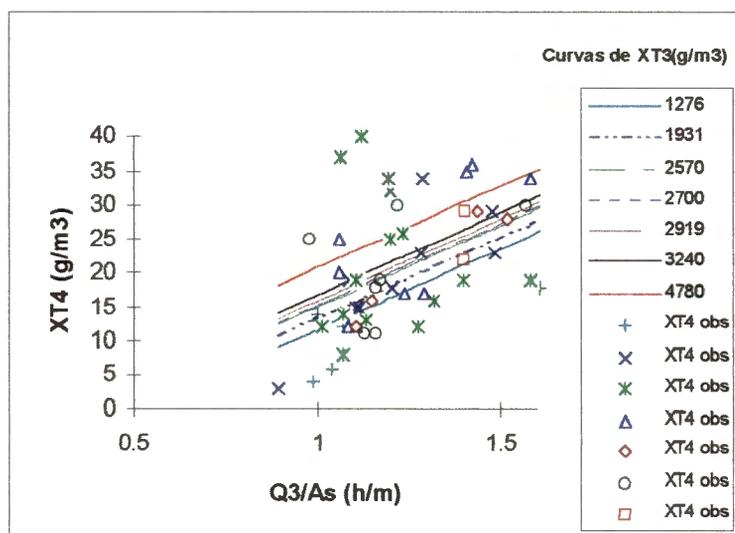


Figura 17 - Variação da concentração de SST efluente do DS ( $X_{T4}$ ) com ( $Q_3/A_s$ ) observada na ETE - Barueri e as curvas de ajuste para diversos valores de concentrações de SST afluente ao DS ( $X_{T3}$ )

Na figura 18, os dados de Barueri são plotados novamente em conjunto com a eq.(5.32), contudo, utilizando os valores dos parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  sugeridos por UBER et al. (1991b).

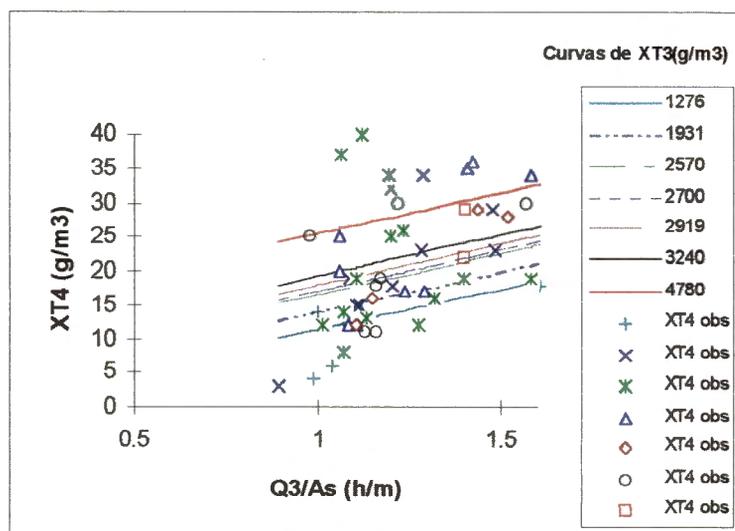


Figura 18 - Dados da figura 17 com os valores das constantes  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  de UBER et al. (1991b)

Os valores dos parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  ajustados e sugeridos são apresentados na seguinte tabela:

Tabela 10 - Valores de  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$c_1$	15.856	5.69
$c_2$	0.003	0.00403
$c_3$	24.081	11.91
Coef. de Determinação	0.271	---

A comparação entre os parâmetros da tabela 10 mostra que o coeficiente angular das retas  $c_3$  calculado pela regressão aqui é quase o dobro do valor adotado por Uber. Além disso, o coeficiente  $c_2$  que exprime o efeito de  $X_{T3}$  é subestimado. Assim as retas de UBER et al. (1991b) cobrem mais completamente os dados observados apesar de menos inclinadas. Visualmente, a eq.(5.32) com valores dos parâmetros de UBER et al. (1991b) descreve melhor o comportamento observado, sendo então, os valores a serem utilizados no POR.

### 6.5 Aeração:

Os fatores de maior influência na taxa de transferência de oxigênio são:

- temperatura;
- concentração de oxigênio dissolvido;
- características do esgoto;
- caracterização do aerador e da geometria do reator.

A equação que representa matematicamente a vazão de ar no sistema de lodos ativados com aeração por ar difuso, discutida no item 5.2.2 do presente trabalho, é apresentada na eq.(5.30):

$$AFR = \frac{C_s \cdot OR}{\gamma \alpha (\beta C_s - C) (1.024)^{T_L - 20} \xi \rho} \quad (5.30)$$

Os parâmetros a serem definidos neste equacionamento são: fatores de correção para a aeração ( $\alpha$  e  $\beta$ ), concentração de OD no TA ( $C$ ), concentração de OD de saturação a 20°C ( $C_s$ ), temperatura do líquido no TA ( $T_L$ ), eficiência de transferência de oxigênio ( $\xi$ ), densidade do ar ( $\rho$ ), fração de peso de oxigênio no ar ( $\gamma$ ) e constante de correção de temperatura.

A influência da temperatura pode se dar quando, por exemplo, a temperatura se eleva implicando em uma redução na concentração de saturação  $C_s$ , o que, por sua vez, faz com que a taxa de transferência diminua. A constante de correção de temperatura usualmente é adotada como **1.024** (VON SPERLING, 1996), e o coeficiente teórico do OD de saturação a 20°C ao nível do mar é de **9.17 mg/l** (METCALF & EDDY, 1991). A temperatura média no líquido do tanque de aeração encontrada no banco de dados operacionais da ETE - Barueri foi de **24°C**.

Em condições estacionárias, quanto maior a concentração de OD no TA ( $C$ ) a ser mantida no reator, menor a taxa de transferência de oxigênio. Em sistemas de lodos ativados, a concentração de OD mantida no reator usualmente situa-se na faixa de 0.5 a 2.0 mg/l (METCALF & EDDY, 1991). Como nos dados da ETE - Barueri, apresentam como concentração média de OD no TA de **1.6 mg/l**, será empregado este valor no modelo de otimização.

Segundo METCALF & EDDY (1991), a densidade do ar a 20°C ( $\rho$ ) e a fração de peso do oxigênio no ar ( $\gamma$ ) são **1.2 kg/m<sup>3</sup>** e **0.232**, respectivamente.

A identificação de sais, matéria particulada e agentes tensoativos presentes no esgoto altera a concentração de saturação do líquido no reator. Esta influência pode ser quantificada através do seguinte fator de correção:

$$\beta = (\text{OD de saturação no líquido do reator}) / (\text{OD de saturação na água limpa a 20°C})$$

Os valores de  $\beta$  variam de 0.70 a 0.98 (METCALF & EDDY, 1991), sendo que no projeto original da ETE - Barueri foi usado o valor de 0.98. Assim, será adotado o valor de **0.98** para  $\beta$ .

O coeficiente de transferência de oxigênio é influenciado pelas características dos esgotos, bem como pela geometria do reator e grau de mistura. O fator de correção,  $\alpha$ , é expresso pela seguinte relação:

$$\alpha = (\text{Coef. de transferência de oxigênio, esgoto}) / (\text{Coef. de transferência de oxigênio, água})$$

Os valores típicos de  $\alpha$  variam de 0.40 a 0.80 nos sistemas de aeração por ar difuso (METCALF & EDDY, 1991), enquanto que no projeto original da ETE - Barueri foi usado o valor de 0.60. Portanto, será adotado o valor de **0.60** para  $\alpha$ .

O sistema de aeração por ar difuso é composto por difusores submersos no líquido, tubulações distribuidoras de ar, tubulações de transporte de ar, sopradores e outras unidades por onde o ar passa. O ar é introduzido próximo ao fundo do tanque, e o oxigênio é transferido ao meio líquido à medida que a bolha se eleva à superfície. Em geral, quanto menor o tamanho da bolha de ar, maior a área superficial disponível para a transferência de gases, ou seja, maior a eficiência de oxigenação. Por esta razão, os sistemas de aeração com bolhas finas são os mais eficientes na transferência de oxigênio. Segundo VON SPERLING (1996), a eficiência de transferência de oxigênio padrão média nos aeradores por ar difuso de bolhas finas varia de 10 a 30%. No projeto original da ETE - Barueri foi adotado o valor de **30%**, sendo este o valor adotado no POR.

#### 6.6 Adensador Gravitacional:

Através do banco de dados operacionais da ETE - Barueri, obteve-se que a concentração média dos SST do sobrenadante do AG ( $X_{T10}$ ) é de 5928 g/m<sup>3</sup>.

### 6.7 Digestor Anaeróbio:

Como descrito no item 5.2.5 do capítulo 5, foi admitida a taxa de estabilização como de 1ª ordem com relação aos sólidos voláteis degradáveis anaerobicamente. Baseado em um grande número de dados experimentais, TANG et al. (1987b) desenvolveu um modelo matemático em que o coeficiente da taxa de 1ª ordem está em função da temperatura de digestão:

$$K = r_1 \exp \left[ 7.675 \left( r_2 - \frac{1000}{T_d + 273} \right) \right] \quad (5.44)$$

As constantes da taxa de reação do DIG1  $r_1$  e  $r_2$  também foram determinadas por TANG et al. (1987b) como sendo **0.632** e **3.003**, respectivamente. Tais valores serão admitidos no presente trabalho.

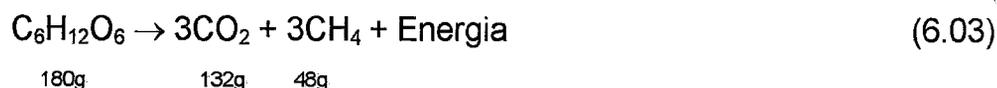
Segundo os dados operacionais da ETE - Barueri, tem-se:

- Temperatura afluyente ao DIG1: **24°C**;
- Temperatura média do ambiente: **23°C**;
- Altura total do DIG2: **11.40m**;
- Relação da área externa com o volume do DIG1: **0.34**;
- DBO<sub>5</sub> solúvel do sobrenadante do DIG2: **800g/m<sup>3</sup>**;
- SST do sobrenadante do DIG2: **6000g/m<sup>3</sup>**;
- Coeficiente de condução de calor (concreto revestido internamente com fibra de lã de vidro): **1.0 W/m<sup>2</sup>.°C**

De acordo com UBER et al. (1991b) um valor típico para a eficiência de troca de calor é de **0.85**.

Como o metano (CH<sub>4</sub>) produzido pela digestão anaeróbia na ETE - Barueri não tem aproveitamento energético, pois o mesmo é liberado para a atmosfera após ser queimado, o trabalho produzido (valor energético) pelo gás do digestor em unidades monetárias por 10<sup>6</sup> kJ é **zero**.

O coeficiente de produção de metano pode ser calculado a partir da conversão de  $\text{DBO}_L$  em  $\text{CH}_4$ , ao supor que o conjunto inicial é glicose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  (METCALF & EDDY, 1991). Assim sob condições anaeróbias a glicose é convertida em dióxido de carbono e metano:



Em seguida o oxigênio entra em ação para oxidar o metano em dióxido de carbono e água:



Assim, a conversão de  $\text{DBO}_L$  em  $\text{CH}_4$  em kg é:

$$\frac{\text{Kg CH}_4}{\text{Kg DBO}_L} = \frac{48/180}{192/180} = 0,25$$

Portanto, para cada kg de  $\text{DBO}_L$  convertida se formam 0,25kg de  $\text{CH}_4$ . Então o volume equivalente de 0,25kg de  $\text{CH}_4$  produzidos a partir da estabilização de 1kg de  $\text{DBO}_L$  é:

$$V_{\text{CH}_4} = (0,25\text{kg}) \cdot (10^3\text{g/Kg}) \cdot \frac{1\text{ mol} \cdot 22,4\ell}{16\text{g.mol}} \cdot (10^3\ell/\text{m}^3)^{-1} = 0,35\text{m}^3 \text{ CH}_4$$

Assim, são produzidos **0,35m<sup>3</sup>** de  $\text{CH}_4$  por kg de  $\text{DBO}_L$ .

Como mencionado no item 5.2.5 a concentração da descarga do fundo do DIG2, também baseou-se na hipótese de adensamento diferencial, a qual é fundamentada na teoria de fluxo limite. Desta forma,  $X_{T14}$  pode ser calculada como:

$$X_{T14} = [\delta a_d (n_d - 1)]^{1/n_d} \cdot \left( \frac{n_d}{n_d - 1} \right) \cdot \left( \frac{A_d}{Q_{14}} \right)^{1/n_d} \quad (5.50)$$

Segundo UBER et al. (1991b) e TANG et al. (1987b), um valor usual para o fator de redução da velocidade de sedimentação  $\delta$  é de **2.5**. Assim será adotado este valor no POR. As variáveis  $a_d$  e  $n_d$  são as constantes de sedimentação para o lodo digerido que é adensado no digestor secundário.

Os dados da ETE - Barueri da concentração de SST no fundo do DIG2 ( $X_{T14}$ ), da área do DIG2 ( $A_d$ ) e da vazão da descarga do fundo do DIG2 ( $Q_{14}$ ), através de análise de regressão realizada pelo software EXCEL, foram usados para determinar as constantes de sedimentação  $a_d$  e  $n_d$  para o lodo digerido e adensado.

Plotados os dados da ETE - Barueri e a curva de ajuste, obteve-se a figura 19.

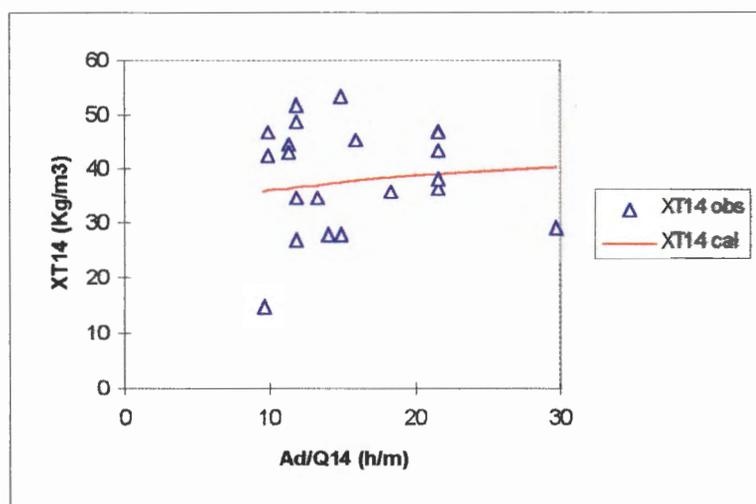


Figura 19 - Variação da concentração de SST do lodo digerido e adensado no DIG2 ( $X_{T14}$ ) com ( $A_d/Q_{14}$ ) observada na ETE - Barueri e a curva de ajuste

A eq.(5.50) com os valores de UBER et al. (1991b) em conjunto com os dados da ETE - Barueri são representados graficamente na figura 20.

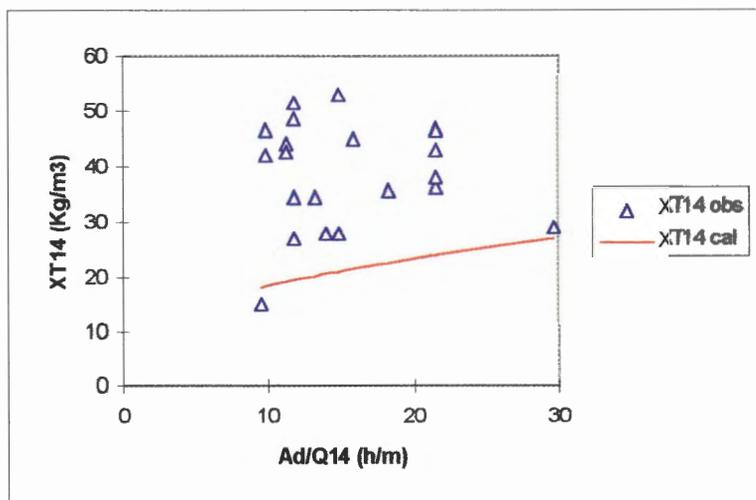


Figura 20 - Dados da figura 19 com os valores das constantes  $a_d$  e  $n_d$  de UBER et al. (1991b)

Na tabela 11 são apresentados os valores dos coeficientes  $a_d$  e  $n_d$  ajustados e sugeridos por UBER et al. (1991b).

Tabela 11 - Valores de  $a_d$  e  $n_d$

Parâmetro	Análise de Regressão	UBER et al. (1991b)
$a_d$	$2.430 \times 10^{13}$	292.6
$n_d$	9.750	2.9
Coef. de Determinação	0.013	---

Nas figuras 19 e 20, nota-se que o comportamento das curvas é o mesmo. Verifica-se através da figura 19 que os dados observados apresentam grande dispersão, a qual é responsável pelo coeficiente de determinação muito baixo (0.013). Realizando uma análise nos dados da SABESP constata-se que os dados das concentrações de SST referentes à descarga do lodo do DIG2 são pouco confiáveis (ver item 6.2.3). Assim, para manter certa coerência física (o modelo tem que retratar o comportamento físico observado), resolveu-se adotar os valores de  $a_d$  e  $n_d$  sugeridos por UBER et al. (1991b).



### 6.8 Filtro Prensa:

Segundo os dados operacionais da ETE - Barueri, tem-se os seguintes valores médios:

- Tempo de formação da torta por tempo de ciclo: **0.875**;
- Pressão aplicada: **1500000 N/m<sup>2</sup>**;
- Viscosidade do líquido filtrado: **0.00089 N.s/m<sup>2</sup>**;
- Tempo de um ciclo: **240 min**;
- Resistência específica do lodo: **1,56.10<sup>12</sup> m/kg**;
- Concentração de SST do líquido filtrado (sobrenadante): **4855 g/m<sup>3</sup>**;

### 6.9 Condições do Esgoto Afluente à ETE:

Também baseado no banco de dados operacionais da ETE - Barueri, obteve-se os seguintes valores médios para as características do esgoto afluente à estação de tratamento:

- Vazão: **16164 m<sup>3</sup>/h**;
- DBO<sub>5</sub> solúvel: **625 g/m<sup>3</sup>**;
- Concentração da biomassa ativa: **26 g/m<sup>3</sup>**;
- Concentração de SSV biodegradáveis: **521 g/m<sup>3</sup>**;
- Concentração de SSV inertes: **260 g/m<sup>3</sup>**;
- Concentração de sólidos suspensos fixos: **260 g/m<sup>3</sup>**.

## 7 APLICAÇÃO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

Como relatado anteriormente o sistema a ser estudado é a estação de tratamento de esgotos de Barueri (ETE - Barueri), cuja configuração esquemática foi apresentada na figura 07. E, as unidades de tratamento que compõem o sistema são: decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário, adensador gravitacional, digestores anaeróbios (primário e secundário) e filtro prensa.

Este capítulo tratará da aplicação do projeto ótimo robusto (POR) na operação da ETE - Barueri, que é um sistema de tratamento secundário por lodos ativados. Tal sistema é altamente não linear e contém 55 parâmetros.

### 7.1 Estrutura do Projeto Ótimo Robusto na ETE - Barueri:

A robustez do sistema de tratamento em estudo é a sensibilidade, em regime permanente, da DBO e da concentração de SST às variações de 55 valores dos parâmetros do modelo. O POR também é usado para gerar alternativas de operação que representam a relação entre o custo anual total (CT) e a robustez. Com isto, é esperado representar mais consistentemente a variação da incerteza das condições operacionais.

Analisando as eqs.(5.13) a (5.16), observa-se que o projeto ótimo robusto aplicado às estações de tratamento de esgotos por lodos ativados pode ter a seguinte estrutura, ao supor que a função objetivo é a soma ponderada da robustez da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do efluente com a robustez da concentração dos sólidos suspensos totais (SST) do efluente da ETE:

$$\min_{x,y} \alpha \cdot R(\text{DBO}') + (1-\alpha) \cdot R(\text{SST}') \quad (7.01)$$

sujeito a:

$$h(x, y, \hat{u}) = 0 \quad (7.02)$$

$$\text{DBO}(x, y, \hat{u}) \leq \text{DBO}^{\max} \quad (7.03)$$

$$\text{SST}(x, y, \hat{u}) \leq \text{SST}^{\max} \quad (7.04)$$

$$\text{CT}(x, y, \hat{u}) \leq \text{CT}^{\max} \quad (7.05)$$

onde:

$\alpha$  : peso constante da função objetivo ( $0 \leq \alpha \leq 1$ );

$$R(\text{DBO}') = \sum_{j=1}^{55} w_j \left| \frac{\partial \text{DBO}'}{\partial u_j} \right| = \sum_{j=1}^{55} w_j \left| \left( \frac{\partial \text{DBO}}{\partial x} \right)^T \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial \text{DBO}}{\partial u_j} \right| \quad (7.06)$$

$$R(\text{SST}') = \sum_{j=1}^{55} w_j \left| \frac{\partial \text{SST}'}{\partial u_j} \right| = \sum_{j=1}^{55} w_j \left| \left( \frac{\partial \text{SST}}{\partial x} \right)^T \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial \text{SST}}{\partial u_j} \right| \quad (7.07)$$

DBO : concentração da DBO<sub>5</sub> efluente (solúvel e suspensa) da ETE (g/m<sup>3</sup>);

SST : concentração dos SST efluente da ETE (g/m<sup>3</sup>);

CT : custo anual total (US\$/ano);

h : funções tecnológicas e equações de balanço de massa e vazão (ver tópico 5.2) das unidades de tratamento, no número de 54 funções;

DBO' = DBO[x(y,u), y,  $\hat{u}$ ] : medida de performance reduzida que inclui a dependência implícita da DBO sobre  $u_j$  através das variáveis de estado x;

SST' = SST[x(y,u), y,  $\hat{u}$ ] : medida de performance reduzida que inclui a dependência implícita dos SST sobre  $u_j$  através das variáveis de estado x;

$w_j$  : peso constante positivo associado com o parâmetro  $u_j$ .

Desta forma, em vez de minimizar o custo total com as medidas de robustez incluídas nas restrições, estas medidas de robustez (função objetivo) são minimizadas com o custo total inserido como uma restrição, limitado pelo parâmetro custo total máximo ( $CT^{\max}$ ). Com isto, é mais fácil serem obtidas as relações entre o custo e a robustez (UBER et al., 1991b).

As derivadas parciais da DBO' e dos SST' são avaliadas nos valores nominais dos parâmetros,  $\hat{u}_i$  e são funções do projeto. As medidas de robustez das eqs.(7.06) e (7.07) podem ser consideradas como heurísticas para a robustez do sistema, visto que elas são aproximadamente a variação máxima da DBO e de SST para variações nos valores nominais dos parâmetros de magnitude igual a  $w_j$ . Assim valores baixos de  $R(\text{DBO}')$  e  $R(\text{SST}')$  deverão ser associados com melhorias na robustez de DBO e SST.

O sistema de equações algébricas (na maioria não linear) promove resultados, no regime permanente, da remoção da concentração de SST e da DBO<sub>5</sub> solúvel do efluente da ETE. Tais equações são uma combinação de 54 modelos semi-teóricos e empíricos das unidades de tratamento bem como as relações de vazão e balanço de massa necessários.

As soluções para o modelo dependem dos valores relativos dos pesos nas eqs.(7.06) e (7.07). Os pesos deverão ser consistentes com a incerteza relativa nos valores dos parâmetros nominais, por exemplo,  $w_j = v \cdot \sigma_{u_j}$ , onde  $v$  é uma constante. Na ausência de informação estatística mínima sobre a incerteza relativa, um método é modelar os erros em  $\hat{u}$  como uma porcentagem fixa de cada valor do parâmetro. Foi adotado no presente trabalho esse método, com isto os valores dos pesos,  $w_j$ , foram igualados aos valores dos parâmetros nominais  $\hat{u}$ . Portanto, as medidas de robustez  $R(\text{DBO}')$  e  $R(\text{SST}')$  são equivalentes à soma da função performance absoluta normalizada dos coeficientes de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade normalizado para a função performance geral  $p'$  é definida como:  $\partial p' / (\partial u_j / \hat{u}_j) = \hat{u}_j \cdot (\partial p' / \partial u_j)$ , e os valores dos parâmetros são assumidos como positivos. Conseqüentemente, os valores de  $R(\text{DBO}')$  e  $R(\text{SST}')$  estão em ( $g/m^3$ ), e são interpretados matematicamente como estimativas de

primeira ordem das variações máximas da  $DBO_5$  e dos SST para 100% de erro nos valores dos parâmetros nominais  $\hat{u}$ .

Como o sistema é um modelo em regime permanente, os coeficientes de sensibilidade da performance reduzidos  $\partial DBO_5 / \partial u$  e  $\partial SST / \partial u$  são interpretados como variações locais da performance do sistema no regime permanente. Estes coeficientes de sensibilidade da performance são diferentes dos coeficientes que podem ser obtidos do modelo do sistema dinâmico, os quais são interpretados como as variações locais na performance do sistema dinâmico avaliados no tempo  $t$ . Esta hipótese, entretanto, garante que para variações razoáveis nos parâmetros do sistema, é válida. UBER et al. (1988) acreditam que tais problemas podem ser expressos adequadamente dentro de uma estrutura de regime permanente no projeto de ETEs. Baseado nestas considerações, a qualidade média da água do efluente, determinada pelo sistema em regime permanente usando os valores médios dos parâmetros, pode ser correlacionada com a qualidade da água do efluente do sistema dinâmico.

As variáveis de estado,  $x$ , representam as características do esgoto (fase líquida e sólida) nos vários pontos de controle da ETE - Barueri. Tais características são vazão, concentração de biomassa ativa, concentração de  $DBO_5$  solúvel, concentração de SSV biodegradáveis, concentração de SSV inertes, concentração de sólidos suspensos inorgânicos ou fixos, e concentração de sólidos suspensos totais. Outras variáveis de estado relatam mais fundamentalmente a performance das unidades de tratamento, tais como os tempos médios de residência celular do digestor primário e do lodo ativado e, o tempo de detenção hidráulica no tanque de aeração. Tais variáveis de estado são muitas vezes usadas na prática como variáveis identificadoras do processo empregado no projeto, e são denominadas de parâmetros de projeto. Os parâmetros de projeto e seus respectivos símbolos são listados na tabela 12. Por conveniência na apresentação dos resultados, alguns parâmetros que apesar de não serem variáveis de estado são derivados das mesmas.

Tabela 12 - Parâmetros de projeto

Variável	Símbolo
taxa de aplicação superficial do DP (m/h)	OR <sub>p</sub>
relação alimento/microorganismo * (kg DBO <sub>5</sub> / Kg SSVLM.dia)	F/M
carga orgânica no TA * (kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> .dia)	L <sub>a</sub>
concentração de SSV no líquido misturado * (g/m <sup>3</sup> )	SSVLM
taxa de recirculação * (%)	r
tempo de detenção hidráulica no TA (d)	θ
tempo médio de residência celular dos lodos ativados (h)	θ <sub>c</sub>
taxa de aplicação superficial no DS * (m/h)	OR <sub>s</sub>
carga de sólidos no DS * (kg / m <sup>2</sup> .h)	L <sub>s</sub>
carga de sólidos no AG (kg / m <sup>2</sup> .h)	L <sub>g</sub>
tempo médio de residência celular no DIG1 (d)	θ <sub>d</sub>
carga de sólidos no DIG2 (kg / m <sup>2</sup> .h)	L <sub>d</sub>
rendimento do filtro prensa (kg / m <sup>2</sup> .h)	L <sub>r</sub>

Nota:

\* variáveis derivadas das variáveis do modelo computacional

Os valores das variáveis de projeto,  $y$ , são assumidos fixos com relação aos coeficientes de sensibilidade da função performance  $\partial DBO'/\partial u$  e  $\partial SST'/\partial u$ , ou seja,  $y$  são as variáveis independentes. Assim, as variáveis de projeto deverão representar as dimensões físicas das unidades de tratamento, bem como a vazão de descarga do DS e a temperatura de digestão do lodo do DIG1, que são variáveis de controle mas são assumidas fixas para um dado regime operacional da estação. O modelo do sistema de tratamento de esgoto possui 9 graus de liberdade, e as variáveis de projeto com seus respectivos símbolos são apresentadas na tabela 13. Como a aplicação do projeto ótimo robusto na ETE - Barueri tem finalidade identificar operação ótima, então as capacidades físicas das unidades de tratamento da ETE já estão dimensionadas, não havendo necessidade de serem otimizadas. Assim, o produto das dimensões físicas unitárias com o número de unidades em operação, cujos valores são apresentados na tabela 04, resultará no valor da capacidade total (área ou volume) de cada tipo de unidade. Tais valores são também exibidos na tabela 13.

Tabela 13 - Variáveis de projeto

Variável	Símbolo	Valor
Área do DP (m <sup>2</sup> )	A <sub>p</sub>	10.260,00
Volume do TA (m <sup>3</sup> )	V <sub>t</sub>	78.208,00
Área do DS (m <sup>2</sup> )	A <sub>s</sub>	13.296,00
Vazão de descarga do DS (m <sup>3</sup> /h)	Q <sub>s</sub>	---
Área do AG (m <sup>2</sup> )	A <sub>g</sub>	2.642,00
Volume do DIG1 (m <sup>3</sup> )	V <sub>d</sub>	62.952,00
Temperatura de digestão do DIG1 (°C)	T <sub>d</sub>	---
Área do DIG2 (m <sup>2</sup> )	A <sub>d</sub>	1.710,60
Área do FP (m <sup>2</sup> )	A <sub>r</sub>	3.240,00

Nota:

\* Variável a ser determinada pelo projeto ótimo robusto.

Para a solução das equações do modelo são necessários os valores de 55 parâmetros  $u$  (considerados na análise de sensibilidade), dentre os quais estão presentes as condições do esgoto afluente à ETE, coeficientes cinéticos e coeficientes de regressão associados com modelos empíricos das unidades de tratamento (ver capítulo 6). Estes valores são incertos por várias razões, como por exemplo, a variabilidade natural, a falta de representatividade de algumas equações semi-empíricas, dados insuficientes e erros de medidas. Os parâmetros,  $u$ , do modelo e os valores nominais,  $\hat{u}$ , assumidos são indexados e listados por unidades de tratamento na tabela 14. Estes valores nominais foram obtidos por uma das seguintes formas:

- Relatórios da operação da ETE - Barueri (1994);
- Dados teóricos ou recomendados por METCALF & EDDY (1991);
- Dados recomendados por VON SPERLING (1995, 1996);
- Dados recomendados por UBER et al. (1991b);
- Dados recomendados por TANG et al. (1987b).

A estimativa e a justificativa dos valores dos parâmetros da tabela 14 foram apresentadas no capítulo 6 do presente trabalho.

Tabela 14 - Parâmetros u do modelo

índice i	Nome do Parâmetro, $u_i$	Valor Nominal $\hat{u}_i$
<i>Sedimentação Primária</i>		
1	constante do modelo de Voshel-Sak, $v_1$	0.158 <sup>a</sup>
2	constante do modelo de Voshel-Sak, $v_2$	0.232 <sup>a</sup>
3	constante do modelo de Voshel-Sak, $v_3$	0.098 <sup>a</sup>
<i>Características de Sedimentação do Lodo</i>		
4	constante de decantação do DS, $a_w$	16.614 <sup>a</sup>
5	constante de sedimentação do DP, $a_p$	17.007 <sup>a</sup>
6	constante de regressão do modelo de adensamento, $a_2$	2.500 <sup>c</sup>
7	constante de decantação do DS, $n_w$	2.031 <sup>a</sup>
8	constante de sedimentação do DP, $n_p$	2.478 <sup>a</sup>
<i>Cinética do Sistema de Lodos Ativados</i>		
9	coeficiente de produção máxima, $Y$ (Kg célula/Kg DBO <sub>5</sub> )	0.49 <sup>a</sup>
10	constante de velocidade média, $K_s$ (g DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> )	60 <sup>a</sup>
11	taxa máxima de utilização do substrato, $k$ (d <sup>-1</sup> )	5.0 <sup>a</sup>
12	coeficiente de decaimento endógeno, $b$ (d <sup>-1</sup> )	0.075 <sup>a</sup>
13	fração de células microbianas degradáveis, $f$	0.77 <sup>a</sup>
14	conversão, $C_{SSV}$ (g DBO <sub>L</sub> / g SSV)	1.42 <sup>d</sup>
15	conversão, $C_{DBO}$ (g DBO <sub>L</sub> / g DBO <sub>5</sub> )	1.5 <sup>d</sup>
<i>Sedimentação Secundária</i>		
16	constante do modelo de Chapman, $c_1$	5.69 <sup>c</sup>
17	constante do modelo de Chapman, $c_2$	0.00403 <sup>c</sup>
18	constante do modelo de Chapman, $c_3$	11.91 <sup>c</sup>
<i>Aeração</i>		
19	fator de correção para a aeração, $\alpha$	0.6 <sup>a</sup>
20	fator de correção para a aeração, $\beta$	0.98 <sup>a</sup>
21	concentração de OD no TA, $C$ (g/m <sup>3</sup> )	1.6 <sup>a</sup>
22	concentração de OD de saturação a 20°C, $C_s$ (g/m <sup>3</sup> )	9.17 <sup>b</sup>
23	temperatura do TA, $T_L$ (°C)	24.0 <sup>a</sup>
24	eficiência de transferência de oxigênio, $\xi$	0.30 <sup>a</sup>
25	densidade do ar, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1.2 <sup>b</sup>
26	fração de peso do oxigênio no ar, $\gamma$	0.232 <sup>b</sup>
27	constante de correção de temperatura	1.024 <sup>d</sup>
<i>Adensador Gravitacional</i>		
28	SST do sobrenadante do AG, $X_{T10}$ (g/m <sup>3</sup> )	5928 <sup>a</sup>
<i>Digestor Anaeróbio</i>		
29	constante da taxa de reação do DIG1, $r_1$	0.632 <sup>e</sup>
30	constante da taxa de reação do DIG1, $r_2$	3.003 <sup>e</sup>
31	temperatura afluyente do DIG1, $T_0$ (°C)	24.0 <sup>a</sup>
32	coeficiente de produção de metano (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg DBO <sub>L</sub> )	0.35 <sup>b</sup>
33	temperatura média do ambiente, $T_s$ (°C)	23.0 <sup>a</sup>
34	eficiência de troca de calor, $\epsilon$	0.85 <sup>c</sup>
35	coeficiente de condução de calor, $U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1.0 <sup>a</sup>
36	relação da área externa com o volume do DIG1, $a$	0.34 <sup>a</sup>
37	trabalho do gás do DIG1 (US\$ / 10 <sup>6</sup> kJ)	0.0 <sup>a</sup>
38	DBO <sub>5</sub> solúvel do sobrenadante do DIG2, $S_{13}$ (g/m <sup>3</sup> )	800 <sup>a</sup>
39	fator de redução da velocidade de sedimentação, $\delta$	0.25 <sup>c</sup>

Tabela 14 - Parâmetros u do modelo (continuação)

índice i	Nome do Parâmetro, $u_i$	Valor Nominal $\hat{u}_i$
40	constante de decantação do lodo digerido, $a_d$	292.6 <sup>c</sup>
41	constante de decantação do lodo digerido, $n_d$	2.9 <sup>c</sup>
42	SST do sobrenadante do DIG2, $X_{T13}$ (g/m <sup>3</sup> )	6000 <sup>a</sup>
43	altura total do DIG2 (m)	11.4 <sup>a</sup>
<i>Filtro Prensa</i>		
44	tempo de formação da torta por tempo de ciclo, $\chi$	0.875 <sup>a</sup>
45	pressão aplicada, P (N/m <sup>2</sup> )	1500000.0 <sup>a</sup>
46	viscosidade do líquido filtrado, $\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	0.00089 <sup>a</sup>
47	tempo de um ciclo, t (min)	240.0 <sup>a</sup>
48	resistência específica do lodo, R (m/Kg)	1.56x10 <sup>12</sup> <sup>a</sup>
49	SST do líquido filtrado, $X_{T15}$ (g/m <sup>3</sup> )	4855 <sup>a</sup>
<i>Condições do Esgoto Afluente à ETE</i>		
50	Vazão, $Q_0$ (m <sup>3</sup> /h)	16164 <sup>a</sup>
51	DBO <sub>5</sub> solúvel, $S_0$ (g/m <sup>3</sup> )	625 <sup>a</sup>
52	Concentração da biomassa ativa, $X_{A0}$ (g/m <sup>3</sup> )	26 <sup>a</sup>
53	Concentração de SSV biodegradáveis, $X_{D0}$ (g/m <sup>3</sup> )	521 <sup>a</sup>
54	Concentração de SSV inertes, $X_{I0}$ (g/m <sup>3</sup> )	260 <sup>a</sup>
55	Concentração de sólidos suspensos fixos, $X_{F0}$ (g/m <sup>3</sup> )	260 <sup>a</sup>

Nota:

<sup>a</sup> valor obtido de relatórios da ETE-Barueri (1994)<sup>b</sup> valor teórico ou recomendado por METCALF & EDDY (1991)<sup>c</sup> valor sugerido por UBER et al. (1991b)<sup>d</sup> valor recomendado por VON SPERLING (1995, 1996);<sup>e</sup> valor recomendado por TANG et al. (1987b);

## 7.2 Estratégia de Otimização:

A otimização foi realizada em um microcomputador PC IBM 586 100MHz com 8 MBytes de memória RAM, usando a versão de dupla precisão do programa computacional GRG2/SC. O GRG2/SC é um código escrito em FORTRAN que soluciona problemas de programação não linear com restrições de sensibilidade (SCNLP), isto é, problemas de programação não linear com funções que dependem da sensibilidade do sistema às variações nos valores dos parâmetros do modelo. Tal programa foi obtido mediante contato com o professor James G. Uber da University of Cincinnati e o professor Leon S. Lasdon da University of Texas-Austin. O passo seguinte foi efetuar a compilação do código GRG2/SC para

microcomputadores, visto que havia sido feito por Uber somente para workstations tipo Apollo DN3000.

Assim, o GRG2/SC combina técnicas de análise de sensibilidade com o algoritmo do gradiente reduzido generalizado para otimização não linear. Os coeficientes de sensibilidade são calculados e atualizados automaticamente pelo sistema definido pelas funções tecnológicas e variáveis de estado. Estes coeficientes, no caso do projeto ótimo robusto aplicado à ETE - Barueri, são introduzidos na função objetivo do modelo. Para o GRG2/SC é necessária a construção de quatro subrotinas que avaliam as funções do problema e suas derivadas e, um arquivo de dados que determina as características do problema, opções do algoritmo e tolerâncias. As subrotinas são as seguintes:

- GCOMP: nesta subrotina são escritas as funções tecnológicas, performance e de custo do problema. E, dados os valores das variáveis e parâmetros do modelo, são retornados os valores de todas essas funções;
- PARSH: em tal subrotina são geradas as derivadas parciais de primeira ordem de todas as funções contidas na subrotina GCOMP com relação às variáveis do modelo. Assim, as derivadas parciais são determinadas analiticamente;
- SGCOMP: nesta subrotina estão contidas as funções baseadas na sensibilidade do sistema. Como a aplicação do presente trabalho se trata do projeto ótimo robusto, então, nesta subrotina são escritas as medidas de robustez do sistema em função das medidas de performance (DBO e SST);
- SPARSH: em tal subrotina são escritas as derivadas parciais de primeira ordem com relação a todas as funções baseadas na sensibilidade, declaradas na subrotina SGCOMP, com relação às variáveis e coeficientes de sensibilidade do modelo. Assim, tais derivadas são calculadas analiticamente.

O arquivo de dados, intitulado GCOMPWW.DAT, foi empregado para discriminar várias características tais como: dimensão do problema, índice e tipos de funções, índice e tipos de funções baseadas na sensibilidade, valores iniciais das variáveis, contorno das variáveis, índice das funções e variáveis de estado, valores dos parâmetros, contorno dos parâmetros, índice dos parâmetros em que os coeficientes de sensibilidade são necessários, nome das funções, variáveis e parâmetros e, várias opções de algoritmos e tolerâncias.

Segundo UBER et al. (1988), em ETEs a otimização tem como obstáculos as dificuldades numéricas e a presença de vários ótimos locais. As dificuldades numéricas existem principalmente devido ao alto número de restrições de igualdade não lineares, visto que cada mudança nos valores das variáveis requer a solução de um sistema não linear. O ótimo local existe devido a alguns componentes da função custo do sistema não serem suaves e levemente descontínuos em vários pontos, e também devido ao sistema de equações não lineares.

UBER et al. (1988) também afirmam que um método prático para a solução de problemas de programação não linear complexos é o emprego de vários pontos iniciais diferentes na região das variáveis do modelo. Como cada solução corresponde a um diferente ponto inicial, a mesma auxilia na definição das características do problema e na determinação do nível apropriado de confiança dos resultados. Se, por exemplo, vários pontos iniciais convergirem aproximadamente à mesma solução, então esta solução é uma aproximação de um ótimo local, mesmo se as condições ótimas necessárias não são satisfeitas numericamente. Além disso, em uma forma heurística, quando os pontos iniciais abrangem uma ampla região no espaço viável do sistema, a probabilidade que o ótimo local identificado seja um ótimo global é maior. No presente trabalho, foram empregados quatro diferentes pontos iniciais e, cada operação ótima discutida é a melhor solução obtida usando estes pontos iniciais.

### 7.3 Geração de Alternativas de Operação:

Neste item serão analisadas as relações entre o custo anual total máximo ( $CT^{max}$ ), a robustez de DBO ( $R_{DBO}$ ) e a robustez de SST ( $R_{SST}$ ) para o fator de ponderação  $\alpha$  igual a 0,  $\frac{1}{2}$  e 1. O intervalo do  $CT^{max}$  analisado é de 1.750.300,00 a 2.625.450,00 US\$/ano com incrementos de 218.790,00 US\$/ano em cada fator de ponderação  $\alpha$ . Portanto, em cada análise são realizadas as interações entre o custo e as robustez de DBO e SST e, as relações entre as características de cada alternativa de operação em função dos vários graus de custo e robustez. Nas restrições de qualidade da água do efluente da ETE - Barueri a DBO máxima permitida e a concentração de SST máxima permitida são de 60 mg/l, segundo o decreto estadual Nº 8468 do Estado de São Paulo.

A operação de custo mínimo é obtida ao minimizar o CT sujeito às equações governantes do modelo e as restrições de qualidade da água do efluente. Tal estratégia produziu CT em torno de 1.750.300,00 US\$/ano. A operação de custo mínimo servirá como base para comparação de  $R_{DBO}$  e  $R_{SST}$  para alternativas de operação com vários  $CT^{max}$ . De modo geral esta solução é inferior com relação à  $R_{DBO}$  ou  $R_{SST}$ . Analogamente, na maioria das vezes a estratégia de operação com  $\alpha=1$  é inferior com relação à  $R_{SST}$  e a com  $\alpha=0$  é inferior com relação à  $R_{DBO}$ .

Detalhes dos resultados das estratégias de operação com  $\alpha = 1, 0$  e  $\frac{1}{2}$  são apresentados nas tabelas 15, 16 e 17, respectivamente. Nestas tabelas constam os parâmetros e as variáveis de projeto (constantes de tabelas 12 e 13) agrupados nas respectivas unidades de tratamento, os valores dos critérios CT,  $R_{DBO}$ , e  $R_{SST}$  e os valores das medidas de qualidade do efluente representadas na forma de DBO e SST. Nas tabelas 15, 16 e 17 também é exibido um resumo estatístico de cada alternativa sobre o ponto inicial determinado (melhor dos quatro pontos iniciais) para a operação ótima, o tempo de processamento em um PC IBM 586 100MHz, e o critério de parada do modelo. KT significa que devido as condições necessárias de Kuhn-Tucker, o ótimo local é satisfeito, enquanto que FC

significa que o critério de parada foi o da variação fracional da função objetivo. Quando determinado projeto atinge no final da otimização um  $CT$  inferior ao  $CT^{\max}$  estipulado para este projeto, tal solução é dita também inferior, e não é considerada nas análises subsequentes.

### 7.3.1 Fator de Ponderação $\alpha = 1$ :

As relações da tabela 15 entre o custo anual total máximo de operação,  $CT^{\max}$ , e as medidas de robustez,  $R_{DBO'}$  e  $R_{SST'}$ , para  $\alpha$  igual a 1, são apresentadas na figura 21. Estes resultados mostram uma significativa relação entre  $CT$  e  $R_{DBO'}$ , pois o custo variou de 1750300,00 a 2625450,00 US\$/ano enquanto que a  $R_{DBO'}$  foi de 103 a 338 mg/l. Como pode-se observar na vizinhança da operação de custo mínimo, o custo marginal para a melhora da robustez de DBO é baixo, visto que um aumento do custo de apenas 12,50% resultou numa redução apreciável  $R_{DBO'}$ , da ordem de 47%, significando um acréscimo na robustez da operação em termos de DBO efluente. Enquanto a solução se torna mais robusta com relação à DBO, a sensibilidade de SST sofre um aumento, tornando-se assim uma alternativa de operação inferior com relação à  $R_{SST'}$ , embora no início a mesma tenha reduzido.

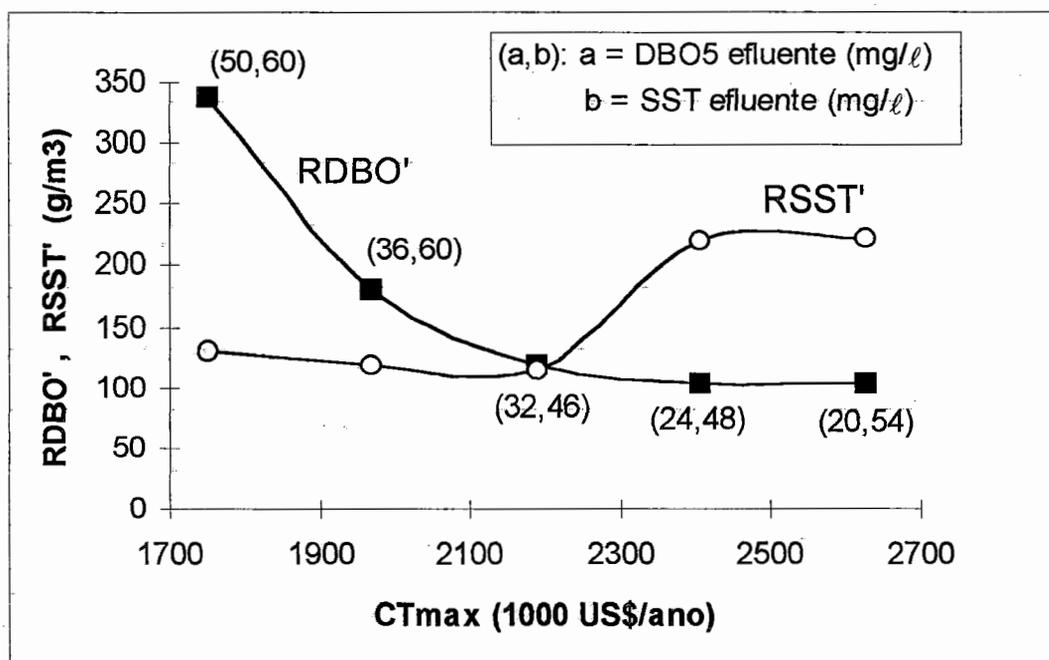


Figura 21 - Relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez para  $\alpha = 1$

Tabela 15 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri  
com  $\alpha = 1$

Variável	Operação de Custo Mínimo	CT <sup>max</sup> (10 <sup>3</sup> US\$/ano)			
	1750.30	1969.09	2187.88	2406.66	2625.45
<i>Decantador Primário</i>					
OR <sub>p</sub> (m/h)	1.88	1.81	1.58	1.59	1.54
<i>Tanque de Aeração</i>					
F/M (Kg DBO <sub>5</sub> / Kg SSVLM.dia)	0.97	0.44	0.43	0.37	0.36
La (Kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> .d)	3.68	3.68	3.70	3.59	4.32
SSVLM (g/m <sup>3</sup> )	3803.49	8456.30	8706.61	9705.97	12149.16
r (%)	15.29	28.61	41.72	44.10	64.33
θ (h)	4.80	4.84	4.78	4.75	4.21
θ <sub>c</sub> (d)	2.57	5.10	6.16	8.15	8.18
<i>Decantador Secundário</i>					
Q <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> /h)	2520.00	4624.02	7951.20	7279.20	10781.40
OR <sub>s</sub> (m/h)	1.22	1.18	1.38	1.20	1.22
L <sub>s</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	16.99	7.25	22.09	14.23	7.17
<i>Adensador Gravitacional</i>					
L <sub>g</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.07	0.70	0.89	2.00 <sup>*</sup>	2.00 <sup>*</sup>
<i>Digestor Anaeróbio</i>					
T <sub>d</sub> (°C)	26.27	30.51	24.60	28.26	38.06
θ <sub>d</sub> (d)	8.45	8.53	15.41	18.07	25.65
L <sub>d</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.16	1.00	1.15	0.91	0.85
<i>Filtro Prensa</i>					
L <sub>f</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	0.34	0.35	0.41	0.43	0.45
<i>Objetivos</i>					
CT (10 <sup>3</sup> US\$/ano)	1750.30	1969.09	2187.88	2406.66	2625.45
R <sub>DBO</sub> (g/m <sup>3</sup> )	337.76	180.06	119.80	104.06	103.37
R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	132.10	120.21	116.26	221.04	223.71
R <sub>DBO</sub> + R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	469.86	300.27	236.06	325.10	327.08
<i>Qualidade do Efluente</i>					
DBO (g/m <sup>3</sup> )	49.85	35.66	32.30	24.06	20.24
SST (g/m <sup>3</sup> )	60.00 <sup>*</sup>	60.00 <sup>*</sup>	46.44	48.37	54.21
<i>Resumo Estatístico</i>					
Ponto Inicial	4	1	4	1	1
CPU (min)	2.27	1.78	2.10	1.80	2.50
Critério de Parada <sup>+</sup>	KT	FC	FC	KT	KT

Nota:

A<sub>p</sub>=10260m<sup>2</sup>; V<sub>t</sub>=78208m<sup>3</sup>; A<sub>s</sub>=13296m<sup>2</sup>; A<sub>g</sub>=2642m<sup>2</sup>; V<sub>d</sub>=62952m<sup>3</sup>; A<sub>d</sub>=1710,6m<sup>2</sup>; A<sub>f</sub>=3240m<sup>2</sup>;

<sup>+</sup> KT: Kuhn-Tucker, FC: variação fracional;

<sup>#</sup> Projeto inferior;

<sup>\*</sup> Valor da variável limitada pelo contorno.

A figura 21 também mostra que, diferentemente da operação de custo mínimo na aplicação do POR para  $\alpha=1$ , a concentração de SST efluente não atinge seu valor máximo permitido ( $60 \text{ mg/l}$ ) ao mesmo tempo a  $\text{DBO}_5$  efluente resultante é também sempre menor que aquela produzida pela operação de custo mínimo. Estes resultados estão de acordo com a operação realizada na prática em que devido a incerteza e a variabilidade natural, as alternativas de operação deverão ser executadas no sentido de melhorar os padrões de qualidade do efluente.

Para análise dos custos individuais, os custos anuais totais de operação do decantador primário,  $\text{CT}_p$ , do tanque de aeração,  $\text{CT}_{ta}$ , do decantador secundário,  $\text{CT}_s$ , e do tratamento da fase sólida,  $\text{CT}_{sl}$  são plotados na figura 22 contra os custos anuais totais obtidos da operação ótima. Observa-se que o custo anual total referente ao tratamento da fase sólida ( $\text{CT}_{sl}$ ) é predominante com relação às outras parcelas, fazendo com que esta porção seja o fator determinante da operação. O custo anual total referente à unidade do TA ( $\text{CT}_{ta}$ ) é insensível enquanto que as parcelas do  $\text{CT}_p$  (custo anual total referente a unidade do DP) e do  $\text{CT}_s$  (custo anual total referente a unidade do DS) oscilam de forma oposta no sentido de balancear a operação conjunta.

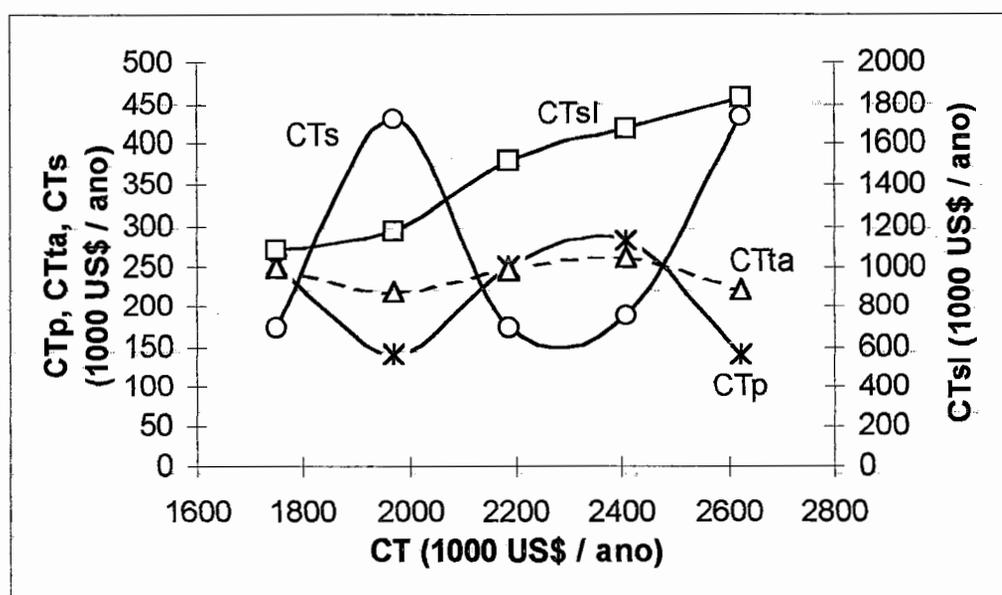


Figura 22 - Análise dos custos individuais  $\text{CT}_p$ ,  $\text{CT}_{ta}$ ,  $\text{CT}_s$  e  $\text{CT}_{sl}$  para  $\alpha = 1$

Examinando as variações nos valores dos parâmetros e variáveis de operação das fases líquida e sólida em diferentes alternativas apresentadas na tabela 15, nota-se que tais alternativas apresentam-se diferentes em relação à operação de custo mínimo.

Variações percentuais dos parâmetros de operação da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO}$  para  $\alpha = 1$  são apresentadas nas figuras 23 a 25. Esses parâmetros não foram esboçados em um único gráfico por questão de escala e melhor visualização para o leitor. As variações percentuais mostradas são relativas aos valores da operação de custo mínimo. Assim, os valores dos parâmetros de custo mínimo, denominados de  $x^*$  nas figuras, têm variações percentuais iguais a zero. Por exemplo, a figura 23 mostra que partindo da operação de custo mínimo para as soluções mais robustas (caminhando da direita para esquerda), a percentagem de variação da taxa de aplicação superficial do DS ( $OR_s$ ) cresce de -3% a 14% do valor referente à operação de custo mínimo. Como as alternativas de operação robustas foram geradas ao variar parametricamente o limite superior do custo anual total  $CT^{max}$ , o custo de operação aumenta nas figuras 23 a 25 à medida que a operação é cada vez mais robusta em termos de DBO.

A figura 23 mostra que a taxa de aplicação superficial do DP ( $OR_p$ ) apresenta queda com o aumento da robustez. Os outros parâmetros têm um comportamento variado em relação à robustez. O tempo de detenção hidráulica ( $\theta$ ) e a carga orgânica ( $L_a$ ) no tanque de aeração são relativamente constantes com exceção da operação de máxima robustez quando estes parâmetros assumem valores respectivamente, menor (-12%) e maior (17%) em relação a operação de custo mínimo.

Como apresentado nas figuras 24 e 25, a concentração de SSV no líquido misturado (SSVLM), a taxa de recirculação ( $r$ ) e o tempo médio de residência celular do lodo ativado ( $\theta_c$ ) aumentaram com o aumento de robustez de DBO, enquanto que a relação alimento / microorganismo (F/M) diminuiu. A taxa de aplicação superficial do DS,  $OR_s$ , (figura 23) e a carga de sólidos no DS,  $L_s$ , (figura 25) oscilam com  $R_{DBO}$ .

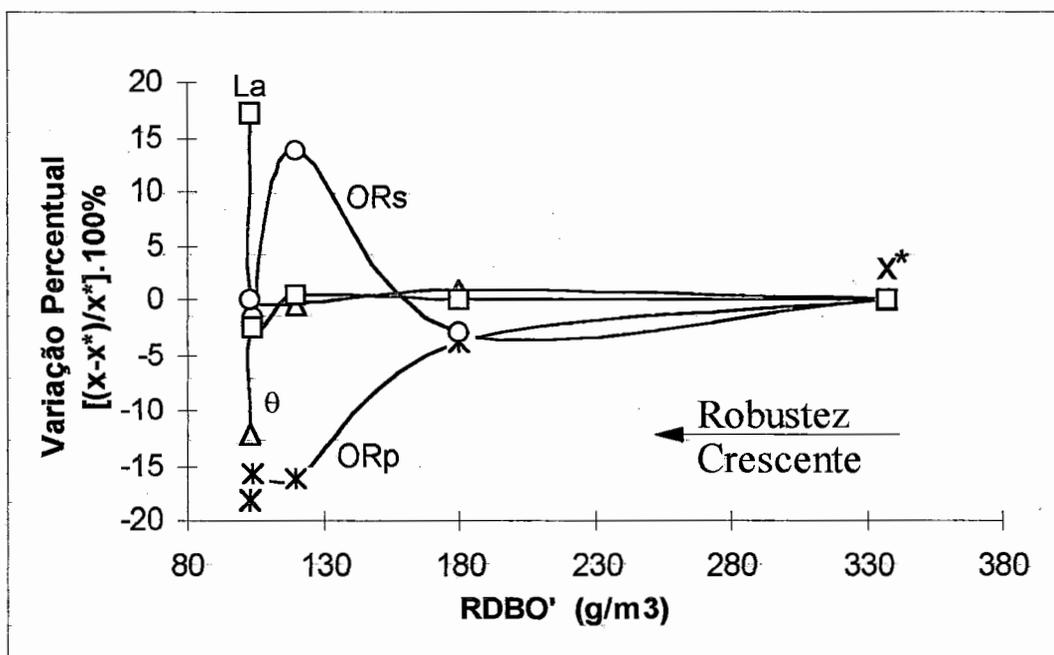


Figura 23 - Variações percentuais dos parâmetros  $OR_p$ ,  $La$ ,  $\theta$  e  $OR_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$

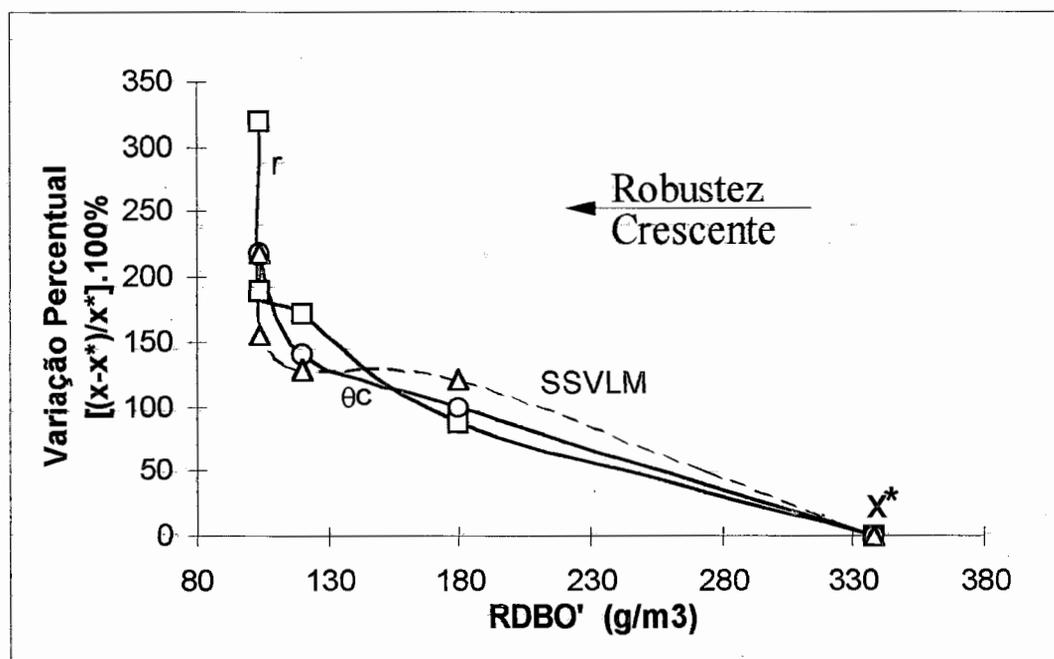


Figura 24 - Variações percentuais dos parâmetros  $SSVLM$ ,  $r$  e  $\theta_c$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$

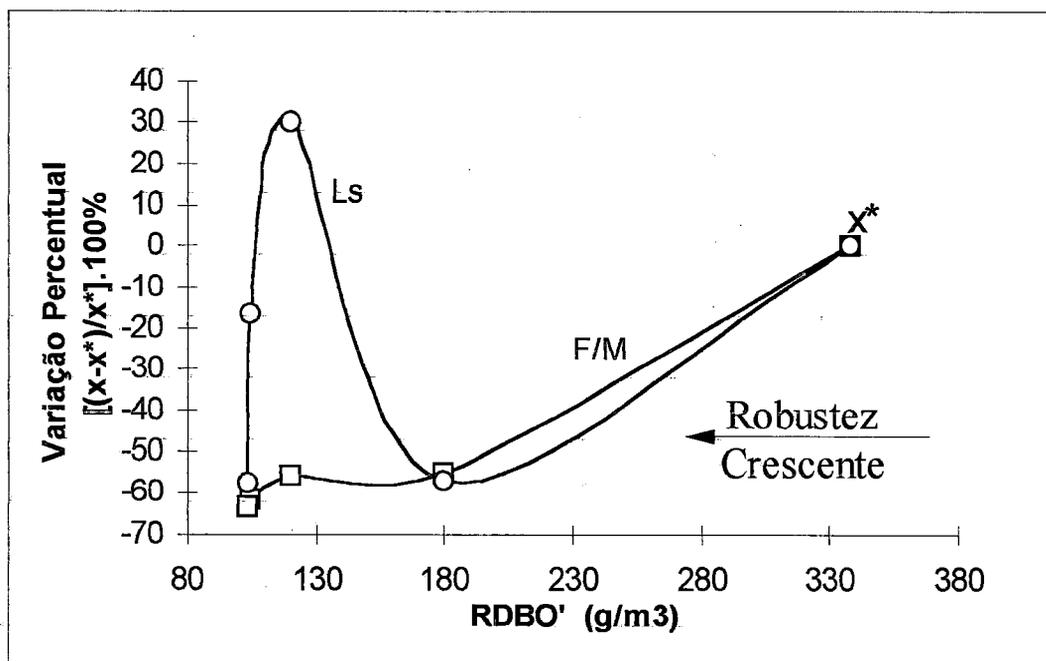


Figura 25 - Variações percentuais dos parâmetros F/M e  $L_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$

Talvez a curva mais notável mostrada seja a relação entre a robustez de DBO e o tempo médio de residência celular no TA ( $\theta_c$ ). Analisando a figura 24, observa-se que saindo da operação de custo mínimo,  $\theta_c$  aumentou de 2.6 para 8.2 dias (215%). Assim, pode-se concluir que o aumento em  $\theta_c$  está associado ao aumento da robustez de DBO, que é acompanhado pelo aumento de  $r$ .

Historicamente, os projetos de custo mínimo têm especificado valores menores de  $\theta_c$ , devido às interações entre  $\theta_c$  e os custos de aeração e sedimentação secundária (BERTHOUEX & POLKOWSKI, 1970; MIDDLETON & LAWRENCE, 1976; TARRER et al., 1976; TANG et al., 1987b). Portanto, os projetos mais robustos possuem  $\theta_c$  maiores, contrariamente aos projetos de custo mínimo. Os resultados sobre  $\theta_c$  encontrados aqui através do POR são consistentes com o intervalo de  $\theta_c$  de 5 a 15 dias recomendado por METCALF & EDDY (1991).

BERTHOUEX & POLKOWSKI (1970) investigaram os efeitos da incerteza nos parâmetros sobre os projetos de custo mínimo em lodos

ativados, e sugeriram que  $\theta_c$  deve ser aumentado (acima do valor requerido pelo projeto de custo mínimo) para melhorar a qualidade de sedimentação do sistema por lodos ativados. SUIDAN et al. (1983) ao analisarem os principais efeitos sobre as propriedades de sedimentação do lodo, concluíram que o valor de  $\theta_c$  é importante devido à sua relação com a sensibilidade (robustez) da concentração de  $\text{DBO}_5$  efluente.

As variações percentuais de parâmetros da fase sólida do tratamento em função de  $R_{\text{DBO}'}$  para  $\alpha = 1$  são exibidas nas figuras 26 e 27. Na figura 26 observa-se que a temperatura de digestão no DIG1 ( $T_d$ ) e o tempo médio de residência celular no DIG1 ( $\theta_d$ ) aumentam com o aumento da robustez de DBO quando  $\theta_c$  atinge valores maiores. A carga de sólidos no DIG2 ( $L_d$ ) não apresenta grande variação em relação à robustez de DBO. Ao analisar a figura 27, nota-se que o rendimento do FP ( $L_f$ ) aumenta gradualmente e a carga de sólidos no AG ( $L_g$ ) reduz-se (-35%) para depois aumentar (86%).

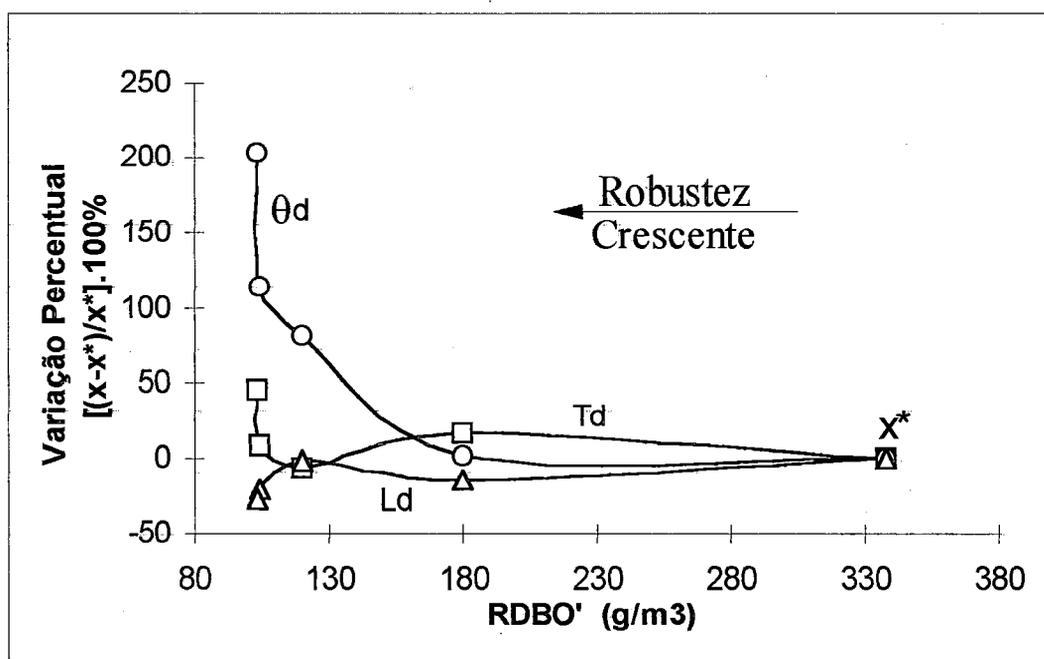


Figura 26 - Variações percentuais dos parâmetros  $T_d$ ,  $\theta_d$  e  $L_d$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{\text{DBO}'}$  para  $\alpha = 1$

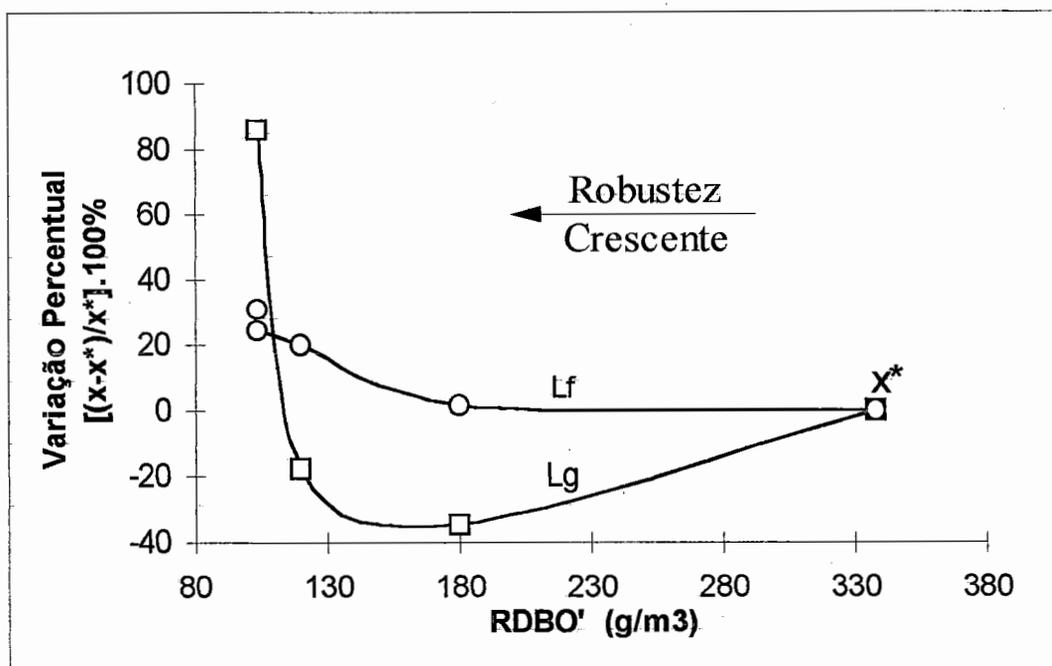


Figura 27 - Variações percentuais dos parâmetros  $L_g$  e  $L_f$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1$

### 7.3.2 Fator de Ponderação $\alpha = 0$ :

Na tabela 16 têm-se as relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez  $R_{DBO'}$  e  $R_{SST'}$ , as quais são esboçadas na figura 28. Para o fator de ponderação  $\alpha = 0$ , a robustez de SST é mais significativa. Partindo da operação de custo mínimo, um pequeno aumento de custo (12,50%) produz um decréscimo médio em  $R_{SST'}$  de 43,31% inicialmente. No entanto, maiores investimentos na operação não refletem maior robustez em termos de SST. Os resultados também mostram que embora se tenha melhoria na robustez de SST, a robustez de DBO tem um pequeno acréscimo, tornando-se assim uma solução inferior com relação à  $R_{DBO'}$ . As concentrações de  $DBO_5$  e SST efluente são reduzidas ao introduzir o critério de minimização de  $R_{SST'}$  como objetivo do modelo. Observa-se, entretanto, que a concentração de SST é reduzida a valores bem inferiores (em torno de 8 mg/l) ao padrão exigido (60 mg/l).

Tabela 16 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri  
com  $\alpha = 0$

Variável	Operação de Custo Mínimo	CT <sup>max</sup> (10 <sup>3</sup> US\$/ano)			
		1750.30	1969.09	2187.88	2406.66 <sup>#</sup>
<i>Decantador Primário</i>					
OR <sub>p</sub> (m/h)	1.88	1.60	1.60	1.57	1.58
<i>Tanque de Aeração</i>					
F/M (Kg DBO <sub>5</sub> / Kg SSVLM.dia)	0.97	0.98	0.95	0.51	0.51
La (Kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> .d)	3.68	3.68	3.69	3.63	3.62
SSVLM (g/m <sup>3</sup> )	3803.49	3771.39	3866.31	7086.35	7132.15
r (%)	15.29	14.87	13.50	13.22	10.67
θ (h)	4.80	4.81	4.83	4.83	4.83
θ <sub>c</sub> (d)	2.57	2.41	2.33	3.01	2.99
<i>Decantador Secundário</i>					
Q <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> /h)	2520.00	855.66	843.77	842.98	839.50
OR <sub>s</sub> (m/h)	1.22	1.33	1.21	1.21	1.21
L <sub>s</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	16.99	13.44	10.30	7.25	3.95
<i>Adensador Gravitacional</i>					
L <sub>g</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.07	1.40	1.67	1.67	1.40
<i>Digestor Anaeróbico</i>					
T <sub>d</sub> (°C)	26.27	36.26	35.76	38.06	38.03
θ <sub>d</sub> (d)	8.45	18.04	22.72	31.11	33.16
L <sub>d</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.16	1.12	0.99	0.70	0.500
<i>Filtro Prensa</i>					
L <sub>f</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	0.34	0.35	0.42	0.44	0.54
<i>Objetivos</i>					
CT (10 <sup>3</sup> US\$/ano)	1750.30	1969.09	2187.88	2355.90	2524.50
R <sub>DBO</sub> (g/m <sup>3</sup> )	337.76	354.93	357.31	355.42	371.71
R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	132.10	74.89	45.82	45.43	45.31
R <sub>DBO</sub> + R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	469.86	429.82	403.13	400.85	417.02
<i>Qualidade do Efluente</i>					
DBO (g/m <sup>3</sup> )	49.85	43.58	41.65	41.58	35.12
SST (g/m <sup>3</sup> )	60.00	12.47	7.70	7.67	7.66
<i>Resumo Estatístico</i>					
Ponto Inicial	4	3	3	4	1
CPU (min)	2.27	3.05	2.79	2.66	2.66
Critério de Parada <sup>+</sup>	KT	KT	KT	FC	FC

Nota:

A<sub>p</sub>=10260m<sup>2</sup>, V<sub>T</sub>=78208m<sup>3</sup>, A<sub>s</sub>=13296m<sup>2</sup>, A<sub>g</sub>=2642m<sup>2</sup>, V<sub>d</sub>=62952m<sup>3</sup>, A<sub>d</sub>=1710,6m<sup>2</sup>, A<sub>f</sub>=3240m<sup>2</sup>;

<sup>+</sup> KT: Kuhn-Tucker, FC: variação fracional;

<sup>#</sup> Projeto inferior;

<sup>\*</sup> Valor da variável limitada pelo contorno.

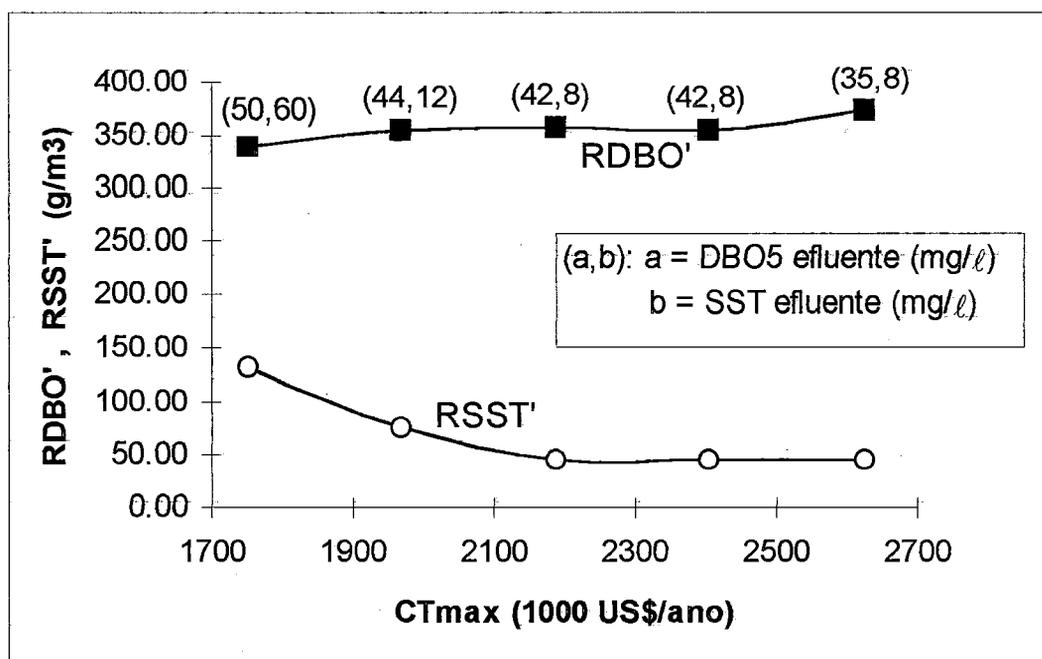


Figura 28 - Relações entre  $CT_{max}$  e as medidas de robustez para  $\alpha = 0$

É interessante comparar as operações indicadas pelos critérios que valorizam robustez em termos de DBO ( $\alpha = 1$ ) e SST ( $\alpha = 0$ ). Das figuras 21 e 28, vê-se que, para mesmo custo de operação, o critério de DBO gera alternativas bem superiores em relação ao critério de robustez.

Na análise dos custos individuais apresentada na figura 29, o  $CT_{si}$  continua predominante se tornando o custo mais efetivo, como na figura 22 quando  $\alpha = 1$ . O  $CT_s$  apenas aumenta e, o  $CT_p$  e o  $CT_{ta}$  diminui, sendo que o  $CT_p$  é o custo menos efetivo.

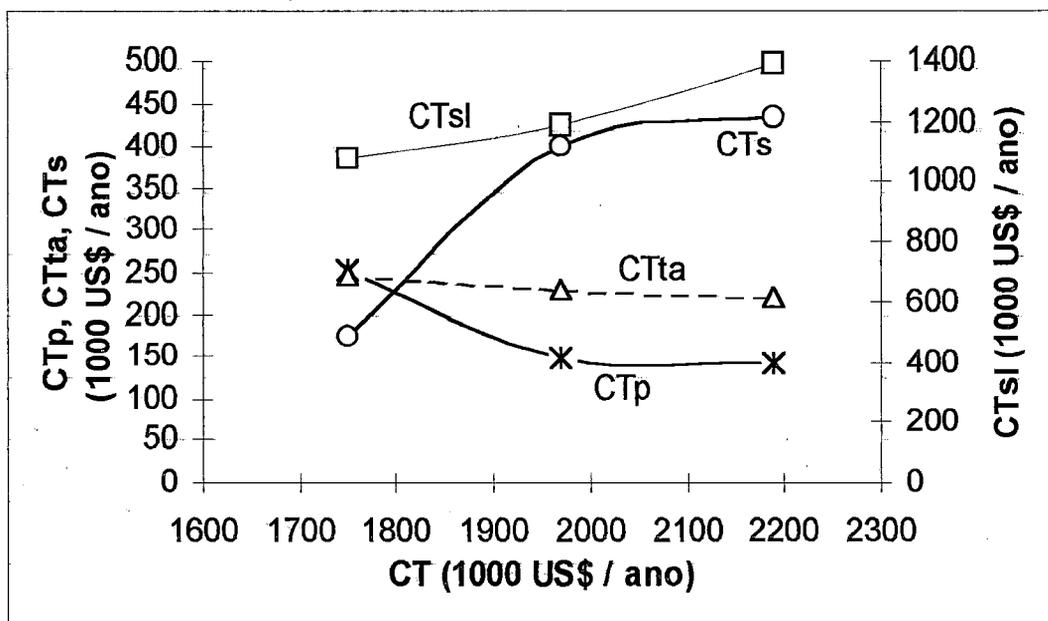


Figura 29 - Análise dos custos individuais  $CT_p$ ,  $CT_{ta}$ ,  $CT_s$  e  $CT_{sl}$  para  $\alpha = 0$

As variações em porcentagem dos parâmetros da fase líquida do tratamento em função de  $R_{SST}$  para  $\alpha = 0$  são exibidas graficamente nas figuras 30 a 32. Diferentemente da operação para DBO robusto, as figuras 31 e 32 mostram que  $\theta_c$ ,  $r$  e  $L_s$  diminuem com a melhoria de robustez em termos  $R_{SST}$ . Neste caso, o tempo de detenção hidráulica no TA ( $\theta$ ), a carga orgânica no TA ( $L_a$ ) e a relação alimento / microorganismo ( $F/M$ ) mantêm o mesmo valor obtido na operação de custo mínimo. As taxas de aplicação superficial no DP ( $OR_p$ ) e no DS ( $OR_s$ ) apresentam variação similar àquela observada no caso de  $\alpha = 1$ .

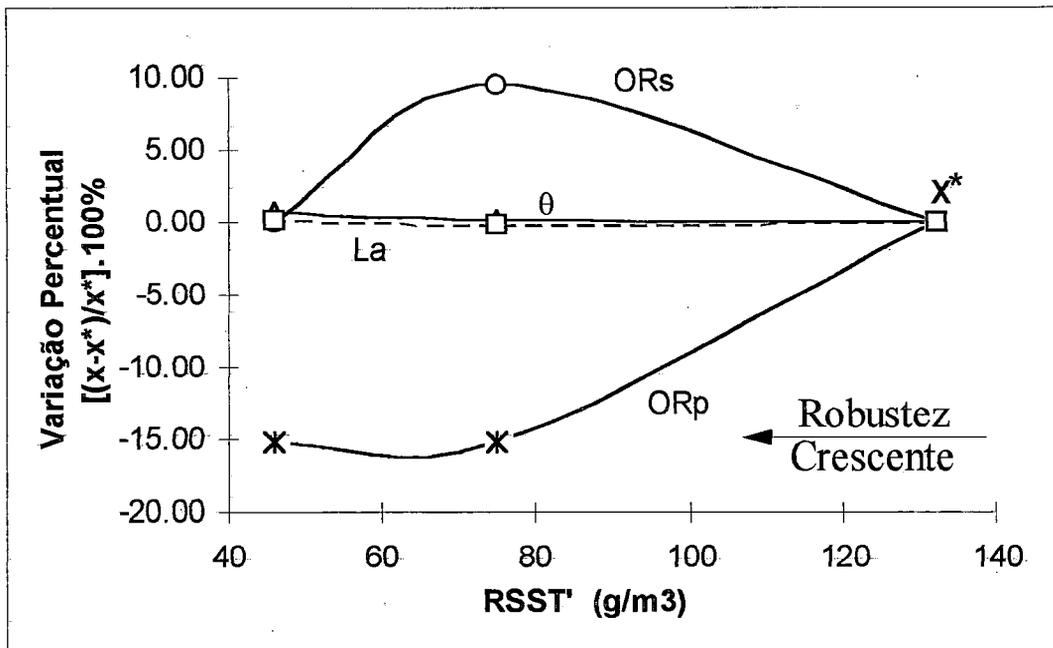


Figura 30 - Variações percentuais dos parâmetros  $OR_p$ ,  $La$ ,  $\theta$  e  $OR_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $RSST'$  para  $\alpha = 0$

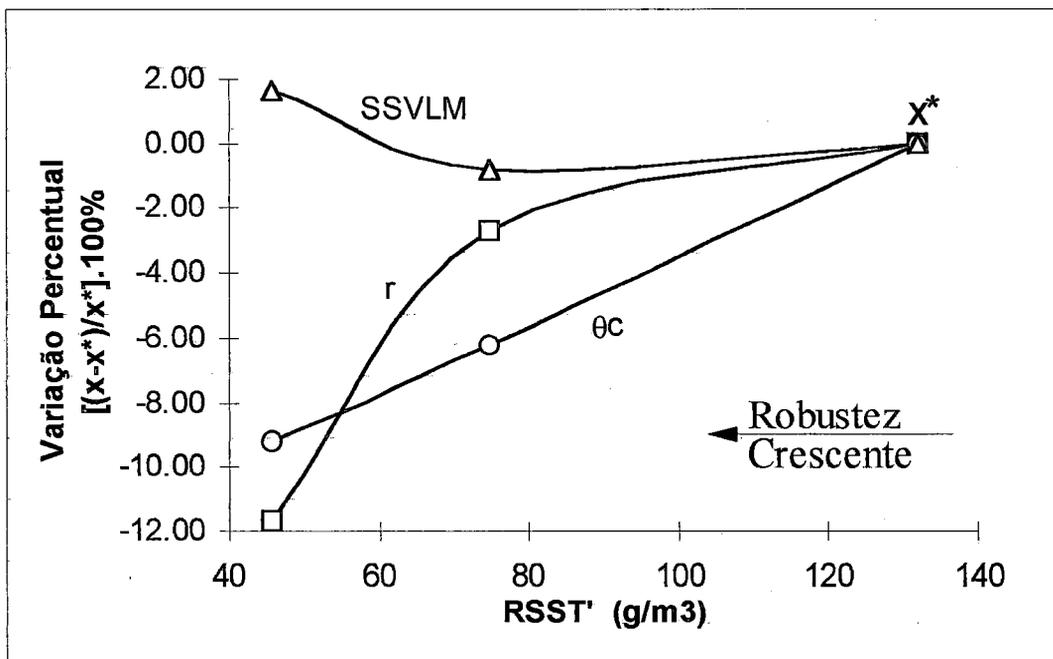


Figura 31 - Variações percentuais dos parâmetros  $SSVLM$ ,  $r$  e  $\theta_c$  da fase líquida do tratamento em função de  $RSST'$  para  $\alpha = 0$

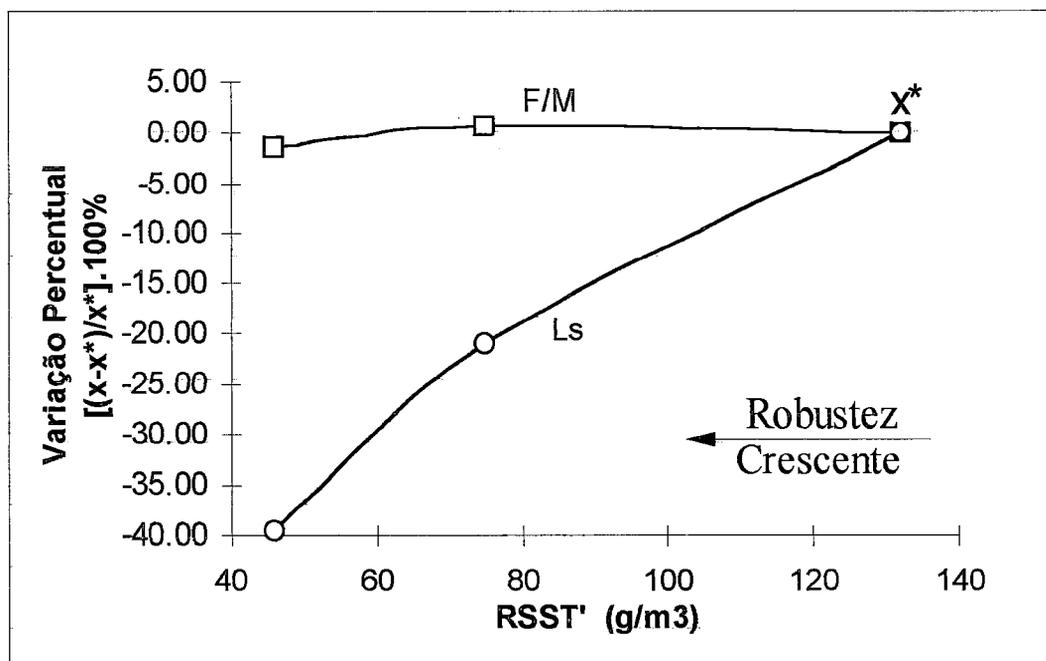


Figura 32 - Variações percentuais dos parâmetros  $F/M$  e  $L_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $RSST'$  para  $\alpha = 0$

Nas figuras 33 e 34 são mostradas as variações percentuais dos parâmetros da fase sólida do tratamento em função de  $RSST'$  para  $\alpha = 0$ . Pode-se observar que houve um aumento considerável de  $\theta_d$  e  $L_g$  com o aumento da robustez de SST. Apenas  $L_d$  registra um pequeno decréscimo com a robustez.

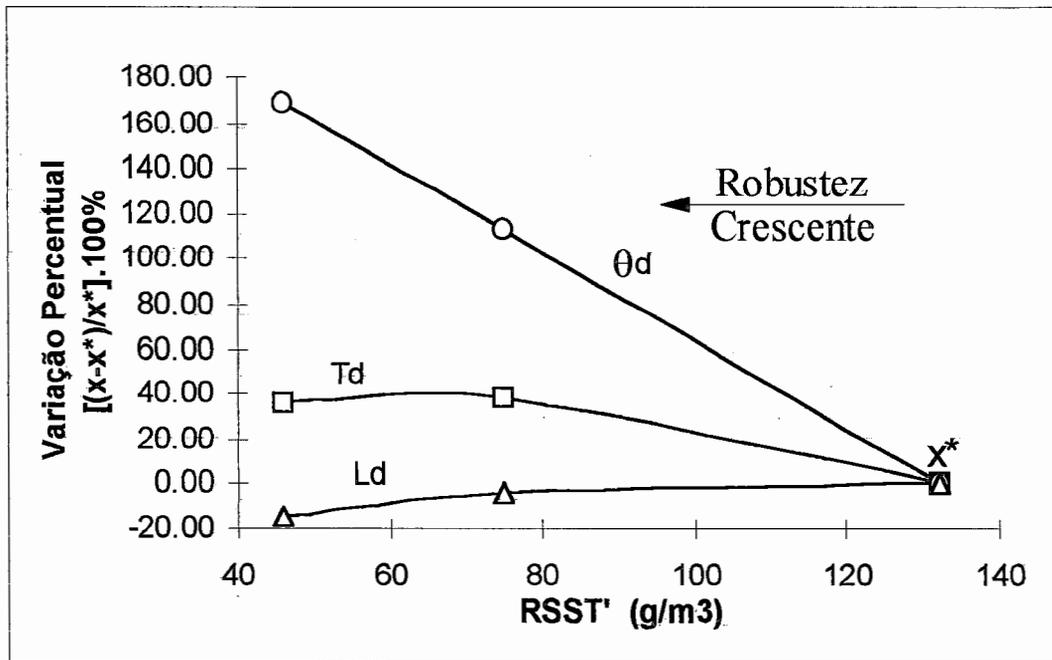


Figura 33 - Variações percentuais dos parâmetros  $T_d$ ,  $\theta_d$  e  $L_d$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{SST'}$  para  $\alpha = 0$

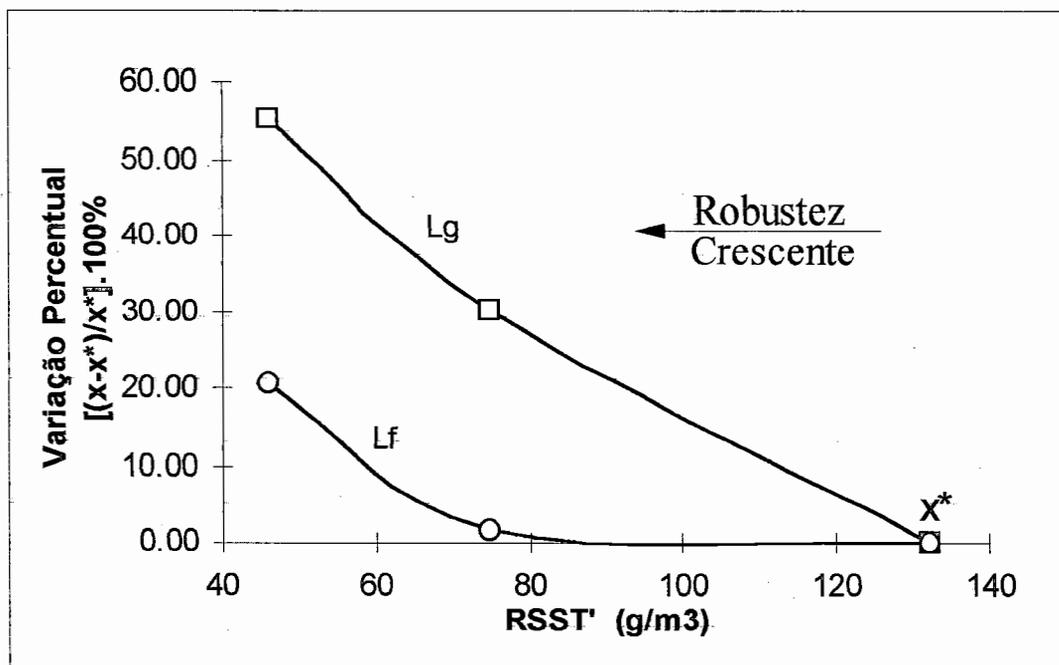


Figura 34 - Variações percentuais dos parâmetros  $L_g$  e  $L_f$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{SST'}$  para  $\alpha = 0$

### 7.3.3 Fator de Ponderação $\alpha = \frac{1}{2}$ :

Na figura 35 são apresentadas as relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez  $R_{DBO'}$  e  $R_{SST'}$  para  $\alpha = \frac{1}{2}$  da tabela 17. Esses resultados mostram que é possível obter operação robusta tanto em termos de DBO como de SST. Neste caso, tanto a sensibilidade de DBO ( $R_{DBO'}$ ) quanto de SST ( $R_{SST'}$ ) apresentam uma queda com o aumento do custo anual total operacional, sendo esta variação mais acentuada na proximidade da operação de custo mínimo. Este comportamento é adverso daqueles observados para  $\alpha = 1$  e  $\alpha = 0$  nas figuras 21 e 28.

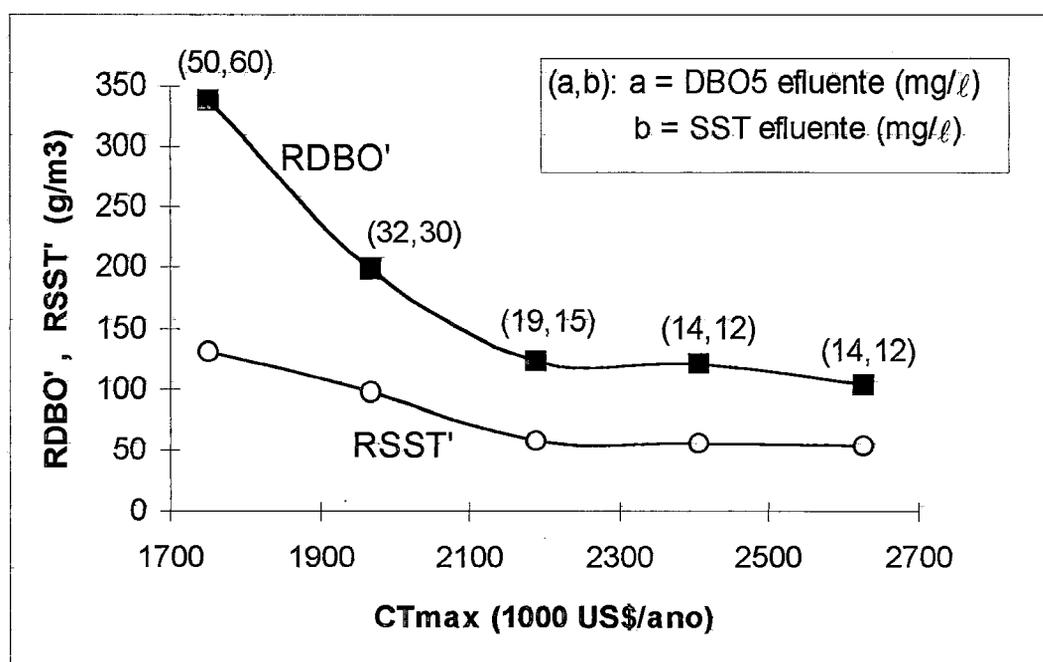


Figura 35 - Relações entre  $CT^{\max}$  e as medidas de robustez para  $\alpha = \frac{1}{2}$

Tabela 17 - Resumo das alternativas ótimas de operação da ETE - Barueri

com  $\alpha = \frac{1}{2}$ 

Variável	Operação de Custo Mínimo	CT <sup>max</sup> (10 <sup>3</sup> US\$/ano)			
		1750.30	1969.09	2187.88	2406.66
<i>Decantador Primário</i>					
OR <sub>p</sub> (m/h)	1.88	1.60	1.58	1.58	1.60
<i>Tanque de Aeração</i>					
F/M (Kg DBO <sub>5</sub> / Kg SSVLM.dia)	0.97	0.44	0.42	0.43	0.43
La (Kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> .d)	3.68	4.16	3.71	3.71	3.70
SSVLM (g/m <sup>3</sup> )	3803.49	9471.23	8759.42	8723.06	8699.12
r (%)	15.29	22.40	15.88	13.41	11.12
θ (h)	4.80	4.83	4.86	4.85	4.85
θ <sub>c</sub> (d)	2.57	4.03	4.89	8.14	8.17
<i>Decantador Secundário</i>					
Q <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> /h)	2520.00	3724.01	2615.22	969.70	840.22
OR <sub>s</sub> (m/h)	1.22	1.21	1.21	1.21	1.21
L <sub>s</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	16.99	7.23	17.04	12.15	7.70
<i>Adensador Gravitacional</i>					
L <sub>g</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.07	2.00 <sup>*</sup>	2.00 <sup>*</sup>	1.75	2.00 <sup>*</sup>
<i>Digestor Anaeróbio</i>					
T <sub>d</sub> (°C)	26.27	33.70	24.10	24.62	35.92
θ <sub>d</sub> (d)	8.45	24.48	30.02	32.69	32.68
L <sub>d</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.16	1.16	1.15	0.71	0.50 <sup>*</sup>
<i>Filtro Prensa</i>					
L <sub>f</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	0.34	0.35	0.44	0.60	0.72
<i>Objetivos</i>					
CT (10 <sup>3</sup> US\$/ano)	1750.30	1969.09	2187.88	2406.66	2581.90
R <sub>DBO</sub> <sup>*</sup> (g/m <sup>3</sup> )	337.76	198.94	123.15	121.42	103.52
R <sub>SST</sub> <sup>*</sup> (g/m <sup>3</sup> )	132.10	96.99	57.88	56.17	54.23
R <sub>DBO</sub> <sup>*</sup> + R <sub>SST</sub> <sup>*</sup> (g/m <sup>3</sup> )	469.86	295.93	181.03	177.59	157.75
<i>Qualidade do Efluente</i>					
DBO (g/m <sup>3</sup> )	49.85	32.47	19.37	13.60	13.57
SST (g/m <sup>3</sup> )	60.00 <sup>*</sup>	30.26	14.58	12.33	12.11
<i>Resumo Estatístico</i>					
Ponto Inicial	4	1	4	1	1
CPU (min)	2.27	2.76	2.81	2.68	3.01
Critério de Parada <sup>+</sup>	KT	KT	KT	KT	KT

Nota:

A<sub>p</sub>=10260m<sup>2</sup>; V<sub>f</sub>=78208m<sup>3</sup>; A<sub>s</sub>=13296m<sup>2</sup>; A<sub>g</sub>=2642m<sup>2</sup>; V<sub>d</sub>=62952m<sup>3</sup>; A<sub>d</sub>=1710,6m<sup>2</sup>; A<sub>f</sub>=3240m<sup>2</sup>;<sup>+</sup> KT: Kuhn-Tucker; FC: variação fracional;<sup>#</sup> Projeto inferior;<sup>\*</sup> Valor da variável limitada pelo contorno.

Uma comparação entre as figuras 21, 28 e 35 mostra que há um ajuste das medidas de robustez DBO e SST às variações no valor do fator de ponderação  $\alpha$ . Nas estratégias de operação com o mesmo custo ( $CT^{\max}$ ), o valor de  $R_{DBO'}$  diminui com o aumento de  $\alpha$  de 0 a 1 enquanto que o valor de  $R_{SST'}$  aumenta, conforme figura 36. Estas comparações também indicam que o grau de melhora nas concentrações de  $DBO_5$  e SST efluente está relacionado com  $\alpha$ : uma correlação positiva entre  $\alpha$  e a redução de  $DBO_5$  efluente e uma correlação negativa entre  $\alpha$  e a redução de SST efluente.

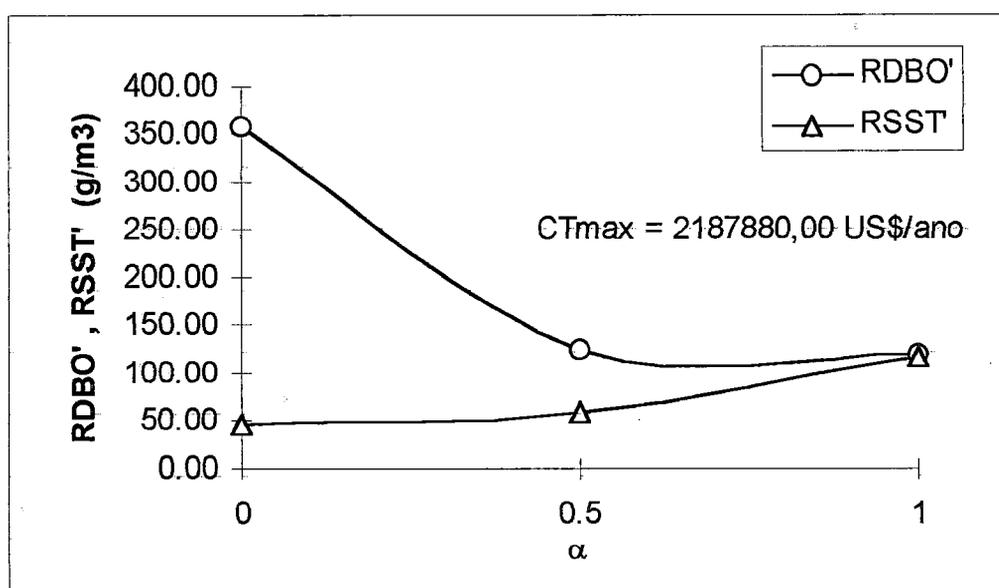


Figura 36 - Relação do fator de ponderação ( $\alpha$ ) entre  $R_{DBO'}$  e  $R_{SST'}$  para  $CT^{\max} = 2187880,00$  US\$/ano

A análise dos custos individuais para  $\alpha = \frac{1}{2}$  é exibida na figura 37, e revela um comportamento semelhante aos das figuras 22 ( $\alpha = 1$ ) e 29 ( $\alpha = 0$ ). O  $CT_{sl}$  é o custo mais efetivo, o  $CT_s$  oscila, e o  $CT_p$  e o  $CT_{ta}$  permanecem praticamente inalterados.

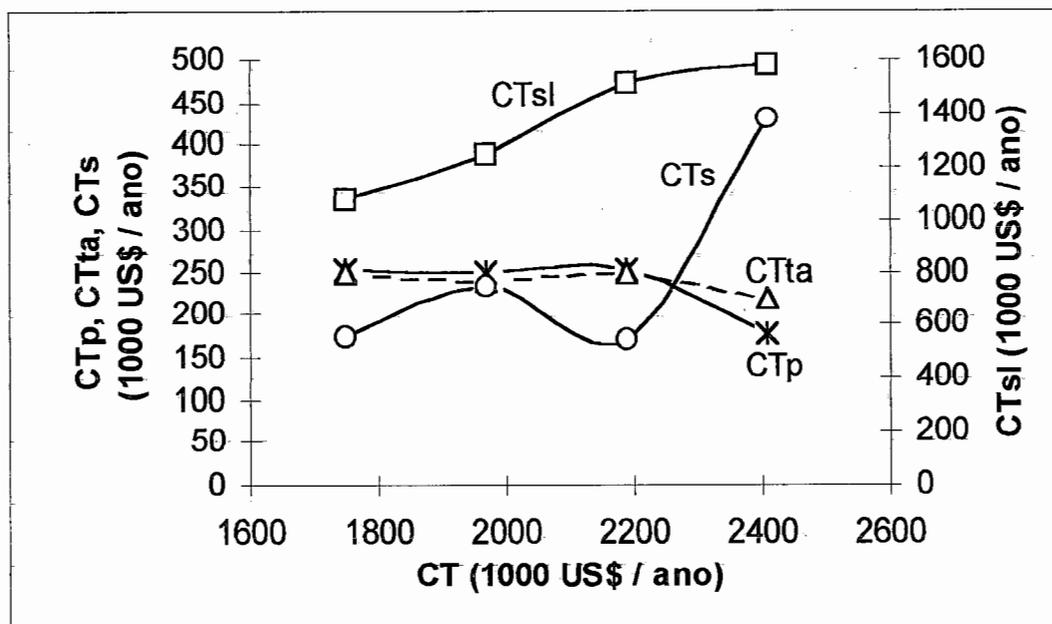


Figura 37 - Análise dos custos individuais  $CT_p$ ,  $CT_{ta}$ ,  $CT_s$  e  $CT_{sl}$  para  $\alpha = \frac{1}{2}$

As variações percentuais dos parâmetros da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO}$  são apresentadas nas figuras 38, 40 e 41, e em função de  $R_{SST}$  na figura 39.

O desenvolvimento dos parâmetros  $\theta$ ,  $L_a$ ,  $OR_s$  e  $OR_p$  com a robustez em termos de DBO ( $\alpha = \frac{1}{2}$ ) e SST ( $\alpha = \frac{1}{2}$ ) é apresentado nas figuras 38 e 39. Tendo em vista que os dois gráficos apresentam o mesmo arranjo, serão interpretados apenas os resultados em termos de  $R_{DBO}$ . Da figura 38, depende-se que neste caso, o tempo de detenção hidráulica no TA ( $\theta$ ) e a taxa de aplicação superficial no DS ( $OR_s$ ) independem da robustez. A taxa de aplicação superficial no DP ( $OR_p$ ) apresenta o mesmo comportamento que nos outros estudos de  $\alpha$ .

O tempo médio de residência celular no tanque de aeração,  $\theta_c$ , aumenta de 2.6 a 8.2 dias. Como demonstrado anteriormente, o aumento substancial de  $\theta_c$  proporciona maior robustez de DBO. Para se obter maior robustez, além do aumento de  $\theta_c$  ocorre a redução de SSVLM e  $r$ . Enquanto,  $L_s$  e  $F/M$  mantém o mesmo arranjo da figura 25 para  $\alpha = 1$ .

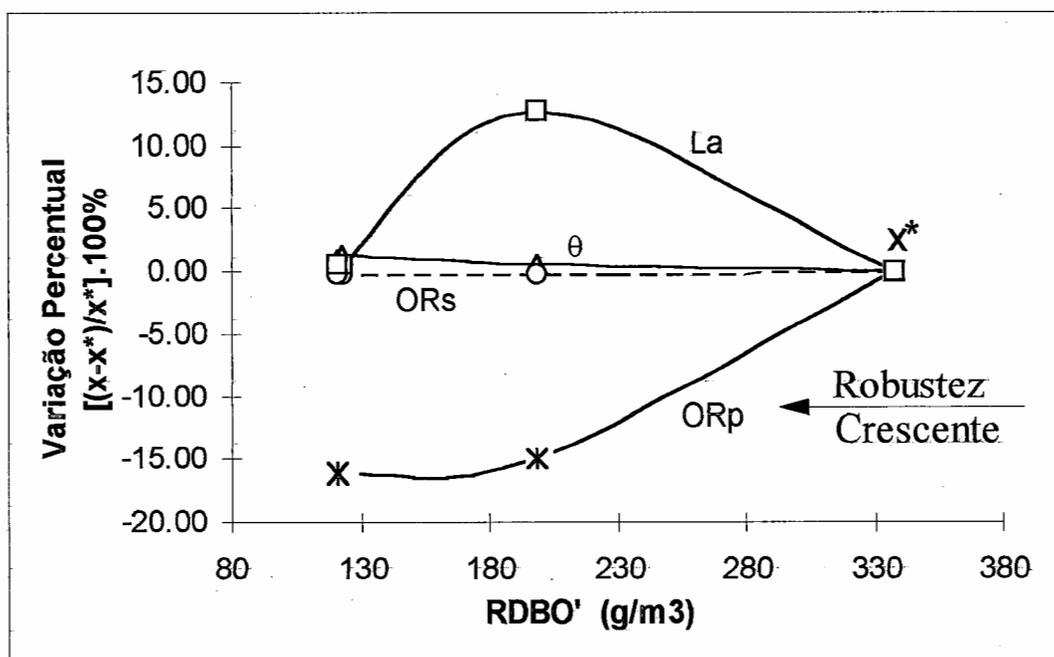


Figura 38 - Variações percentuais dos parâmetros OR<sub>p</sub>, La, θ e OR<sub>s</sub> da fase líquida do tratamento em função de R<sub>DBO'</sub> para α=1/2

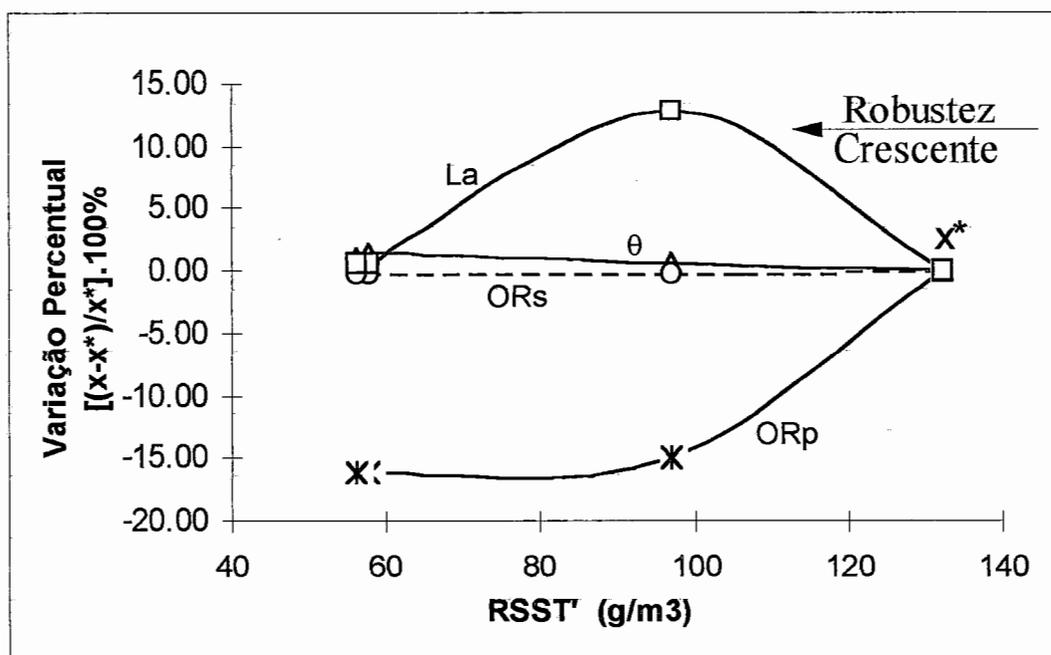


Figura 39 - Variações percentuais dos parâmetros OR<sub>p</sub>, La, θ e OR<sub>s</sub> da fase líquida do tratamento em função de R<sub>SST'</sub> para α=1/2

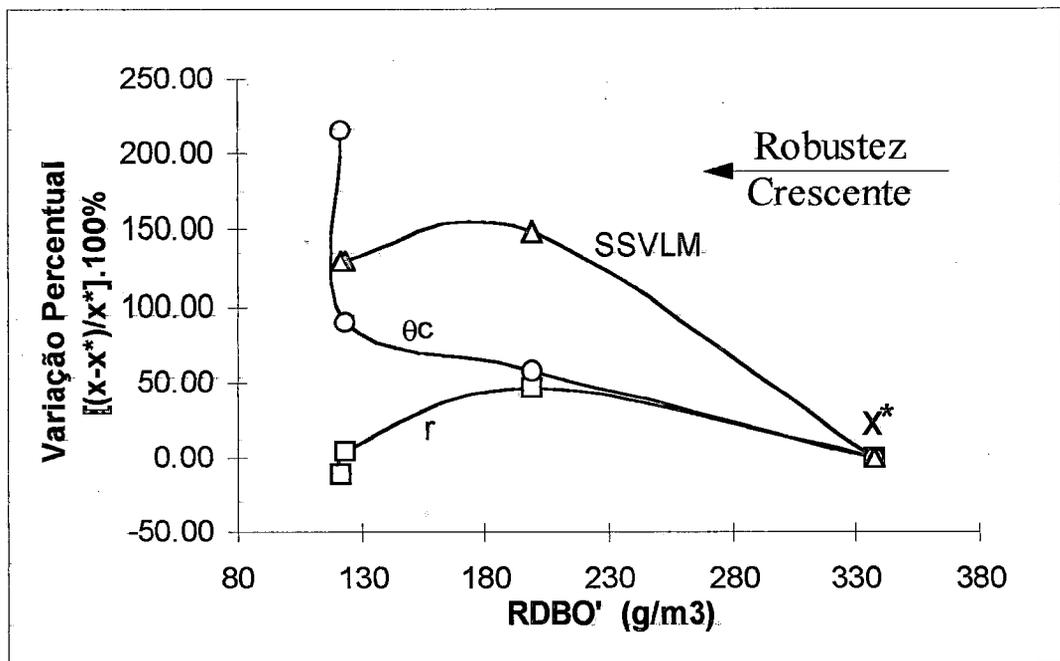


Figura 40 - Variações percentuais dos parâmetros SSVLM,  $r$  e  $\theta_c$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1/2$

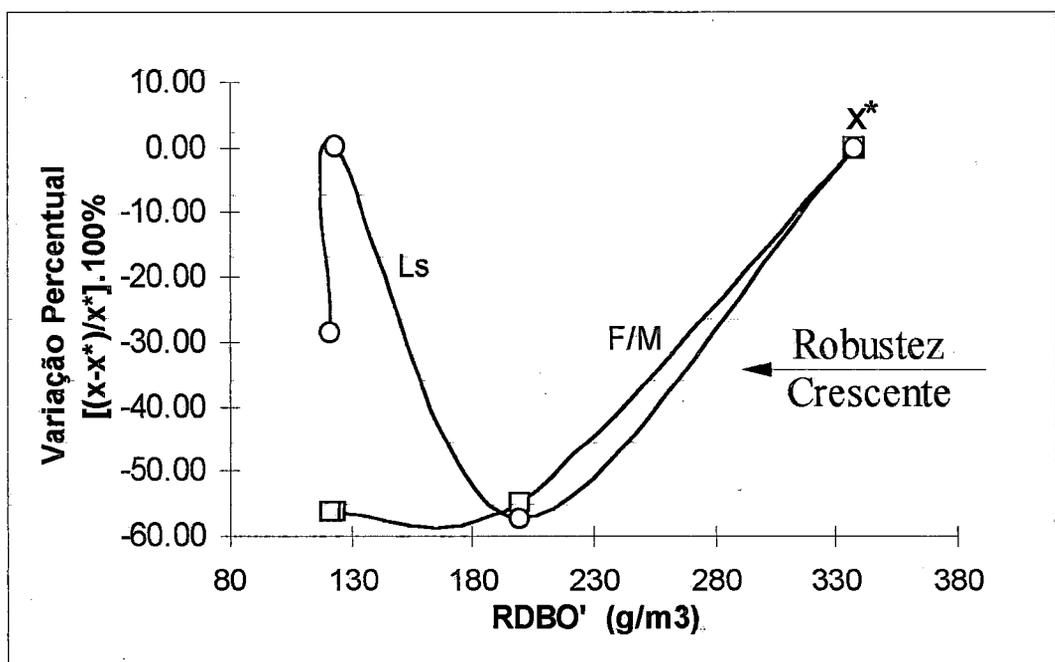


Figura 41 - Variações percentuais dos parâmetros  $F/M$  e  $L_s$  da fase líquida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = 1/2$

Nas figuras 42 e 43 são apresentadas as variações percentuais dos parâmetros da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$ .

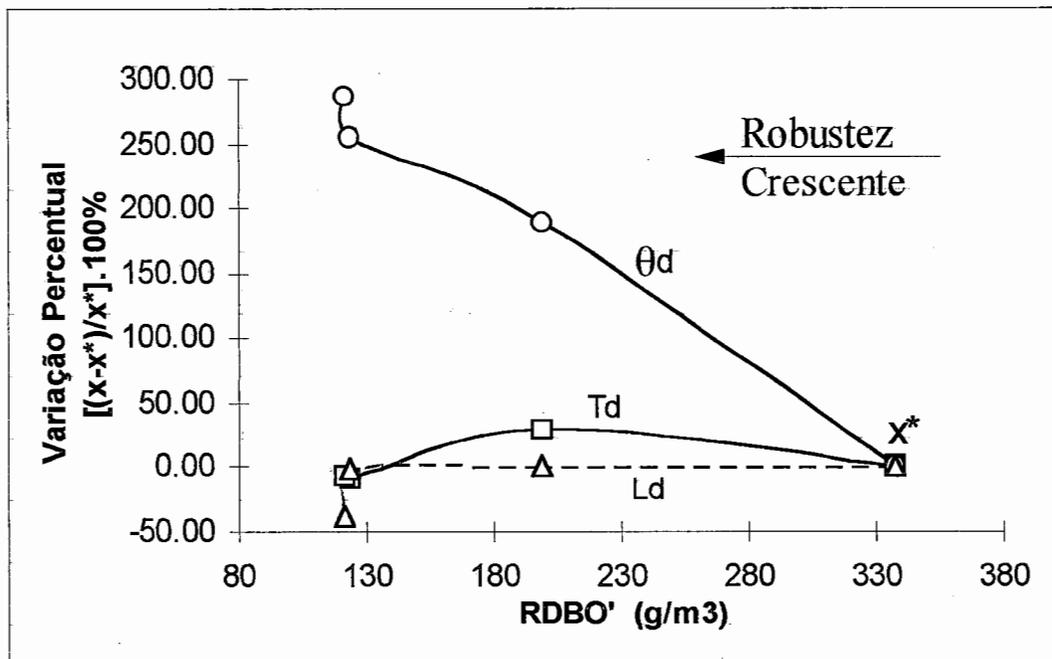


Figura 42 - Variações percentuais dos parâmetros  $T_d$ ,  $\theta_d$  e  $L_d$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = \frac{1}{2}$

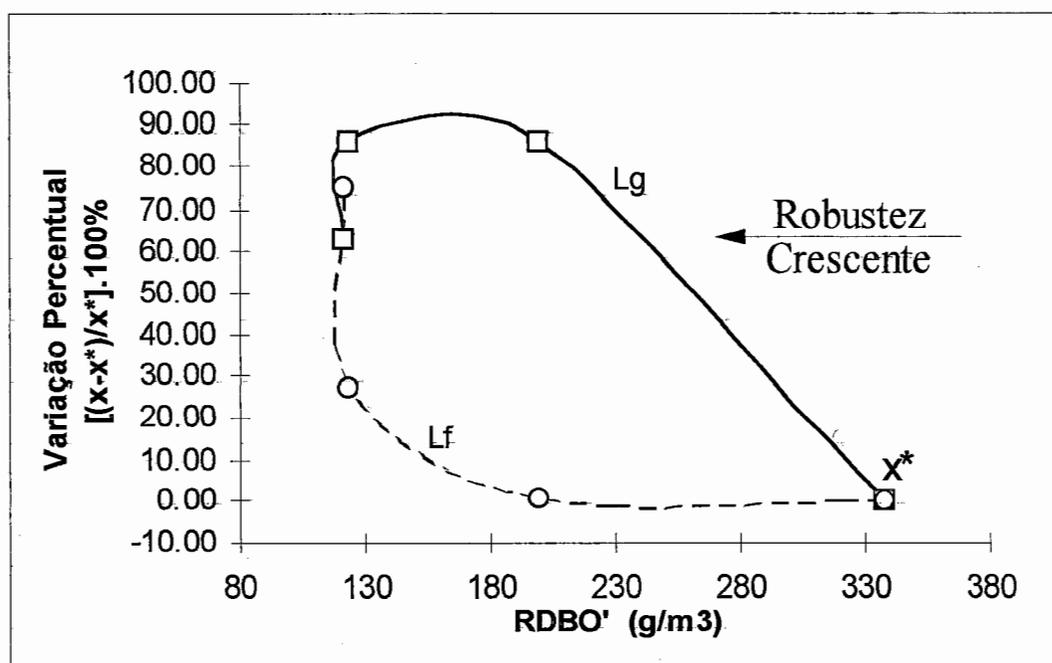


Figura 43 - Variações percentuais dos parâmetros  $L_g$  e  $L_f$  da fase sólida do tratamento em função de  $R_{DBO'}$  para  $\alpha = \frac{1}{2}$

#### 7.4 Estudo Comparativo entre Várias Estratégias de Operação:

Neste estudo comparativo, as soluções operacionais para ETE-BARUERI robustas e de custo mínimo são obtidas das tabelas 15 a 17, e apresentadas na tabela 18.

A escolha das alternativas de operação robusta correspondentes à restrição  $CT^{\max} = 1969090,00$  US\$/ano são escolhidas a serem comparadas à solução de custo mínimo em vista da robustez total destas ser igual ou melhor que a da operação de custo mínimo, conforme tabela 18.

A tabela 18 também mostra o intervalo de alguns parâmetros operacionais para o projeto de ETEs recomendado por pesquisadores como METCALF & EDDY (1991) e os do Great Lakes - Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers (GLUMRB, 1978). O atendimento de tais intervalos recomendados não garantem projetos robustos ou de baixo custo, visto que os intervalos ignoram as interações entre os processos unitários bem como outros fatores de ordem biológica e econômica que devem variar entre situações diferentes de projeto. Por exemplo, os valores práticos do GLUMRB sugerem que o valor de  $L_s$  seja de  $0.64 \text{ Kg DBO}_5 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$  para ser aplicado uniformemente e ainda não contempla as condições de projeto particular e as interações com outros processos de tratamento. Contudo, os intervalos refletem cerca de 40 anos de experiência acumulada, além de levar em conta alguma incerteza devido sua natureza conservativa.

O projeto de custo mínimo geralmente não se enquadra dentro dos intervalos recomendados. Conseqüentemente, o projeto de custo mínimo não é esperado ser um projeto robusto, visto que os valores de  $R_{\text{DBO}}$  e  $R_{\text{SST}}$  devem ser elevados quando comparados com os projetos DBO robusto e SST robusto, respectivamente. Esta perda da robustez resulta de uma ênfase exclusiva ao custo, sem a consideração da incerteza. A incerteza bem como outros objetivos adicionais, são esperados ser contemplados pelos engenheiros projetistas.

Tabela 18 - Resumo de alternativas de operação robusta da ETE - Barueri

Variável	Operação					Valores Recomendados	
	Custo Mínimo	SST Robusto	DBO Robusto	DBO+SST Robusto	EteBarueri (1995)	METCALF & EDDY(1991)	GLUMRB (1978)
<i>Decantador Primário</i> OR <sub>p</sub> (m/h)	1.88	1.60	1.81	1.60	1.90	1.3 - 2.0	< 1.7
<i>Tanque de Aeração</i> F/M (Kg DBO <sub>5</sub> / Kg SSVLM.d)	0.97	0.98	0.44	0.44	0.40	0.2 - 0.4	0.2 - 0.5
La (Kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>3</sup> .d)	3.68	3.68	3.68	4.16	4.16	0.3 - 0.6	0.64
SSVLM (g/m <sup>3</sup> )	3803.49	3771.39	8456.30	9471.23	10401.0	1500-3000	1000-3000
r (%)	15.29	14.87	28.61	22.40	42.10	25 - 75	15 - 75
θ (h)	4.80	4.81	4.84	4.83	4.60	4 - 8	---
θ <sub>c</sub> (d)	2.57	2.41	5.10	4.03	4.90	5 - 15	---
<i>Decantador Secundário</i> Q <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> /h)	2520.00	855.66	4624.02	3724.01	7951.20	---	---
OR <sub>s</sub> (m/h)	1.22	1.33	1.18	1.21	0.88	0.67-1.33	<2(Q <sub>0</sub> (1+.01r
L <sub>s</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	16.99	13.44	7.25	7.23	22.09	3 - 6	< 10.2
<i>Adensador Gravitacional</i> L <sub>g</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.07	1.40	0.70	2.00	3.35	1.67-3.25	---
<i>Digestor Anaeróbio</i> T <sub>d</sub> (°C)	26.27	36.26	30.51	33.70	24.00	---	---
θ <sub>d</sub> (d)	8.45	18.04	8.53	24.48	28.70	---	---
L <sub>d</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	1.16	1.12	1.00	1.16	0.40	---	---
<i>Filtro Prensa</i> L <sub>f</sub> (Kg / m <sup>2</sup> .h)	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	---	---
<i>Objetivos</i> CT (10 <sup>3</sup> US\$/ano)	1750.30	1969.09	1969.09	1969.09	1915.15	---	---
R <sub>DBO</sub> (g/m <sup>3</sup> )	337.76	354.93	180.06	198.94	338.14	---	---
R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	132.10	74.89	120.21	96.99	133.49	---	---
R <sub>DBO</sub> + R <sub>SST</sub> (g/m <sup>3</sup> )	469.86	429.82	300.27	295.93	471.63	---	---
<i>Qualidade do Efluente</i> DBO (g/m <sup>3</sup> )	49.85	43.58	35.66	32.47	33.00	---	---
SST (g/m <sup>3</sup> )	60.00	12.47	60.00	30.26	22.00	---	---

Nota:

A<sub>p</sub>=10260m<sup>2</sup>; V<sub>t</sub>=78208m<sup>3</sup>; A<sub>s</sub>=13296m<sup>2</sup>; A<sub>g</sub>=2642m<sup>2</sup>; V<sub>d</sub>=62952m<sup>3</sup>; A<sub>d</sub>=1710,6m<sup>2</sup>; A<sub>f</sub>=3240m<sup>2</sup>;

\* Valor da variável limitada pelo contorno.

As alternativas de operação quando comparadas com a operação de custo mínimo, revelam que um pequeno adicional no  $CT^{\max}$  (12,50% do custo mínimo) proporciona decréscimos na medida de robustez (47% na  $R_{DBO}$  e 43% na  $R_{SST}$ ). Outra análise é o indicativo que a concentração de  $DBO_5$  efluente é provavelmente mais sensível às perturbações dos parâmetros do que a concentração de SST efluente.

Ao observar a tabela 18, conclui-se que a operação SST robusta não necessariamente implica em um aproveitamento na robustez de DBO, e vice-versa. Pelo contrário, a solução SST robusta mostra uma significativa deteriorização (aumento) na robustez de DBO, quando comparado com a operação de custo mínimo.

A comparação entre parâmetros identificados pelo método de minimização da sensibilidade (POR) em relação DBO, SST, e DBO+SST e pela minimização do custo total mostra que os parâmetros indicados pelas operações com os critérios SST robusto e custo mínimo indicam valores de parâmetros bem diversos dos recomendados na literatura, apesar dos valores de  $R_{SST}$  sugerirem que a operação SST robusta é a mais robusta com relação à SST efluente. Mencionam-se particularmente os parâmetros F/M (relação alimento/microorganismo),  $r$  (taxa de recirculação),  $\theta_c$  (tempo médio de residência celular) e  $L_s$  (carga de sólidos do DS) com valores atípicos.

A maioria dos parâmetros recomendados pela operação ótima sob os critérios de DBO ( $\alpha = 1$ ) e, DBO+SST, ( $\alpha = 1/2$ ) são mais próximos dos empregados pela prática. A operação (DBO+SST) robusto não atende aos contornos de  $L_a$ , SSVLM, e  $\theta_c$  enquanto que a operação DBO robusta aos limites de  $L_a$  e SSVLM. Os valores de  $L_a$  e SSVLM estão acima do limite máximo recomendado porque a ETE - Barueri não se caracteriza como uma ETE típica. No projeto original da ETE-Barueri, a  $DBO_5$  afluente é de 300 mg/l e a concentração de SST afluente é de 400 mg/l, enquanto que atualmente são de 625 mg/l e 1067 mg/l, respectivamente.

A estratégia operacional DBO robusta é esperada ser mais robusta na prática que a operação de custo mínimo, e esta expectativa é amparada

pelos valores de  $R_{DBO}$ . A evidência de uma correlação entre o valor da medida de primeira ordem  $R_{DBO}$  e os desvios dos valores dos parâmetros de projeto recomendados, é um resultado positivo.

Em relação à carga orgânica no TA ( $L_a$ ) nota-se que todas as operações estudadas recomendam cargas acima dos limites indicados na literatura, chegando aproximadamente 5 vezes destes. Quanto à carga de sólidos do DS ( $L_s$ ) observa-se que as operações ótimas com  $\alpha = 1$  (DBO robusta) e  $\frac{1}{2}$  (DBO+SST robusta) indicam valores próximos da faixa recomendada na prática. A taxa de aplicação superficial do DP e DS obtidas através de otimização são comparáveis com valores da literatura.

Outra análise importante é a relação entre a robustez de DBO e  $\theta_c$ . Vários pesquisadores têm relatado que o projeto de custo mínimo determina valores mínimos de  $\theta_c$ . Os resultados aqui sugerem, entretanto, que o aproveitamento da robustez de DBO está associado a valores altos de  $\theta_c$ . Tais resultados são também consistentes com o intervalo de  $\theta_c$  recomendado por METCALF & EDDY (1991).

Os parâmetros operacionais atuais da ETE-BARUERI têm um bom ajuste com relação aos valores recomendados na prática, com exceção de  $L_a$ , SSVLM e  $L_s$ .

Interessantemente a DBO efluente obtida pelos critérios  $\alpha = 1$  e  $\frac{1}{2}$  ( $36$  e  $32 \text{ g/m}^3$ ) são muito próximas daquela produzida pela operação atual da ETE-BARUERI ( $33 \text{ g/m}^3$ ), enquanto que SST efluente com  $\alpha = 1$  alcança o máximo permitido ( $60 \text{ g/m}^3$ ) quando  $\alpha = \frac{1}{2}$  produz SST ( $30 \text{ g/m}^3$ ) da mesma ordem de BARUERI na prática ( $22 \text{ g/m}^3$ ). Pode-se concluir que a operação atual da ETE-BARUERI em termos de DBO e SST efluente é comparável com a recomendada pelo critério de DBO+SST, no entanto o valor da somatória de sua robustez ( $471,63$ ) é bem maior que a robustez da alternativa de operação DBO+SST ( $295,93$ ), tornando-se uma operação mais sensível (menos robusta) à variação dos valores dos parâmetros.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

---

O objetivo inicialmente traçado para o desenvolvimento deste trabalho foi o de se avaliar e definir um método de otimização de sistemas de lodos ativados, capaz de considerar explicitamente a incerteza nos valores dos parâmetros do modelo dentro das restrições e da função objetivo, e ao mesmo tempo identificar a operação ótima.

Definido o objetivo realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre métodos de otimização em sistemas de lodos ativados, estudos de custos e de funções tecnológicas do processo que permitisse a avaliação e a definição de elementos básicos para o trabalho.

A metodologia escolhida, Projeto Ótimo Robusto (POR), proposta por UBER et al. (1988), soluciona problemas de programação não linear sujeito a restrições de sensibilidade. Desta forma com o projeto ótimo robusto é possível gerar projetos alternativos que resultem em soluções consistentes quando comparadas com os projetos advindos da prática.

Como foi visto, a importância da incerteza é muitas vezes desprezada nos modelos de projeto ótimo, e os projetos alternativos gerados que usam tais modelos não são necessariamente ótimos para um problema de projeto real. Para contornar tal dificuldade, o POR aproveita a estrutura do projeto ótimo tradicional e inclui explicitamente a incerteza sobre os resultados do modelo. Os projetos alternativos gerados pelo POR refletem sobre várias fontes de incerteza e ajudam a entender a complexa relação entre os efeitos contrários possíveis desta incerteza e outras importantes variáveis e objetivos do sistema.

Em seguida, o POR em forma de programa computacional (GRG2/SC) foi aplicado à operação da estação de tratamento de esgotos de Barueri (ETE - Barueri). Tal aplicação é importante visto que grandes somas

são gastas anualmente na construção, operação e manutenção de ETEs, as quais é esperado um desempenho consistente com relação à incerteza das condições operacionais.

Estratégias alternativas foram geradas no sentido de determinar a relação entre o custo anual total de operação do sistema e as medidas de robustez de qualidade da água do efluente ( $DBO_5$  e SST). Nesse estudo a robustez é inversamente relacionada com a sensibilidade da qualidade do efluente com relação à incerteza nos valores de 55 parâmetros do modelo. Estas estratégias determinaram uma forte relação entre o custo e a robustez. Quando comparadas com a operação de custo mínimo, percebe-se que aumentos consideráveis da robustez podem ser obtidos com pequenos acréscimos nos custos. Enquanto que os projetos de custo mínimo têm historicamente estado em desacordo com os projetos recomendados na prática, os projetos robustos são mais consistentes, tornando-os mais próximos da realidade. Na aplicação do POR na ETE-Barueri, ficou comprovado que o aumento considerável na robustez de DBO é obtido com o aumento substancial de  $\theta_c$ .

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o uso da metodologia do projeto ótimo robusto a outros sistemas de tratamento de esgotos, ou a redes coletoras de esgotos, ou então a qualquer sistema que seja tipicamente não linear e que tenha uma considerável fonte de incerteza.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALMEIDA, G.N.; GONÇALVES, M.C. Eficiência e teor de umidade da torta na desidratação de lodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17º, Natal - RN, 1993. Anais. Natal, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993, p.676-691.
- AKÇA, L.; KINACI, C.; KARPUZCU, M. A model for optimum design of activated sludge plants. *Water Research*, v.107, n.9, p.1461-1468, Mar., 1993.
- BENETTI, A.D.; LUCA, S.J. Remoção de carga orgânica: custos de tratamento físico-químico vs lodos ativados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17º, Natal - RN, 1993. Anais. Natal, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993, p.457-465.
- BERTHOUEX, P.M.; POLKOWSKI, L.B. Optimum waste treatment plant design under uncertainty. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.42, n.9, p.1589-1613, Sep., 1970.
- CHAPMAN, D.T. The influence of process variables on secondary clarification. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.55, n.12, p.1425-1434, Dec., 1983.
- CHEN, M.S.K.; ERICKSON, L.E., FAN, L. Consideration of sensitivity and parameter uncertainty in optimal process design. *Ind. Eng. Chemical*, v.9, n.4, p.514-521, 1970.
- COAKLEY, P.; JONES, B.R.S. Sludge filtration. *Sewage and Industrial Wastes*, v.28, n.8, p.963-976, Aug., 1956.
- CHRISTENSEN, G.L. Units of specific resistance. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.55, n.4, p.417-419, Apr., 1983.

- CRAIG, E.W.; MEREDITH, D.D.; MIDDLETON, A.C. Algorithm for optimal activated sludge division. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.104, n.6, p.1107-1117, Dec., 1978.
- DAJANI, J.S.; GEMMER, R.S. Economic guidelines for public utilities planning. *Journal of the Urban Planning and Development Division*, ASCE, v.99, n.2, p.171-182, Sep., 1973.
- DINIZ, Luiz Carlos. *Otimização de sistemas de lodos ativados*. São Carlos, 1981. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ECKENFELDER, W.W. *Principles of water quality management*. Boston, CBI, 717p., 1980.
- ECKENFELDER, W.W.; GORONSZY, M.C.; WATKIN, A.T. Comprehensive activated sludge process design. In: JORGENSEN, S.E.; GROMIEC, M.J., eds. *Mathematical models in biological water treatment*. Amsterdam, Elsevier, 1985. p.95-132. (Developments in Environmental Modelling, 7).
- GRADY, C.P.L., JR. Simplified optimization of activated sludge process. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.103, n.3, p.413-429, Jun., 1977.
- HASHIMOTO, T.; LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R. Robustness of water resources systems. *Water Resources Research*, v.18, n.1, p.21-26, Feb., 1982.
- HOOKE, R.; JEEVES, T.A. Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal Assn. Comp.*, v.8, n.2, p.212, Mar., 1961.
- HUGHEY, P.W.; MEREDITH, D.D.; MIDDLETON, A.C. Algorithm for optimal activated sludge operation. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.108, n.2, p.348-366, Apr., 1982.
- IMHOFF, K. *Manual de tratamento de águas residuárias*. São Paulo, Edgard Blücher, 1986.
- LAMPOGLIA, T.C.; LYRA, P.G.; MANZOCHI, L.B. Projeto de instalações de desidratação de lodo com a utilização de filtros prensa de placas. *Revista DAE*, ano XLII, n.128, p.69-81, 1982.

- LASDON, L.S.; WAREN, A.D.; JAIN, A.; RATNER, M. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *Trans. on Math. Software*, ACM, v.4, n.1, p.34-50, Mar., 1978.
- LASDON, L.S.; WAREN, A.D.; JAIN, A. GRG2 User's guide, Jul., 1994.
- LAURIA, D.T.; UNK, J.B.; SCAEFER, J.K. Activated sludge process design. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.103, n.4, p.625-645, Aug., 1977.
- LAWRENCE, A.W.; McCARTY, P.L. Unified basis for biological treatment design and operation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, ASCE, v.96, n.3, p.757-775, Jun., 1970.
- LOGAN, J.A. et al. An analysis of the economics of wastewater treatment. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.34, n.9, p.882, Sep., 1962.
- LYNN, W.R. et al. Systems analysis for planning wastewater treatment. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.34, n.6, p.565-581, Jun., 1962.
- METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3<sup>a</sup> ed., McGraw - Hill, New York, N.Y., 1991.
- MIDDLETON, A.C.; LAWRENCE, A.W. Least cost design of activated sludge systems. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.48, n.5, p.889-905, May, 1976.
- PARKER, D.S. Assessment of secondary clarification design concepts. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.55, n.4, p.349-359, Apr., 1983.
- PFEFFER, J.T. Increased loading on digesters with recycle of digested solids. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.40, n.11, part 1, p.1920-1933, May, 1968.
- SÃO PAULO. SECRETARIA DOS SERVIÇOS E OBRAS PÚBLICAS. SABESP. *ETE Barueri Estação de Tratamento de Esgotos*. São Paulo, Gráfica SABESP, s.d.
- SUIDAN, M.T.; SAUNDERS, F.M.; GODFREY, C.S.; STEWART, H.T. Wastewater treatment: sensitivity analysis. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.109, n.1, p.120-138, Feb., 1983.

- TANG, C.C.; BRILL, E.D., JR.; PFEFFER, J.T. Comprehensive model of activated sludge wastewater treatment system. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.113, n.5, p.952-969, Oct., 1987b.
- TARRER, A.R.; GRADY, C.P.L., JR.; LIM, H.C.; KOPPEL, L.B. Optimal activated sludge design under uncertainty. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.102, n.3, p.657-673, June, 1976.
- TYTECA, D. Mathematical models for cost-effective biological wastewater treatment. In: JORGENSEN, S.E.; GROMIEC, M.J., eds. *Mathematical models in biological water treatment*. Amsterdam, Elsevier, 1985. p.737-802. (Developments in Environmental Modelling, 7).
- TYTECA, D.; SMEERS, R.; NYNS, E.J. Mathematical modeling and economic optimization of wastewater treatment plants. *CRC Critical Review in Environmental Engineering*, v.8, n.1, p.1-89, 1977.
- UBER, J.G.; BRILL, E.D., JR. Design optimization with sensitivity constraints. *Engrg. Optimization*, v.16, n.1, p.15-28, 1990.
- UBER, J.G.; KAO, J.J.; BRILL, E.D., JR.; PFEFFER, J.T. Sensitivity constrained nonlinear programming: a general approach for planning and design under parameter uncertainty and an application to treatment plant design. *Final Tech. Report to the Department of the Interior*, U.S. Geological Survey, Reston, Va, 218p., 1988.
- UBER, J.G.; BRILL, E.D., JR.; PFEFFER, J.T. Robust optimal design for wastewater treatment I: general approach. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.117, n.4, p.425-437, Jul./Aug., 1991a.
- UBER, J.G.; PFEFFER, J.T.; BRILL, E.D., JR. Robust optimal design for wastewater treatment II: application. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.117, n.4, p.438-456, Jul./Aug., 1991b.
- VON SPERLING, M. Parameter estimation and sensitivity analysis of an activated sludge model using monte carlo simulation and the analyst's involvement. *Wat. Sci. Tech.*, v.28, n.11-12, p.219-229, 1993.
- VON SPERLING, M. Critérios e dados para uma seleção preliminar de sistemas de tratamento de esgotos. *Encarte da Revista BIO*, ano III, n.1, jan./abr., p.7-21, 1994b.

- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 240p., 1995.
- VON SPERLING, M. *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 211p., 1996.
- VOSHEL, D.; SAK, J.G. Effect of primary effluent suspended solids and BOD on activated sludge production. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.40, n.5, part 2, p.R203-212, May, 1968.
- WHITLACH, E.E., Jr.; RAVELLE, C.S. Designing regionalized wastewater treatment systems. *Water Resources Research*, v.12, n.4, p.581-591, Aug., 1976.
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). *Joint treatment of industrial and municipal wastewater*. Washington, Lancaster, 34p., 1976.

## OBRAS CONSULTADAS

---

- ALMEIDA, G.N.; GONÇALVES, M.C. Desempenho de filtro prensa de esteira na desidratação de lodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15º, Belém - PA, 1989. Anais. Belém, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989, p.457-465.
- ALMEIDA NETO, L.P.; GASPAR, G.O.; COMPARINI, J.B.; SILVA, N.L. Avaliação de parâmetros de projeto de sistemas de esgotos sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15º, Belém - PA, 1989. Anais. Belém, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989, p.239-309.
- AZEVEDO NETTO, J.M. et al. *Sistemas de esgotos sanitários*. 2ª ed., São Paulo, CETESB, 1977.
- BARTH, F.T. et al. *Modelos de gerenciamento de recursos hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, São Paulo, 1987.
- CAMPOS, J.R. *Alternativas para Tratamento de Esgotos Sanitários*. São Paulo, ÉDILE - Serviços Gráficos e Editora Ltda., 73p., 1991.
- CATUNDA, P.F.C.; VAN HAANDER, A.C.; SOUSA, J.T. Dimensionamento e otimização de decantadores de lodo ativado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15º, Belém - PA, 1989. Anais. Belém, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989, p.67-85.
- CEREDA, R.L.; MALDONADO, J.C. *Introdução ao FORTRAN 77 para microcomputadores*. São Paulo, Mc Graw-Hill, 1987.

- CORDEIRO, J.S.; CAMPOS, J.R. Aplicações de ensaios de filtros-prensa na remoção de água de lodos de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18º, Salvador - BA, 1995. Anais. Salvador, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1995.
- ELLIS, K.V.; TANG, S.L. Wastewater treatment optimization model for developing world I: model development. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.117, n.4, p.501-517, Jul./Aug., 1991.
- FIERING, M.B. Establishing contributions to an insurance fund. *Water Resources Research*, v.18, n.2, p.211-214, Apr., 1982.
- FORESTI, E.; CAMPOS, J.R.; RODRIGUES, B.A.S. *Notas de aulas sobre sistemas de esgotos sanitários*. São Carlos - SP, Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC - USP, 1980.
- FUJIWARA, O. Preliminary optimal design model for wastewater treatment plant. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.116, n.1, p.206-210, Feb., 1990.
- JORDÃO, E.P. O conceito de balanço de massa no dimensionamento das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15º, Belém - PA, 1989. Anais. Belém, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1989, p.469-483.
- KAO, J.J.; BRILL, E.D., JR.; PFEFFER, J.T. Computer based environment for wastewater treatment plant design. *Journal Environmental Engineering*, ASCE, v.119, n.5, p.931-945, Sep./Oct., 1993.
- LESSARD, P.; BECK, M.B. Dynamic modeling of the activated sludge process: a case study. *Water Res.*, v.27, n.6, p.963-978, 1993.
- LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R.; HAITH, D.A. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. p.122-129.
- PEARSON, F.; SCHERER, C.R. O & M costs and optimal capacity expansion. *Journal Environmental Engineering Division*, ASCE, v.107, n.4, p.619-633, Aug., 1981.

- PINTO, M.A.T.; NEDER, K.D.; MACHADO, A.F. A utilização do controle estatístico como meio de referência e otimização do processo de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17º, Natal - RN, 1993. Anais. Natal, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993, p.83-95.
- PRIOLI, P.S.; ASSALI NETO, J.; JUNQUEIRA NETTO, M. Curvas de custo de estações de tratamento de esgotos para estimativas de investimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17º, Natal - RN, 1993. Anais. Natal, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993.
- RAMOS, N.; LUCA, S.J. Lodos ativados / aeração prolongada análise de parâmetros e constantes operacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17º, Natal - RN, 1993. Anais. Natal, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993, p.129-137.
- SHIH, C.S.; DEFILLIPI, J.A. System optimization of waste treatment plant process design. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, v.96, n.2, p.409-421, Apr., 1970.
- TANG, C.C.; BRILL, E.D., JR.; PFEFFER, J.T. Optimization techniques for secondary wastewater treatment system. *Journal Environmental Engineering, ASCE*, v.113, n.5, p.935-969, Oct., 1987a.
- TANG, S.L.; ELLIS, K.V. Wastewater treatment optimization model for developing world II: model testing. *Journal Environmental Engineering, ASCE*, v.120, n.3, p.610-644, May/Jun., 1994.
- TEBBUTT, T.H.Y.; CHRISTOULAS, D.G. Performance relationships for primary sedimentation. *Water Research*, v.9, p.347-356, 1975.
- TYTECA, D. Nonlinear programming model of wastewater treatment plant. *Journal Environmental Engineering Division, ASCE*, v.107, n.4, p.747-766, Aug., 1981a.

TYTECA, D.; SMEERS, Y. Nonlinear programming design of wastewater treatment plant. *Journal Environmental Engineering Division, ASCE*, v.107, n.4, p.767-779, Aug., 1981b.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. (1993). Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP. São Carlos. 56p.

VON SPERLING, M. Solids management for the control of extended aeration systems: an analysis of classical and advanced strategies. *Water SA*, v.20, n.1, p.49-60, 1994a.

VON SPERLING, M.; LUMBERS, J.P. Optimization of the operation of the oxidation ditch process incorporating a dynamic model. *Wat. Sci. Tech.*, v.24, n.6, p.225-233, 1991.