

# Campus de São Carlos

Influência da Umidade Atmosférica sobre o  
Mecanismo de Transferência de Gases através  
da Interface Água-Atmosfera

ALEXANDRE SILVEIRA

Orientador. Prof. Dr. Marcilio F. Giorgetti

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**Influência da Umidade Atmosférica sobre o Mecanismo  
de Transferência de Gases através da Interface Água-  
Atmosfera**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço: 21/05/04

Assinatura:  
*Bernardo Coriolis*

**Alexandre Silveira**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil; Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti

DEDALUS - Acervo - EESC



31100047329

São Carlos

2004



|        |           |
|--------|-----------|
| Class. | TESE EESC |
| Codd.  | 5920?     |
| Tombo  | T20104    |
| Sysno  | 1395309   |

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

S587i Silveira, Alexandre  
Influência da umidade atmosférica sobre o mecanismo  
de transferência de gases através da interface água-  
atmosfera / Alexandre Silveira. -- São Carlos, 2004.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área : Hidráulica e Saneamento.

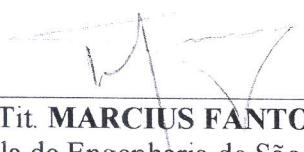
Orientador: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti.

1. Reoxigenação superficial. 2. Umidade  
atmosférica. 3. Transferência de gases. 4. Interface  
gás-líquido. Título.

## **FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE SILVEIRA**

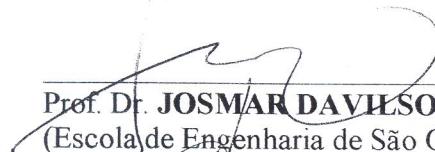
Tese defendida e julgada em 19-03-2004 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Tit. **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

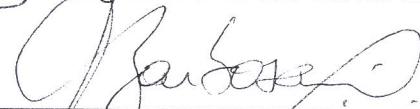
Aprovado

  
Prof. Tit. **WOODROW NELSON LOPES ROMA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

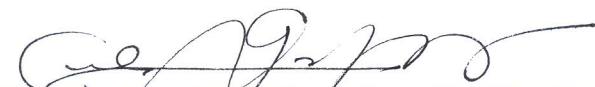
Aprovado

  
Prof. Dr. **JOSMAR DAVIDSON PAGLIUSO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

  
Prof. Dr. **ANTENOR RODRIGUES BARBOSA JUNIOR**  
(Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP)

Aprovado

  
Prof. Tit. **CARLOS ALBERTO GASPARETTO**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

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

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus queridos pais, Athayde e Luzia, pela educação no passado.

Aos meus filhos, Bárbara e Gabriel, pela educação no futuro.

À minha esposa, Andréa, pelo presente.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Marcius pela orientação, profissionalismo e amizade, pela confiança depositada e pelo exercício da construção do conhecimento.

Ao Professor Woodrow Nelson Lopes Roma pelo apoio.

Aos amigos Romeu Francisco Gadotti, Guilherme Del Nero Maia, Giovanni Chaves Penner, Cláudio Antônio Andrade Lima, Alisson Carraro, Sérgio Francisco Aquino, André Coelho, Sérgio Paulo Campana Filho, Fernando Hermes Passig, Leonardo Soares Vieira, Marcus Vinícius Guerini Vallero.

Aos professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento com os quais tive o privilégio de conviver durante sete anos, especialmente ao técnico Roberto Cesar Bérgamo.

Aos colegas e irmãos Athayde Silveira Neto e Rafael Silveira. Ao amigo José Francisco Ferreira. Todos distantes, mas presentes.

À FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa.

## RESUMO

SILVEIRA A. – Influência da umidade atmosférica sobre o mecanismo de transferência de gases através da interface água-atmosfera. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

O trabalho apresenta uma investigação sobre a influência da umidade atmosférica no processo de absorção de oxigênio atmosférico por corpo de água através de sua superfície líquida livre. Os experimentos realizados em laboratório consistem na reoxigenação de uma massa de água, contida em um tanque cilíndrico, submetida à agitação mecânica. A atmosfera que reabastece de oxigênio a massa líquida é controlada e os ensaios são conduzidos com vários níveis de umidade do ar, o que provoca diferentes taxas de evaporação. Simultaneamente, determinam-se os coeficientes de reoxigenação,  $K_2 (h^{-1})$ , em cada experimento. Investiga-se neste trabalho a correlação entre esses dois parâmetros. O processo de reoxigenação é analisado inicialmente com o uso de metodologia clássica baseada em modelos matemáticos tradicionais (possivelmente inadequados). Propõe-se neste trabalho, um modelo original para essa mesma análise.

Palavras-chave: umidade atmosférica, reoxigenação superficial, transferência de gases, interface gás-líquido.

## ABSTRACT

SILVEIRA A. – *Influence of the atmospheric humidity on the mechanism of the gas transfer at the atmosphere-water interface.* PhD Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

The influence of the atmospheric humidity on the process of absorption of oxygen by a water body through its free surface is presented herein. Laboratory experiments were run for the reoxygenation of a water mass kept in a cylindrical vessel under mechanical agitation. The quality of the atmospheric air transferring oxygen to water is controlled and the tests are run with several levels of air humidity, what renders different rates of evaporation. The corresponding coefficients of reaeration  $K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ) are determined for each experiment. The correlation between these two latter parameters is investigated. The process of reoxygenation is analyzed initially using a classical methodology based on traditional mathematical models (possibly inadequate). An original model for the same analysis is proposed in this work.

Keywords: atmospheric humidity, surface reoxygenation, gas transfer, gas-liquid interface.

## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| LISTA DE ABREVIATURAS .....                                    | i   |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....  | ii  |
| LISTA DE FIGURAS .....   | iv  |
| LISTA DE TABELAS.....  | xii |
| 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....                                | 1   |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                 | 4   |
| 2.1 Reoxigenação superficial .....                             | 5   |
| 2.1.1 Fórmulas empíricas para estimativa de $K_2$ em rios..... | 9   |
| 2.1.2 Modelos conceituais .....                                | 12  |
| 2.1.2.1 Teoria dos dois filmes.....                            | 12  |
| 2.1.2.2 Teoria da penetração – Modelo de Higbie.....           | 14  |
| 2.1.2.3 Teoria da renovação superficial–Danckwerts.....        | 15  |
| 2.1.3 Influência da temperatura sobre $K_2$ .....              | 17  |
| 2.1.4 Influência da umidade atmosférica sobre $K_2$ .....      | 18  |
| 2.1.5 Modelagem da transferência de oxigênio .....             | 20  |
| 2.1.5.1 Estimativa dos parâmetros .....                        | 22  |
| 2.1.5.2 Concentração de Saturação de O.D. - $C_S$ .....        | 23  |
| 2.1.5.3 Recomendações na análise de dados experimentais .....  | 25  |
| 2.1.5.4 Instrumentos.....                                      | 26  |
| 2.2 Agitação de líquidos .....                                 | 28  |
| 2.2.1 Introdução.....  | 28  |
| 2.2.2 Padrões de escoamento .....                              | 30  |
| 2.2.3 Equipamentos de agitação .....                           | 33  |
| 2.2.4 Seleção dos rotores .....                                | 35  |
| 2.2.5 Potência consumida na agitação .....                     | 36  |
| 2.3 Umidade relativa e umidade absoluta .....                  | 37  |

|   |    |
|---|----|
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                   | 40 |
| 3.1 Montagem experimental.....                                | 40 |
| 3.1.1 Descrição geral.....                                    | 40 |
| 3.1.1.1 Tanque com agitação hidrodinâmica.....                | 41 |
| 3.1.1.2 Impulsor rotativo - rotor .....                       | 43 |
| 3.1.1.3 Sistema de distribuição de ar .....                   | 47 |
| 3.1.1.3.1 Distribuição de ar tipo radial-centrípeta .....     | 47 |
| 3.1.1.3.2 Distribuição de ar tipo radial-centrífuga .....     | 49 |
| 3.1.1.4 Vazão de ar .....                                     | 50 |
| 3.1.1.4.1 Posicionamento do sensor de UR .....                | 50 |
| 3.1.1.5 Secador de ar .....                                   | 52 |
| 3.1.1.6 Umidificador de ar .....                              | 52 |
| 3.1.1.7 Sistema de controle da umidade do ar.....             | 54 |
| 3.2 Instrumentação .....                                      | 54 |
| 3.2.1 Oxigênio dissolvido (O.D.) .....                        | 55 |
| 3.2.1.1 Calibração do sensor de O.D. ....                     | 56 |
| 3.2.2 Umidade relativa do ar.....                             | 60 |
| 3.2.3 Temperatura .....                                       | 61 |
| 3.2.4 Velocidade de rotação .....                             | 62 |
| 3.2.5 Vazão de ar .....                                       | 62 |
| 3.3 Ensaios .....   | 64 |
| 3.3.1 Metodologia experimental.....                           | 64 |
| 3.3.2 Formulação utilizada.....                               | 67 |
| 3.3.2.1 Modelo para quantificação da taxa de evaporação ..... | 70 |
| 3.3.3 Estimativa dos parâmetros e tempo de ensaio .....       | 71 |
| 3.3.4 Condições dos ensaios.....                              | 80 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                              | 81 |
| 4.1 Coeficiente de Reoxigenação .....                         | 81 |
| 4.2 Correção de $K_2$ para a temperatura padrão de 25°C.....  | 98 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.3     | Coeficiente de reoxigenação $K_{2,25}$ em função do nível de agitação ..... | 99  |
| 4.4     | Coeficiente de reoxigenação $K_2$ em função da taxa de evaporação .....     | 107 |
| 4.5     | Considerações sobre o modelo utilizado .....                                | 110 |
| 4.5.1   | Proposição de novo modelo .....   | 114 |
| 4.5.1.1 | Estimativa dos parâmetros $K_2$ , $K_3$ , $C_s$ e $C_0$ .....               | 115 |
| 4.5.1.2 | Análise de $K_2$ .....  | 119 |
| 4.5.1.3 | Análise de $K_3$ .....  | 122 |
| 4.5.1.4 | Estimativa de $K_2$ e $K_3$ pelo método do regime permanente .....          | 125 |
| 5.      | CONCLUSÕES .....  | 127 |
| 6.      | BIBLIOGRAFIA.....   | 130 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

EPA – Environmental Protection Agency

O.D. – Oxigênio Dissolvido

MRP - Método do Regime Permanente

ASCE – American Society of Civil Engineers

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |   |              |
|------------|---|--------------|
| $A$        | = Área de interface gás-líquido                       | $L^2$        |
| $C$        | = Concentração do gás dissolvido no volume líquido    | $ML^{-3}$    |
| $C_0$      | = Concentração inicial de oxigênio dissolvido         | $ML^{-3}$    |
| $C'_S$     | = Concentração de saturação sob condições do processo | $ML^{-3}$    |
| $C_I$      | = Concentração do gás na interface                    | $ML^{-3}$    |
| $C_L$      | = Concentração do gás na fase líquida                 | $ML^{-3}$    |
| $C_S$      | = Concentração de saturação do gás no líquido         | $ML^{-3}$    |
| $D$        | = Diâmetro do rotor                                   | $L$          |
| $D_m$      | = Coeficiente de difusão molecular do gás no líquido  | $L^2T^{-1}$  |
| $H$        | = Profundidade média do escoamento                    | $L$          |
| $J$        | = Fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa      | $ML^2T^{-1}$ |
| $K'_2$     | = Coeficiente de reoxigenação superficial do processo | $T^{-1}$     |
| $K_2$      | = Coeficiente de reoxigenação superficial             | $T^{-1}$     |
| $K_{2,25}$ | = Coeficiente de reoxigenação superficial a 25°C      | $T^{-1}$     |
| $K_3$      | = Coeficiente de desoxigenação                        | $T^{-1}$     |
| $K_{3,25}$ | = Coeficiente de desoxigenação na temperatura 25°C    | $T^{-1}$     |
| $K_g$      | = Coeficiente do filme gasoso                         | $LT^{-1}$    |
| $K_L$      | = Coeficiente global de transferência de massa        | $LT^{-1}$    |
| $K_l$      | = Coeficiente do filme líquido                        | $LT^{-1}$    |
| $K_{La}$   | = Coeficiente volumétrico de transferência de massa   | $T^{-1}$     |
| $m$        | = Massa de gás dissolvido                             | $M$          |
| $\dot{m}$  | = Descarga mássica                                    | $MT^{-1}$    |
| $N$        | = Velocidade de rotação                               | $T^{-1}$     |

|            |   |                 |
|------------|---|-----------------|
| $N_{Re}$   | = Número de Reynolds                            |                 |
| $P_{atm}$  | = Pressão atmosférica                           | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $\bar{p}$  | = Pressão parcial                               | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $p_s$      | = Pressão de saturação de vapor de água         | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $P_G$      | = Pressão parcial do gás na fase gasosa         | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $P_I$      | = Pressão parcial do gás na interface           | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $Q$        | = Vazão de ar                                   | $L^3T^{-1}$     |
| $t$        | = Tempo   | T               |
| $T$        | = Temperatura                                   | $\theta$        |
| $T_{ar}$   | = Temperatura do ar                             | $\theta$        |
| $t_e$      | = Tempo médio de contato do fluido na interface | T               |
| $T_{evap}$ | = Taxa de evaporação                            | $MT^{-1}$       |
| $U$        | = Velocidade média do escoamento                | $LT^{-1}$       |
| $UA$       | = Umidade absoluta da atmosfera                 |                 |
| $UR$       | = Umidade relativa da atmosfera                 |                 |
| $V'$       | = Velocidade do rotor                           | $LT^{-1}$       |
| $\Delta P$ | = Diferença de pressão na placa de orifício     | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $y$        | = Profundidade do escoamento                    | L               |
| $\rho$     | = Massa específica do fluido                    | $ML^{-3}$       |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – $K_2$ para rios (velocidade média $U= 0,5$ m/s).....  | 10 |
| Figura 2 – Modelo dos dois filmes .....  | 13 |
| Figura 3 – Teoria da Penetração .....  | 14 |
| Figura 4 – $K_2$ em função da umidade relativa do ar, 62 rpm.....  | 19 |
| Figura 5 – $K_2$ em função da umidade relativa do ar, 255 rpm.....   | 19 |
| Figura 6 – $K_2$ em função da umidade relativa do ar.....  | 20 |
| Figura 7 – Elementos funcionais de um instrumento .....  | 27 |
| Figura 8 – Movimento do fluido em um tanque, sem inibidores de vórtice. ....   | 31 |
| Figura 9 – Rotor inclinado e fora de centro.....   | 31 |
| Figura 10 – Movimento do fluido em tanques agitados com rotores turbina (a) e hélice (b), com inibidores de vórtice e "draft tubes". ..... | 32 |
| Figura 11 – Dimensões padrão de um tanque para agitação de líquidos .....  | 33 |
| Figura 12 – Tipo de rotor em função da viscosidade do líquido.....   | 35 |
| Figura 13 – Pressão de saturação .....   | 38 |
| Figura 14 – Esquema da montagem experimental .....   | 40 |
| Figura 15 – Tanque cilíndrico.....   | 41 |
| Figura 16 – Dimensões do tanque (cm).....  | 42 |
| Figura 17 – Vista do tanque em planta .....  | 42 |
| Figura 18 – Fotografia do tanque.....  | 42 |
| Figura 19 – Tanque (aberto) em operação .....  | 43 |
| Figura 20 – Esquema do sistema de agitação .....   | 43 |
| Figura 21 – Fotografia do sistema de agitação .....  | 44 |
| Figura 22 – Detalhe do sistema de vedação .....  | 44 |
| Figura 23 – Dimensões do rotor (cm) .....  | 45 |
| Figura 24 – Curvas de potência .....   | 45 |
| Figura 25 – Esquema do anel de distribuição de ar.....   | 48 |
| Figura 26 – Entrada e saída de ar no tanque .....  | 48 |
| Figura 27 – Anel de distribuição de ar .....   | 49 |
| Figura 28 – Sistema de distribuição de ar: centro-periferia.....   | 49 |
| Figura 29 – Tampa do tanque.....   | 50 |
| Figura 30 – Soprador de ar .....   | 50 |
| Figura 31 – Umidade medida em três locais – sem agitação da água.....  | 51 |
| Figura 32 – Umidade medida em três locais – com agitação da água.....  | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 33 – Secador para ar comprimido.....                                    | 52 |
| Figura 34 – Sistema para umidificação de ar.....                               | 53 |
| Figura 35 – Bomba de alta pressão .....  | 53 |
| Figura 36 – Câmara umidificadora.....  | 53 |
| Figura 37 – Sistema de controle da umidade do ar .....                         | 54 |
| Figura 38 – Sistema de aquisição de dados .....                                | 55 |
| Figura 39 – Eletrodo para medida de oxigênio dissolvido.....                   | 55 |
| Figura 40 – Comparação entre os sensores TI e WTW .....                        | 57 |
| Figura 41 – Comparação entre os sensores TI e Orion .....                      | 59 |
| Figura 42 – Umidade de equilíbrio para as vazões de ar de 600 e 1000 l/h ..... | 60 |
| Figura 43 – Estimativa do tempo de resposta do sensor .....                    | 61 |
| Figura 44 – Temperatura da água .....  | 61 |
| Figura 45 – Medidor da velocidade de rotação .....                             | 62 |
| Figura 46 – Dimensões da placa de orifício .....                               | 64 |
| Figura 47 – Fotografia da placa de orifício.....                               | 64 |
| Figura 48 – Difusor de ar no tanque em repouso.....                            | 65 |
| Figura 49 – Difusor ligado com tanque em repouso .....                         | 66 |
| Figura 50 – Difusor ligado com tanque em agitação.....                         | 66 |
| Figura 51 – Vista superior do tanque .....                                     | 66 |
| Figura 52 – Rotâmetro .....  | 67 |
| Figura 53 – Volume de controle .....   | 71 |
| Figura 54 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 50 rpm.....              | 74 |
| Figura 55 – $C_S$ em função da % de dados utilizados, 50 rpm .....             | 74 |
| Figura 56 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 100 rpm.....             | 75 |
| Figura 57 – $C_S$ em função da % de dados utilizados, 100 rpm .....            | 75 |
| Figura 58 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 150 rpm.....             | 76 |
| Figura 59 – $C_S$ em função da % de dados utilizados, 150 rpm .....            | 76 |
| Figura 60 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 200 rpm.....             | 77 |
| Figura 61 – $C_S$ em função da % de dados utilizados, 200 rpm .....            | 77 |
| Figura 62 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 250 rpm.....             | 78 |
| Figura 63 – $C_S$ em função da % de dados utilizados, 250 rpm .....            | 78 |
| Figura 64 – $K_2$ em função da % de dados utilizados, 300 rpm.....             | 79 |
| Figura 65– $C_S$ em função da % de dados utilizados, 300 rpm .....             | 79 |
| Figura 66 – Curva de reoxigenação.....   | 82 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 67 – Resíduos em função do tempo .....  | 82 |
| Figura 68 – Distribuição dos resíduos.....     | 82 |
| Figura 69 - Curva de reoxigenação.....         | 82 |
| Figura 70 – Resíduos em função do tempo .....  | 82 |
| Figura 71 – Distribuição dos resíduos.....     | 82 |
| Figura 72 – Curva de reoxigenação.....         | 83 |
| Figura 73 – Resíduos em função do tempo .....  | 83 |
| Figura 74 – Distribuição dos resíduos.....     | 83 |
| Figura 75 – Curva de reoxigenação.....         | 83 |
| Figura 76 – Resíduos em função do tempo .....  | 83 |
| Figura 77 – Distribuição dos resíduos.....     | 83 |
| Figura 78 – Curva de reoxigenação.....         | 84 |
| Figura 79 – Resíduos em função do tempo .....  | 84 |
| Figura 80 – Distribuição dos resíduos.....     | 84 |
| Figura 81 – Curva de reoxigenação.....         | 84 |
| Figura 82 – Resíduos em função do tempo .....  | 84 |
| Figura 83 – Distribuição dos resíduos.....     | 84 |
| Figura 84 – Curva de reoxigenação.....         | 85 |
| Figura 85 – Resíduos em função do tempo .....  | 85 |
| Figura 86 – Distribuição dos resíduos.....     | 85 |
| Figura 87 – Curva de reoxigenação.....         | 85 |
| Figura 88 – Resíduos em função do tempo .....  | 85 |
| Figura 89 – Distribuição dos resíduos.....     | 85 |
| Figura 90 – Curva de reoxigenação.....         | 86 |
| Figura 91 – Resíduos em função do tempo .....  | 86 |
| Figura 92 – Distribuição dos resíduos.....     | 86 |
| Figura 93 – Curva de reoxigenação.....         | 86 |
| Figura 94 – Resíduos em função do tempo .....  | 86 |
| Figura 95 – Distribuição dos resíduos.....     | 86 |
| Figura 96 – Curva de reoxigenação.....         | 87 |
| Figura 97 – Resíduos em função do tempo .....  | 87 |
| Figura 98 – Distribuição dos resíduos.....     | 87 |
| Figura 99 – Curva de reoxigenação.....         | 87 |
| Figura 100 – Resíduos em função do tempo ..... | 87 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 101 – Distribuição dos resíduos.....    | 87 |
| Figura 102 – Curva de reoxigenação.....        | 88 |
| Figura 103 – Resíduos em função do tempo ..... | 88 |
| Figura 104 – Distribuição dos resíduos.....    | 88 |
| Figura 105 – Curva de reoxigenação.....        | 88 |
| Figura 106 – Resíduos em função do tempo ..... | 88 |
| Figura 107 – Distribuição dos resíduos.....    | 88 |
| Figura 108 – Curva de reoxigenação.....        | 89 |
| Figura 109 – Resíduos em função do tempo ..... | 89 |
| Figura 110 – Distribuição dos resíduos.....    | 89 |
| Figura 111 – Curva de reoxigenação.....        | 89 |
| Figura 112 – Resíduos em função do tempo ..... | 89 |
| Figura 113 – Distribuição dos resíduos.....    | 89 |
| Figura 114 – Curva de reoxigenação.....        | 90 |
| Figura 115 – Resíduos em função do tempo ..... | 90 |
| Figura 116 – Distribuição dos resíduos.....    | 90 |
| Figura 117 – Curva de reoxigenação.....        | 90 |
| Figura 118 – Resíduos em função do tempo ..... | 90 |
| Figura 119 – Distribuição dos resíduos.....    | 90 |
| Figura 120 – Curva de reoxigenação.....        | 91 |
| Figura 121 – Resíduos em função do tempo ..... | 91 |
| Figura 122 – Distribuição dos resíduos.....    | 91 |
| Figura 123 – Curva de reoxigenação.....        | 91 |
| Figura 124 – Resíduos em função do tempo ..... | 91 |
| Figura 125 – Distribuição dos resíduos.....    | 91 |
| Figura 126 – Curva de reoxigenação.....        | 92 |
| Figura 127 – Resíduos em função do tempo ..... | 92 |
| Figura 128 – Distribuição dos resíduos.....    | 92 |
| Figura 129 – Curva de reoxigenação.....        | 92 |
| Figura 130 – Resíduos em função do tempo ..... | 92 |
| Figura 131 – Distribuição dos resíduos.....    | 92 |
| Figura 132 – Curva de reoxigenação.....        | 93 |
| Figura 133 – Resíduos em função do tempo ..... | 93 |
| Figura 134 – Distribuição dos resíduos.....    | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 135 – Curva de reoxigenação.....  | 93  |
| Figura 136 – Resíduos em função do tempo .....   | 93  |
| Figura 137 – Distribuição dos resíduos.....  | 93  |
| Figura 138 – Curva de reoxigenação.....  | 94  |
| Figura 139 – Resíduos em função do tempo .....   | 94  |
| Figura 140 – Distribuição dos resíduos.....  | 94  |
| Figura 141 – Curva de reoxigenação.....  | 94  |
| Figura 142 – Resíduos em função do tempo .....   | 94  |
| Figura 143 – Distribuição dos resíduos.....  | 94  |
| Figura 144 – Curva de reoxigenação.....  | 95  |
| Figura 145 – Resíduos em função do tempo .....   | 95  |
| Figura 146 – Distribuição dos resíduos.....  | 95  |
| Figura 147 – Curva de reoxigenação.....  | 95  |
| Figura 148 – Resíduos em função do tempo .....   | 95  |
| Figura 149 – Distribuição dos resíduos.....  | 95  |
| Figura 150 – Curva de reoxigenação.....  | 96  |
| Figura 151 – Resíduos em função do tempo .....   | 96  |
| Figura 152 – Distribuição dos resíduos.....  | 96  |
| Figura 153 – Curva de reoxigenação.....  | 96  |
| Figura 154 – Resíduos em função do tempo .....   | 96  |
| Figura 155 – Distribuição dos resíduos.....  | 96  |
| Figura 156 – $K_{2,25}$ em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$ 0,78 a 0,90 g/min) ..... | 100 |
| Figura 157 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 0,78 a 0,90 g/min). 100    | 100 |
| Figura 158 – $K_{2,25}$ em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$ 0,65 a 0,85 g/min) ..... | 101 |
| Figura 159 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 0,65 a 0,85 g/min).. 101   | 101 |
| Figura 160 – $K_{2,25}$ em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$ 2,04 a 3,19 g/min) ..... | 102 |
| Figura 161 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 2,04 a 3,19 g/min).. 102   | 102 |
| Figura 162 – $K_{2,25}$ em função da velocidade de rotação .....                                 | 103 |
| Figura 163 – $K_{2,25}$ em função da velocidade de rotação .....                                 | 103 |
| Figura 164 – $K_{2,25}$ em função da potência específica .....                                   | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 165 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 0,78 a 0,90 g/min), bi-logarítmico ..... | 104 |
| Figura 166 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 0,65 a 0,85 g/min), bi-logarítmico ..... | 105 |
| Figura 167 – $K_{2,25}$ em função da potência específica ( $T_{evap}$ 2,04 a 3,19 g/min), bi-logarítmico ..... | 105 |
| Figura 168 – $n_1$ e $n_2$ para $T_{evap}$ 0,78 a 0,90 g/min .....   | 106 |
| Figura 169 – $n_1$ e $n_2$ para $T_{evap}$ 0,65 a 0,85 g/min .....   | 106 |
| Figura 170 – $n_1$ e $n_2$ para $T_{evap}$ 2,04 a 3,19 g/min .....   | 107 |
| Figura 171 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 50 rpm.....   | 108 |
| Figura 172 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 100 rpm.....  | 108 |
| Figura 173 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 150 rpm.....  | 108 |
| Figura 174 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 200 rpm.....  | 109 |
| Figura 175 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 250 rpm.....  | 109 |
| Figura 176 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação, 300 rpm.....  | 109 |
| Figura 177 – $K_{2,25}$ em função da taxa de evaporação.....   | 110 |
| Figura 178 – Comparação entre os valores de $C_S$ .....  | 112 |
| Figura 179 – Variação da concentração de saturação.....  | 113 |
| Figura 180 – modelo novo, 50 rpm .....   | 115 |
| Figura 181 – modelo novo, 100 rpm .....  | 116 |
| Figura 182 – modelo novo, 150 rpm .....  | 116 |
| Figura 183 – modelo novo, 200 rpm .....  | 116 |
| Figura 184 – modelo novo, 250 rpm .....  | 117 |
| Figura 185 – modelo novo, 300 rpm .....  | 117 |
| Figura 186 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 50 rpm .....  | 120 |
| Figura 187 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 100 rpm .....   | 120 |
| Figura 188 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 150 rpm .....   | 120 |
| Figura 189 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 200 rpm .....   | 121 |
| Figura 190 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 250 rpm .....   | 121 |
| Figura 191 – Comparação entre $K_{2,25}$ – 300 rpm .....   | 121 |
| Figura 192 – $K_{3,25}$ – 50 rpm.....  | 122 |
| Figura 193 – $K_{3,25}$ – 100 rpm.....   | 122 |
| Figura 194 – $K_{3,25}$ – 150 rpm.....   | 123 |
| Figura 195 – $K_{3,25}$ – 200 rpm.....   | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 196 – $K_{3,25}$ – 250 rpm.....                               | 123 |
| Figura 197 – $K_{3,25}$ – 300 rpm.....                               | 124 |
| Figura 198 – $K_{3,25}$ em função do nível de agitação da água ..... | 124 |
| Figura 199 – Comparação entre $K_{2,25}$ - MRP .....                 | 126 |
| Figura 200 – Comparação entre $K_{3,25}$ - MRP .....                 | 126 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 – $K_2$ (dia $^{-1}$ a 20°C) para rios .....   | 9   |
| Tabela 2 – Comparação dos valores de $C_S$ obtidos a partir das equações A, B, C, D e E, pressão = 1 atm, água desalinizada ..... | 25  |
| Tabela 3 – Tipos de rotores .....   | 34  |
| Tabela 4 – Potência dissipada .....   | 46  |
| Tabela 5 – Valores obtidos com os sensores TI-Vernier e WTW.....  | 57  |
| Tabela 6 – Desvio padrão dos sensores TI-Vernier e WTW .....  | 58  |
| Tabela 7 – Valores obtidos com os sensores TI-Vernier e Orion.....  | 58  |
| Tabela 8 – Desvio padrão dos sensores TI-Vernier e WTW .....  | 59  |
| Tabela 9 – Tempo de ensaio sugerido.....  | 72  |
| Tabela 10 – Tempo de ensaio (limite prático).....   | 72  |
| Tabela 11 – Variação de parâmetros, 50 rpm.....   | 74  |
| Tabela 12 – Variação de parâmetros, 100 rpm.....  | 75  |
| Tabela 13 – Variação de parâmetros, 150 rpm.....  | 76  |
| Tabela 14 – Variação de parâmetros, 200 rpm.....  | 77  |
| Tabela 15 – Variação de parâmetros, 250 rpm.....  | 78  |
| Tabela 16 – Variação de parâmetros, 300 rpm.....  | 79  |
| Tabela 17 – Tempo de duração dos ensaios.....   | 80  |
| Tabela 18 – Ensaios .....   | 80  |
| Tabela 19 – Erro padrão e coeficiente de determinação .....   | 97  |
| Tabela 20 – $K_2$ (h $^{-1}$ ) corrigido para 25°C .....  | 98  |
| Tabela 21 –Taxa de evaporação de 0,78 a 0,90 g/min.....   | 100 |
| Tabela 22 – Taxa de evaporação de 0,65 a 0,85 g/min.....  | 101 |
| Tabela 23 – Taxa de evaporação de 2,04 a 3,19 g/min.....  | 102 |
| Tabela 24 – Comparação entre os valores de $C_S$ .....  | 111 |
| Tabela 25 – Parâmetros estimados, novo modelo.....  | 118 |

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

---

O conhecimento do mecanismo de absorção do oxigênio atmosférico através da superfície de um líquido é de grande importância para a determinação da qualidade dos corpos de água naturais. A quantidade de oxigênio dissolvido na água é um importante parâmetro de qualidade, constituindo-se em fator limitante para a manutenção da vida aquática. O oxigênio dissolvido (O.D.) em um corpo de água natural é essencial para a manutenção dos seres aeróbios responsáveis pelo processo de redução da demanda bioquímica de oxigênio (D.B.O.). Entre os outros processos consumidores de O.D. estão a demanda bentônica e a adição de D.B.O. devido ao escoamento superficial. O (re)abastecimento de O.D. é realizado naturalmente pela reaeração ou reoxigenação superficial através da interface água-ar, além das atividades fotossintéticas.

O processo físico de reoxigenação de um sistema aquático pode ser quantificado pelo coeficiente simbolizado por  $K_2$ , o qual fornece um indicativo da velocidade de enriquecimento de oxigênio no volume de água. Sua dimensão de medida é o inverso do tempo, ou  $\text{tempo}^{-1}$ . O inverso de  $K_2$ , ou seja  $1/K_2$ , é uma constante de tempo do processo. O coeficiente  $K_2$  quantifica fenômenos em que estão envolvidos tanto a área superficial do corpo de água quanto o seu volume. No entanto, embora não seja o parâmetro quantificador do processo de transferência superficial, é usualmente denominado na literatura “coeficiente de reoxigenação superficial”. O parâmetro  $K_2$  é considerado relevante na Engenharia Ambiental como um indicador da capacidade de autodepuração de um escoamento. A estimativa correta de  $K_2$  define indiretamente a quantidade de resíduos consumidores de oxigênio que poderia ser lançada no corpo receptor sem comprometimento da qualidade da água.

Desde o começo do século XX, a transferência de gases através da interface ar-água vem sendo estudada por pesquisadores, visando à determinação dos coeficientes de transferência de massa envolvidos no processo. A complexidade da investigação é devida aos fatores que afetam a

transferência do gás verificada na interface. Destacam-se, por exemplo, as características hidráulicas do escoamento e a velocidade do vento sobre a superfície líquida, além da temperatura e de fatores físico-químicos que podem contribuir acelerando ou retardando o processo de transferência.

Vários modelos foram propostos com o objetivo de explicar o fenômeno da absorção do oxigênio por um corpo de água, entre os quais se destacam o Modelo de Dois Filmes (1924), a Teoria da Penetração (1935), o Modelo da Renovação Superficial (1951) o Modelo de Difusão Turbulenta (1955) e modelos baseados na teoria cinética (a partir de 1962). Os modelos estabeleceram bases conceituais para o fenômeno, que servem de apoio para o desenvolvimento de tecnologias para a determinação empírica ou semi-empírica dos parâmetros: coeficiente de transferência de massa; espessura dos filmes nas fases líquida e gasosa; tempo médio de renovação superficial e distribuição das idades de renovação superficial, considerados relevantes no processo de transferência de gases através da interface. Estes parâmetros são discutidos brevemente na revisão bibliográfica. Na medida em que os modelos foram se tornando mais sofisticados, a caracterização e a determinação dos coeficientes empíricos tornaram-se também mais complexas.

As pesquisas realizadas no início da década de 90 no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP apontaram para outro possível fator que influenciaria a transferência de oxigênio através da interface água-ar, a umidade relativa do ar. Os resultados que indicaram uma correlação entre  $K_2$  e a umidade atmosférica, obtida por pesquisadores da EESC, são apresentados na revisão bibliográfica.

A determinação do coeficiente  $K_2$  pode ser realizada em escala de laboratório em tanques hidrodinâmicos ou em canais artificiais, onde podem ser controlados os múltiplos fatores que influenciam o comportamento hidrodinâmico. A prática usual observada na literatura tem sido a determinação do coeficiente  $K_2$  a partir de uma análise de regressão sobre dados coletados durante um regime transitório na variação do O.D. do corpo de água sob observação. Existem fórmulas empíricas que permitem a estimativa do coeficiente  $K_2$  em escoamentos naturais de águas, utilizando-se variáveis mensuráveis do escoamento como a velocidade e a profundidade médias.

O objetivo geral deste trabalho é a realização de uma investigação, em escala de laboratório, sobre o mecanismo de absorção do oxigênio atmosférico através da superfície livre da água em agitação. A partir dos dados coletados, será feita uma análise para a quantificação de  $K_2$  em função do nível de agitação, fato que permitirá uma comparação com resultados de diversos autores.

Do ponto de vista específico, os objetivos são direcionados para investigar os fatores que interferem no coeficiente de transferência de oxigênio e de outros gases através da interface água-atmosfera. Os parâmetros considerados são a umidade relativa do ar e as características do nível de agitação. Os ensaios são realizados em condições ambientais rigorosamente controladas. Paralelamente são feitas diversas análises sobre a estimativa dos parâmetros que quantificam o processo de reoxigenação. Um novo modelo matemático é proposto para quantificar o processo, sendo testado e comparado com o modelo clássico.

A justificativa para a realização desta pesquisa é que a investigação do fenômeno de transferência de oxigênio atmosférico para um corpo de água sob condições de agitação é um assunto complexo e não totalmente compreendido, de grande aplicação prática em áreas de domínio da Engenharia Ambiental e Sanitária.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água utilizada na natureza por seres vivos para manutenção da vida é constantemente reciclada através do processo conhecido como ciclo hidrológico. O uso múltiplo das águas considera diversas funções, entre as quais se destacam: consumo humano, recreação, processos industriais, sistemas hidrelétricos, navegação, irrigação, habitação e manutenção de organismos aquáticos e habitat das comunidades vegetais.

Ações governamentais, através de legislações ambientais, são aplicadas para proteger as águas naturais evitando contaminação por poluentes e substâncias tóxicas, estabelecendo padrões de qualidade por vezes alcançados por meio de adequados sistemas de tratamento de águas resíduárias. Esta atuação conjunta de políticas governamentais e tecnologias de tratamento garante que águas de melhor qualidade sejam devolvidas ao corpo receptor, e o uso múltiplo das águas torna-se possível para as gerações atuais e futuras, como explicitado na legislação brasileira (Lei 6938/81, Política Nacional do Meio Ambiente e Lei 9433/97, Política Nacional dos Recursos Hídricos também conhecida como Lei das Águas).

Em sistemas de tratamentos de águas resíduárias o oxigênio é utilizado por microrganismos aeróbios que oxidam matéria orgânica ou em reações químicas de oxidação. É patente a relevância do conhecimento do mecanismo de transferência de oxigênio para otimizar estações de tratamento. Ainda que a transferência de oxigênio utilizada nas estações seja feita na forma de ar difuso (borbulhamento), o princípio de transferência de massa é o mesmo, independentemente de o oxigênio provir de bolhas ou da atmosfera.

A aplicação do conhecimento científico aos processos de transferência de oxigênio estende-se à reoxigenação superficial verificada em rios e lagos, necessária para restabelecer o equilíbrio na concentração de oxigênio dissolvido que é continuamente consumido por organismos vivos, tornando o fenômeno bastante complexo.

O conhecimento adquirido sobre transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida através da interface livre tem aplicação nos escoamentos de águas naturais. No entanto, o fenômeno de transferência pode ser estudado em duas frentes distintas: quando o oxigênio provém da atmosfera e quando é artificialmente fornecido ao meio. O primeiro caso, denominado reaeração ou reoxigenação superficial, ocorre naturalmente e é quantificado pelo Coeficiente de Reaeração (ou Reoxigenação) Superficial,  $K_2$ . Em sistemas de tratamento de águas residuárias, o oxigênio é fornecido artificialmente, sendo o processo conhecido como "aeração" e é caracterizado pelo Coeficiente Volumétrico de Transferência de Massa,  $K_{La}$ . Os dois coeficientes têm como dimensões o inverso do tempo ( $\text{tempo}^{-1}$ ).

O processo de transferência de gases tem sido investigado, geralmente, com base em medições feitas em campo ou em laboratório. Entre os parâmetros medidos estão a concentração de oxigênio dissolvido, temperatura, pressão, além das variáveis hidrodinâmicas do escoamento. As técnicas de campo, geralmente, demandam maiores quantidades de recursos e tempo, fato que justifica a investigação do fenômeno em escala de laboratório.

## 2.1 Reoxigenação superficial

O fenômeno de reoxigenação superficial é o processo de troca de oxigênio entre a atmosfera e um corpo de água em contato com a atmosfera. Geralmente, a transferência (líquida) de oxigênio ocorre da atmosfera para o corpo de água visto que os níveis de oxigênio dissolvido na maioria dos escoamentos naturais encontram-se abaixo dos valores de saturação, EPA (1985).

Durante a reoxigenação superficial, as propriedades do fluido pouco se alteram, enquanto que as características hidráulicas do escoamento variam drasticamente dos regimes lentos para os regimes rápidos. Em escoamentos laminares o processo de reoxigenação é determinado somente pela difusão molecular, enquanto que nos escoamentos turbulentos a situação é mais complexa, envolvendo o transporte aleatório pelos turbilhões, Barbosa (1989).

Para descrever o fenômeno da reoxigenação foram desenvolvidos modelos conceituais que incorporam os processos físicos da absorção e transporte permitindo prever o coeficiente de reoxigenação para as condições do escoamento. Esses modelos baseiam-se na existência de uma película entre a água e ar na qual ocorrem fortes gradientes de concentração. Os modelos consideram ainda algumas hipóteses: "Analítica e experimentalmente, foi estabelecido que em escoamentos turbulentos os valores de O.D. são essencialmente uniformes abaixo da película superficial" Giansanti (1986). Outra hipótese verificada por Holley (1977), mostra que devido ao constante contato com o ar atmosférico, a superfície livre do líquido está saturada dos gases contidos na atmosfera, ou seja, no equilíbrio, a concentração dos gases atmosféricos na interface é a concentração de saturação do gás no líquido e foi evidenciado por Myamoto, (1931) apud Giansanti (1986) que "a razão entre o número de moléculas de oxigênio gasoso que bombardeiam a superfície livre e os que dela saem é da ordem de 10:1". O tempo necessário para saturação da superfície livre é da ordem de  $10^{-7}$  segundos Holley (1977) apud Schulz (1990).

Nos corpos de água naturais pode ocorrer uma concentração de oxigênio dissolvido menor do que a concentração de saturação desse gás no líquido. A concentração de saturação do oxigênio dissolvido na água é função da temperatura, pressão e salinidade. O fluxo de oxigênio da atmosfera para a água depende do déficit de oxigênio com relação à saturação; esse postulado está presente em todas as formulações aqui apresentadas. Os mesmos postulados e mecanismos controlam o transporte de qualquer outro gás através da interface gás-líquido.

Adeney e Becker (1919) propuseram, com base em dados experimentais, uma forma matemática para descrever a taxa com que gases pouco solúveis dissolvem-se na água. Segundo o modelo, o fluxo de massa ou a taxa de transferência gasosa por unidade de área normal ao fluxo é diretamente proporcional ao déficit relativo à saturação do gás no líquido, ou seja:

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = K_L \cdot (C_s - C) \quad (1)$$

Em que:

|       |   |   |
|-------|---|---|
| $J$   | = | Fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa          |
| $A$   | = | Área de interface gás-líquido                           |
| $m$   | = | Massa de gás dissolvido                                 |
| $t$   | = | Tempo   |
| $C_s$ | = | Concentração de saturação do gás no líquido             |
| $C$   | = | Concentração do gás dissolvido no volume líquido        |
| $K_L$ | = | Coeficiente global de transferência de massa (oxigênio) |

Substituindo-se  $dm/dt$  por  $d(V.C)/dt$ , com  $V$  representando o volume do líquido no qual a massa do gás se dissolve, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (2)$$

Observa-se na equação 2 que o coeficiente  $K_L$  possui dimensões  $LT^{-1}$  (comprimento por tempo). Portanto, é o parâmetro que indica a velocidade de transferência superficial. No entanto a área de transferência,  $A$ , é na maioria dos casos, de difícil obtenção, especialmente em situações de agitação intensa. Nas aplicações, o termo  $K_L \cdot (A/V)$  é substituído pela notação  $K_2$  e é denominado coeficiente de reaeração ou de reoxigenação superficial, com dimensão de tempo<sup>-1</sup>.

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_s - C) \quad (3)$$

A solução da equação 3 para uma concentração inicial  $C_0$ , é apresentada na equação 4.

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

O mesmo raciocínio é desenvolvido nos casos em que o oxigênio é fornecido através de borbulhamento sub-superficial, com o mesmo problema da quantificação da área de transferência,  $A$ . Neste caso o parâmetro  $K_L \cdot (A/V)$  é representado por  $K_{La}$ , coeficiente volumétrico de transferência de massa, uma outra denominação pouco rigorosa, porém de uso consagrado especialmente na literatura de Engenharia Química..

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_{La} \cdot t} \quad (5)$$

O volume de água (equação 2),  $V$ , pode ser igualado ao produto da área superficial,  $A$ , pela profundidade média do escoamento,  $H$ . Portanto  $V = A.H$ , o

que faz com que  $K_2=K_L/H$ . No entanto esta simplificação só é válida se a superfície líquida for regular (lisa). Sob a ação de elevados níveis de agitação, situação comum em escoamentos naturais, a superfície se deforma e nessas condições  $H \neq V/A$ , pois a área de transferência é muito maior que a área superficial.

Nota-se nas equações 4 e 5, que o déficit de oxigênio ( $C_S - C$ ) tende assintoticamente para zero, ou seja, no limite, a concentração de O.D. na água tende à concentração de saturação. Conseqüentemente o fluxo de O.D. transferido decresce exponencialmente com o tempo.

Os modelos que descrevem o fenômeno de reoxigenação superficial são basicamente de três tipos: empíricos, semi-empíricos e conceituais. Os modelos empíricos são normalmente baseados apenas em observações de características hidráulicas do escoamento como a velocidade média  $U$ , a profundidade  $H$  e a declividade  $S$  e suas correlações com o mecanismo de reoxigenação. Os modelos empíricos são empregados para calcular o fluxo de oxigênio em águas naturais. Os modelos semi-empíricos ou conceituais baseiam-se em considerações físicas e incluem outros parâmetros tais como a viscosidade cinemática  $\nu$  e a difusividade molecular do gás dissolvido  $D_m$ . Os modelos conceituais, geralmente, são aplicados aos dados obtidos nos ensaios em escala de laboratório.

### 2.1.1 Fórmulas empíricas para estimativa de $K_2$ em rios

As pesquisas sobre reoxigenação superficial têm grande aplicação nos escoamentos naturais de água. Foram desenvolvidas diversas equações empíricas para previsão de  $K_2$  em rios. Algumas destas equações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 –  $K_2$  (dia<sup>-1</sup> a 20°C) para rios<sup>1</sup>

Fonte: Adaptado de EPA (1985)

| Correlação   | Referência                      |
|--|---------------------------------|
| $K_2 = 3,93 \cdot \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$           | (a) O'Connor & Dobbins (1958)   |
| $K_2 = 5,03 \cdot \frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$       | (b) Churchill et al. (1962)     |
| $K_2 = 5,34 \cdot \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$         | (c) Owens et al. (1964)         |
| $K_2 = 4,75 \cdot \frac{U}{H^{1,5}}$                 | (d) Isaacs e Gaudy (1968)       |
| $K_2 = 10,9 \cdot \left( \frac{U}{H} \right)^{0,85}$ | (e) Negulescu e Rojanski (1969) |
| $K_2 = 4,54 \cdot \frac{U^{0,703}}{H^{1,054}}$       | (f) Padden e Gloyna (1971)      |
| $K_2 = 5,49 \cdot \frac{U^{0,607}}{H^{1,689}}$       | (g) Bennett e Rathbun (1972)    |
| $K_2 = 1,92 \cdot \frac{U^{0,273}}{H^{0,894}}$       | (h) Long (1984)                 |

U = Velocidade média do canal (m/s)  
H = profundidade média do canal (m)

De acordo com as formulações empíricas apresentadas na Tabela 1, o coeficiente de reoxigenação  $K_2$  é função da velocidade e da profundidade média do escoamento. Outras formulações para previsão do coeficiente de

<sup>1</sup> Cada equação tem aplicação somente em determinadas faixas de velocidade média do escoamento  $U$  profundidade média  $H$ .

reoxigenação podem ser encontradas em Bowie et al (1985) apud Oliveira (1996), Barbosa (1989) e EPA (1985).

O grande número de equações para previsão de  $K_2$  conduz a valores que podem apresentar diferença significativa entre si. Na Figura 1 compara-se  $K_2$  em função da profundidade  $H$ , obtido por 8 equações, considerando-se a velocidade média do escoamento  $U=0,5$  m/s.

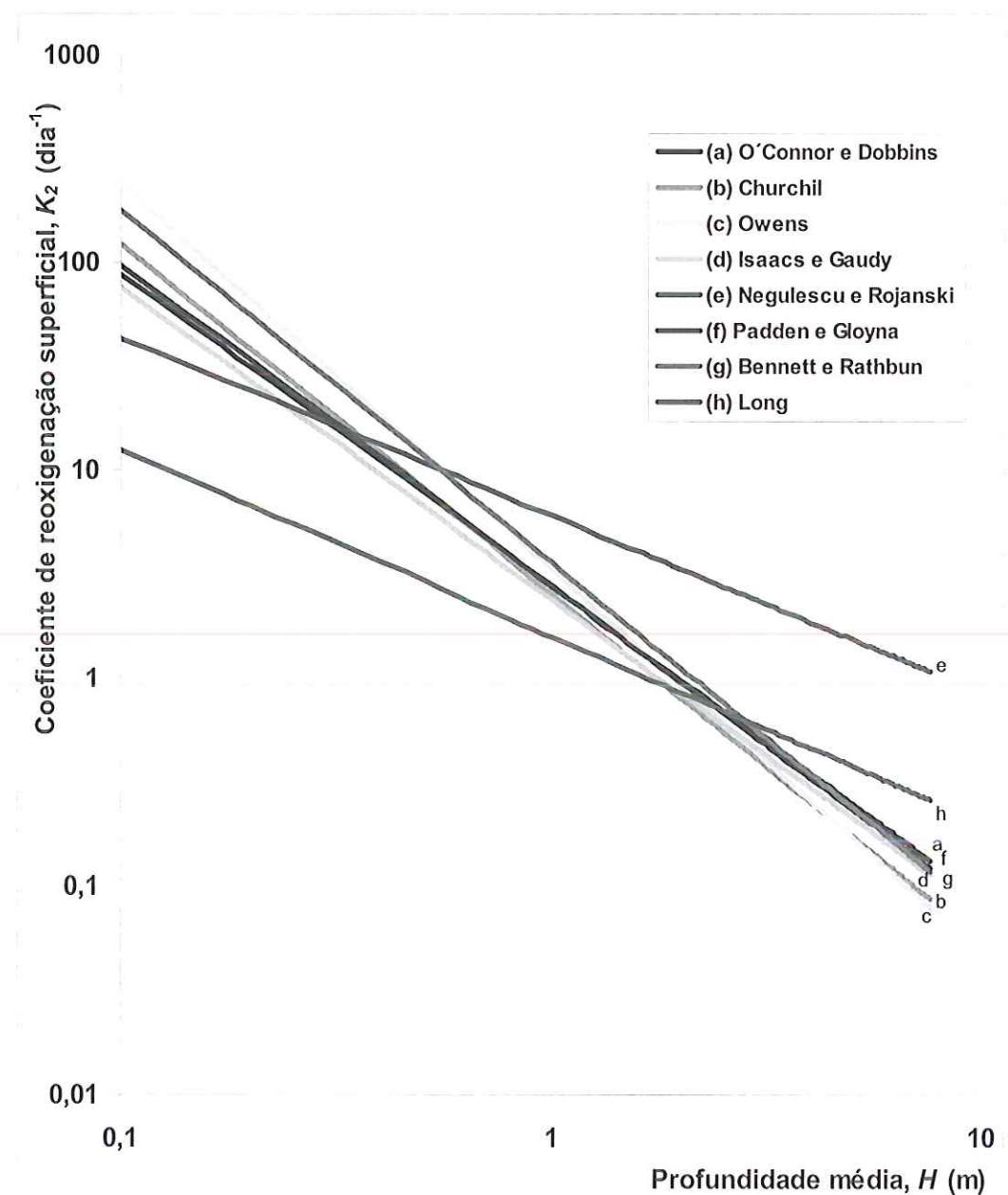


Figura 1 –  $K_2$  para rios (velocidade média  $U= 0,5$  m/s)

Fonte: Adaptado de EPA (1985)

LEU (1997) desenvolveu uma solução analítica para a previsão de  $K_2$  e a comparou com algumas das equações apresentadas na Tabela 1. O autor comparou os valores de  $K_2$  obtidos pela sua teoria e pelas equações com o valor de  $K_2$  obtido experimentalmente. Os resultados obtidos mostraram que a teoria de LEU (1997) apresenta valores condizentes com os das equações empíricas.

Bennett e Rathbun (1972), House e Skavroneck (1981), Yotsukura (1983), OEPA (1983) entre outros pesquisadores, revisaram as diversas fórmulas de previsão do coeficiente de reoxigenação. Estes estudos concluíram que nenhuma equação pode ser aplicada para todo e qualquer rio. Algumas formulações fornecem resultados satisfatórios para determinados escoamentos, velocidades e profundidades, mas não são validadas para outras situações. Cada equação fornece bons ajustes para dados experimentais obtidos no rio que produziu a equação.

No entanto, as equações para previsão de  $K_2$  são comumente empregadas em diversos modelos para a qualidade da água como, por exemplo, o QUAL2E da United States *Environmental Protection Agency*, U.S.EPA. O modelo QUAL2E permite simular alguns a concentração de alguns parâmetros de qualidade ao longo de trechos dos rios. A concentração de oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros de qualidade de água. No trabalho de CHAUDHURY (1998) observa-se que o pesquisador utilizou a equação de O'Connor e Dobbins de 1958 para calcular  $K_2$ , que é um dado de entrada no modelo QUAL2E.

Além das variáveis hidráulicas que aparecem nas equações da Tabela 1, o coeficiente de reoxigenação superficial pode ser influenciado por alguns fatores: a presença de surfatantes na água, partículas em suspensão, temperatura da água e ventos. Chern (2001) investigou o efeito da presença de óleos vegetais, surfatantes e terra diatomácea na taxa de transferência de oxigênio, comparando-a com a taxa observada no processo em água isenta destas impurezas.

### 2.1.2 Modelos conceituais

Estão relatados a seguir três modelos conceituais para o processo de transferência de massa através da interface água-ar. Os primeiros estudos datam do começo do século (1904) e se baseiam em conceitos de camada limite. A teoria dos dois filmes de Lewis & Whitmann apresentada em 1924, apesar das limitações, serviu de base para modelos posteriores.

#### 2.1.2.1 Teoria dos dois filmes

Inicialmente proposta por Whitmann (1923) e posteriormente publicada em Lewis & Whitmann (1924), a teoria propõe que a taxa de absorção do gás é controlada pela difusão através de duas películas viscosas, uma líquida e outra gasosa, formando duas camadas que impõem resistências (em série) à transferência gasosa através da interface água-ar.

A teoria dos dois filmes é um modelo físico simplificado do processo de absorção de um gás por um líquido, que tem como principal crítica a não consideração dos complexos problemas hidrodinâmicos presentes durante o processo de transferência de gases nos regimes turbulentos, que são predominantes.

A teoria dos dois filmes é o mais antigo modelo proposto para transferência de gases e segundo seus autores baseia-se nas seguintes hipóteses:

- Equilíbrio instantâneo na interface entre a pressão parcial do gás  $P_l$  e sua concentração no líquido  $C_l$
- Distribuição linear da concentração nos filmes líquido e gasoso
- A película superficial nas duas fases é laminar
- Condições de regime permanente

A Figura 2 ilustra a teoria dos dois filmes.

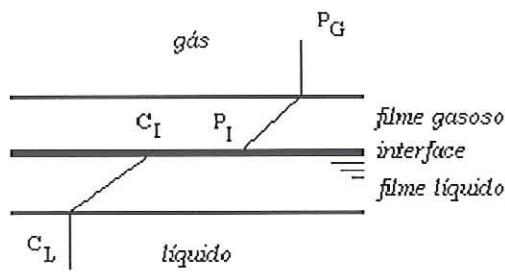


Figura 2 – Modelo dos dois filmes

Outros pontos criticados no modelo dizem respeito às hipóteses da distribuição linear da concentração e à existência de uma película superficial estável, condições que em regime turbulento são pouco prováveis.

Admitindo-se as hipóteses feitas por Lewis e Whitman (1924), pode-se obter a relação para o fluxo de massa através da interface de maneira que:

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = k_L \cdot (C_I - C_L) = k_G \cdot (P_G - P_I) \quad (6)$$

Em que:

- $J$  = Fluxo de massa ou taxa de transferência gasosa
- $A$  = Área de interface gás-líquido
- $m$  = Massa de gás dissolvido
- $t$  = Tempo
- $C_I$  = Concentração do gás na interface
- $C_L$  = Concentração do gás na fase líquida
- $k_L$  = Coeficiente do filme líquido
- $P_G$  = Pressão parcial do gás na fase gasosa
- $P_I$  = Pressão parcial do gás na interface
- $k_G$  = Coeficiente do filme gasoso

Na interface, as fases líquida e gasosa estão em equilíbrio, portanto aplicando-se a lei de Henry na equação 6, os termos  $P_I$  e  $C_I$  são eliminados e a resistência total ao processo de transferência passa a ser função de um coeficiente global e igual à soma das resistências oferecidas pelos filmes gasoso e líquido.

Para baixa solubilidade, como a do oxigênio em água, a resistência na fase gasosa é desprezível se comparada com a resistência imposta pelo filme líquido. Segundo Liss & Slater (1974), no caso específico do oxigênio, 99,98% da resistência ao processo de difusão ocorre devido ao filme líquido. Para outras substâncias com coeficiente de solubilidade superior a 4,8 atm.l/mol, a

resistência da fase líquida corresponde a mais de 95% da resistência total, Mackay & Leinonen (1975).

Como a resistência oferecida à passagem do oxigênio através do filme gasoso é considerada desprezível em relação ao filme líquido, o coeficiente global de transferência de massa é igual ao coeficiente de transferência através do filme líquido, ou seja,  $k_L = K_L$ . O valor de  $K_L$  pode ser determinado de acordo com a equação 7.

$$K_L = \frac{D_m}{\delta} \quad (7)$$

Em que:

$D_m$  = coeficiente de difusão molecular do gás no líquido

$\delta$  = espessura do filme líquido

### 2.1.2.2 Teoria da penetração – Modelo de Higbie

O modelo proposto originalmente por Higbie (1935) contradiz a teoria dos dois filmes, postulando que os gases dissolvidos não têm tempo suficiente para penetrar no filme líquido e estabelecer perfil linear de concentração característico de um regime permanente. O modelo considera o efeito da mistura das porções de água no seu movimento para a superfície livre, ou seja, o líquido da interface é continuamente substituído por outros elementos fluidos provenientes de camadas inferiores. A Figura 3 ilustra a Teoria da Penetração.

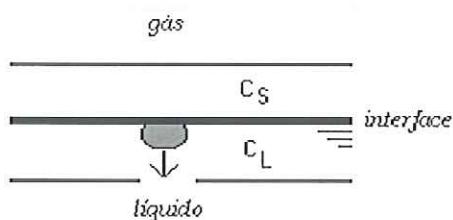


Figura 3 – Teoria da Penetração

A teoria da penetração admite que a superfície livre seja composta por pequenos elementos fluidos que após entrarem em contato com a fase gasosa durante um tempo médio “ $t_e$ ” são completamente misturados na massa líquida. Desse modo, o processo é transitório e governado por difusão molecular.

Aplicando-se um balanço de massa para a difusão de um soluto gasoso em uma fase líquida com profundidade  $y$  obtém-se a equação diferencial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (8)$$

As seguintes condições de contorno podem ser aplicadas;

$$t = 0; y > 0; C = C_L$$

$$t > 0; y = 0; C = C_S$$

$$t > 0; y = \infty; C = C_L$$

Resolvendo a equação diferencial (8) com as condições de contorno descritas anteriormente, o fluxo médio de massa,  $\bar{J}$ , para uma determinada função de distribuição das idades dos elementos líquidos superficiais pode ser expresso como:

$$\bar{J} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = -D_m \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t_e}} (C_S - C_L) \quad (9)$$

Comparando a equação (9) com a equação (1), pode-se escrever:

$$K_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t_e}} \quad (10)$$

O modelo apresentado por Higbie (1935) descreve o aumento do coeficiente de transferência em função do aumento do nível de agitação, sendo tanto maior quanto menor for o intervalo de tempo médio de mistura  $t_e$ .

### 2.1.2.3 Teoria da renovação superficial–Danckwerts

O modelo proposto por Danckwerts (1951) conhecido como teoria da renovação superficial, pode ser considerado como uma expansão da teoria da penetração de Higbie (1935) pelo fato de também considerar que o efeito de mistura se estende até à superfície. Danckwerts (1951) modificou a teoria da penetração supondo que vários elementos da água poderiam passar por uma mistura completa vertical com períodos diferentes de contato com o gás na superfície, não mais um tempo médio  $t_e$ .

O autor desta teoria propõe que a taxa de produção de novas superfícies é constante e que a probabilidade de qualquer elemento da superfície ser substituído é independente do tempo de exposição. Admite ainda, que a concentração constante na superfície é igual à concentração de saturação e que a taxa de desaparecimento dos elementos superficiais com uma certa idade deve ser proporcional ao número de elementos com essa idade.

Definindo  $s$  como a taxa constante de produção de superfície nova, e uma função para a distribuição das idades  $\phi(t)$ , o autor propôs uma forma analítica para a função de distribuição de idades como:

$$-\frac{d\phi(t)}{dt} = s\phi(t) \quad (11)$$

Cuja integração fornece a função de distribuição das idades como:

$$\phi(t) = s \cdot e^{-st} \quad (12)$$

Este ponto é considerado a principal diferença entre a teoria da penetração e a teoria da renovação superficial.

De maneira análoga à teoria de Higbie (1935) o modelo de Danckwerts emprega a equação da difusão e a primeira lei de Fick, obtendo a taxa instantânea de transporte de massa na interface que, por sua vez, com a distribuição de idades proposta por Danckwerts (1951), produz a taxa média de absorção no tempo  $\bar{J}$ :

$$\bar{J} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt} = -D_m \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=0} = \sqrt{D_m \cdot s} (C_s - C_L) \quad (13)$$

A qual fornece:

$$K_L = \sqrt{D_m \cdot s} \quad (14)$$

O modelo indica, assim como a teoria da penetração, que o coeficiente de transferência de massa é diretamente proporcional à raiz quadrada da difusividade molecular. Os valores de  $s$  não são bem conhecidos, mas podem ser determinados experimentalmente.

Existem ainda outros modelos para a transferência de massa interfacial baseados na difusão turbulenta e na teoria cinética, propostos por Kishinevsky (1955) e Krenkel & Orlob (1962).

O coeficiente de reoxigenação superficial pode ser obtido a partir do uso de equações empíricas ou de dados experimentais. No primeiro caso obtém-se  $K_2$  calculado e no segundo,  $K_2$  observado ou experimental.

Entre as técnicas existentes para se obter  $K_2$ , estão o balanço de oxigênio dissolvido, a desoxigenação e técnica dos traçadores gasosos (hidrocarbonetos leves ou gases radioativos). A técnica dos traçadores é um dos métodos mais aceitos, no entanto demanda mais recursos.

### 2.1.3 Influência da temperatura sobre $K_2$

Os estudos realizados por vários pesquisadores indicam que existe uma variação crescente do coeficiente de absorção de oxigênio por um corpo de água com o aumento da temperatura.

Krenkel & Orlob (1962) explicaram a variação do coeficiente de reoxigenação em relação à temperatura a partir da lei de Arrhenius. As pesquisas experimentais produziram resultados que foram ajustados por uma função exponencial do tipo:

$$K_2(T) = a' \cdot e^{b' \cdot T} \quad (15)$$

Em que  $a'$  e  $b'$  são coeficientes obtidos através de ajuste da função aos pontos experimentais e  $T$  é a temperatura absoluta (K). Geralmente, o coeficiente de reoxigenação é relacionado a uma temperatura de referência, normalmente 25°C, o que torna a equação anterior em:

$$K_2(25) = a' \cdot e^{b' \cdot 298} \quad (16)$$

Para se estimar o coeficiente de reoxigenação  $K_2$  em uma temperatura  $T$  qualquer, utiliza-se a relação entre as equações (15) e (16) atribuindo-se ao termo  $e^{b'}$  o valor de  $\theta$ , de maneira que:

$$K_2(T) = K_2(25) \cdot \theta^{(T-298)} \quad (17)$$

O valor mais utilizado para  $\theta$ , segundo Rainwater e Holley (1983, p.34) *apud* Costa (1992) é 1,024, porque representa uma média para o conjunto de observações dos diferentes pesquisadores.

#### 2.1.4 Influência da umidade atmosférica sobre $K_2$

A relação clássica para a taxa de transferência de oxigênio foi apresentada na equação 2, sendo expressa pela equação:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} (C_s - C)$$

De acordo com Adeney e Becker (1919) os fatores que influenciam a transferência de gases são: umidade, componentes iniciais do ar, temperatura e pressão. Os pesquisadores citados foram os primeiros a relatar uma provável influência da umidade atmosférica sobre o processo de absorção de gases por um corpo líquido, sem, no entanto, investir na análise da influência desse fator. Durante as décadas que se seguiram, diversos pesquisadores investigaram o fenômeno de absorção de gases por corpos de água e propuseram diversas correlações empíricas baseadas em parâmetros médios mensuráveis do escoamento. Provavelmente, esses corpos de água estavam expostos a diferentes condições de umidade atmosférica que não foram levadas em conta nas formulações propostas. A dispersão dos resultados que podem ser obtidos para o coeficiente de reoxigenação com as formulações disponíveis, pode ser influenciada pela não consideração da umidade atmosférica local quando da realização dos experimentos.

A falta de pesquisas relacionando a umidade relativa do ar com o coeficiente de reoxigenação reflete na pouca bibliografia especializada sobre o assunto. Os resultados da pesquisa realizada por Costa (1992), indicam uma correlação negativa entre o coeficiente de reoxigenação e a umidade relativa do ar para uma faixa de umidade entre 55 e 98%. Os gráficos da Figura 4 e da Figura 5 ilustram a variação de  $K_2$  em função da umidade relativa para as velocidades de rotação 62 e 255 rpm, medidas no eixo de um agitador rotativo utilizado para promover agitação do líquido.

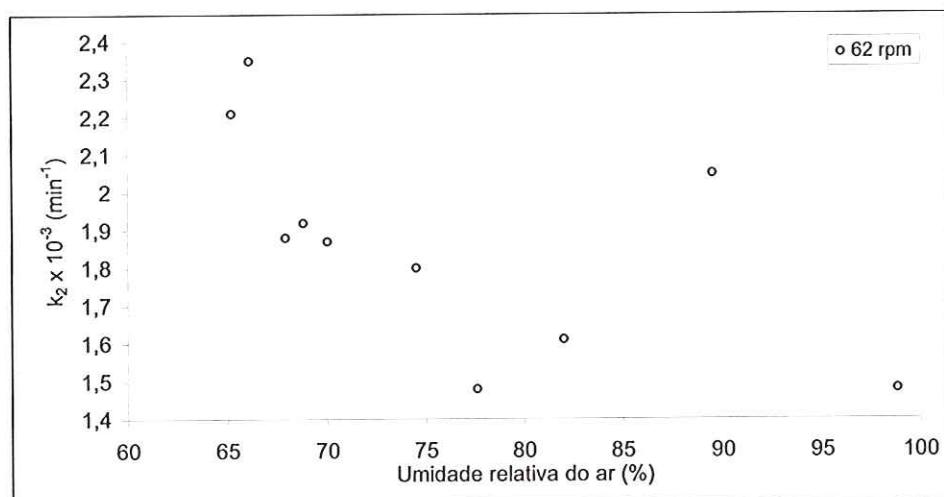


Figura 4 –  $K_2$  em função da umidade relativa do ar, 62 rpm

Fonte: Costa (1992)

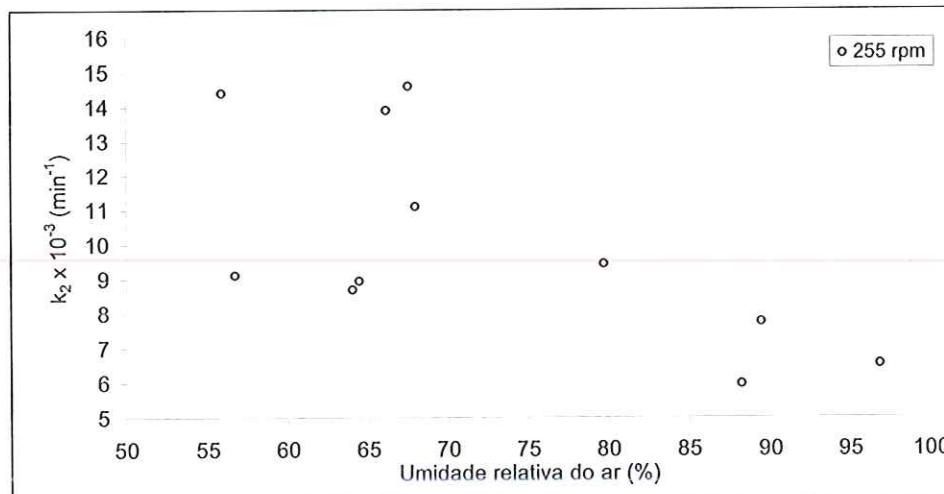


Figura 5 –  $K_2$  em função da umidade relativa do ar, 255 rpm.

Fonte: Costa (1992)

Oliveira (1996) publica em seu trabalho dados que sugerem a existência de uma resistência ao processo de absorção de oxigênio pelo corpo de água em condições de elevada umidade atmosférica. O autor realizou ensaios de reoxigenação sob três condições distintas de umidade e três velocidades de rotação, conforme ilustra o gráfico da Figura 6. Os valores obtidos para  $K_2$  foram corrigidos para a temperatura de 25°C, daí a terminologia  $K_{2,25}$ .

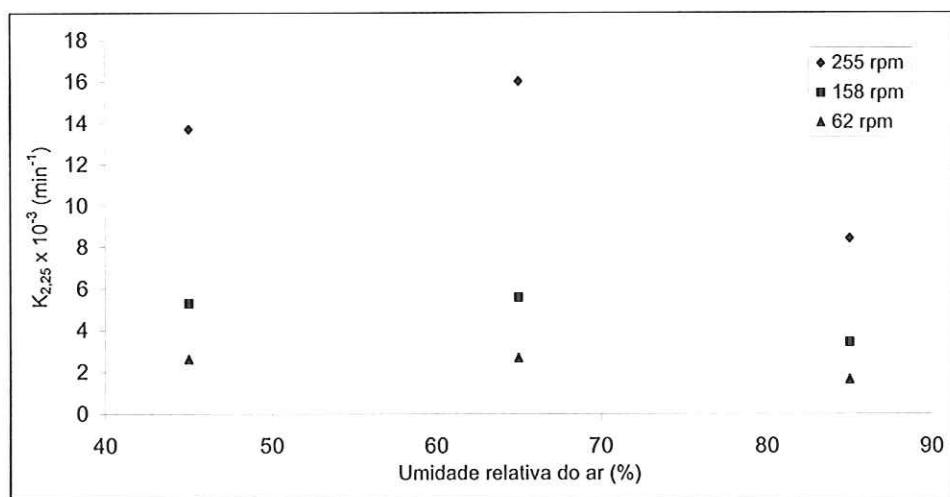


Figura 6 –  $K_2$  em função da umidade relativa do ar.

Fonte: Oliveira (1996)

Com base nas informações sobre o trabalho de Costa (1992), Shiau (1995) realizou testes de reoxigenação com uso de difusores, os quais permitiram a obtenção de distintos valores de  $K_2$  para ensaios realizados durante o dia e repetidos à noite. O pesquisador observou que na data do ensaio, o dia estava ensolarado e seco enquanto à noite ocorreu chuva. Isto implicou em estudos mais profundos em seu trabalho visto que a umidade influenciara a transferência de oxigênio.

Os trabalhos citados anteriormente indicam a existência de uma correlação entre  $K_2$  e a umidade do ar, no entanto existem algumas divergências quanto aos dados obtidos por Costa (1992) e Oliveira (1996) conforme ilustram os gráficos precedentes, o que torna imprescindível novas investigações sobre o assunto. A explicação provável para a diferença exibida pela tendência em ambos os casos é a falta de controle do ambiente do qual o oxigênio é transferido para a água, fato que não permitiu relacionar adequadamente a reoxigenação com a umidade atmosférica.

### 2.1.5 Modelagem da transferência de oxigênio

Os testes utilizados para quantificar a taxa de transferência de oxigênio para a água limpa, geralmente, consistem em ensaios de reoxigenação realizados em tanques, em regime não-permanente após prévia desoxigenação da água em teste. Os dados coletados nos ensaios permitem estimar o

coeficiente de transferência de oxigênio. Esta estimativa é fortemente influenciada tanto pelos procedimentos experimentais quanto pelas técnicas empregadas na análise dos dados dos ensaios, Brown e Baillod (1982). Um padrão para a determinação da taxa de transferência pode ser encontrado em "A Standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water" citado como ASCE (1984).

O modelo clássico para o processo de transferência de oxigênio através da superfície livre pode ser expresso conforme a equação 3, por:

|   |   |  |   |                 |
|---|---|--|---|-----------------|
| Taxa de transferência de massa<br>por unidade de volume | = | Coeficiente volumétrico de<br>transferência de massa | x | Força<br>Motriz |
| $\frac{dC}{dt}$   | = | $K_2$  | x | $(C_s - C)$     |

Considerando um sistema de mistura completa,  $K_2$  e  $C$  são considerados constantes no volume de água em agitação.

Na transferência de oxigênio a partir de difusores ou qualquer outro dispositivo submerso, aparece o termo  $K_{La}$  no lugar de  $K_2$ . Os dois coeficientes anteriores são volumétricos. A aplicação no caso de aeração submersa deve considerar que o sistema não se aproxima de uma condição de mistura completa. Como consequência deste fato, aparecem duas zonas distintas de oxigenação, uma próxima à fonte de oxigênio e outra mais afastada. A principal diferença entre as aplicações, além da terminologia e significado físico dos coeficientes  $K_{La}$  e  $K_2$ , é que  $K_{La}$  se refere à zona próxima à fonte de oxigênio e  $K_2$  é considerado constante em todo o volume.

Brown e Baillod (1982) definem, em função das aplicações citadas, o coeficiente (volumétrico) aparente e real de transferência de massa. Nos casos de (re)oxygenação submersa,  $C_s$  varia com o tempo durante o ensaio transiente. Considerar  $C_s$  constante e igual à média da concentração atingida no tempo igual ao tempo infinito,  $C_s^\infty$ , pode acarretar em erro na estimativa de  $K_{La}$ . Portanto, o parâmetro  $K_{La}$  determinado é denominado coeficiente aparente de transferência de massa,  $K_{La}^*$ . No caso de reoxigenação superficial,  $C_s$  é constante e igual a  $C_s^\infty$ , e  $K_{La}$  é igual a  $K_{La}^*$ .

### 2.1.5.1 Estimativa dos parâmetros

A estimativa dos parâmetros utilizados no modelo clássico deve considerar alguns fatores, a saber:

- O modelo utilizado está correto? Ou seja, descreve o fenômeno físico considerando todos os fatores que interferem direta ou indiretamente no fenômeno?
- Como o modelo deve ser ajustado aos dados experimentais, qual seria o critério para selecionar a "correta" estimativa dos parâmetros determinados pela análise de regressão?
- Determinar, através de técnicas estatísticas, o nível de confiança ou exatidão dos parâmetros estimados.

O método dos mínimos quadrados pode ser utilizado para a análise de regressão. Várias técnicas foram propostas para a análise dos dados, cujos nomes provêm da forma da equação utilizada para a análise.

---

**Método Exponencial:** são utilizados diretamente os valores experimentais das concentrações de O.D. medidos em função do tempo para ajustar a equação  $C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 t}$  (Equação 4), através do método dos mínimos quadrados não linear. A estimativa dos parâmetros é mais precisa do que em outros métodos. A vantagem do método é que a implementação de uma rotina de cálculo com recursos computacionais possibilita a estimativa de todos os parâmetros,  $K_2$ ,  $C_s$  e  $C_0$ .

**Método do Logaritmo do Déficit:** a equação 4 também pode ser escrita na forma logarítmica:

$$\ln\left(\frac{C_s - C}{C_s - C_0}\right) = -K_2 \cdot t \quad (18)$$

Em que  $(C_s - C)$  é o déficit de oxigênio que dá nome ao método. O valor de  $K_2$  é determinado como sendo o coeficiente angular da reta apresentada na equação 18. Pode ser utilizado o método dos mínimos quadrados linear para

efetuar a análise de regressão. A principal desvantagem deste método é que este requer o valor da concentração de saturação  $C_s$  (calculado ou determinado experimentalmente). A estimativa de  $K_2$  pode ser afetada se a escolha de  $C_s$  não for adequada.

**Método Direto ou Diferencial:** este método aproxima numericamente a taxa de transferência (volumétrica)  $\frac{dC}{dt}$  para  $\frac{\Delta C}{\Delta t}$  utilizando as variações das concentrações obtidas experimentalmente. O valor de  $K_2$  é determinado pelo coeficiente angular da equação diferencial  $\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_s - C)$  (equação 3) utilizando o método dos mínimos quadrados linear. A principal desvantagem do método direto é que ele majora os erros de medida dos dados experimentais. Por este motivo este método não é recomendado, pois o processo de aproximação numérica resulta em erros maiores do que aqueles que se verificam na própria medida da concentração de oxigênio dissolvido.

#### 2.1.5.2 Concentração de Saturação de O.D. - $C_s$

A concentração de saturação de oxigênio dissolvido é um parâmetro básico utilizado em grande parte dos modelos de previsão da qualidade da água, o que exige valores precisos de  $C_s$ .

Existem diversas equações que são utilizadas para calcular a concentração de saturação cujo valor é reproduzido em tabelas. As equações são estimam o valor de  $C_s$  em função da temperatura. Algumas equações consideram o efeito da salinidade e pressão local, outras equações foram desenvolvidas a partir de experimentos com água destilada e pressão padrão de 1 atmosfera. Algumas destas equações podem ser encontradas em EPA (1985).

O valor de  $C_s$  também pode ser determinado experimentalmente a partir da exposição de um volume de água a uma atmosfera saturada de vapor de água (em equilíbrio). Atmosfera esta, de ar ou de oxigênio puro. Medições da

pressão parcial de oxigênio na fase gasosa permitem calcular a solubilidade do gás na água.

Existem divergências entre os resultados obtidos pelos vários métodos utilizados para determinar o valor da concentração de saturação de oxigênio dissolvido. Sobretudo nas equações, a diferença pode ser significativa e pode conduzir a erros na estimativa do coeficiente de reoxigenação superficial. As maiores diferenças são encontradas para condições de alta salinidade, de interesse em estuários e oceanos. Para as águas doces, considerando a faixa de temperatura de 10 a 25°C, a variação percentual em relação à média é de aproximadamente  $\pm 2\%$ . A Tabela 2 apresenta o valor de  $C_s$  calculado a partir de 5 equações juntamente com as respectivas variações.

Tabela 2 – Comparação dos valores de  $C_S$  obtidos a partir das equações A, B, C, D e E, pressão = 1 atm, água desalinizada

*Adaptado de EPA (1985)*

| Temperatura<br>(°C) | Equações   |       |       |                      |       | Variação (%) |
|---------------------|--|-------|-------|----------------------|-------|--------------|
|                     | A  | B     | C     | D                    | E     |              |
| 10                  | 11,27  | 11,36 | 11,34 | 11,26                | 11,27 | 0,4          |
| 11                  | 11,00  | 11,10 | 11,08 | 10,99                | 11,01 | 0,5          |
| 12                  | 10,75  | 10,84 | 10,84 | 10,73                | 10,75 | 0,5          |
| 13                  | 10,50  | 10,60 | 10,60 | 10,49                | 10,50 | 0,6          |
| 14                  | 10,26  | 10,37 | 10,38 | 10,25                | 10,27 | 0,6          |
| 15                  | 10,03  | 10,14 | 10,16 | 10,02                | 10,04 | 0,7          |
| 16                  | 9,82   | 9,93  | 9,95  | 9,79                 | 9,83  | 0,8          |
| 17                  | 9,61   | 9,72  | 9,75  | 9,58                 | 9,62  | 0,9          |
| 18                  | 9,40   | 9,52  | 9,55  | 9,38                 | 9,43  | 0,9          |
| 19                  | 9,21   | 9,33  | 9,37  | 9,18                 | 9,25  | 1,0          |
| 20                  | 9,02   | 9,14  | 9,19  | 8,99                 | 9,08  | 1,1          |
| 21                  | 8,84   | 8,96  | 9,01  | 8,81                 | 8,92  | 1,2          |
| 22                  | 8,67   | 8,79  | 8,84  | 8,63                 | 8,77  | 1,2          |
| 23                  | 8,50   | 8,62  | 8,68  | 8,46                 | 8,63  | 1,3          |
| 24                  | 8,33   | 8,46  | 8,52  | 8,29                 | 8,51  | 1,4          |
| 25                  | 8,18   | 8,31  | 8,37  | 8,13                 | 8,39  | 1,6          |
| 26                  | 8,02   | 8,16  | 8,22  | 7,97                 | 8,28  | 2,0          |
| 27                  | 7,87   | 8,02  | 8,08  | 7,81                 | 8,19  | 2,4          |
| 28                  | 7,72   | 7,87  | 7,94  | 7,66                 | 8,11  | 2,8          |
| 29                  | 7,58   | 7,74  | 7,80  | 7,51                 | 8,03  | 3,4          |
| 30                  | 7,44   | 7,61  | 7,67  | 7,36                 | 7,97  | 4,0          |
| <i>Equações</i>     |  |       |       |                      |       |              |
| A                   | $C_S = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,007991 \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$ |       |       | Baca e Arnett, 1976  |       |              |
| B                   | $C_S = 14,62 - 0,3898 \cdot T + 0,006969 \cdot T^2 - 5,897 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$    |       |       | Johnson e Duke, 1976 |       |              |
| C                   | $C_S = 14,6 \cdot e^{(-T \cdot (0,027767 - 0,00027 \cdot T + 0,000002 \cdot T^2))}$    |       |       | U.S Army CDE, 1982   |       |              |
| D                   | $C_S = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,007910 \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$ |       |       | Bauer, 1979          |       |              |
| E                   | $C_S = 14,5532 - 0,38217 \cdot T + 0,0054258 \cdot T^2$                                |       |       | Genet, 1974          |       |              |

### 2.1.5.3 Recomendações na análise de dados experimentais

Brown e Baillod (1982), fazem algumas recomendações para o procedimento de estimativa dos parâmetros. Inicialmente deve ser feita uma análise dos dados experimentais. Devem ser eliminados os dados que

apresentem “ruídos” com relação à tendência da curva de reoxigenação. O método exponencial é recomendado para análise de regressão do modelo aos dados experimentais. Devem ser estimados os parâmetros  $K_2$ ,  $C_s$  e  $C_0$  com seus respectivos desvios-padrões, que refletem o grau de dispersão dos dados observados. O valor do desvio padrão deve ser no máximo 5% para  $K_2$ , 3% para  $C_s$  e 0,3 mg/l para  $C_0$ .

Chern (2001) utilizou um modelo exponencial análogo à equação 5, já que a reoxigenação foi feita por ar submerso. Para estimar o coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio,  $K_{La}$ , o pesquisador realizou a análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton, determinando os parâmetros,  $K_{La}$ ,  $C_s$  e  $C_0$ .

Paralelamente a estrutura de erros dos dados deve ser avaliada com relação aos resíduos (diferença entre a concentração observada e calculada). A distribuição dos resíduos deve ser necessariamente aleatória, ou seja, não-tendenciosa. Além disso, os valores (absolutos ou relativos) dos resíduos devem possuir pequena magnitude. Outro fator importante a ser observado é a somatória dos resíduos aproxima-se de zero ou de um percentual pequeno com relação aos resíduos, Barros Neto (2002).

#### 2.1.5.4 Instrumentos

As características dos instrumentos utilizados em laboratório devem ser conhecidas para evitar equívocos nas conclusões fornecidas pelas experimentações. Quando uma pesquisa científica envolve etapas de laboratório que utilizem medidas de parâmetros físicos, químicos e/ou biológicos, deve-se conhecer o instrumento e seus erros. O conhecimento prévio de conceitos concernentes ao funcionamento de um instrumento é uma ferramenta bastante útil para analisar e localizar os erros intrínsecos nas medições realizadas.

Um instrumento pode ser descrito em função da sua operação e do grau de aproximação à medida real. A operação, segundo Doeblin (1990), pode ser

descrita em termos dos elementos funcionais, enquanto o grau de aproximação é definido em função das características estáticas e dinâmicas do instrumento em uso. Um dos possíveis esquemas para os elementos funcionais de um instrumento, que inclui todas as suas funções básicas, é apresentado na Figura 7. O sensor primário é o elemento que recebe energia do meio a ser medido, motivo pelo qual não existe medição perfeita. Os demais elementos manipulam, convertem, transmitem e apresentam os dados ao observador. Um elemento físico pode realizar mais de uma função. Um instrumento ou um sistema de medição deve ser capaz de realizar todas essas funções. Existem várias possibilidades de concepção de um instrumento. Bons instrumentos devem minimizar entradas interferentes através de filtragem dos sinais em um processo de retroalimentação, Silveira (1999).

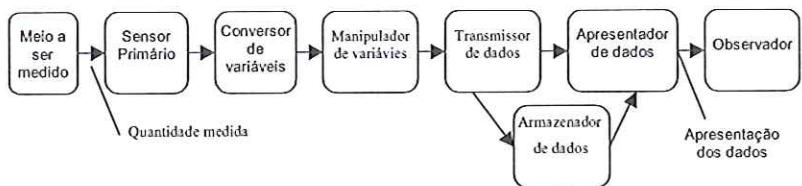


Figura 7 – Elementos funcionais de um instrumento

*Fonte: Doebelin (1990) adaptado de Silveira (1999).*

As especificações de um instrumento estão associadas às características estáticas e dinâmicas. A principal característica estática é a calibração estática, que geralmente é de fácil obtenção e fornece importantes informações. Da curva de calibração estática são retiradas as demais características como precisão, linearidade, e sensibilidade entre outras, Doebelin, (1990).

A calibração dinâmica envolve a determinação de respostas dinâmicas do instrumento ou equipamento. Os modelos utilizados para calibração dinâmica em grande parte das aplicações geralmente envolvem equações diferenciais lineares ordinárias com coeficientes constantes. A calibração dinâmica consiste na determinação da função de transferência operacional do instrumento, Silveira (1999).

## 2.2 Agitação de líquidos

"Todo dia utilizamos alguma operação de mistura, seja misturando o café com açúcar pela manhã, ou "drinks" pela noite, entretanto esta operação é pouco entendida" Ulbrecht e Patterson (1985)

### 2.2.1 Introdução

Muitos processos dependem das condições de operação de agitação e mistura de fluidos. Os termos agitação e mistura, são utilizados indistintamente, embora não sejam exatamente sinônimos.

Segundo McCabe (1993), o termo agitação se refere ao deslocamento induzido da matéria em trajetórias específicas, geralmente em movimentos circulares. A mistura é caracterizada por uma distribuição aleatória de uma substância em outra, inicialmente separadas em duas fases.

A agitação de líquidos possui, entre outras, as seguintes aplicações McCabe, (1993):

- Manter partículas sólidas em suspensão;
- Misturar líquidos miscíveis;
- Dispersar gás em líquidos;
- Formar emulsões;
- Promover transferência de calor entre o líquido e o meio de aquecimento.

A agitação de líquidos pode causar mudanças físicas e químicas, ocorrendo, ou não, aumento da taxa de transporte. Alguns exemplos da ocorrência destes fenômenos estão descritos a seguir:

Mudança física – aumento da área superficial de um sólido ou diminuição do diâmetro do sólido;

Mudança química – ocorrência de reação química;

Taxa de transporte – aumento considerável da taxa de transferência de calor, através da quebra do filme interfacial resistente à passagem de calor.

O termo mistura é aplicado em operações que visam reduzir os gradientes de concentração ou temperatura em um determinado volume de material. A mistura é utilizada não somente para promover homogeneidade, mas também para transferir massa e calor entre partículas ou fases líquidas. O deslocamento do fluido diminui a espessura do filme resistente, ou seja, aumenta o gradiente de concentração imediatamente adjacente à superfície (partícula ou fase) de transferência. Entre suas aplicações destacam-se:

- Dissolução;
- Absorção de gases;
- Cristalização;
- Extração líquido-líquido.

Segundo Brodkey (1988), a mistura envolve um movimento turbulento do material ocorrendo, ou não, reação química. O objetivo de pesquisas realizadas neste campo é entender o processo físico que ocorre na mistura e o efeito do movimento turbulento em outros aspectos, como por exemplo, o efeito na cinética química.

Segundo McCabe (1993), a mistura é uma operação mais complexa de se estudar do que a agitação. O comportamento da velocidade de escoamento do fluido em um tanque agitado é complexo, embora razoavelmente reproduzível. Os resultados de estudos sobre mistura são de difícil interpretação, pois dependem de conceitos utilizados pelos pesquisadores.

Os equipamentos utilizados para mistura e agitação de líquidos, em geral, são adaptações de vasos ou canos. Nos vasos (cilíndricos) existe um forte movimento de circulação enquanto nos canos predominam fluxos unidirecionais longitudinais embora existam fluxos transversais. São exemplos de vasos: os tanques cilíndricos de agitação com uso de rotores, jatos líquidos ou borbulhamento. Neste texto serão abordados apenas tanques cilíndricos agitados por um rotor acoplado em um eixo vertical. A geometria do tanque varia em função da natureza da agitação. Os rotores que promovem o fluxo

axial (paralelo ao eixo do rotor) e o fluxo radial (tangencial ao rotor) são basicamente de três tipos: hélice (ou propulsor), pás e turbina, McCabe, (1993).

### 2.2.2 Padrões de escoamento

O movimento do fluido, ou padrão de escoamento, em um tanque agitado depende do tipo de rotor selecionado, das características do fluido, tamanho e proporções do tanque (geometria) e dos inibidores de vórtices ("baffles").

A velocidade do fluido em qualquer ponto do tanque possui três componentes, McCabe, (1993). O primeiro componente de velocidade é radial e atua na direção perpendicular ao eixo do rotor. O segundo componente é longitudinal e atua na direção paralela ao eixo do rotor. O terceiro componente é tangencial ou rotacional e atua na direção tangente ao rotor, o que propicia um movimento circular ao redor do rotor.

A componente tangencial, em casos típicos, é desvantajosa para a mistura, pois tem uma trajetória circular e cria um vórtice na superfície, causando estratificação em vários níveis sem realizar mistura longitudinal entre os níveis. Se existirem partículas sólidas, por exemplo, estas são lançadas para fora do vórtice, por força centrífuga, ocorrendo uma concentração em vez de uma mistura. Neste caso é recomendado o uso de inibidores de vórtice, "baffles".

Quando são criadas trajetórias circulares, a velocidade relativa entre o fluido e o rotor é reduzida, e a potência a ser absorvida pelo líquido é limitada.

Em tanques de agitação sem a utilização dos inibidores de vórtices o movimento circular é induzido por qualquer tipo de rotor. Se o vórtice formado for muito grande, o escoamento padrão é o mesmo independentemente do tipo de rotor. Quando do uso de rotores de alta velocidade, o vórtice formado alcança o rotor.

O escoamento tangencial, movimento circular, gera um vórtice (redemoinho) no líquido como mostrado na Figura 8.

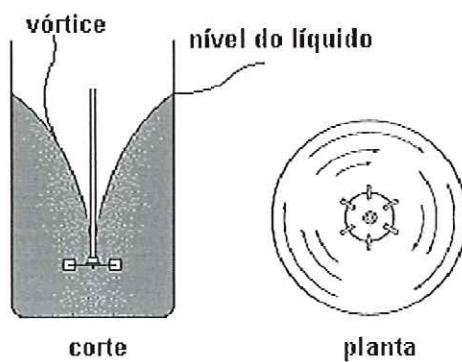


Figura 8 – Movimento do fluido em um tanque, sem inibidores de vórtice.

*Fonte: Uhl e Gray (1966)*

Em tanques pequenos o rotor pode ser montado de forma inclinada, fora de centro, para a prevenção de turbilhões ou fora do eixo central conforme pode ser visualizado na Figura 9.

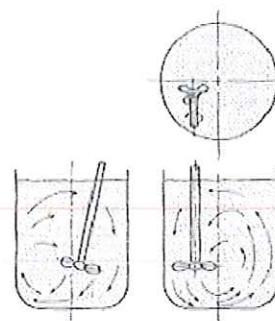


Figura 9 – Rotor inclinado e fora de centro.

*Fonte: Uhl e Gray (1966)*

Algumas descrições importantes:

**Propulsores ou hélices:** dirigem o fluido para o fundo do tanque, onde a corrente se espalha radialmente em todas as direções e sobe ao longo da parede do tanque retornando à zona de sucção do rotor. São utilizados quando são necessárias grandes correntes verticais.

**Pás:** fornecem um bom escoamento radial no plano do rotor, mas não fornecem escoamento vertical, sua principal limitação. Não servem, por exemplo, para manter sólidos suspensos.

**Turbinas:** movimentam o fluido radialmente contra a parede do tanque onde a corrente se divide. Uma parte se dirige ao fundo e volta ao centro do rotor enquanto a outra sobe em direção à superfície e retorna ao rotor por cima (zona de sucção). São geradas duas circulações distintas. Desenvolvem excelentes escoamentos radiais e bons escoamentos verticais. Mostram-se eficientes na mistura de líquidos de mesma densidade. Em tanques cilíndricos verticais a profundidade do líquido deve ser igual ou maior que o diâmetro do tanque. Se necessário profundidades maiores, são montados dois ou mais rotores no mesmo eixo.

**“Draft tubes”:** adicionam atrito ao fluido e para uma dada potência de entrada a taxa de circulação é reduzida, deste modo são utilizados somente em casos específicos. O retorno do fluxo para o rotor ocorre em todas as direções. Embora isto não seja uma limitação, quando se deseja que a direção e a velocidade do escoamento em direção à sucção do rotor são utilizados “*draft tubes*”. São freqüentemente utilizados para alto cisalhamento (por exemplo: emulsões). São montados em posições diferentes em função do tipo de rotor: acima das turbinas e em torno de propulsores/hélices.

**Inibidores de vórtice:** são tiras perpendiculares à parede do tanque que interferem no escoamento rotacional sem interferir muito no fluxo radial e tangencial. Geralmente quatro tiras são suficientes.

A Figura 10 apresenta o movimento do fluido em tanques agitados com inibidores de vórtice e “*draft tubes*”.



Figura 10 – Movimento do fluido em tanques agitados com rotores turbina (a) e hélice (b), com inibidores de vórtice e “*draft tubes*”.

Fonte: Uhl e Gray (1966)

### 2.2.3 Equipamentos de agitação

Os equipamentos de agitação são essencialmente constituídos do vaso e do agitador. Os agitadores podem ser montados no centro ou fora deste, com um ângulo de inclinação em relação ao eixo do vaso, dificultando a formação de vórtice. Agitadores também podem ser montados em entradas laterais dos vasos; nesse caso, os suportes devem ser fixados no vaso, e não no solo. Neste breve texto, serão abordados os equipamentos de agitação constituídos de um vaso cilíndrico com os agitadores montados ao longo da linha central do vaso.

O vaso pode ser aberto ou fechado (pressurizado). Como acessórios do vaso têm-se os inibidores de vórtice, que são adicionados para dificultar a formação de vórtice, serpentinas e camisas de aquecimento ou refrigeração, quando necessário controle de temperatura.

O agitador é composto de três partes fundamentais: motor, eixo e rotor. Relacionados ao eixo estão seus acoplamentos, os quais proporcionam métodos de instalação e desmontagem convenientes, rolamentos fixos ou mancais, que suportam o eixo e reduzem as deflexões laterais, anel estabilizador, que reduz vibrações e deflexões no eixo. Para isolar o conteúdo do vaso da atmosfera externa pode ser instalado selo mecânico ou afim. A Figura 11 ilustra um esquema e dimensões de um sistema de agitação de líquidos.

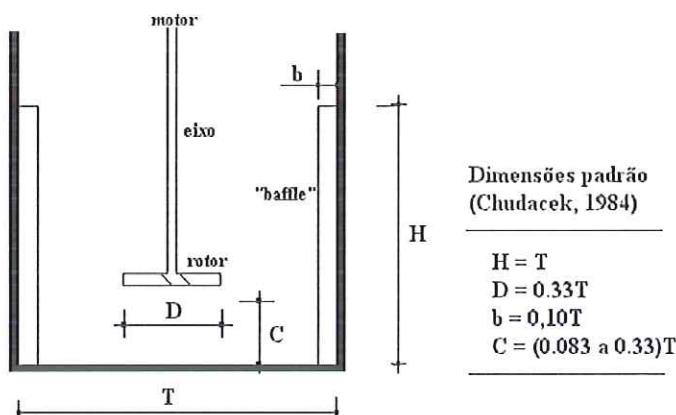


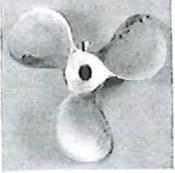
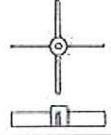
Figura 11 – Dimensões padrão de um tanque para agitação de líquidos

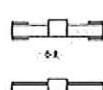
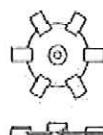
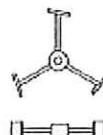
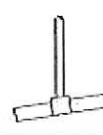
Fonte: Terron (1994)

A Tabela 3 mostra uma classificação resumida dos tipos de rotores utilizados para agitação e mistura de líquidos, quanto às suas características e utilização. A Tabela 3 apresenta apenas rotores do tipo hélice e turbina, utilizados para agitação de líquidos de baixa viscosidade.

Tabela 3 – Tipos de rotores

Fonte: [www.geocities.com/agitacao\\_de\\_liquidos](http://www.geocities.com/agitacao_de_liquidos) (consultado em 02/2003)

| Nº  | Tipo  | Descrição  | Características  | Ilustração  |
|-----|---|--|--|---|
| 1   | Impulsor de tipo marítimo ou Propulsor ("Marine-type impeller") | Usualmente é um propulsor de 3 lâminas, muito semelhante a um propulsor marítimo   | Fluidos com baixa viscosidade e para qualquer tamanho de vaso. Alta taxa de circulação. Fluxo axial (paralelo às paredes do vaso). Consumo de energia sensível à viscosidade           |    |
| 2   | Turbina ("Turbine")   | Rotor com lâminas de ângulo constante em relação ao plano vertical, em toda a extensão ou em seções finitas, tendo lâminas verticais ou colocadas em ângulos agudos com a vertical. Geralmente feitas em duas peças para que possam ser facilmente removidas de um tanque fechado. | Fluidos com viscosidade baixa ou moderada. Fluxo radial (perpendicular às paredes do vaso)<br>Consumo de energia não é sensível à viscosidade em Números de Reynolds moderados e altos |   |
| 2.1 | Lâmina plana ("flat blade")                                     | Comprimento das lâminas de 1/5 a 1/8 do diâmetro   | Descarga radial, com sucção da base e do topo  |  |
| 2.2 | Lâmina curva ("curved blade")                                   | Lâminas curvadas no sentido contrário da rotação   | Baixo cisalhamento na ponta da lâmina<br>Consumo de energia menor que o de lâmina plana.<br>Bom para soluções contendo sólidos frágeis   |  |

|     |   |  |  |   |
|-----|---|--|--|---|
| 2.3 | Lâmina inclinada ("pitched blade")              | Lâminas colocadas em ângulo agudo (45° mais comum)   | Fluxo misto (axial e radial). Indicado para operações com curto tempo de mistura |    |
| 2.4 | Coberta ("Shrouded")                            | Prato cobrindo total ou parcialmente o topo ou o fundo da turbina                                    | Cobertura usada para controlar a sucção ou a descarga                            |    |
| 2.5 | Ponta de flecha ("arrowhead")                   | Lâminas em formato de ponta de flecha fixadas sobre um disco   | Fluxo misto  |    |
| 2.6 | Catavento inclinado ("pitched vane")            | Adaptação do tipo disco com a área reduzida pela inclinação das lâminas em relação ao plano vertical | Grande velocidade, pequeno consumo de energia                                    |    |
| 2.7 | Lâmina de plano inclinado ("tilted blade")      | O plano em que as lâminas estão montadas é inclinado   | Aumento de desempenho sem aumento de consumo de energia                          |   |
| 2.8 | Lâmina curva inclinada ("pitched curved blade") | Combinação do tipo de lâmina inclinada com o de lâmina curva   | Combina os efeitos dos dois tipos  |  |

#### 2.2.4 Seleção dos rotores

A seleção do tipo de rotor adequado é baseada na velocidade de operação e viscosidade, podendo ser auxiliada pelas informações da Figura 12.

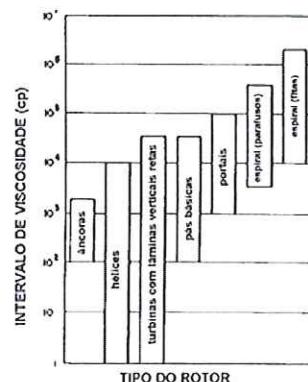


Figura 12 – Tipo de rotor em função da viscosidade do líquido.

Fonte: Terron (1994)

### 2.2.5 Potência consumida na agitação

Os primeiros estudos sobre a potência dissipada pelos rotores na agitação de líquidos datam do final do século XIX. Os parâmetros adimensionais envolvidos na determinação da potência dissipada são: número de Reynolds, número de Froude e número de potência.

Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ): representa a razão entre as forças inerciais e viscosas. Como determina se escoamento é laminar ou turbulento, o número de Reynolds está diretamente ligado com a potência dissipada.

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot V' \cdot D}{\mu} \quad (19)$$

Em que:

$\rho$  = massa específica do fluido

$V'$  = Velocidade do rotor

$D$  = diâmetro do rotor

$\mu$  = viscosidade do fluido

A velocidade  $V'$  é representada pela velocidade angular, ou seja,  $V'=N \cdot D$ . Em que  $N$  é a velocidade de rotação. Substituindo  $V'$  por  $ND$ , têm-se:

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot N \cdot D^2}{\mu} \quad (20)$$

Número de Froude ( $N_{Fr}$ ): representa a razão entre as forças inerciais e gravitacionais. Como a maioria das operações de agitação de líquidos ocorre com a superfície livre do líquido, este adimensional é incluído na análise.

$$N_{Fr} = \frac{(N \cdot D)^2}{D \cdot g} = \frac{D \cdot N^2}{g} \quad (21)$$

Em que  $g$  é o valor da aceleração da gravidade.

Número de Potência ( $N_P$ ): representa a razão entre a diferença de pressão produzida pelo escoamento e as forças inerciais.

$$N_P = \frac{P_d}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad (22)$$

### 2.3 Umidade relativa e umidade absoluta

Cada constituinte da atmosfera exerce uma pressão sobre a superfície independentemente da presença dos outros, resumidamente o conceito da Lei de Dalton das Pressões Parciais. Desse modo, a pressão total, ou pressão atmosférica,  $P_{alm}$ , é igual a soma das pressões de cada gás ou vapor. Sendo “ $\bar{p}_{vaporH_2O}$ ” a pressão parcial de vapor d’água têm-se:

$$P_{alm} = \bar{p}_{ar\ sec\ o} + \bar{p}_{vaporH_2O} \quad (23)$$

O símbolo  $\bar{p}_{vaporH_2O}$ , pressão parcial ou de vapor, de água, representa a pressão exercida pela massa de vapor de água existente na mistura. O seu valor máximo chamado de **pressão de saturação de vapor de água**,  $p_s$ . O valor de  $p_s$  é dependente da temperatura na forma  $p_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}$ . As unidades utilizadas nesta formulação para  $p_s$  e  $T_{ar}$  (ou temperatura de bulbo seco,  $T_s$ ) são respectivamente kPa e °C. A Figura 13 ilustra a equação de

$$\text{Tetens, } p_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}.$$

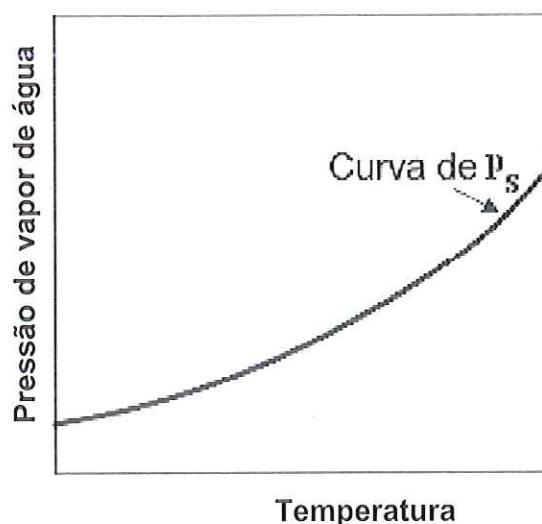


Figura 13 – Pressão de saturação

A umidade relativa do ar (UR) é definida como a relação entre a quantidade de vapor existente no ar e a que existiria se o ar estivesse saturado de vapor, na mesma temperatura, expressa como a relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de saturação de vapor de água.

$$UR(\%) = \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{p_s} \cdot 100 \quad (24)$$

Ainda,

$$\bar{p}_{vaporH_2O} = p_s \cdot UR$$

A umidade absoluta, introduzida inicialmente por Grosvenor, é também denominada Umidade de Grosvenor e pode ser definida de acordo com a equação 25, Treybal (1980). A umidade absoluta aqui tratada como UA, é definida para a mistura gás/vapor na qual os componentes são, respectivamente, o ar seco e o vapor de água. A razão entre a massa de vapor de água e a massa do ar seco é a umidade absoluta da mistura.

$$UA = \frac{m_{vaporH_2O}}{m_{ar\ seco}} \quad (25)$$

Pode-se considerar o vapor de água e a mistura como gases perfeitos, sendo possível desenvolver uma expressão para a umidade absoluta, UA, a partir das pressões parciais e das massas moleculares, Van Wylen (1995).

$$m_{vaporH_2O} = \frac{\bar{p}_{vaporH_2O} \cdot V}{R_{vaporH_2O} \cdot T} \quad (26)$$

e

$$m_{ar\ seco} = \frac{\bar{p}_{ar\ seco} \cdot V}{R_{ar\ seco} \cdot T} \quad (27)$$

Em que  $R_{ar\ seco}$  e  $R_{vaporH_2O}$  são as constantes para os gases e podem ser reescritas em função da constante universal dos gases, R.

$$R_{vaporH_2O} = \frac{R}{M_{vaporH_2O}} \quad (28)$$

e

$$R_{ar\ sec\ o} = \frac{R}{M_{ar\ sec\ o}} \quad (29)$$

Então,

$$UA = \frac{\frac{\bar{p}_{vaporH_2O} \cdot V \cdot M_{vaporH_2O}}{R \cdot T}}{\frac{\bar{p}_{ar\ sec\ o} \cdot V \cdot M_{ar\ sec\ o}}{R \cdot T}} = \frac{M_{vaporH_2O} \cdot \bar{p}_{vaporH_2O}}{M_{ar\ sec\ o} \cdot \bar{p}_{ar\ sec\ o}} \quad (30)$$

Substituindo os valores da massa molecular, têm-se:

$$\begin{aligned} UA &= \frac{18,02}{28,97} \cdot \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{\bar{p}_{ar\ sec\ o}} \\ UA &= 0,622 \cdot \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{\bar{p}_{ar\ sec\ o}} \end{aligned} \quad (31)$$

De acordo com a Lei de Dalton das Pressões Parciais, cada constituinte da atmosfera exerce uma pressão sobre a superfície independente da presença dos outros. Desse modo, a pressão total,  $P$ , é igual a soma das pressões parciais de cada gás ou vapor. Se a mistura considerada for apenas de ar e vapor de água:

$$P = \bar{p}_{ar\ sec\ o} + \bar{p}_{vaporH_2O} \quad (32)$$

Ou ainda

$$\bar{p}_{ar\ sec\ o} = P - \bar{p}_{vaporH_2O}$$

Reescrevendo a equação para a umidade absoluta:

$$UA = 0,622 \cdot \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{P - \bar{p}_{vaporH_2O}} \quad (33)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

---

#### 3.1 Montagem experimental

##### 3.1.1 Descrição geral

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios é constituído de um tanque fechado contendo água em agitação exposta, na sua superfície, ao ar com propriedades físicas controladas. O esquema geral pode ser visualizado na Figura 14.

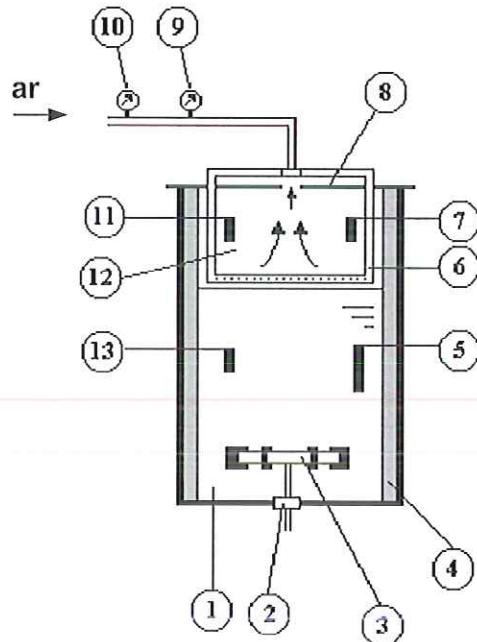


Figura 14 – Esquema da montagem experimental

1. Tanque cilíndrico – fase líquida
2. Sistema de vedação
3. Rotor ou impulsor rotativo
4. Inibidores de vórtice
5. Sensor do oxigênio dissolvido
6. Anel de distribuição de ar

7. Medidor da umidade relativa do ar
8. Tampa do tanque com as saídas de ar
9. Medidor da umidade relativa do ar
10. Medidor de vazão de ar
11. Medidor da temperatura do ar
12. Fase gasosa do tanque
13. Medidor da temperatura da água

### 3.1.1.1 Tanque com agitação hidrodinâmica

Foi utilizado um tanque cilíndrico de acrílico com agitação mecânica rotativa. O projeto geométrico do tanque foi feito com base em Chudacek (1984) citado em Terron (1994), conforme apresentado na revisão bibliográfica.

O tanque possui uma flange em cada extremidade. Uma base e uma tampa são utilizadas para fechar o tanque, com o uso de parafusos e porcas, conforme a Figura 15.

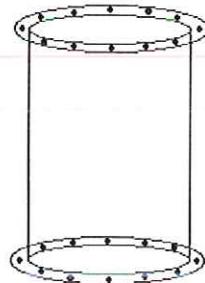


Figura 15 – Tanque cilíndrico

O tanque tem 0,5 m de diâmetro e 0,7 m de altura e é preenchido com 98 litros de água (0,5 m de coluna de água). O rotor está posicionado a 16,7 cm do fundo do tanque. A Figura 16 ilustra as dimensões do tanque.

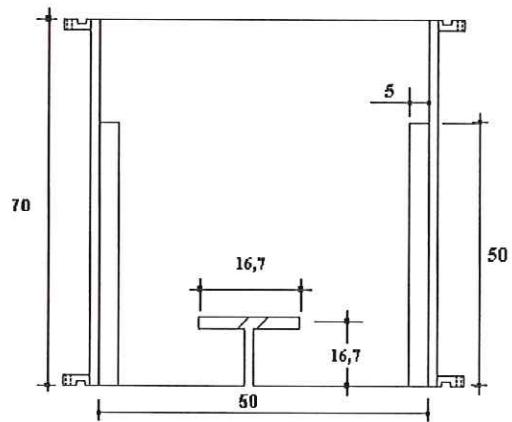


Figura 16 – Dimensões do tanque (cm)

O tanque possui 4 inibidores de vórtice instalados diametralmente opostos. Os inibidores, com 5 cm de largura, têm a função de inibir a formação do vórtice principal da água gerado pelo movimento rotativo. A vista em planta do tanque apresentada na Figura 17 mostra o posicionamento dos inibidores de vórtice e as fotografias do tanque são apresentadas na Figura 18 e na Figura 19.

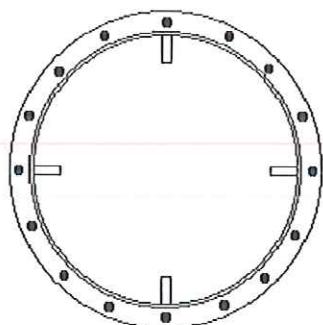


Figura 17 – Vista do tanque em planta

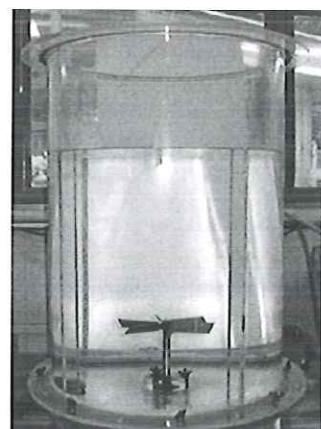


Figura 18 – Fotografia do tanque



Figura 19 – Tanque (aberto) em operação

### 3.1.1.2 Impulsor rotativo - rotor

O sistema de agitação foi introduzido no tanque pela parte inferior, apresentando a vantagem de não alterar as características da superfície líquida e de não favorecer a penetração anômala de ar ao longo do eixo de rotação.

O tanque é apoiado em uma estrutura de aço que o eleva para que o sistema de agitação seja introduzido pela parte inferior do tanque. O acionamento do sistema de agitação é feito por motor elétrico e sistema de polias. O apoio do eixo foi feito por dois mancais de rolamento fornecendo rigidez ao sistema e mantendo o eixo alinhado verticalmente. A Figura 20 e a Figura 21 mostram esquematicamente como foi feita a montagem e uma fotografia do tanque, respectivamente.

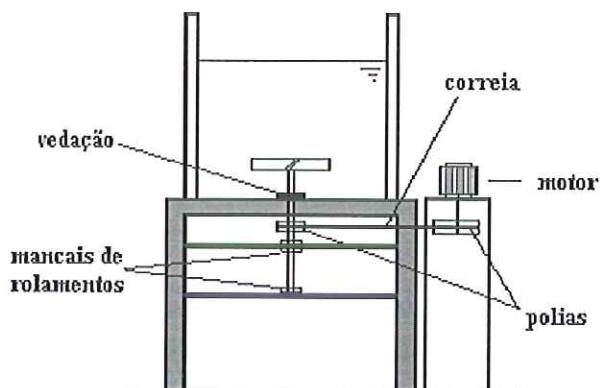


Figura 20 – Esquema do sistema de agitação



Figura 21 – Fotografia do sistema de agitação

A vedação do tanque pode ser feita com sucesso utilizando-se retentores devido às baixas velocidades de rotação impostas durante os ensaios. O retentor fica acondicionado em um suporte que é preso ao fundo do tanque conforme fotografia da Figura 22.

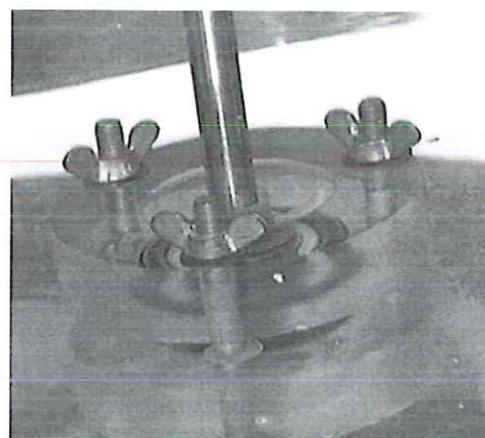


Figura 22 – Detalhe do sistema de vedação

A variação da freqüência do impulsor rotativo foi feita através de um inversor de freqüência que fornecia potência ao motor.

O sistema de agitação da água consiste em um rotor tipo turbina com seis pás inclinadas de 45°, montado na extremidade do eixo. O rotor é mostrado na Figura 23:

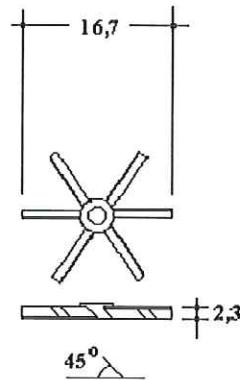


Figura 23 – Dimensões do rotor (cm)

O rotor foi executado em aço inoxidável. Esse tipo de rotor foi escolhido por gerar um escoamento principal bastante conhecido na literatura, sendo indicado para a agitação de líquidos com baixa viscosidade. Além disso, o fato de existir uma curva de potência disponível em Uhl e Gray (1966), como mostrada na Figura 24, permite calcular a potência dissipada pelo rotor no meio líquido conforme equacionamento a seguir.

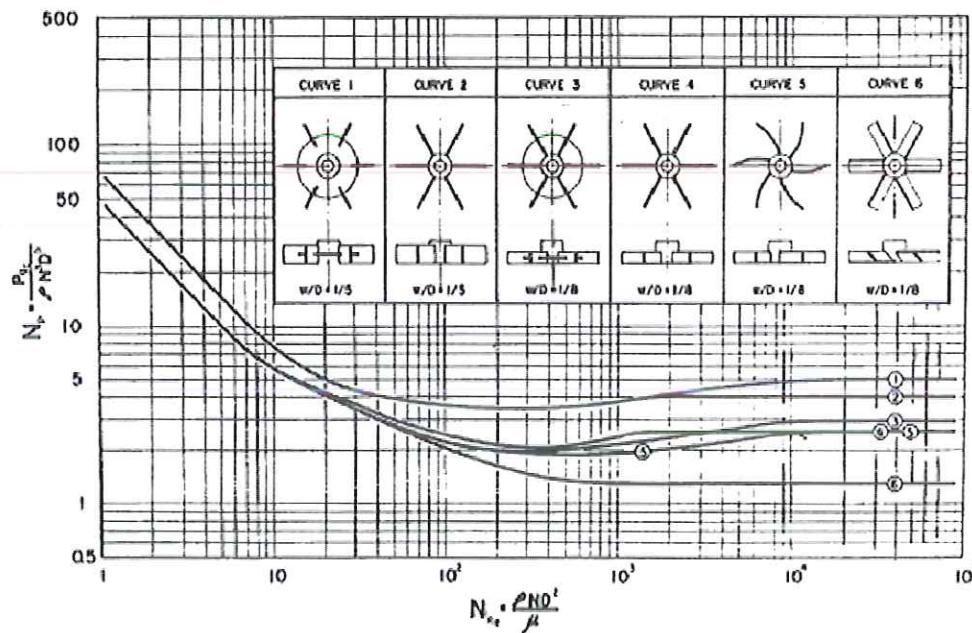


Figura 24 – Curvas de potência

A partir do número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) pode-se obter o número de potência,  $N_P$ , na curva 6 do gráfico da Figura 24. A potência dissipada,  $P_d$  em watts, pode ser calculada pela equação:

$$P_d = N_P \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (34)$$

Em que:

$N$  = velocidade de rotação ( $s^{-1}$ )

$D$  = Diâmetro do rotor (m)

$\rho$  = massa específica da água ( $997,1\text{kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ )

Nesta pesquisa o valor da velocidade de rotação  $N$  varia de 50 a 300 rotações por minuto (rpm). Calculando o número de Reynolds para a menor velocidade, 50 rpm, têm-se:

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot N \cdot D^2}{\mu}$$

Em que:

$\mu$  = viscosidade da água =  $9,59 \cdot 10^{-4} \text{ N.s.m}^2$

$D = 0,167 \text{ m}$

$N = 50/60 = 0,83\text{s}^{-1}$

$$N_{Re} = \frac{997,1 \cdot 0,83 \cdot 0,167^2}{9,59 \cdot 10^{-4}} = 2,41 \cdot 10^4$$

Observa-se na curva 6 do gráfico da Figura 24 que a partir do número de Reynolds  $10^3$  o número de potência torna-se constante e aproximadamente igual a 1,5. Para todas as velocidades de rotação é adotado o  $N_P=1,5$ , pois o número de Reynolds para estas velocidades é maior do que para 50 rpm. A potência dissipada para todas as velocidades de rotação é calculada com a equação 34. A Tabela 4 apresenta os resultados.

Tabela 4 – Potência dissipada

| $N(\text{rpm})$ | $N(\text{rps})$ | $N_{Re}$          | $P_d (\text{W})$ |
|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 50              | 0,83            | $2,41 \cdot 10^4$ | 0,11             |
| 100             | 1,67            | $4,83 \cdot 10^4$ | 0,90             |
| 150             | 2,50            | $7,25 \cdot 10^4$ | 3,04             |
| 200             | 3,33            | $9,67 \cdot 10^4$ | 7,20             |
| 250             | 4,17            | $1,21 \cdot 10^5$ | 14,05            |
| 300             | 5,00            | $1,45 \cdot 10^5$ | 24,28            |

### 3.1.1.3 Sistema de distribuição de ar

Uma das principais diferenças entre esta pesquisa e as anteriores, refere-se à atmosfera que serve como fonte de oxigênio para a transferência para o líquido. Nos trabalhos de Carvalho (1996) e Costa (1992), procurou-se controlar a atmosfera utilizando uma cabine climatizada no interior da qual localizava-se o tanque. Nestas condições, no entanto, ficara muito difícil garantir-se homogeneidade para o volume de ar. Para melhor controlar e quantificar características do ar decidiu-se neste trabalho utilizar um volume menor de ar para a transferência de oxigênio. O tanque foi tampado, e na tampa foi adaptado um dispositivo para a entrada e a saída do ar. Com isto, pôde-se medir a vazão de ar aduzida ao sistema e quantificar a taxa de evaporação calculada em função das medidas de umidade relativa do ar, antes e após a passagem pelo tanque.

Foram estudadas algumas configurações para o sistema de entrada, distribuição e saída do ar. Duas configurações foram selecionadas sendo uma com distribuição periférica do ar através de um anel com orifícios voltados para o centro e saída do ar pelo centro da tampa e outra com distribuição pelo centro e retirada pela periferia. Em ambos os casos, a pressão interna do tanque foi monitorada. O objetivo deste estudo foi avaliar dentre os sistemas de adução aquele que produzisse o menor aumento de pressão dentro do tanque. As configurações são apresentadas a seguir.

#### 3.1.1.3.1 Distribuição de ar tipo radial-centrípeta

Um anel para distribuição de ar foi executado com canos de cobre (diâmetro 3/8") alimentado em 4 pontos eqüidistantes. O anel, com diâmetro de 45 cm, é pouco menor que o diâmetro do tanque. Os orifícios para saída do ar foram executados com diâmetro de 3 mm a cada 1 cm, voltados para o centro do anel. A Figura 25 ilustra o anel de distribuição de ar.

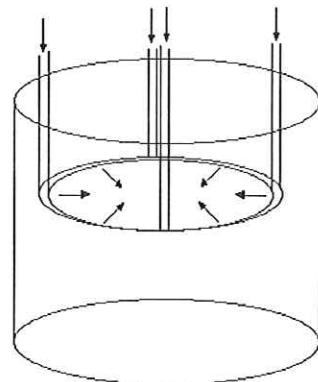


Figura 25 – Esquema do anel de distribuição de ar

Um furo de 8 cm foi executado no centro da tampa para permitir a retirada do ar. O sensor para medida de umidade relativa foi colocado na saída da ar, conforme ilustra a Figura 26.

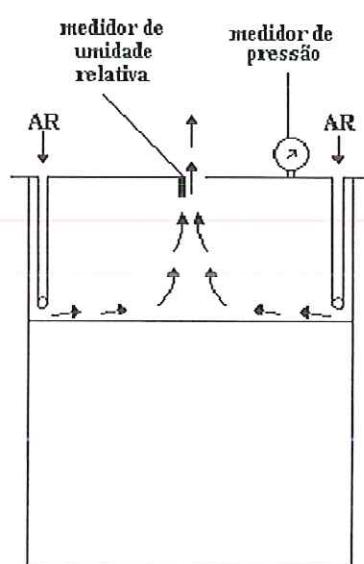


Figura 26 – Entrada e saída de ar no tanque

O anel de distribuição possui altura regulável em relação ao nível da água. Todos os ensaios foram realizados com o anel posicionado a 4 cm da superfície líquida em repouso. A Figura 27 mostra detalhes do anel de distribuição.

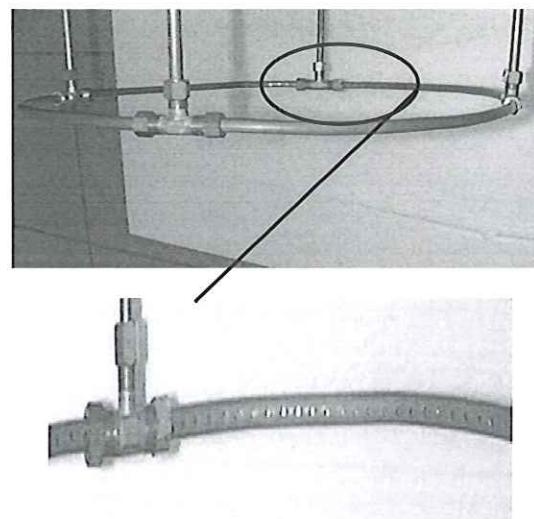


Figura 27 – Anel de distribuição de ar

### 3.1.1.3.2 Distribuição de ar tipo radial-centrífuga

Os primeiros resultados indicaram que seria necessário aumentar a taxa de evaporação. Isto foi conseguido com o aumento da vazão de ar, o que resultou em linha de adução/conexões com diâmetros maiores. Uma outra configuração para entrada, distribuição e saída do ar foi utilizada. A entrada consistiu em um tubo de 5 cm de diâmetro perfurado por toda sua área. O diâmetro dos furos é de 0,9 cm. Para a saída do ar foram executados 4 furos diametralmente opostos de 7 cm de diâmetro. O desenho da Figura 28 ilustra um corte do tanque e a tampa vista em planta.

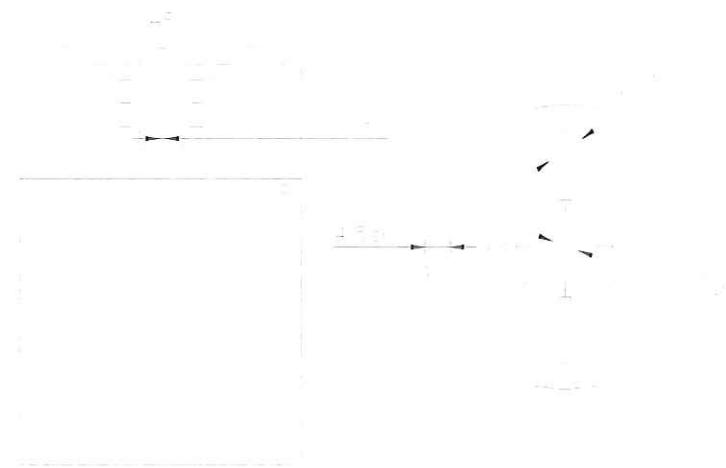


Figura 28 – Sistema de distribuição de ar: centro-periferia

A fotografia da Figura 29 mostra a tampa.

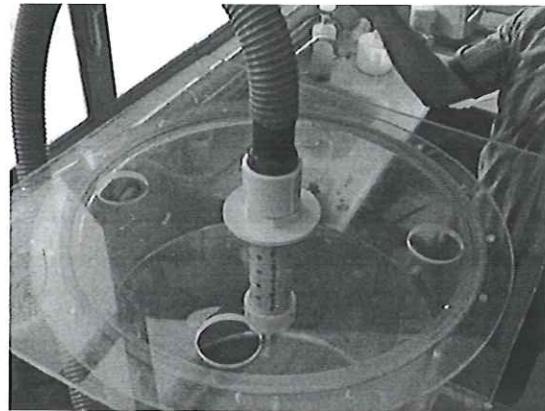


Figura 29 – Tampa do tanque

#### **3.1.1.4 Vazão de ar**

Inicialmente foi considerada a opção de utilizar cilindros comerciais de ar sintético, com umidade conhecida, para fornecer ar ao sistema. Esta opção foi descartada devido ao alto custo envolvido, já que os ensaios demandam até 12 horas.

Um compressor ou um soprador de ar foi utilizado em função da vazão necessária e perda de carga na linha. Para menores vazões e altas perdas de carga foi utilizado o compressor enquanto que para as maiores vazões e menores perdas o soprador mostrado na Figura 30 foi utilizado.

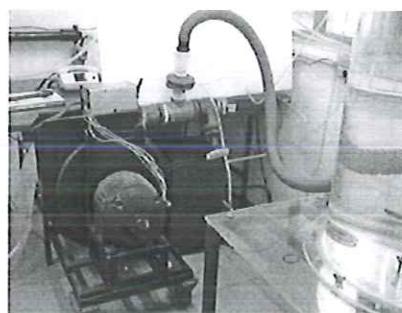


Figura 30 – Soprador de ar

##### **3.1.1.4.1 Posicionamento do sensor de UR**

A condição de mistura completa é desejada para que a transferência de massa seja homogênea e para determinar a localização do sensor para medir a umidade. Foi realizado um ensaio para verificar esta condição. O ensaio consistiu em colocar o sensor dentro do tanque para medir a umidade em

diversos locais, esperando-se constatar condições de homogeneidade com respeito à umidade relativa do ar. O sensor foi colocado em 3 posições diferentes, junto à tampa do tanque, na metade da altura disponível e próximo à superfície da água. O gráfico da Figura 31 ilustra os três ensaios, com a vazão de ar de 60l/min sem a agitação da água.

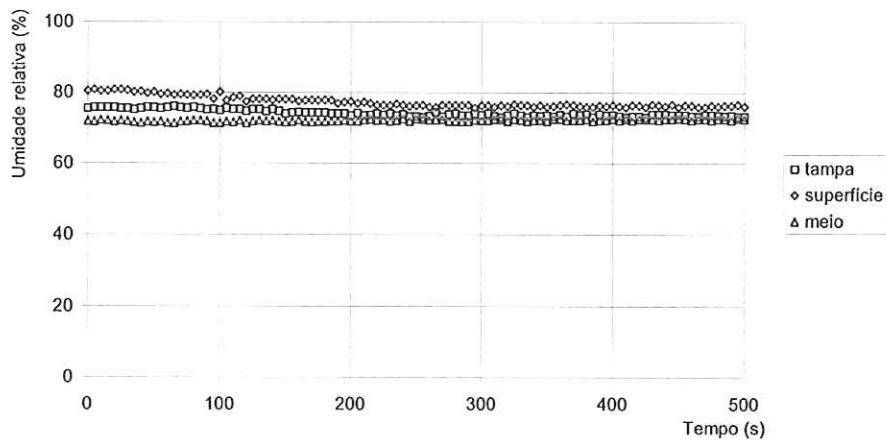


Figura 31 – Umidade medida em três locais – sem agitação da água

Pode ser observado que a mistura provocada apenas pelo ar promove uma mistura tal que, em condições de regime permanente ( $t > 200$  segundos), a umidade medida seja representativa para todo volume, independente da localização do sensor. O ensaio seguinte diferenciou-se do anterior apenas pela agitação da água, com velocidade de rotação de 100 rpm. O resultado é mostrado na Figura 32.

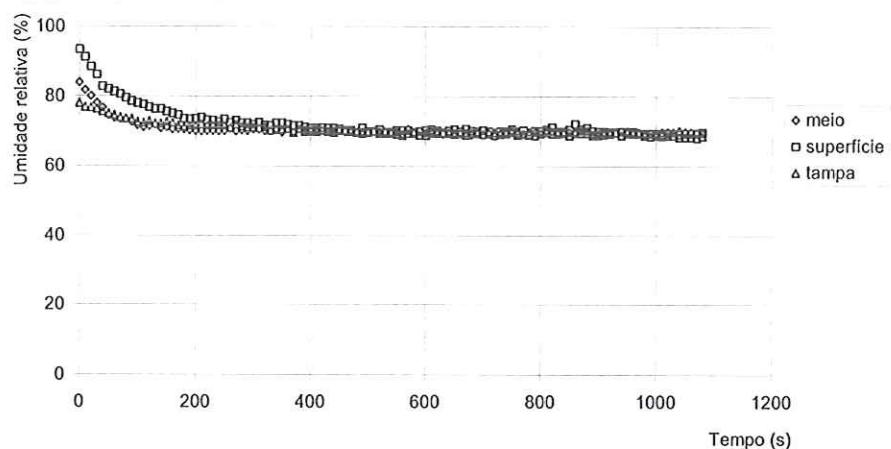


Figura 32 – Umidade medida em três locais – com agitação da água

As medições registradas com o sensor nos três locais mostraram-se equivalentes, comprovando a existência de homogeneidade; portanto a localização do sensor pode ser qualquer uma no interior da câmara de simulação atmosférica controlada. Para os ensaios, optou-se por localizar o sensor junto à tampa.

### 3.1.1.5 Secador de ar

Foi utilizado um secador de membrana, para ar comprimido, modelo W74 Norgren Herion. A fotografia da Figura 33 mostra o secador instalado na linha de adução de ar ao tanque. A umidade relativa do ar na saída do secador, para as vazões de ensaio, foi inferior a 10% nas condições de temperatura da realização dos testes.



Figura 33 – Secador para ar comprimido

### 3.1.1.6 Umidificador de ar

O sistema para umidificar o ar comprimido consiste na utilização de uma bomba de alta pressão e baixa vazão que produz uma "névoa" através de um aspersor dentro de uma câmara de passagem do ar. O esquema da Figura 34 ilustra o funcionamento do umidificador.

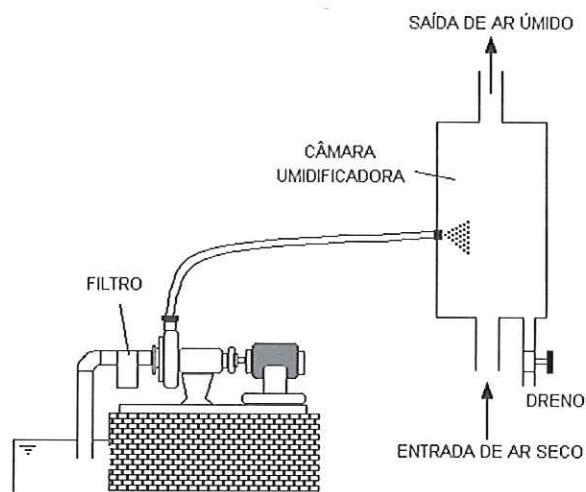


Figura 34 – Sistema para umidificação de ar

A água entra na câmara na forma de micro partículas, o que aumenta a área superficial de transferência para a fase gasosa. O excesso de água não transferida é retirado da câmara pelo dreno que também tem a função de controle da umidade na saída da câmara. As fotografias da Figura 35 e Figura 36 mostram, respectivamente, a bomba e a câmara umidificadora.

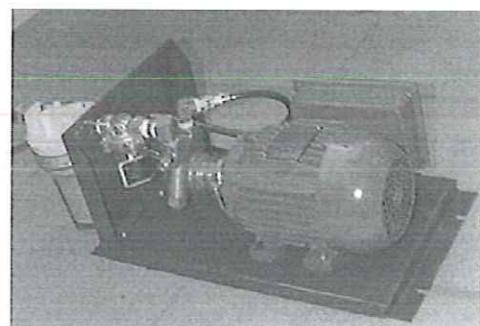


Figura 35 – Bomba de alta pressão

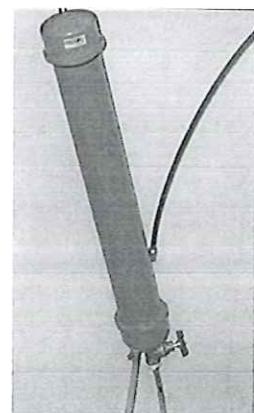


Figura 36 – Câmara umidificadora

### 3.1.1.7 Sistema de controle da umidade do ar

A umidade do ar na entrada do tanque deve ser controlada e mantida constante durante cada ensaio de reoxigenação. Para uma mesma condição de umidade de entrada, são realizados ensaios com diversos níveis de agitação. Após cobrir toda a faixa de agitação, é estabelecida outra condição de umidade de entrada e novamente são realizados os ensaios de reoxigenação para todos os níveis de agitação. Para se obterem as diversas condições de umidade na entrada do tanque, o secador e o umidificador são montados conforme apresentado na Figura 37.

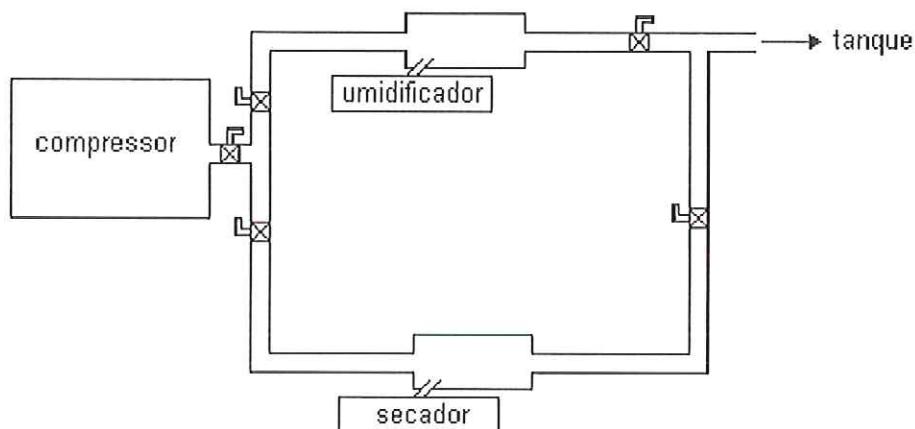


Figura 37 – Sistema de controle da umidade do ar

## 3.2 Instrumentação

Para a realização das medidas experimentais foi utilizado um sistema de aquisição de dados da Texas Instruments e instrumentação da Vernier (TI/Vernier).

Os parâmetros monitorados com o sistema de aquisição de dados TI/Vernier foram: concentração oxigênio dissolvido (mg/l), umidade relativa do ar (%), temperatura (°C).

O sistema TI/Vernier é composto de três unidades, a saber: calculadora gráfica modelo TI-89, CBL (*calculator based laboratory*) também fabricado pela Texas Instruments, e os sensores de medida.

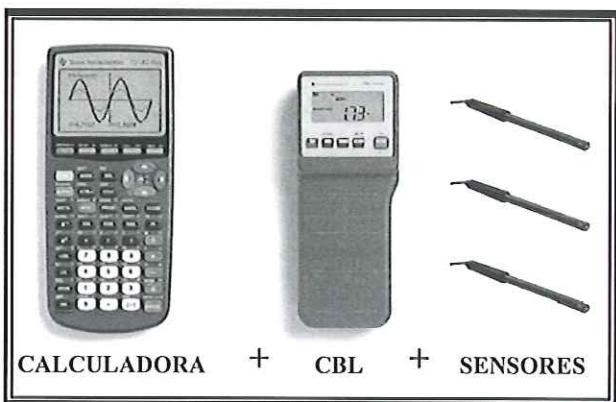


Figura 38 – Sistema de aquisição de dados

A calculadora é conectada ao CBL; o sistema executa o programa de coleta de dados, manipula os resultados e armazena as medidas observadas. O CBL contém uma placa conversora de sinais analógicos/digitais, chips de processamento e memória. Os sensores, Vernier, são acoplados ao CBL. O sistema permite a medição de até 3 parâmetros ao mesmo tempo e realiza as medidas em tempo real. Considerando a concentração de oxigênio dissolvido como o parâmetro cuja medição deve ser rigorosa, foram realizados alguns testes preliminares com os instrumentos.

### 3.2.1 Oxigênio dissolvido (O.D.)

O sensor utilizado para a realizar as medidas de oxigênio dissolvido na água, é um medidor do tipo “eletrodo polarográfico tipo Clark”. O medidor é composto de um catodo de platina e um anodo de prata/cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) em um meio eletrólito de cloreto de potássio ( $\text{KCl}$ ), separados da amostra por uma membrana permeável ao gás.

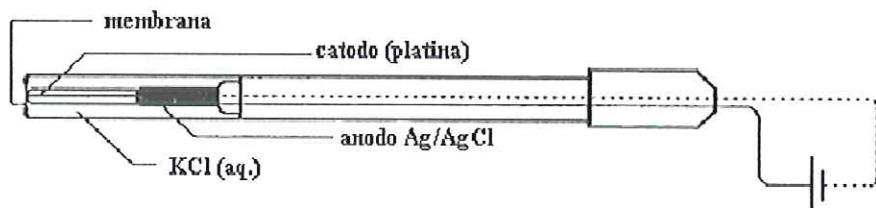


Figura 39 – Eletrodo para medida de oxigênio dissolvido

Uma voltagem fixa é aplicada no eletrodo de platina. Como o oxigênio dissolvido difunde através da membrana em direção ao catodo, o mesmo é reduzido resultando na geração de uma corrente elétrica. A corrente elétrica é convertida em uma diferença de potencial elétrico, que é amplificada pelo instrumento. A diferença de potencial é proporcional à taxa de difusão do oxigênio pela membrana quantificando a concentração de O.D. na amostra.

As vantagens de se usar um medidor com este princípio de funcionamento são citadas em Barbosa (1989) e Shiba (1981).

Por se tratar de equipamento recente no mercado, (1999), foi necessário testá-lo previamente. O teste consistiu em aferir o sensor utilizado para medições de O.D. com sensores similares, de alta precisão, disponíveis no mercado. Dois sensores com o mesmo princípio de funcionamento do sensor TI-Vernier foram selecionados, um de procedência alemã, marca WTW modelo Oxi 197 e outro procedente dos Estados Unidos, marca Orion modelo 810.

### 3.2.1.1 Calibração do sensor de O.D.

Foram preparadas seis amostras com diferentes concentrações de oxigênio dissolvido (O.D.), obtidas através da mistura entre uma água saturada de O.D. e outra com baixas concentrações de O.D. A fim de se obter uma porção de água com baixas concentrações de O.D. foi realizado uma lavagem ou “stripping” de nitrogênio, produzindo um borbulhamento de N<sub>2</sub> em uma coluna de água com superfície aberta à atmosfera. A água saturada de O.D. foi obtida através de alta agitação na amostra.

Os resultados obtidos com os sensores TI e WTW foram comparados com um método padrão. O método titulométrico Winkler descrito em “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (1985) foi considerado como padrão para todos os testes.

A análise de incertezas foi feita com base na análise dos desvios padrões dos processos de medida (instrumento+método). Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Valores obtidos com os sensores TI-Vernier e WTW

| Concentração de O.D. (mg/l) |            |      |
|-----------------------------|------------|------|
| Winkler                     | TI-Vernier | WTW  |
| 1,16                        | 1,36       | 1,09 |
| 2,20                        | 2,00       | 2,20 |
| 2,92                        | 2,75       | 3,21 |
| 4,16                        | 3,92       | 4,80 |
| 5,20                        | 4,54       | 5,70 |
| 6,80                        | 5,55       | 7,30 |

Os resultados obtidos, apresentados no gráfico da Figura 40, mostram as retas ajustadas para ambos os casos. O coeficiente de determinação  $R^2$  é apresentado ao lado de cada reta ajustada. O grau de linearidade da resposta dos sensores é determinado pelo coeficiente de determinação  $R^2$ .

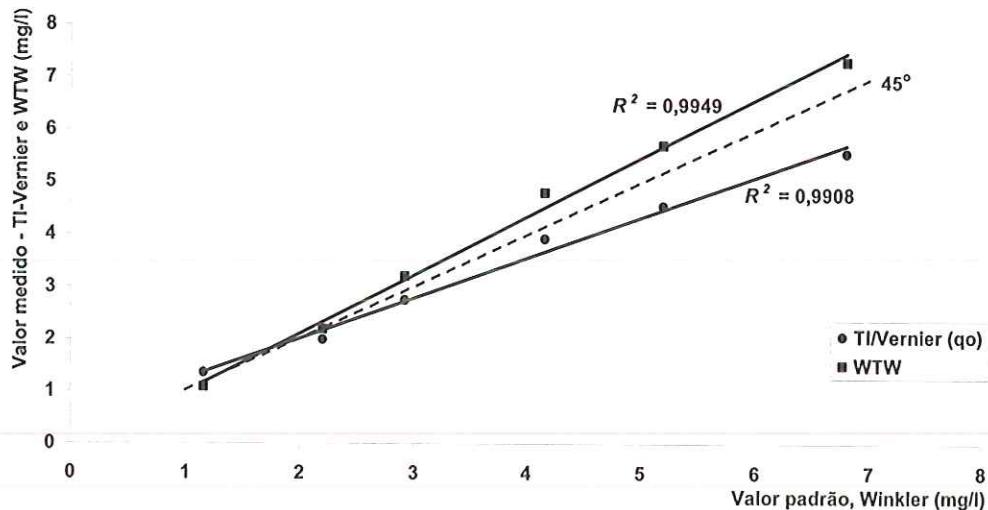


Figura 40 – Comparaçāo entre os sensores TI e WTW

O desvio padrão foi calculado de acordo com Doebelin (1990). Sendo  $m$  o coeficiente angular da reta ajustada,  $b$  é o coeficiente linear da mesma reta,  $q_i$  o valor padrão e  $q_o$  o valor medido, têm-se:

Desvio padrão para o valor medido,  $S_{q_o}$ :

$$S_{q_o} = \sqrt{\frac{\sum (m \cdot q_i + b - q_o)^2}{N}} \quad (38)$$

E o desvio padrão para o valor padrão,  $S_{q_i}$ :

$$S_{q_i} = \sqrt{\frac{S_{q_o}^2}{m^2}} \quad (39)$$

Tabela 6 – Desvio padrão dos sensores TI-Vernier e WTW

|                  | TI-Venier  | WTW        |
|------------------|------------|------------|
| $S_{q_o}$ (mg/l) | $\pm 0,14$ | $\pm 0,15$ |
| $S_{q_i}$ (mg/l) | $\pm 0,18$ | $\pm 0,14$ |

Para poder utilizar o sensor corrigindo o valor medido para o valor padrão é necessário, recalcular de acordo com a seguinte equação:

$$q_i = \frac{q_o - b}{m} \quad (40)$$

Considerando uma distribuição gaussiana, adotando o valor de  $\pm 3S_{q_i}$ , para os resultados calculados, o valor da medida com sua incerteza é:

$$q_i = \frac{q_o - b}{m} \pm 3 \cdot S_{q_i} = \frac{q_o - 0,481}{0,768} \pm 0,55$$

O procedimento do teste foi repetido, comparando-se os instrumento TI-Vernier com o da marca Orion. Os dados obtidos estão listados na Tabela 7

Tabela 7 – Valores obtidos com os sensores TI-Vernier e Orion

| Concentração de O.D. (mg/l) |       |            |
|-----------------------------|-------|------------|
| Winkler                     | Orion | TI-Vernier |
| 1,12                        | 0,72  | 0,57       |
| 1,76                        | 1,59  | 1,32       |
| 2,38                        | 2,36  | 1,94       |
| 3,70                        | 3,67  | 3,11       |
| 4,68                        | 4,74  | 4,09       |
| 5,16                        | 5,56  | 4,70       |
| 6,82                        | 7,25  | 6,15       |

Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 41 mostrando as retas ajustadas para ambos os casos. O coeficiente de determinação  $R^2$  é apresentado ao lado de cada reta ajustada. O grau de linearidade da resposta dos sensores é determinado pelo coeficiente de determinação  $R^2$ .

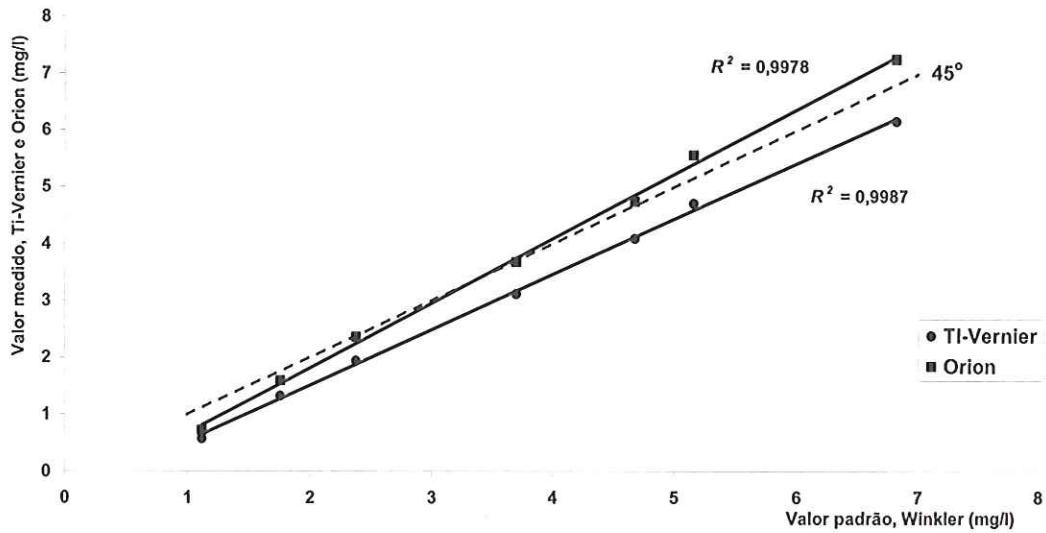


Figura 41 – Comparação entre os sensores TI e Orion

Novamente pode-se observar que o sensor Ti-Vernier obteve menor valor do desvio padrão, para o processo de medição.

Tabela 8 – Desvio padrão dos sensores TI-Vernier e WTW

|                  | TI-Vernier | Orion |
|------------------|------------|-------|
| $S_{q_o}$ (mg/l) | ±0,07      | ±0,10 |
| $S_{q_i}$ (mg/l) | ±0,07      | ±0,09 |

Considerando uma distribuição gaussiana, adotando o valor de  $\pm 3S_{q_i}$ , para os resultados calculados, o valor da medida com sua incerteza é:

$$q_i = \frac{q_o - b}{m} \pm 3 \cdot S_{q_i} = \frac{q_o - 0,441}{0,9745} \pm 0,21$$

Depois de realizada a calibração, o instrumento foi considerado apto para o uso nas medidas. No entanto, como foram realizados dois ensaios com o sensor, e observados valores distintos tanto para a correção em relação ao padrão como para o desvio padrão da medida, decidiu-se utilizar os valores médios.

Deste modo, considerando uma distribuição gaussiana, adotando o valor de  $\pm 3S_{q_i}$ , o valor da medida do sensor junto com sua incerteza será:

$$qi = \frac{qo + 0,02}{0,871} \pm 0,37$$

Devido à versatilidade do sistema de aquisição de dados, estas correções foram feitas via programa na própria calculadora. Este procedimento foi repetido a cada 6 meses, durante a fase experimental da pesquisa.

### 3.2.2 Umidade relativa do ar

O sensor utilizado para medir a umidade relativa do ar é o modelo RH-DIN do fabricante Vernier. Foram realizados ensaios com o objetivo de observar o comportamento da resposta do instrumento durante os períodos de medição. Foi monitorada a umidade relativa do ar na fase gasosa dentro de um tanque contendo água em agitação. A coluna de água utilizada neste ensaio foi de 35 cm. O sistema de adução do ar é o apresentado na seção 3.1.1.3. O sensor para medir a umidade foi colocado na atmosfera do tanque. Os dados foram coletados em função do tempo para duas vazões diferentes de ar com 57% de umidade inicial. Um ensaio típico é mostrado, no qual se observa que para a vazão maior (1000 l/h) o equilíbrio ocorre em um patamar inferior ao da vazão menor (600 l/h).

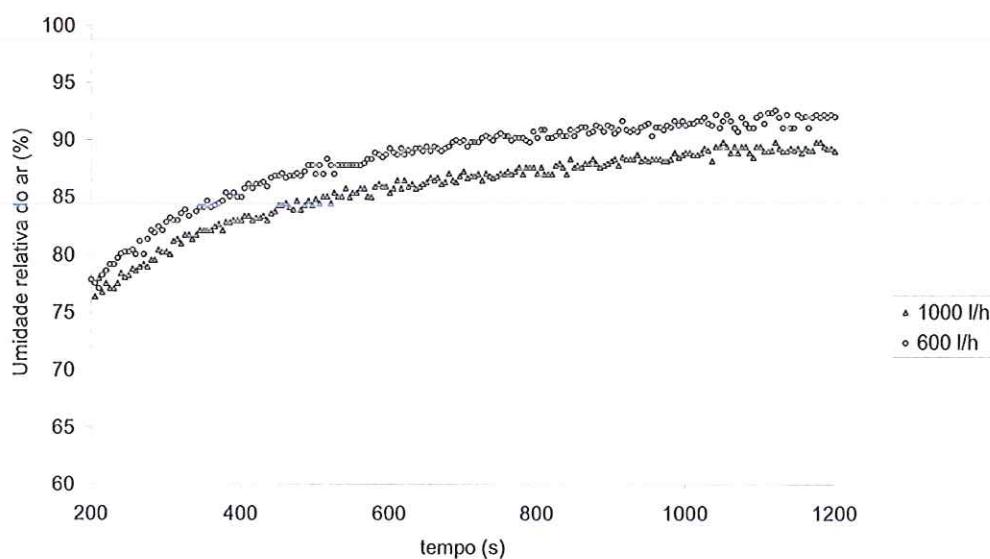


Figura 42 – Umidade de equilíbrio para as vazões de ar de 600 e 1000 l/h

Outros ensaios semelhantes ao anterior foram realizados, porém, sem os dispositivos de entrada e de saída de ar, ou seja, com o reator tampado para que a umidade relativa do ar atingisse o valor de saturação (100%). Uma estimativa do tempo de resposta (aproximadamente 600 segundos), para atmosfera sem movimento, foi obtida neste ensaio. Os resultados de um típico ensaio são mostrados na Figura 43:

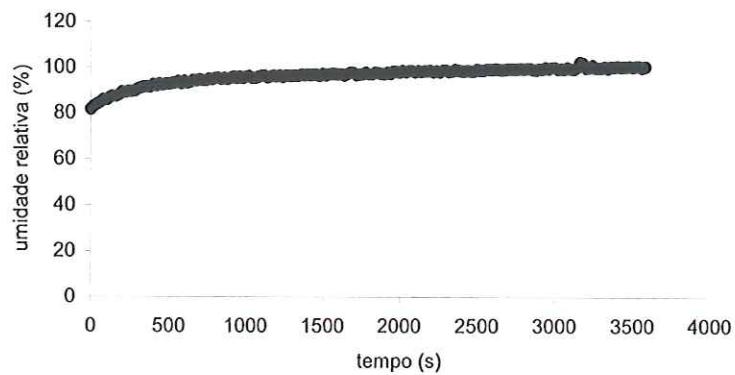


Figura 43 – Estimativa do tempo de resposta do sensor

### 3.2.3 Temperatura

Para testar a eficiência da climatização do laboratório, foi monitorada a temperatura da água no tanque durante um intervalo de 24 horas, servindo também como teste do sensor de temperatura. O resultado obtido foi uma temperatura média de 23,1°C com um desvio padrão de 0,4°C.

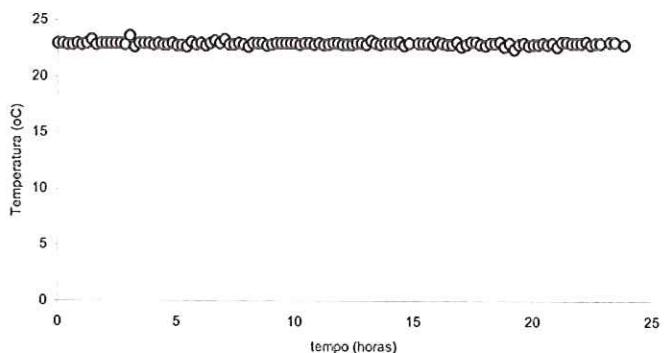


Figura 44 – Temperatura da água

### 3.2.4 Velocidade de rotação

Foi utilizado um sensor eletromagnético para quantificar a velocidade de rotação do agitador mecânico do tanque. Um imã é colado em um disco de plástico acoplado ao eixo do rotor, portanto com a mesma velocidade angular do rotor. Toda vez que o imã passa pelo sensor fixo no suporte, um dispositivo eletromagnético conta uma unidade no mostrador digital. A contagem ocorre durante o tempo de 1 minuto quando o circuito é aberto congelando o mostrador. A velocidade angular é lida no "display" em rotações por minuto. A fotografia da Figura 45 mostra o instrumento com o sensor fixo e o imã colado no disco.

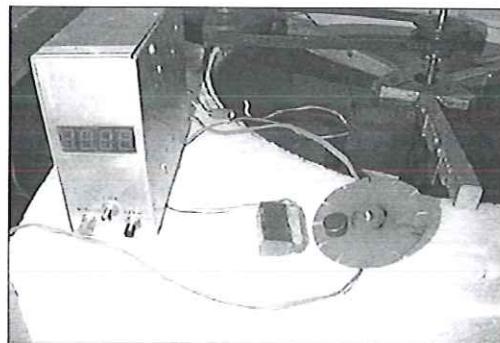


Figura 45 – Medidor da velocidade de rotação

### 3.2.5 Vazão de ar

Para medir a vazão de ar proveniente do compressor foi utilizado um rotâmetro montado na linha de adução de ar. Quando foi utilizado o soprador de ar, a vazão foi medida através de uma placa de orifício instalada na linha de adução de ar. A vazão é quantificada pela diferença de pressão a montante e a jusante da placa. O dimensionamento da placa de orifício é feito de acordo com "*Fluid Meters – Their Theory and Application*", ASME (1959). Foram desprezadas as variações de temperatura. O dimensionamento é apresentado resumidamente a seguir sendo válido somente para as aplicações deste trabalho. Sendo  $\beta$  a relação entre o diâmetro da placa de orifício,  $d$ , e o diâmetro da tubulação,  $D'$ , têm-se:

$$\beta = \frac{d}{D'} = \frac{40}{78} = 0,51 \quad (41)$$

$$\dot{m} = 0.012513 \cdot K \cdot Y_1 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P} \quad (42)$$

Em que:

$\dot{m}$  = descarga mássica (kg/h)

$\Delta P$  = diferença de pressão a montante e a jusante da placa (mmH<sub>2</sub>O)

$d$  = diâmetro da placa de orifício (mm)

$\rho$  = massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>)

Sendo que:

$$K = K_o \cdot \left[ 1 + (0,002 + 0,26\beta^4) \cdot K_o \cdot \frac{1000}{\sqrt{N_{Re}}} \right] \quad (43)$$

$$K_o = 0,6004 + 0,35\beta^4 \quad (44)$$

$$N_{Re} = \frac{4000 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot 3600 \cdot d \cdot \mu} \quad (45)$$

$$Y_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \left[ \frac{\Delta P}{P_m + \left( \frac{P_{bar}}{760} \cdot 10000 \right)} \right] \cdot \frac{1}{K_c} \quad (46)$$

Em que:

$P_m$  = pressão manométrica medida a montante da placa (mmH<sub>2</sub>O)

$P_{bar}$  = pressão barométrica (mmHg)

$\mu$  = viscosidade do ar ( kg/m.s )

Algumas iterações são necessárias para a determinação do valor do número de Reynolds. A ilustração da Figura 46 mostra o esquema da placa de orifício.

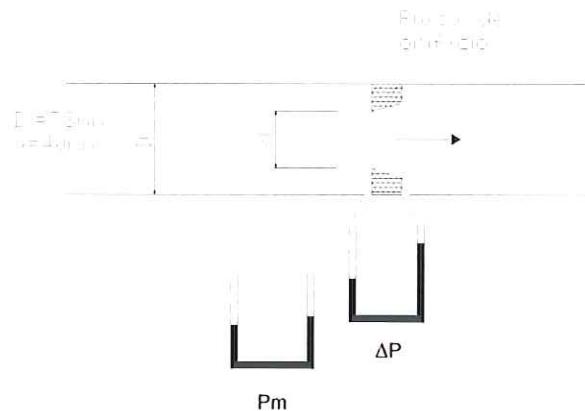


Figura 46 – Dimensões da placa de orifício



Figura 47 – Fotografia da placa de orifício

### 3.3 Ensaios

Os ensaios foram realizados com seis diferentes níveis de agitação da água, quantificados pelas seguintes velocidades de rotação: 50, 100, 150, 200, 250 e 300 rpm. Para cada nível de agitação, foram realizados ensaios com diferentes níveis de umidade atmosférica na entrada do tanque. A umidade do ar dentro do tanque e a taxa de evaporação são funções da umidade na entrada do tanque e da vazão de ar.

#### 3.3.1 Metodologia experimental

Os ensaios consistiram em retirar parte do oxigênio dissolvido da água e monitorar a subsequente curva de reoxigenação da água em agitação, resultante da transferência de oxigênio da atmosfera para a água através da superfície livre. O monitoramento da vazão e da umidade do ar, antes e após a passagem pelo tanque, permitiu quantificar a taxa de evaporação.

O procedimento para todos os ensaios obedece ao seguinte roteiro:

1. Abastecimento do tanque com 100 litros de água destilada.
2. Retirada do oxigênio dissolvido da água pelo processo de borbulhamento de um gás (*stripping*), que provoca a transferência do oxigênio para as bolhas do gás injetado, realizado, no caso, por um borbulhamento de nitrogênio. Como a coluna de água no tanque (com 100 litros) é de apenas 0,50 m, alguns cuidados foram tomados para que as bolhas de nitrogênio não escapassesem para a atmosfera antes que o oxigênio fosse incorporado a elas evitando assim desperdício de nitrogênio. Para majorar a transferência do oxigênio para as bolhas de nitrogênio o diâmetro das bolhas deveria ser o menor possível. Isto foi conseguido utilizando uma pedra porosa como difusor. Esta pedra foi instalada acima do rotor do tanque. Deste modo as bolhas são puxadas para o rotor que além de quebrar as bolhas em bolhas menores, também colabora com o aumento do tempo de detenção das bolhas no tanque aumentando o tempo de contato e a eficiência do processo. As fotografias da Figura 48, Figura 49 e Figura 50 mostram, respectivamente, o difusor no tanque com o rotor parado e o sem vazão de gás, vazão de gás com o rotor parado e rotor ligado com vazão de gás ativada.

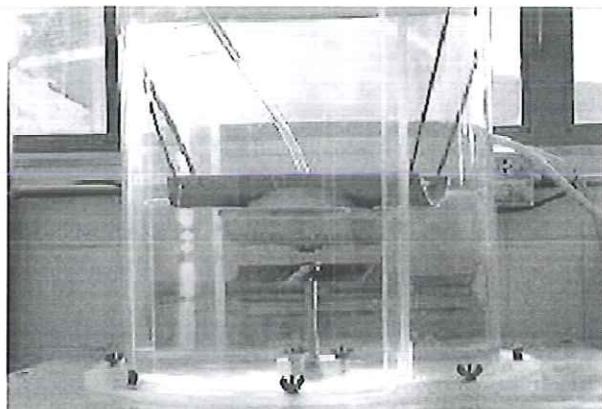


Figura 48 – Difusor de ar no tanque em repouso

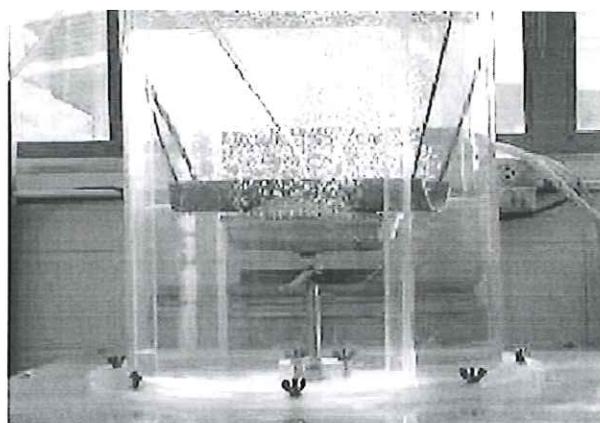


Figura 49 – Difusor ligado com tanque em repouso

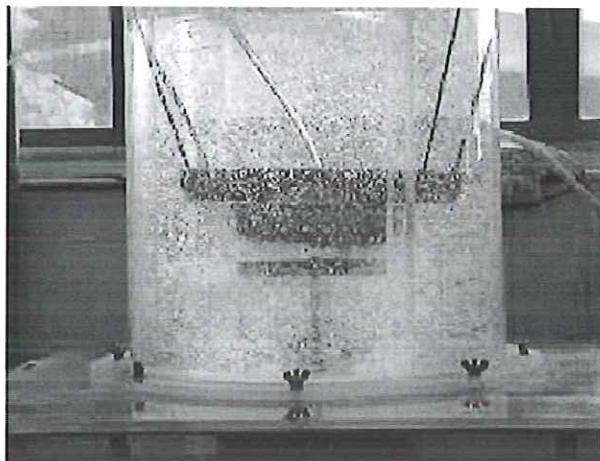


Figura 50 – Difusor ligado com tanque em agitação

3. Regulagem da velocidade de rotação do sistema de agitação. Após o ajuste o sistema é desligado para que o processo de reoxigenação não inicie.
4. Colocação da tampa no tanque. A fotografia da Figura 51 mostra a vista superior do tanque.

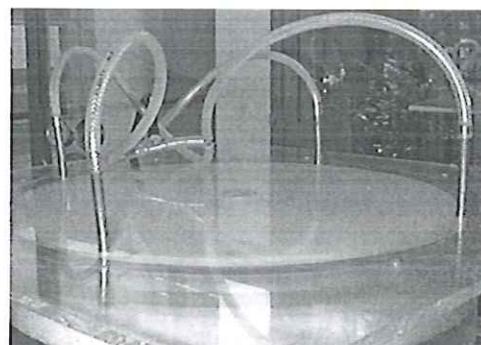


Figura 51 – Vista superior do tanque

5. Acionamento do compressor. O sistema de controle da umidade já deve estar ajustado, para a umidade em questão. A vazão de ar é medida com o uso de um rotâmetro instalado na linha.

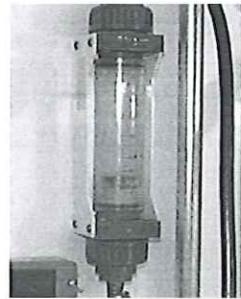


Figura 52 – Rotâmetro

6. Colocação dos sensores de medida dentro do tanque.
7. Acionamento do sistema de agitação da água do tanque.
8. Disparo no sistema de aquisição de dados, que monitora os seguintes parâmetros em função do tempo:

- Oxigênio dissolvido.
- Umidade relativa do ar a montante do tanque
- Umidade relativa do ar dentro do tanque
- Temperatura da água e do ar

### 3.3.2 Formulação utilizada

Para os fins a que se destina esta formulação, torna-se interessante explicitar a relação entre a umidade relativa e a umidade absoluta, o que pode ser feito combinando-se as equações apresentadas na seção 2.3.

$$UA = 0,622 \cdot \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{P - \bar{p}_{vaporH_2O}} \quad \text{e} \quad UR(\%) = \frac{\bar{p}_{vaporH_2O}}{p_s} \cdot 100$$

Substituindo-se  $\bar{p}_{vaporH_2O} = UR \cdot p_s$

$$UA = 0,622 \cdot \frac{UR \cdot p_s}{P - UR \cdot p_s}$$

E ainda

$$UA = \frac{0,622 \cdot UR \cdot 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}}{P - UR \cdot 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}} \left( \frac{\text{kg vapor de água}}{\text{kg ar seco}} \right)$$

O mesmo raciocínio pode ser aplicado para se obter a umidade relativa em relação ao ar úmido, ou seja,  $UA = \frac{m_{\text{vapor}H_2O}}{m_{\text{arúmido}}}$ . Tal procedimento fornece a seguinte relação:

$$UA = \frac{0,622 \cdot UR \cdot 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}}{P} \left( \frac{\text{kg vapor de água}}{\text{kg de ar úmido}} \right) \quad (47)$$

No modelo matemático desenvolvido para quantificar a taxa de evaporação, é necessário utilizar-se a umidade absoluta, UA, em termos do volume do ar úmido. Alguns autores denominam essa grandeza como umidade específica ou razão de mistura. A densidade do ar úmido, definida por  $\rho_{au}$ , é dada por:

$$\rho_{au} = \frac{m}{V}$$

em que  $m$  é a massa de ar úmido, ou seja, a soma da massa de vapor de água com a massa de ar seco. A massa de vapor de água,  $m_w$ , é:

$$m_w = \frac{\bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot V \cdot M_w}{R \cdot T}$$

Sendo  $M_w$  a massa molecular da água ( $18,016 \text{ g.mol}^{-1}$ ) e R é a constante universal dos gases ( $8,314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

A massa de ar seco é dada por:

$$m_d = \frac{\bar{p}_{\text{ar seco}} \cdot V \cdot M_d}{R \cdot T}$$

Em que  $M_d$  é o peso molecular do ar seco ( $28,966 \text{ gmol}^{-1}$ ).

A massa total do ar úmido é:

$$m = m_w + m_d = \frac{(\bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot M_w + \bar{p}_{\text{ar seco}} \cdot M_d)}{R \cdot T} \cdot V$$

Utilizando-se novamente a Lei de Dalton, a equação anterior pode ser rescrita como:

$$m = \frac{(\bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot M_w + (P - \bar{p}_{\text{vapor de água}}) \cdot M_d)}{R \cdot T} \cdot V$$

Ou rearranjando-se os termos:

$$\frac{m}{V} = \frac{M_d \cdot \left( \bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot \frac{M_w}{M_d} + P - \bar{p}_{\text{vapor de água}} \right)}{R \cdot T}$$

$$\rho_{au} = \frac{M_d \cdot \left( P + \bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot \left[ \frac{M_w}{M_d} - 1 \right] \right)}{R \cdot T} \text{ ou}$$

$$\rho_{au} = \frac{M_d \cdot \left( P - \bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot \left[ 1 - \frac{M_w}{M_d} \right] \right)}{R \cdot T}$$

A razão entre as massas moleculares da água e do ar seco ( $\varepsilon$ ) é:

$$\varepsilon = \frac{M_w}{M_d} = \frac{18,016}{28,966} = 0,622$$

Portanto  $1-\varepsilon = 0,378$ .

$$\rho_{au} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_d \cdot (P - \bar{p}_{\text{vapor de água}} \cdot 0,378)}{R \cdot T} \left( \begin{array}{l} \text{g/mol} \cdot \text{kPa} \\ \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \end{array} \right)$$

Deste modo, o produto da densidade do ar úmido pela umidade absoluta em relação ao ar úmido fica:

$$UA \left( \frac{\text{kg vapor de água}}{\text{kg de ar úmido}} \right) \cdot \rho_{au} \left( \frac{\text{kg de ar úmido}}{\text{m}^3 \text{ de ar úmido}} \right) = \left( \frac{\text{kg vapor de água}}{\text{m}^3 \text{ de ar úmido}} \right) \quad (48)$$

Nas pesquisas de Oliveira (1996) e Costa (1992), os resultados experimentais foram apresentados na forma de gráficos que mostravam o valor do coeficiente de reoxigenação em função da umidade relativa do ar (média) na atmosfera ambiente durante o ensaio. Os resultados obtidos pelos pesquisadores citados não permitiram uma conclusão sobre a influência da umidade ambiente sobre o coeficiente de reoxigenação superficial,  $K_2$ .

Provavelmente, isto se deve ao fato de que o coeficiente  $K_2$  não é influenciado pela umidade ambiente e sim pela taxa de evaporação. Carvalho e Costa realizaram experimentos nos quais o tanque de reoxigenação ficara em uma cabine climatizada e a umidade medida por um psicrômetro representa o valor da umidade média do ambiente. Possivelmente o ambiente escolhido como sendo a fonte de transferência de oxigênio não fora bem caracterizado fisicamente pela medição única do psicrômetro.

Em função disto, esta pesquisa está sendo realizada com um ambiente atmosférico menor e mais bem controlado. A vazão de ar aduzida no sistema é medida assim como a umidade relativa do ar antes e depois da passagem pelo tanque de reoxigenação. Elaborou-se um modelo para quantificar a taxa de evaporação (massa de água evaporada por tempo) em função dos parâmetros citados.

### 3.3.2.1 Modelo para quantificação da taxa de evaporação

Considerando-se como volume de controle a fase gasosa do tanque, pode-se efetuar o seguinte balanço de massa de vapor de água, supondo condição de mistura completa:

$$\dot{M}_{\text{entra}} - \dot{M}_{\text{sai}} = \dot{M}_{\text{acumulada}}$$

Como não se acumula massa no sistema e a massa de vapor de água que entra é a soma de duas parcelas, quais sejam, a advecção de vapor de água pelo ar de entrada e a água evaporada, têm-se:

$$\dot{M}_{\text{entra}} + T_{\text{evap}} = \dot{M}_{\text{sai}} \text{ ou ainda } T_{\text{evap}} = \dot{M}_{\text{sai}} - \dot{M}_{\text{entra}}$$

Em que  $T_{\text{evap}}$  (taxa de evaporação) e  $\dot{M}$  tem a dimensão de massa por tempo. Utilizando-se o esquema ilustrado na Figura 53 e substituindo  $\dot{M} = Q \cdot UA \cdot \rho_{\text{au}}$  têm-se:

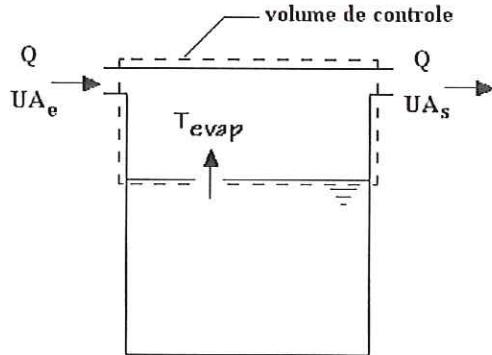


Figura 53 – Volume de controle

$$T_{evap} = Q \cdot UA_e \cdot \rho_{au} - Q \cdot UA_s \cdot \rho_{au} \left( \frac{l \text{ ar úmido}}{\text{min}} \cdot \frac{g \text{ vapor de água}}{\text{kg de ar úmido}} \cdot \frac{\text{kg de ar úmido}}{l \text{ ar úmido}} \right)$$

Ou seja

$$T_{evap} = Q \cdot \rho_{au} (UA_e - UA_s) \left( \frac{g_{vaporH_2O}}{\text{min}} \right) \quad (49)$$

### 3.3.3 Estimativa dos parâmetros e tempo de ensaio

Na determinação do coeficiente de reoxigenação superficial,  $K_2$ , é utilizado o método exponencial, conforme descrito no item 2.1.5.1. O tempo de ensaio necessário para a estimativa de  $K_2$  é  $4/K_2$  e quando praticável  $6/K_2$ , ASCE (1984) e Brown e Baillod (1982). O tempo de  $4/K_2$  corresponde ao tempo necessário para que a concentração de O.D. alcance 98% da concentração de saturação,  $C_S$ . Tais valores têm como base os processos de reoxigenação por ar difuso que são, geralmente, processos rápidos. Os valores sugeridos nem sempre são praticáveis, como no caso de ensaios de reoxigenação superficial.

Como base nos dados obtidos por Barbosa (1989) para  $K_{2,25}$  ( $K_2$  corrigido para a temperatura padrão de 25°C de acordo com a seção 2.1.3) o tempo de ensaio é dado de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Tempo de ensaio sugerido

| Velocidade<br>de rotação<br><i>N</i> (rpm) | $K_{2,25}$ (h <sup>-1</sup> ) | Tempo de ensaio (h) |          |
|--|-------------------------------|---------------------|----------|
|  |                               | 4/ $K_2$            | 6/ $K_2$ |
| 56   | 0,08                          | 45                  | 67       |
| 104  | 0,14                          | 28                  | 42       |
| 150  | 0,21                          | 19                  | 29       |
| 195  | 0,34                          | 12                  | 18       |
| 249  | 0,68                          | 6                   | 9        |
| 370  | 1,26                          | 3                   | 5        |

A Tabela 9 mostra a inviabilidade prática de realizar os ensaios durante o intervalo de 6/ $K_2$  ou mesmo 4/ $K_2$  principalmente para aqueles com menor nível de agitação. Deste modo, foi feita uma análise metodológica para determinar a duração dos ensaios, sempre visando o menor tempo possível, sem perda da qualidade dos dados.

Uma série de ensaios foi realizada, para todos os níveis de agitação, considerando-se como limite prático o tempo máximo de ensaio. Esta análise envolve o consumo de recursos e tempo, sem afetar a qualidade da estimativa dos parâmetros. A Tabela 10 mostra o limite prático.

Tabela 10 – Tempo de ensaio (limite prático)

| Ensaio | Velocidade de rotação (rpm) | Tempo máximo de ensaio (h) |
|--------|-----------------------------|----------------------------|
| 1      | 50                          | 15                         |
| 2      | 100                         | 12                         |
| 3      | 150                         | 7                          |
| 4      | 200                         | 7                          |
| 5      | 250                         | 6                          |
| 6      | 300                         | 4                          |

Para cada ensaio (1 a 6) é feita uma análise para verificar a influência do tempo dos ensaios (da Tabela 10) sobre a qualidade dos parâmetros estimados  $K_2$  e  $C_S$ , já que a estimativa de  $C_O$  se aproxima da medida experimental. Porém são estimados todos os parâmetros:  $C_O$ ,  $K_2$  e  $C_S$ .

Considerando-se que o tempo da Tabela 10, seja o limite prático, o valor "correto" de  $C_S$  e  $K_2$  será considerado como o obtido para 100% dos dados.

Através da análise a seguir, é mostrado que podem ser encontrados os valores de  $C_S$  e  $K_2$ , utilizando-se apenas uma determinada porcentagem dos dados dos ensaios. O erro considerado nos parâmetros  $C_S$  e  $K_2$  em relação aos obtidos com 100% dos dados é de 3%. Como conclusão desta análise resulta o tempo de ensaio necessário para determinação dos parâmetros sem comprometer a qualidade dos mesmos.

Os ensaios são apresentados na forma de gráficos de  $K_2$  e  $C_S$  em função da porcentagem dos dados. A faixa de 3% de erros em relação a 100% dos dados é evidenciada pelas linhas contínuas.

### Ensaio 1

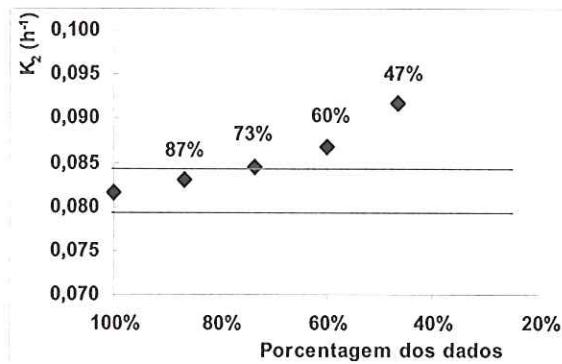


Figura 54 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 50 rpm

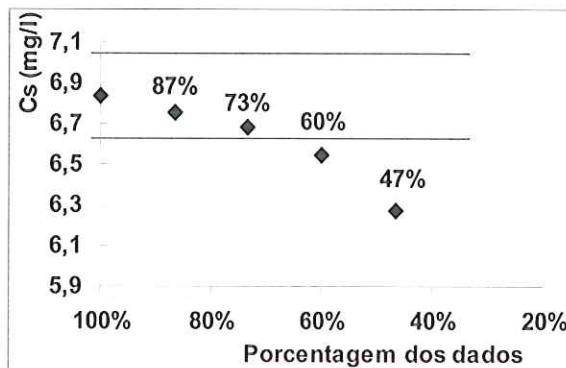


Figura 55 –  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 50 rpm

Considerando  $K_2$  e  $C_s$ , observa-se que 87% dos dados fornecem dados suficientes para o ajuste dos parâmetros dentro do erro imposto. Portanto os ensaios realizados sob a velocidade de rotação de 50 rpm devem ter duração de 13 horas. Comparando-se os valores de  $K_2$  e  $C_s$  obtidos utilizando 15 horas (limite prático) e 13 horas (tempo definido para este ensaio), observa-se as seguintes variações na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação de parâmetros, 50 rpm

|                    | 15 horas | 13 horas | Variação |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $C_0$ (mg/l)       | 0,51     | 0,51     | 0        |
| $C_s$ (mg/l)       | 6,98     | 6,92     | 0,87%    |
| $K_2$ ( $h^{-1}$ ) | 0,08     | 0,08     | 0        |
| % $C_s$            | 70       | 67       |          |

### Ensaio 2

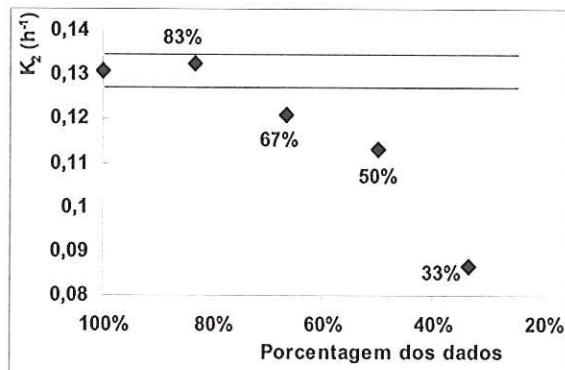


Figura 56 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 100 rpm

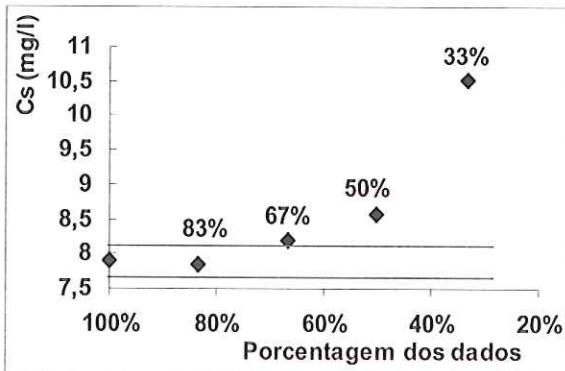


Figura 57 –  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 100 rpm

Observa-se para esta velocidade de rotação que os valores de  $K_2$  e  $C_s$  não são afetados (considerando-se o erro de 3%) utilizando-se até 83% dos dados experimentais. Como o tempo total do ensaio é de 12 horas, utilizando-se 10 horas os resultados são satisfatórios. Comparando-se os valores de  $K_2$  e  $C_s$  obtidos utilizando 12 horas (limite prático) e 10 horas (tempo definido para este ensaios), observa-se as seguintes variações na Tabela 12.

Tabela 12 – Variação de parâmetros, 100 rpm

|                    | 12 horas | 10 horas | Variação |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $C_0$ (mg/l)       | 0,99     | 0,99     | 0        |
| $C_s$ (mg/l)       | 7,89     | 7,84     | 0,64%    |
| $K_2$ ( $h^{-1}$ ) | 0,13     | 0,13     | 0        |
| % $C_s$            | 87       | 77       |          |

### Ensaio 3

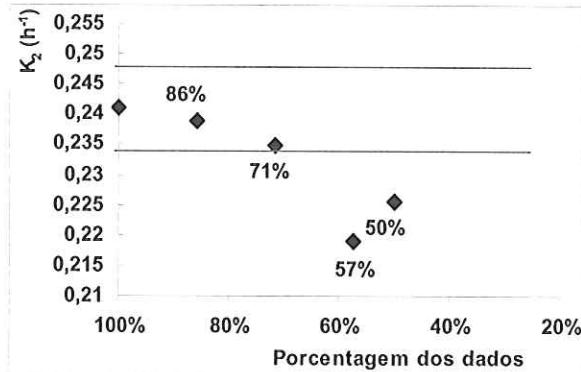


Figura 58 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 150 rpm

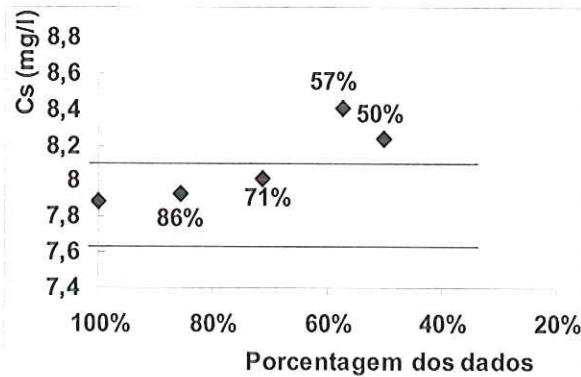


Figura 59 –  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 150 rpm

Utilizando-se 71% do tempo total, obtém-se o resultado esperado.  
Tempo de ensaio - 5 horas. A

Tabela 13 mostra as variações.

Tabela 13 – Variação de parâmetros, 150 rpm

|                           | 7 horas | 5 horas | Variação |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| $C_0$ (mg/l)              | 0,62    | 0,62    | 0        |
| $C_s$ (mg/l)              | 7,78    | 7,79    | -0,13%   |
| $K_2$ ( $\text{h}^{-1}$ ) | 0,25    | 0,25    | 0        |
| % $C_s$                   | 86      | 75      |          |

### Ensaio 4

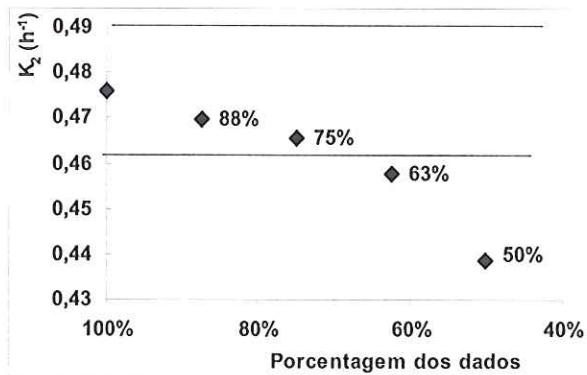


Figura 60 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 200 rpm

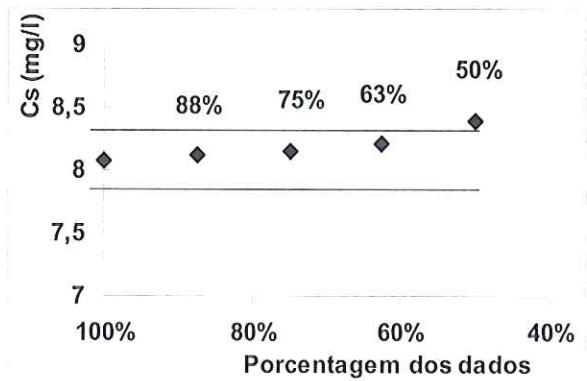


Figura 61 –  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 200 rpm

75% do tempo total do ensaio: 6 horas

Tabela 14 – Variação de parâmetros, 200 rpm

|                | 7 horas | 6 horas | Variação |
|----------------|---------|---------|----------|
| $C_0 (mg/l)$   | 0,65    | 0,66    | -1,5%    |
| $C_s (mg/l)$   | 8,02    | 8,04    | -0,25%   |
| $K_2 (h^{-1})$ | 0,50    | 0,50    | 0        |
| % $C_s$        | 99      | 92      |          |

### Ensaio 5

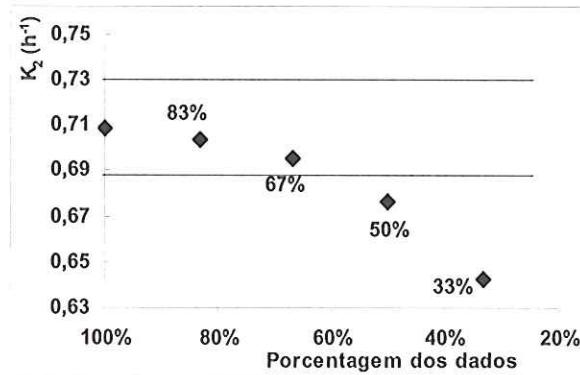


Figura 62 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 250 rpm

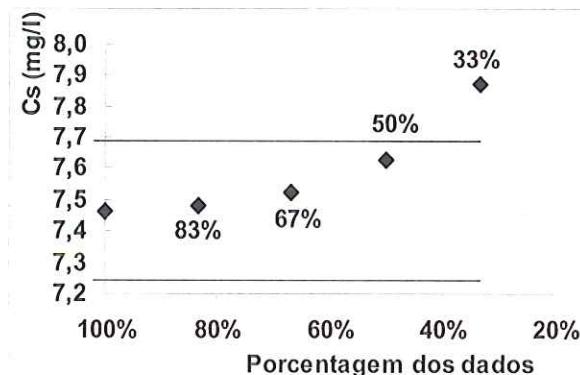


Figura 63 –  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 250 rpm

67% do tempo total : 4 horas

Tabela 15 – Variação de parâmetros, 250 rpm

|                | 6 horas | 4 horas | Variação |
|----------------|---------|---------|----------|
| $C_0 (mg/l)$   | 0,51    | 0,52    | -1,9%    |
| $C_s (mg/l)$   | 7,44    | 7,47    | -0,4%    |
| $K_2 (h^{-1})$ | 0,73    | 0,72    | 0        |
| % $C_s$        | 99      | 94      |          |

### Ensaio 6

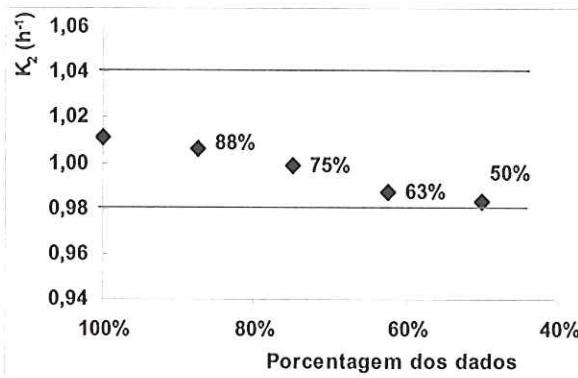


Figura 64 –  $K_2$  em função da % de dados utilizados, 300 rpm

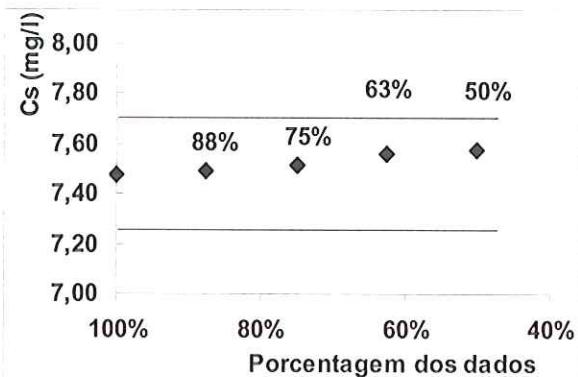


Figura 65–  $C_s$  em função da % de dados utilizados, 300 rpm

63% do tempo total: 2,5 horas

Tabela 16 – Variação de parâmetros, 300 rpm

|                           | 4 horas | 2,5 horas | Variação |
|---------------------------|---------|-----------|----------|
| $C_0$ (mg/l)              | 0,78    | 0,80      | -2,5%    |
| $C_s$ (mg/l)              | 7,47    | 7,53      | -0,79%   |
| $K_2$ ( $\text{h}^{-1}$ ) | 1,03    | 1,00      | 3%       |
| % $C_s$                   | 98      | 93        |          |

Não foram observadas variações significativas nos ensaios com tempo reduzido. A fim de padronizar o tempo de ensaio e evitar ensaios muito curtos, em todo o trabalho serão utilizados os valores da Tabela 17 para a realização dos ensaios.

Tabela 17 – Tempo de duração dos ensaios

| Ensaio | Velocidade de rotação (rpm) | Tempo de ensaio (h) |
|--------|-----------------------------|---------------------|
| 1      | 50                          | 13                  |
| 2      | 100                         | 10                  |
| 3      | 150                         | 6                   |
| 4      | 200                         | 6                   |
| 5      | 250                         | 4                   |
| 6      | 300                         | 4                   |

### 3.3.4 Condições dos ensaios

A Tabela 18 resume as condições dos ensaios

Tabela 18 – Ensaios

| Ensaio | Velocidade de rotação (rpm) | Taxa de evaporação (g/min) | Temperatura da água (°C) |
|--------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1      | 50                          | 0,80                       | 26,2                     |
| 2      | 50                          | 0,68                       | 24,9                     |
| 3      | 50                          | 6,00                       | 20,5                     |
| 4      | 50                          | 2,88                       | 23,6                     |
| 5      | 100                         | 0,78                       | 25,4                     |
| 6      | 100                         | 0,65                       | 24,9                     |
| 7      | 100                         | 0,28                       | 24,2                     |
| 8      | 100                         | 7,03                       | 23,3                     |
| 9      | 100                         | 4,35                       | 22,5                     |
| 10     | 100                         | 3,19                       | 23,3                     |
| 11     | 150                         | 0,78                       | 25,9                     |
| 12     | 150                         | 0,65                       | 26,0                     |
| 13     | 150                         | 0,85                       | 25,0                     |
| 14     | 150                         | 6,00                       | 22,7                     |
| 15     | 150                         | 2,04                       | 21,5                     |
| 16     | 200                         | 0,80                       | 25,0                     |
| 17     | 200                         | 0,66                       | 24,9                     |
| 18     | 200                         | 0,31                       | 24,1                     |
| 19     | 200                         | 2,55                       | 24,3                     |
| 20     | 200                         | 4,87                       | 23,2                     |
| 21     | 250                         | 0,83                       | 25,7                     |
| 22     | 250                         | 0,67                       | 25,4                     |
| 23     | 250                         | 0,89                       | 23,5                     |
| 24     | 250                         | 6,84                       | 20,5                     |
| 25     | 250                         | 2,74                       | 27,5                     |
| 26     | 300                         | 0,90                       | 24,0                     |
| 27     | 300                         | 0,85                       | 26,8                     |
| 28     | 300                         | 0,32                       | 24,5                     |
| 29     | 300                         | 1,18                       | 25,2                     |
| 30     | 300                         | 2,39                       | 21,9                     |

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 4.1 Coeficiente de Reoxigenação

Nesta seção são apresentados os resultados da estimativa dos parâmetros,  $K_2$ ,  $C_S$  e  $C_0$  referentes ao modelo apresentado na equação 4.

$$C = C_S - (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

Cada ensaio é identificado pela velocidade de rotação, taxa média de evaporação e temperatura média na qual o ensaio foi realizado. Os resultados são mostrados em três diferentes gráficos: curva de reoxigenação, resíduos (O.D. medido - O.D.modelo) em função do tempo e a distribuição dos resíduos comparada com a distribuição normal.

A curva de reoxigenação mostra os dados experimentais (pontos discretos) e o modelo (linha contínua) traçado utilizando-se os parâmetros estimados  $K_2$ ,  $C_S$ , e  $C_0$ . A curva do modelo é extrapolada além dos pontos experimentais para facilitar a diferenciação entre os dados experimentais e o modelo ajustado. O valor dos parâmetros estimados está associado ao erro padrão da estimativa.

O gráfico dos resíduos em função do tempo apresenta os valores absolutos (em mg/l) dos resíduos. Neste gráfico é possível observar se existe alguma tendência nos valores dos resíduos ou se estes estão distribuídos aleatoriamente.

O gráfico da distribuição dos resíduos mostra quanto os valores dos resíduos se aproximam de uma distribuição normal.

Este conjunto de gráficos permite uma análise sobre a estimativa dos parâmetros e a validação desta estimativa.

**ENSAIO 1**

**50 rpm;  $T_{evap} = 0,80 \text{ g/min}$ ; 26,2°C**

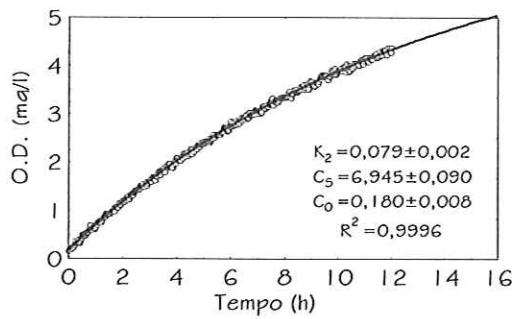


Figura 66 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_S \text{ e } C_O (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 2**

**50 rpm;  $T_{evap} = 0,68 \text{ g/min}$ ; 24,9°C**

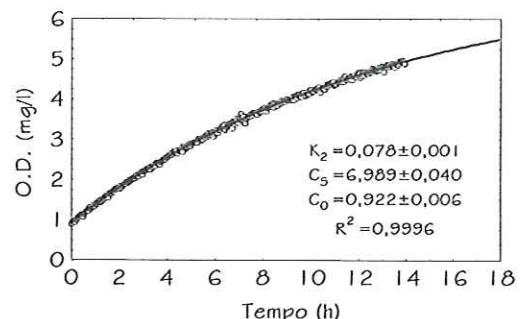


Figura 69 - Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_S \text{ e } C_O (\text{mg/l})$$

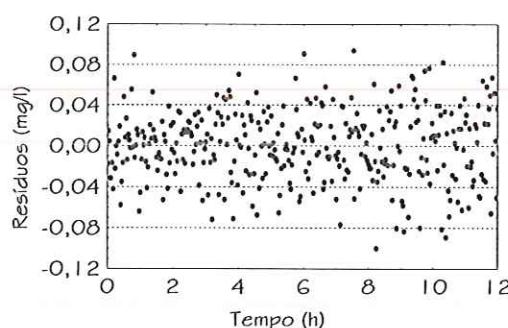


Figura 67 – Resíduos em função do tempo

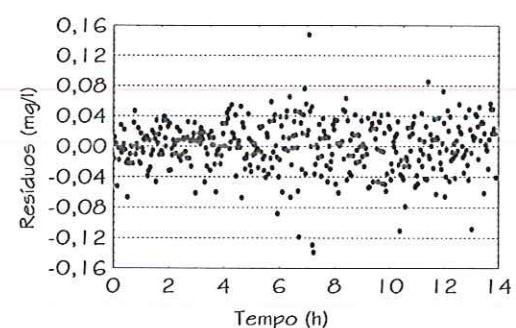


Figura 70 – Resíduos em função do tempo

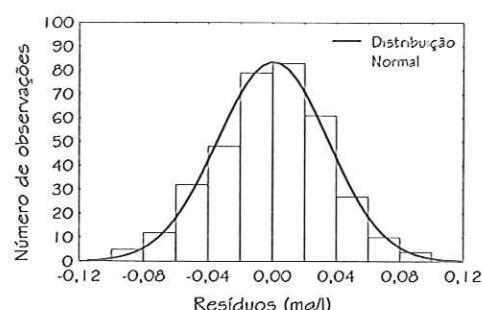


Figura 68 – Distribuição dos resíduos

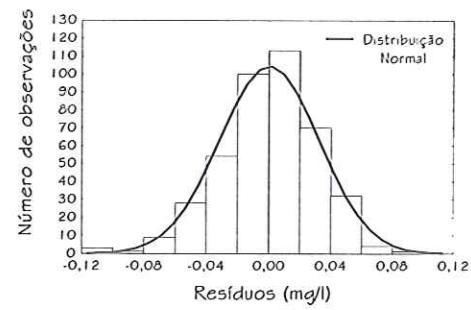


Figura 71 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 3**

**50 rpm;  $T_{evap} = 6,00 \text{ g/min}$ ; 20,5°C**

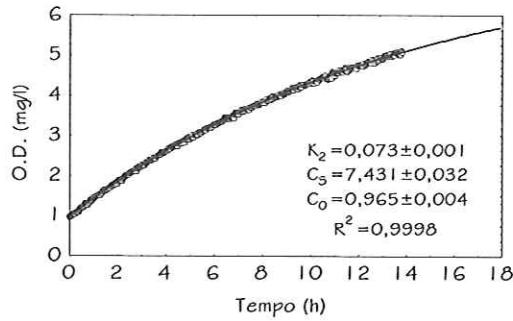


Figura 72 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 4**

**50 rpm;  $T_{evap} = 2,88 \text{ g/min}$ ; 23,6°C**

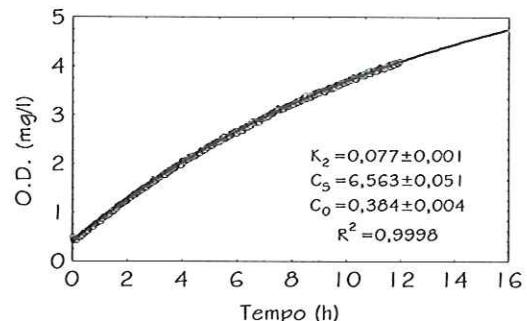


Figura 75 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

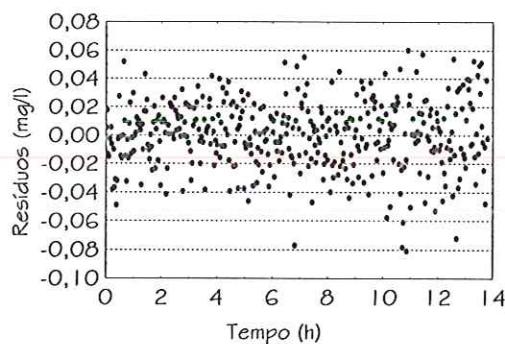


Figura 73 – Resíduos em função do tempo

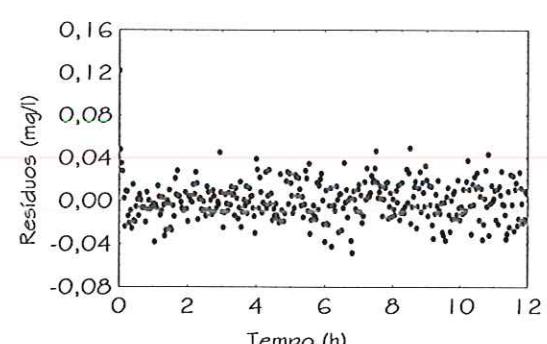


Figura 76 – Resíduos em função do tempo

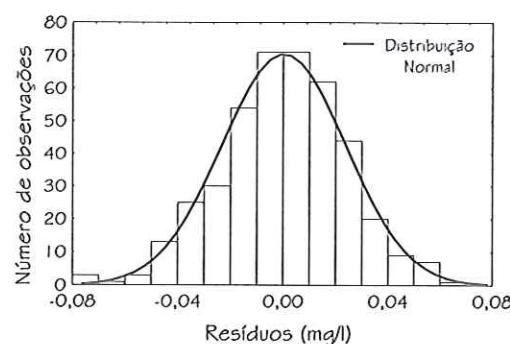


Figura 74 – Distribuição dos resíduos

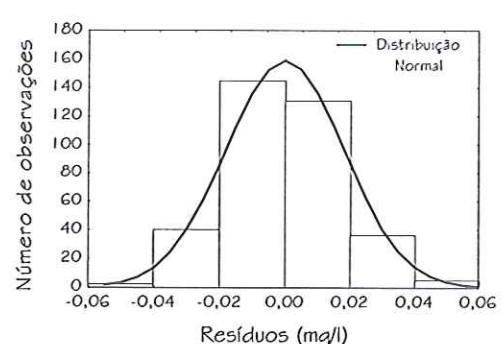


Figura 77 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 5**

**100 rpm;  $T_{evap} = 0,78$  g/min; 25,4°C**

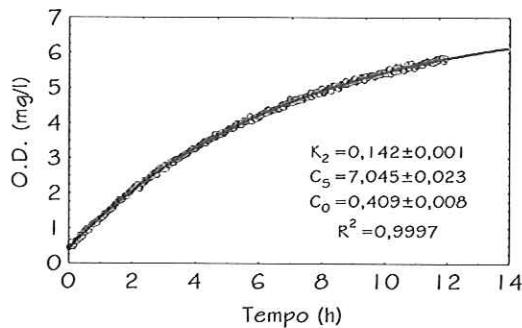


Figura 78 – Curva de reoxigenação

$$K_2 \text{ (h}^{-1}\text{)}, C_s \text{ e } C_o \text{ (mg/l)}$$

**ENSAIO 6**

**100 rpm;  $T_{evap} = 0,65$  g/min; 24,9°C**

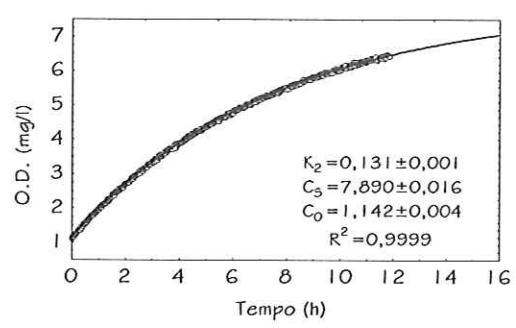


Figura 81 – Curva de reoxigenação

$$K_2 \text{ (h}^{-1}\text{)}, C_s \text{ e } C_o \text{ (mg/l)}$$

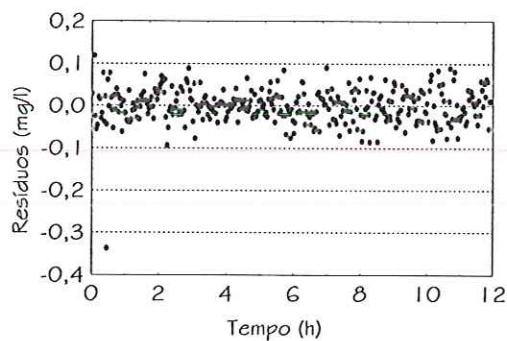


Figura 79 – Resíduos em função do tempo

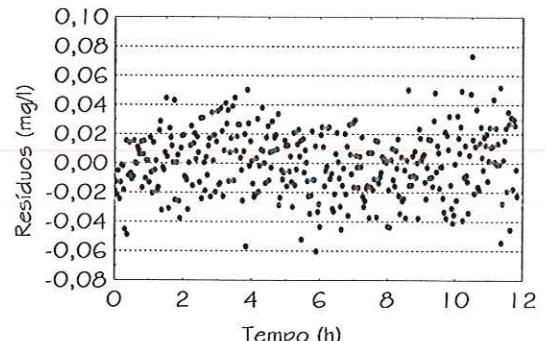


Figura 82 – Resíduos em função do tempo

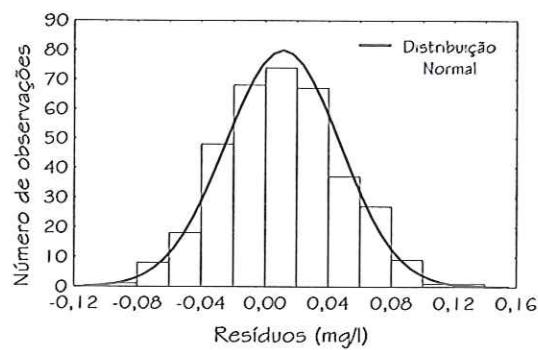


Figura 80 – Distribuição dos resíduos

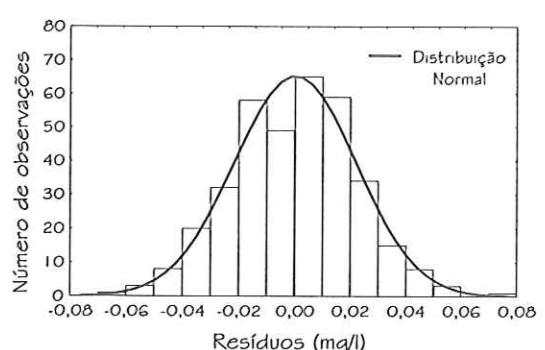


Figura 83 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 7**

**100 rpm;  $T_{evap} = 0,28 \text{ g/min}$ ;  $24,2^\circ\text{C}$**

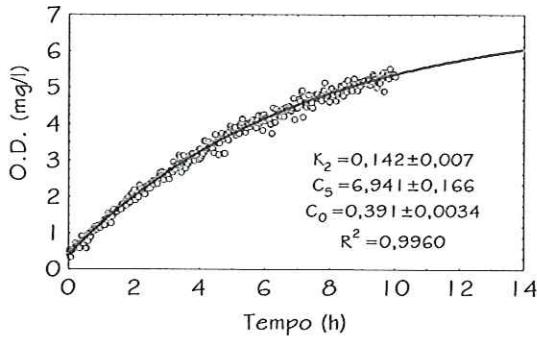


Figura 84 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 8**

**100 rpm;  $T_{evap} = 7,03 \text{ g/min}$ ;  $23,3^\circ\text{C}$**

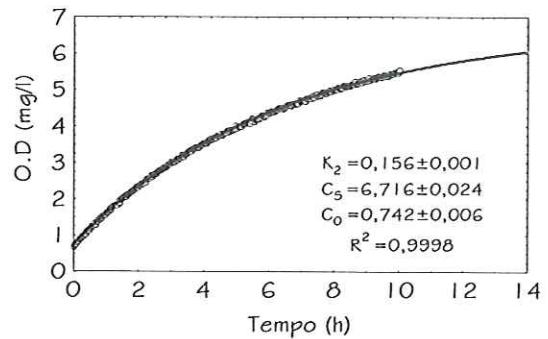


Figura 87 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

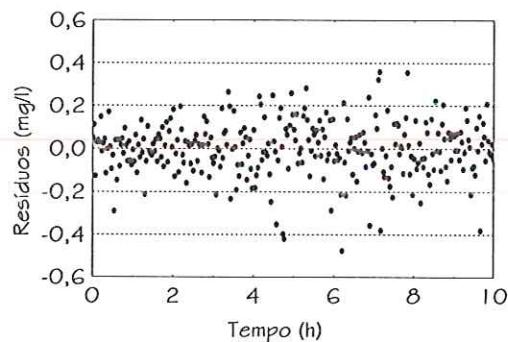


Figura 85 – Resíduos em função do tempo

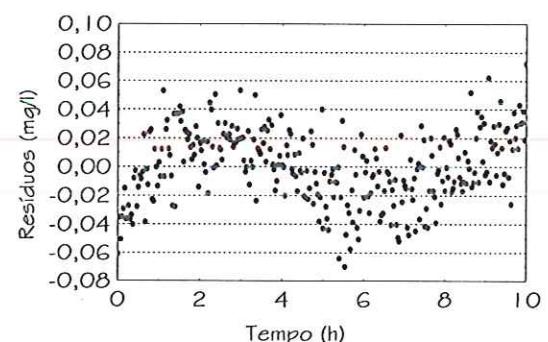


Figura 88 – Resíduos em função do tempo

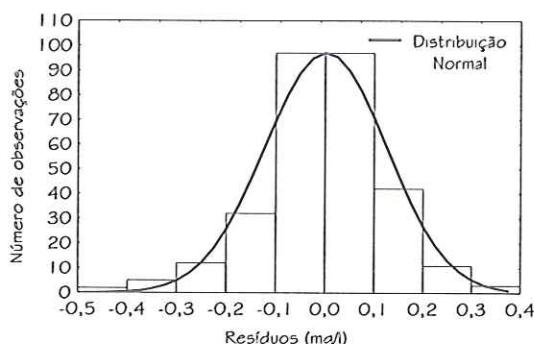


Figura 86 – Distribuição dos resíduos

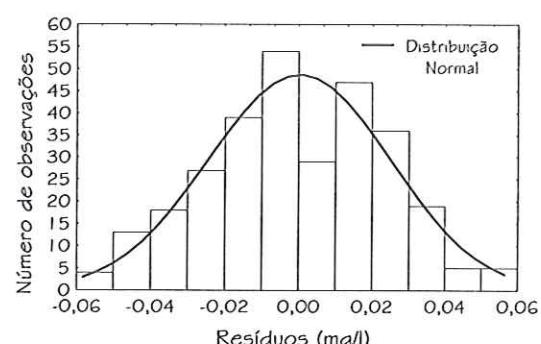


Figura 89 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 9**

**100 rpm;  $T_{evap} = 4,35 \text{ g/min}$ ;  $22,5^\circ\text{C}$**

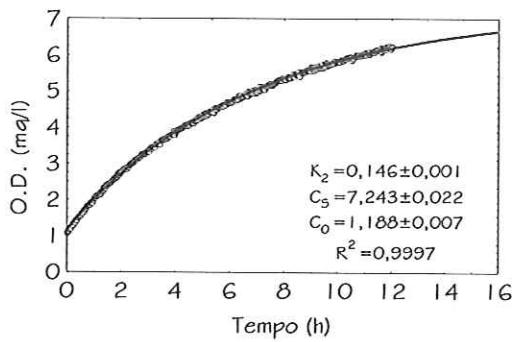


Figura 90 – Curva de reoxigenação

$K_2 (\text{h}^{-1})$ ,  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

**ENSAIO 10**

**100 rpm;  $T_{evap} = 3,19 \text{ g/min}$ ;  $23,3^\circ\text{C}$**

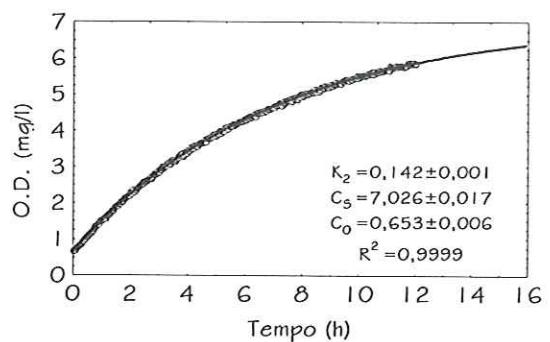


Figura 93 – Curva de reoxigenação

$K_2 (\text{h}^{-1})$ ,  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

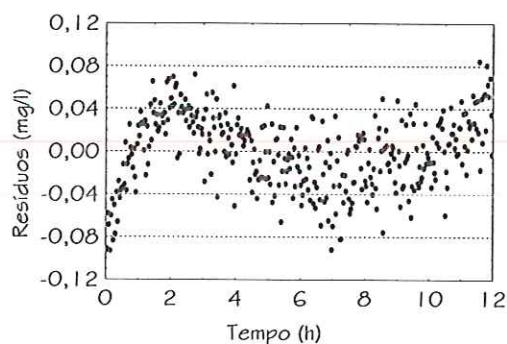


Figura 91 – Resíduos em função do tempo

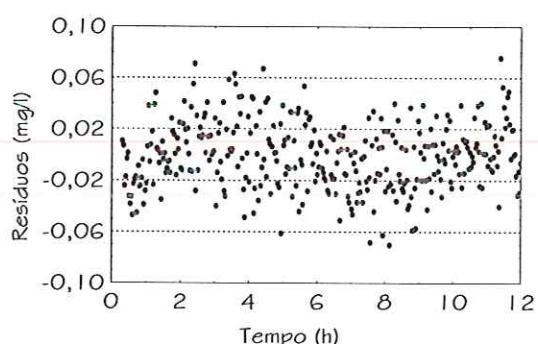


Figura 94 – Resíduos em função do tempo

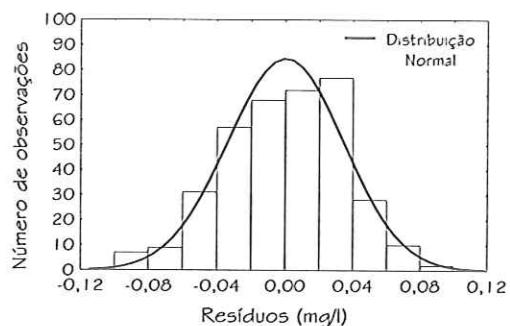


Figura 92 – Distribuição dos resíduos

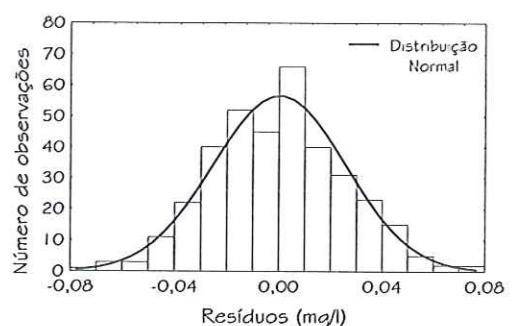


Figura 95 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 11**

**150 rpm;  $T_{evap} = 0,78$  g/min; 25,9°C**

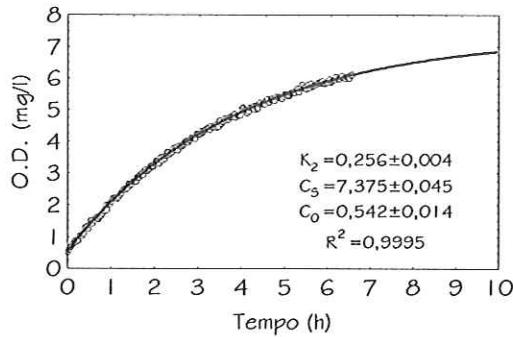


Figura 96 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 12**

**150 rpm;  $T_{evap} = 0,65$  g/min; 26,0°C**

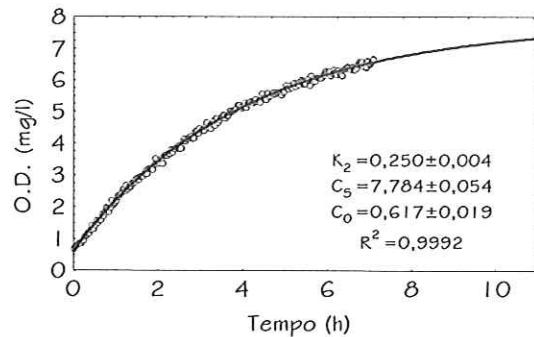


Figura 99 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

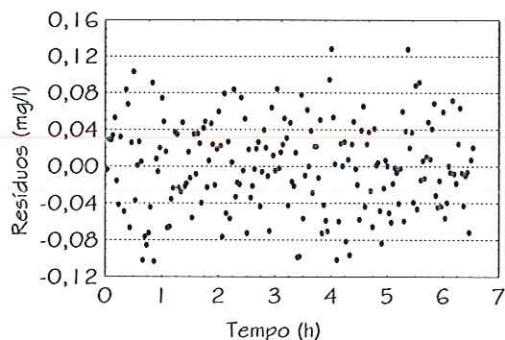


Figura 97 – Resíduos em função do tempo

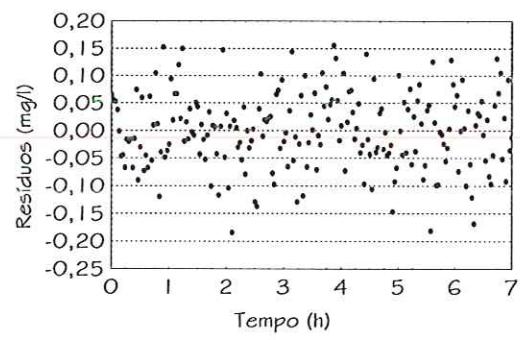


Figura 100 – Resíduos em função do tempo

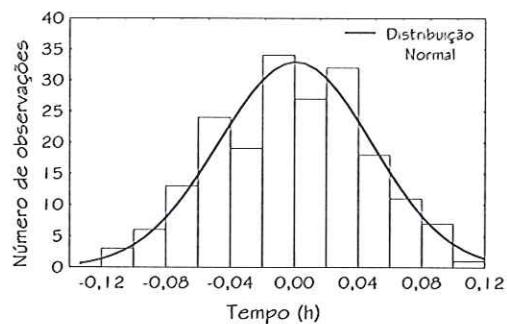


Figura 98 – Distribuição dos resíduos

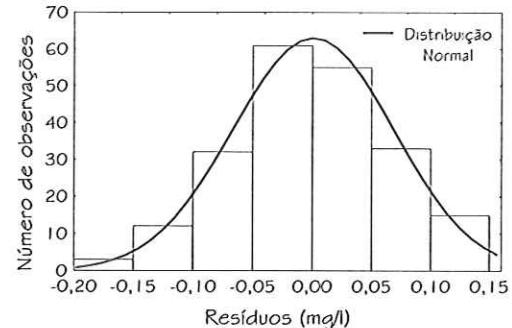


Figura 101 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 13**

**150 rpm;  $T_{evap} = 0,85$  g/min; 25,0°C**

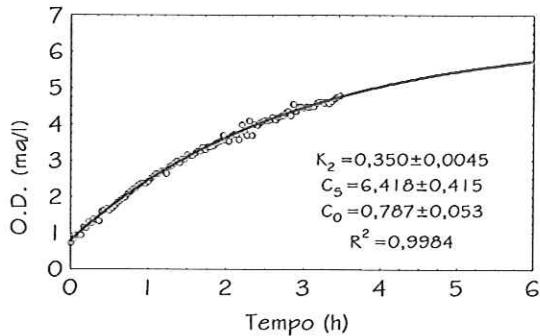


Figura 102 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

**ENSAIO 14**

**150 rpm;  $T_{evap} = 6,00$  g/min; 22,7°C**

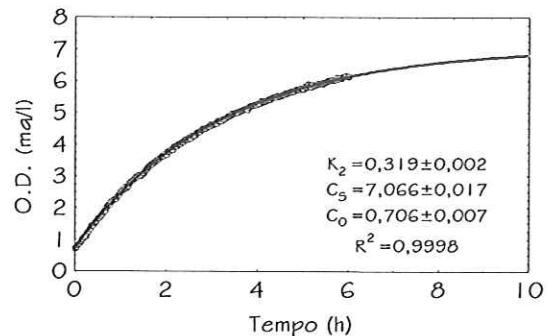


Figura 105 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

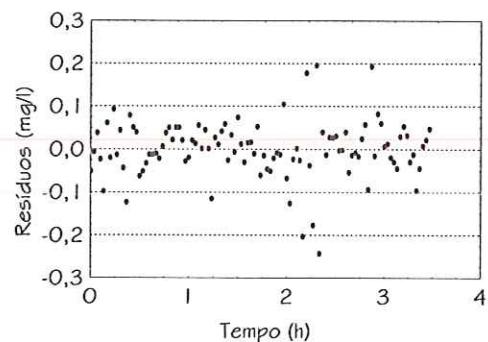


Figura 103 – Resíduos em função do tempo

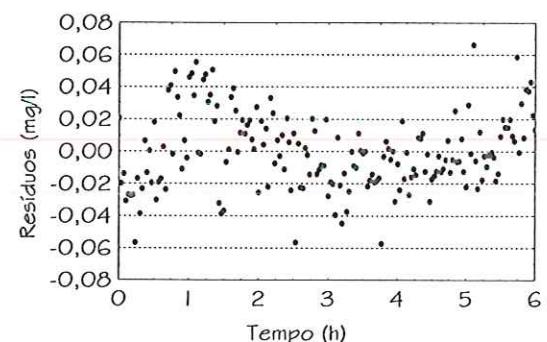


Figura 106 – Resíduos em função do tempo

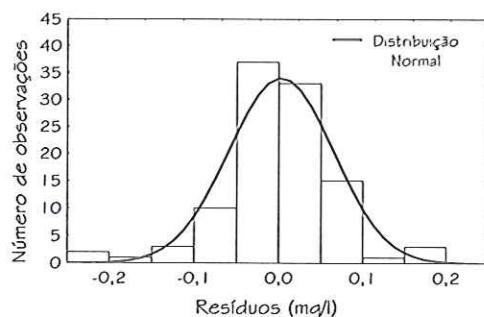


Figura 104 – Distribuição dos resíduos

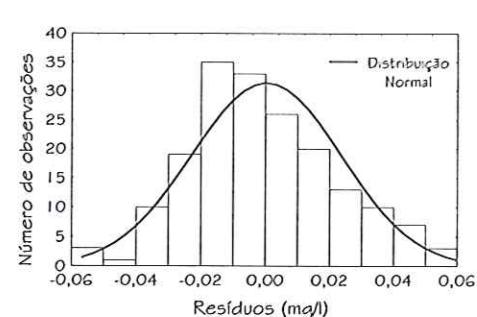


Figura 107 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 15**

**150 rpm;  $T_{evap} = 2,04 \text{ g/min}$ ;  $21,5^\circ\text{C}$**

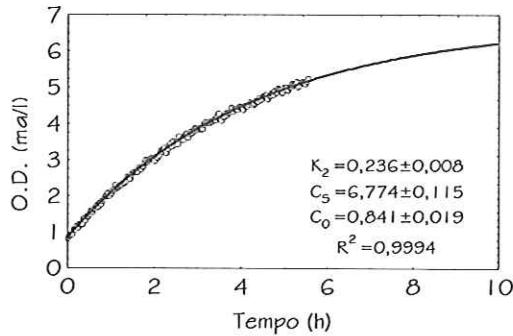


Figura 108 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 16**

**200 rpm;  $T_{evap} = 0,80 \text{ g/min}$ ;  $25,0^\circ\text{C}$**

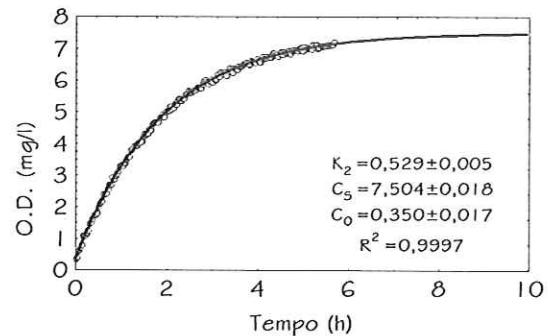


Figura 111 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

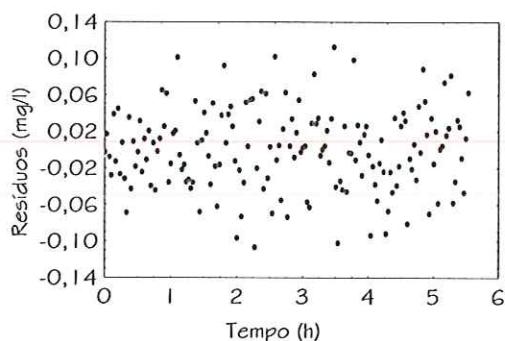


Figura 109 – Resíduos em função do tempo

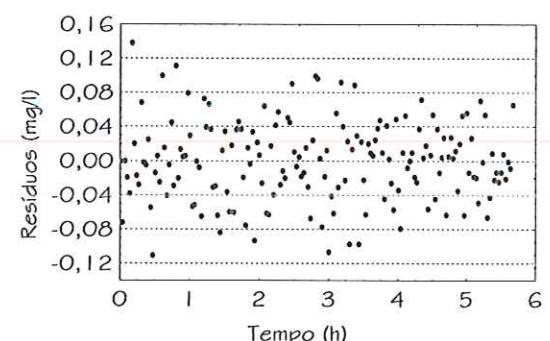


Figura 112 – Resíduos em função do tempo

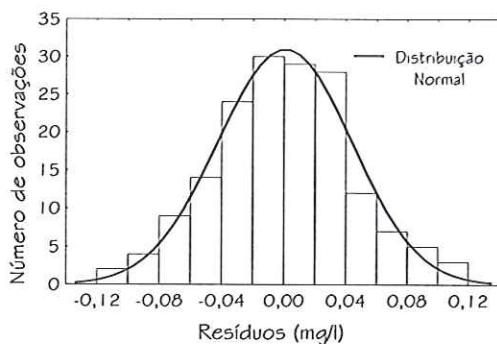


Figura 110 – Distribuição dos resíduos

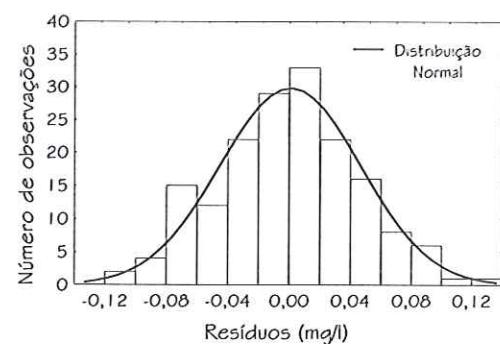


Figura 113 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 17**

**200 rpm;  $T_{evap} = 0,66$  g/min; 24,9°C**

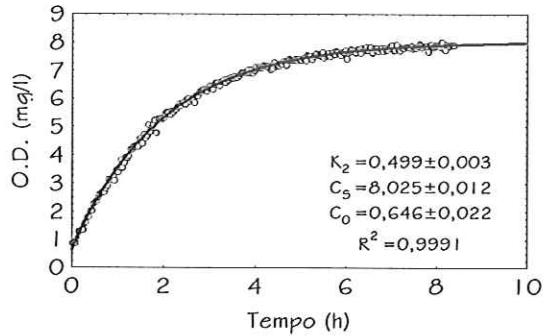


Figura 114 – Curva de reoxigenação

$K_2 (h^{-1})$ ,  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

**ENSAIO 18**

**200 rpm;  $T_{evap} = 0,31$  g/min; 24,1°C**

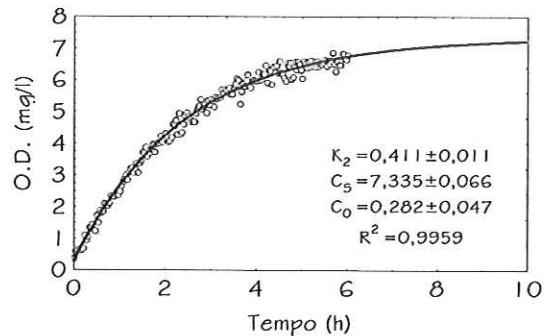


Figura 117 – Curva de reoxigenação

$K_2 (h^{-1})$ ,  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

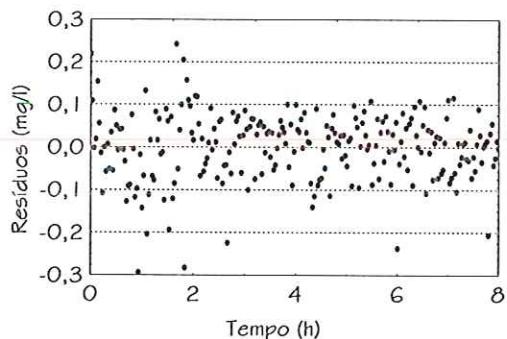


Figura 115 – Resíduos em função do tempo

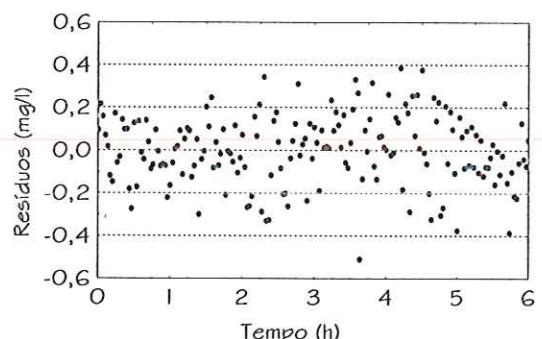


Figura 118 – Resíduos em função do tempo

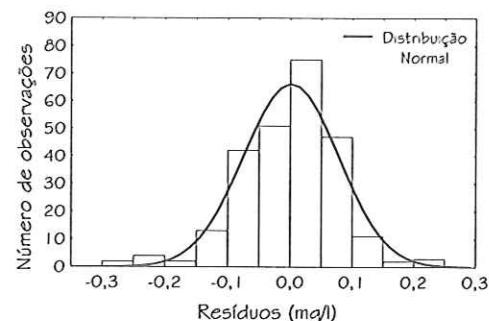


Figura 116 – Distribuição dos resíduos

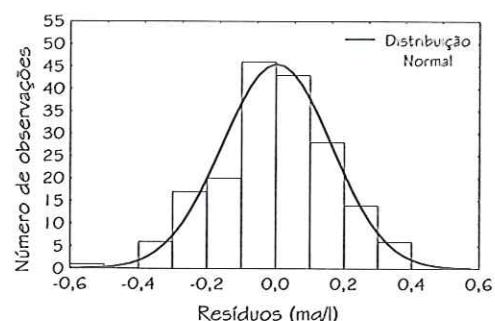


Figura 119 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 19**

**200 rpm;  $T_{evap} = 2,55$  g/min; 24,3°C**

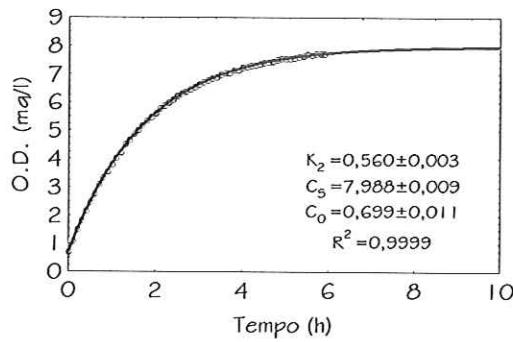


Figura 120 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

**ENSAIO 20**

**200 rpm;  $T_{evap} = 4,86$  g/min; 23,2°C**

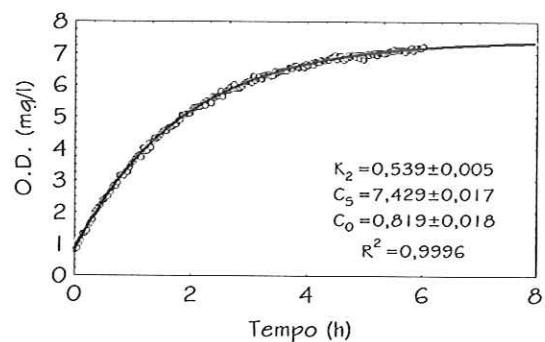


Figura 123 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

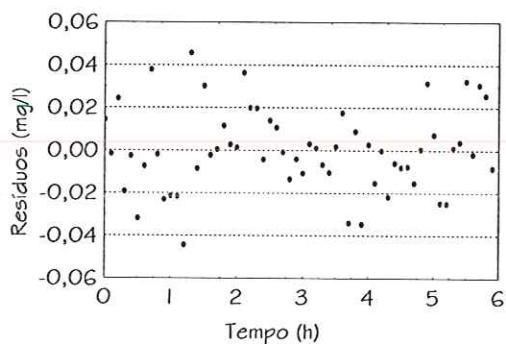


Figura 121 – Resíduos em função do tempo

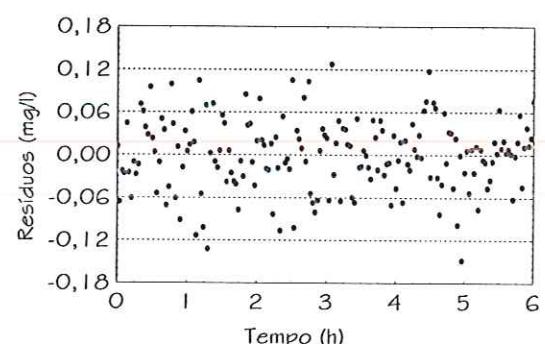


Figura 124 – Resíduos em função do tempo

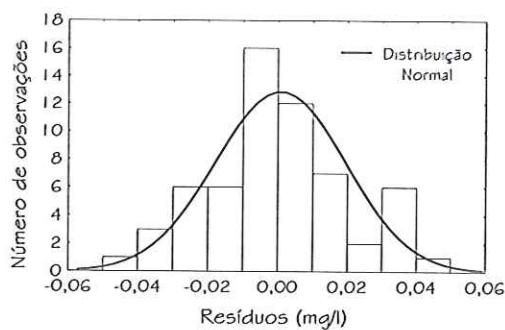


Figura 122 – Distribuição dos resíduos

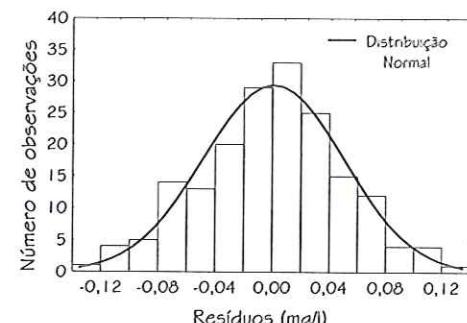


Figura 125 – Distribuição dos resíduos

ENSAIO 21

250 rpm;  $T_{evap} = 0,83$  g/min; 25,7°C

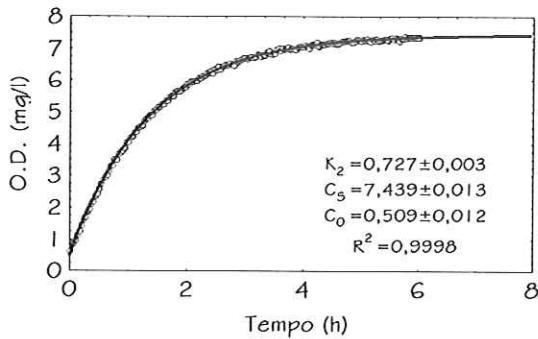


Figura 126 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

ENSAIO 22

250 rpm;  $T_{evap} = 0,67$  g/min; 25,4°C

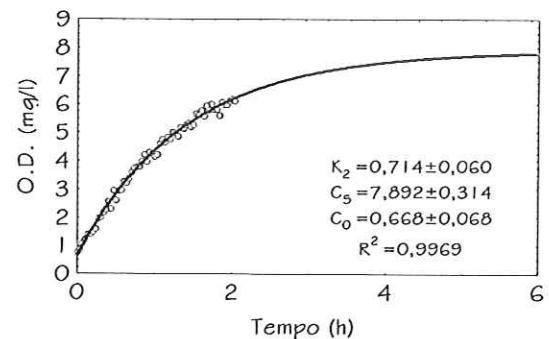


Figura 129 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

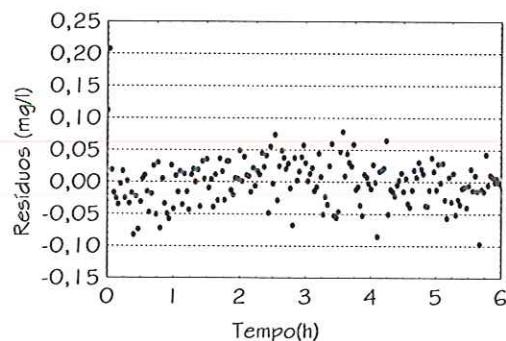


Figura 127 – Resíduos em função do tempo

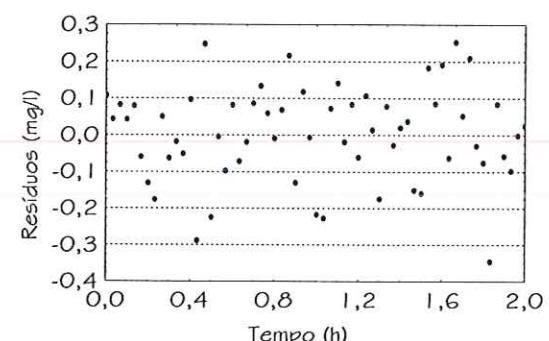


Figura 130 – Resíduos em função do tempo

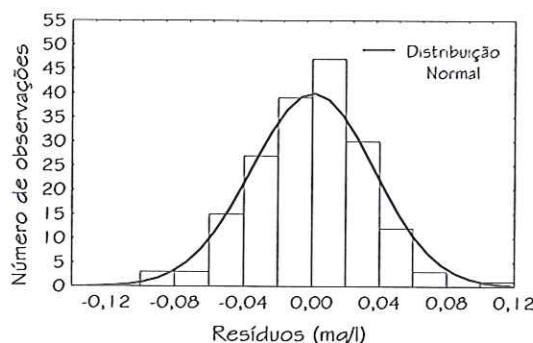


Figura 128 – Distribuição dos resíduos

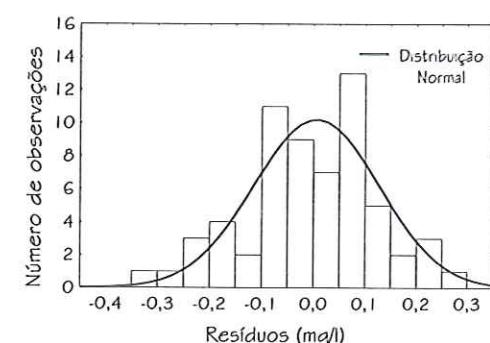


Figura 131 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 23****ENSAIO 24**

**250 rpm;  $T_{evap} = 0,89$  g/min; 23,5°C**

**250 rpm;  $T_{evap} = 6,84$  g/min; 20,5°C**

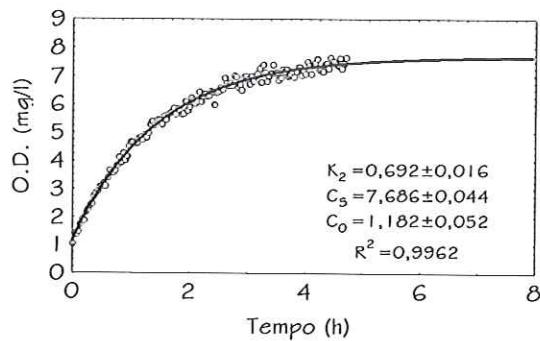


Figura 132 – Curva de reoxigenação

$$K_2 \text{ (h}^{-1}\text{), } C_s \text{ e } C_0 \text{ (mg/l)}$$

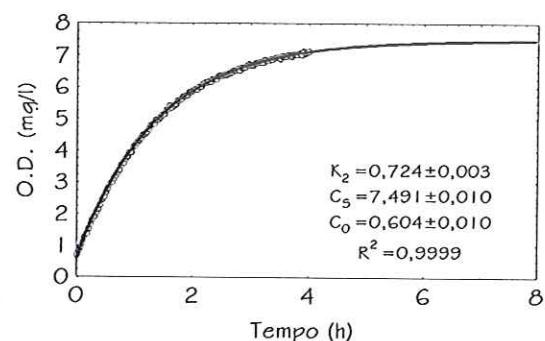


Figura 135 – Curva de reoxigenação

$$K_2 \text{ (h}^{-1}\text{), } C_s \text{ e } C_0 \text{ (mg/l)}$$

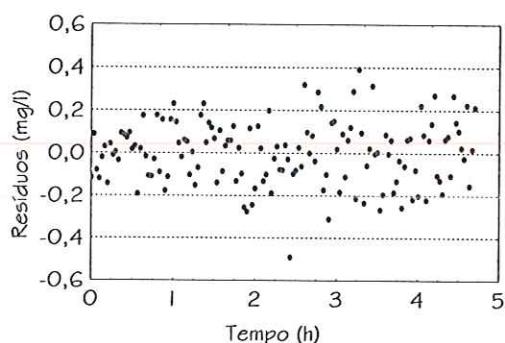


Figura 133 – Resíduos em função do tempo

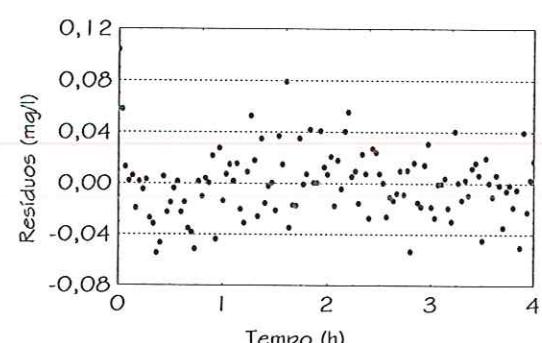


Figura 136 – Resíduos em função do tempo

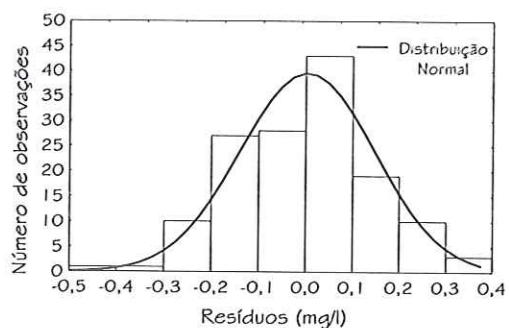


Figura 134 – Distribuição dos resíduos

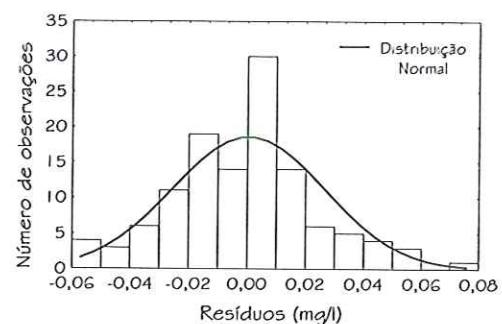


Figura 137 – Distribuição dos resíduos

**ENSAIO 25**

**250 rpm;  $T_{evap} = 2,74$  g/min; 27,5°C**

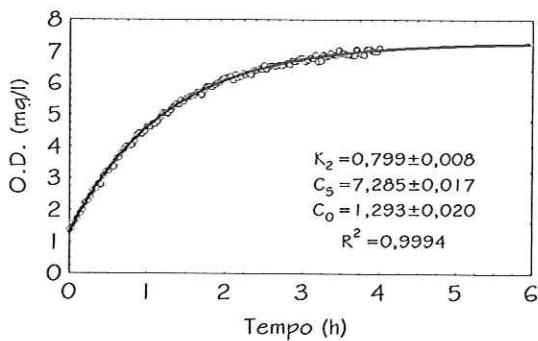


Figura 138 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

**ENSAIO 26**

**300 rpm;  $T_{evap} = 0,90$  g/min; 24,0°C**

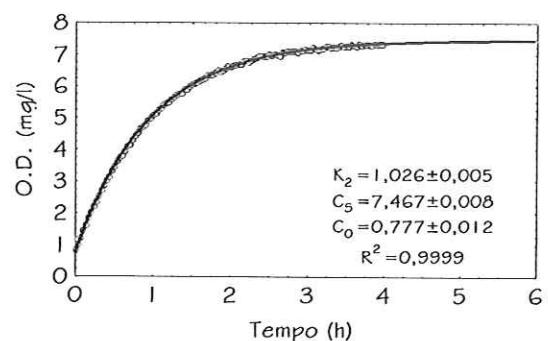


Figura 141 – Curva de reoxigenação

$$K_2 (\text{h}^{-1}), C_s \text{ e } C_o (\text{mg/l})$$

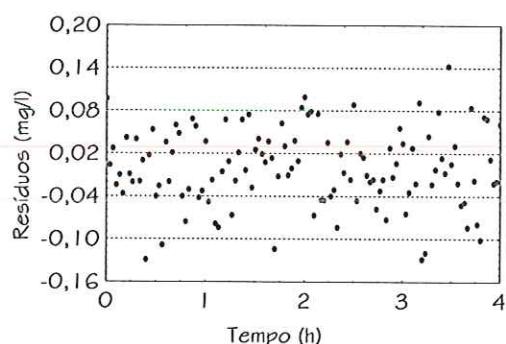


Figura 139 – Resíduos em função do tempo

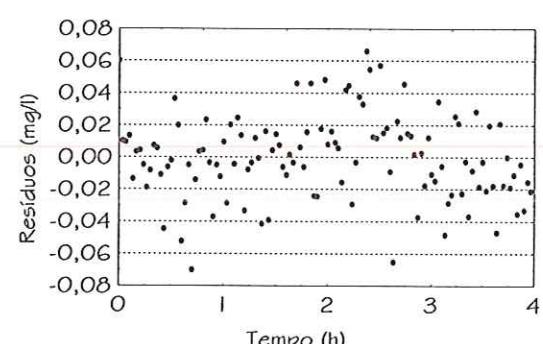


Figura 142 – Resíduos em função do tempo

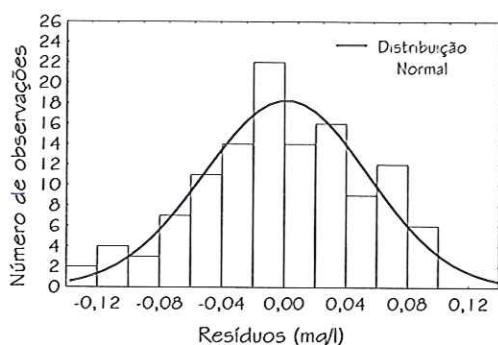


Figura 140 – Distribuição dos resíduos

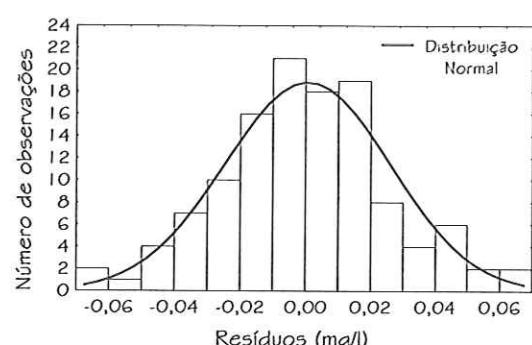


Figura 143 – Distribuição dos resíduos

## ENSAIO 27

300 rpm;  $T_{evap} = 0,85$  g/min; 26,8°C

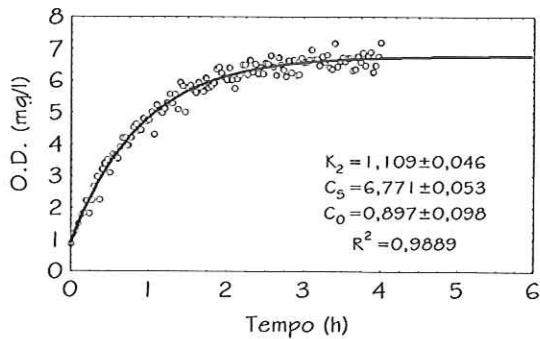


Figura 144 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_S$  e  $C_0$  (mg/l)

## ENSAIO 28

300 rpm;  $T_{evap} = 0,32$  g/min; 24,5°C

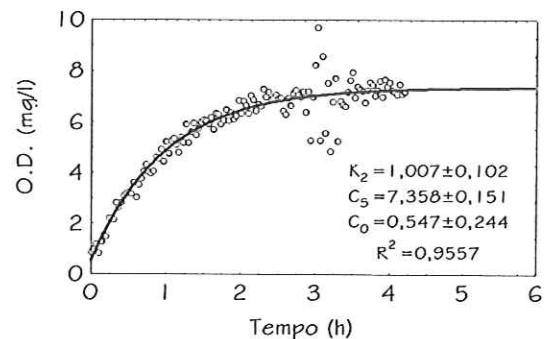


Figura 147 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_S$  e  $C_0$  (mg/l)

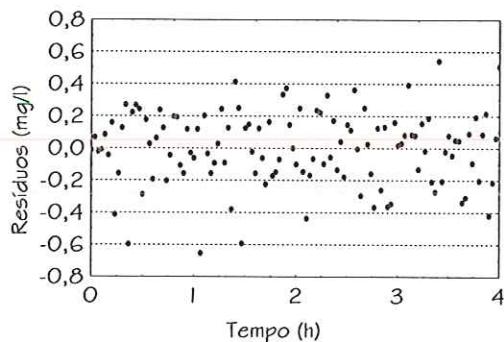


Figura 145 – Resíduos em função do tempo

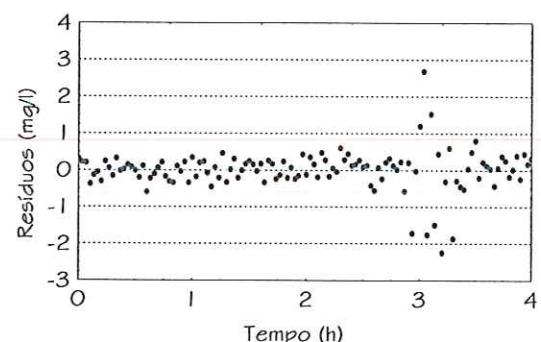


Figura 148 – Resíduos em função do tempo

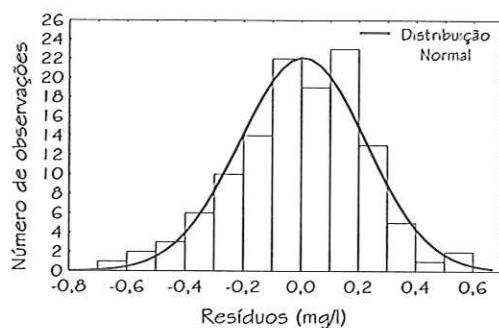


Figura 146 – Distribuição dos resíduos

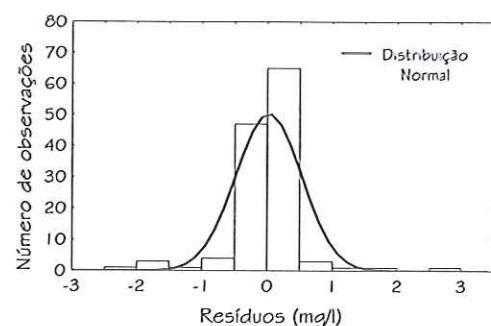


Figura 149 – Distribuição dos resíduos

## ENSAIO 29

300 rpm;  $T_{evap} = 1,18$  g/min; 25,2°C

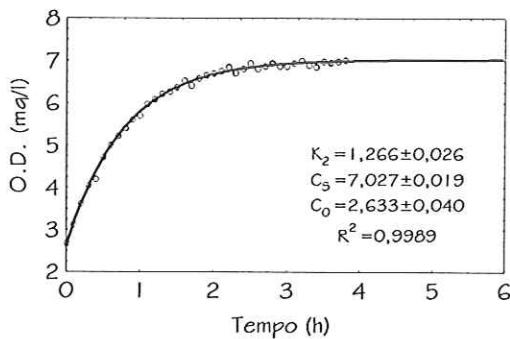


Figura 150 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

## ENSAIO 30

300 rpm;  $T_{evap} = 2,39$  g/min; 21,9°C

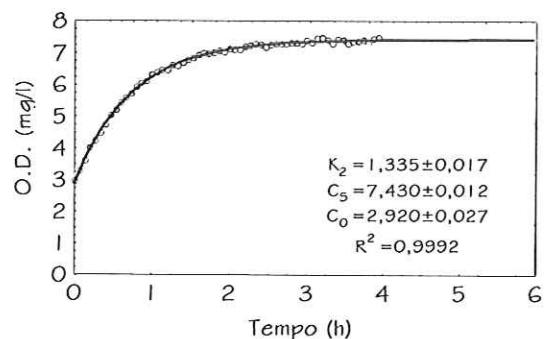


Figura 153 – Curva de reoxigenação

$K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ),  $C_s$  e  $C_o$  (mg/l)

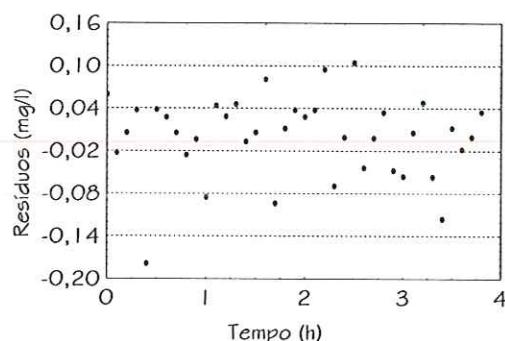


Figura 151 – Resíduos em função do tempo

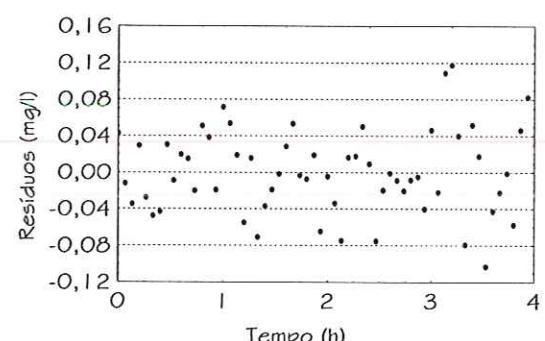


Figura 154 – Resíduos em função do tempo

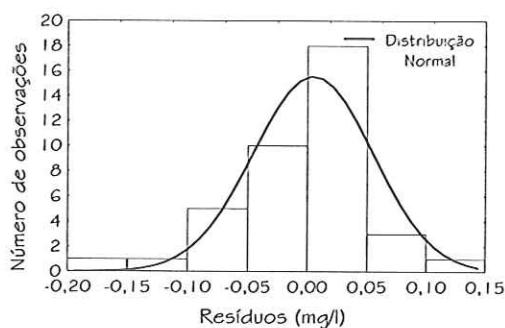


Figura 152 – Distribuição dos resíduos

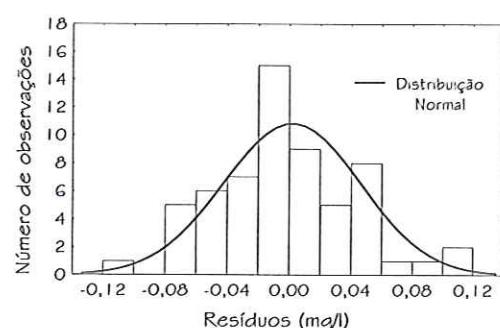


Figura 155 – Distribuição dos resíduos

A correta estimativa dos parâmetros, principalmente de  $K_2$ , deve considerar diversos fatores, conforme descrito sucintamente na revisão bibliográfica, Brown e Baillod (1982). A grande discussão sobre a estimativa dos parâmetros refere-se ao critério utilizado para definir os valores dos parâmetros, ou seja, qual o melhor ajuste? Neste trabalho procurou-se utilizar parâmetros estatísticos para a apoiar o critério da estimativa. O erro padrão de cada um dos três parâmetros estimados,  $C_S$ ,  $C_0$  e  $K_2$ , é apresentado em valores absolutos abaixo das curvas de reoxigenação de cada ensaio. A Tabela 19 mostra o erro padrão da estimativa de cada parâmetro (em valores relativos) e o coeficiente de determinação  $R^2$  do ajuste do modelo.

Tabela 19 – Erro padrão e coeficiente de determinação

| Ensaio  | $C_S$ (%) | $C_0$ (%) | $K_2$ (%) | $R^2$  |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 50 rpm  | 1,3       | 4,5       | 2,0       | 0,9996 |
|         | 0,7       | 0,7       | 1,3       | 0,9996 |
|         | 0,4       | 0,4       | 1,4       | 0,9998 |
|         | 0,8       | 1,1       | 1,3       | 0,9998 |
| 100 rpm | 0,3       | 1,7       | 0,7       | 0,9997 |
|         | 0,2       | 0,4       | 0,8       | 0,9999 |
|         | 2,4       | 8,6       | 4,8       | 0,9960 |
|         | 0,4       | 0,8       | 0,6       | 0,9998 |
|         | 0,3       | 0,6       | 0,7       | 0,9997 |
|         | 2,5       | 0,8       | 0,7       | 0,9998 |
| 150 rpm | 0,6       | 2,6       | 1,4       | 0,9995 |
|         | 0,7       | 3,1       | 1,6       | 0,9992 |
|         | 6,5       | 6,8       | 12,9      | 0,9984 |
|         | 0,2       | 1,0       | 0,6       | 0,9998 |
|         | 3,7       | 14,4      | 4,9       | 0,9994 |
| 200 rpm | 0,2       | 4,8       | 0,9       | 0,9997 |
|         | 0,1       | 3,6       | 0,6       | 0,9992 |
|         | 0,9       | 16,9      | 2,6       | 0,9959 |
|         | 0,1       | 1,5       | 0,5       | 0,9999 |
|         | 0,2       | 2,2       | 0,9       | 0,9996 |
| 250 rpm | 0,1       | 2,5       | 0,4       | 0,9998 |
|         | 4,0       | 10,2      | 8,4       | 0,9968 |
|         | 0,6       | 4,4       | 2,4       | 0,9962 |
|         | 0,1       | 1,6       | 0,4       | 0,9999 |
|         | 0,2       | 1,6       | 1,0       | 0,9994 |
| 300 rpm | 0,1       | 1,5       | 0,5       | 0,9999 |
|         | 0,8       | 10,9      | 4,2       | 0,989  |
|         | 2,0       | 44,6      | 10,1      | 0,9957 |
|         | 0,3       | 1,5       | 2,0       | 0,9988 |
|         | 0,2       | 3,0       | 1,3       | 0,9992 |

Pode-se observar que os valores relativos do erro padrão de cada parâmetro apresentam, com exceção de alguns casos, valores abaixo de 3%

#### 4.2 Correção de $K_2$ para a temperatura padrão de 25°C

Para efetuar comparações com os valores dos coeficientes de reoxigenação é necessário a correção de  $K_2$  para uma temperatura padrão, no caso, 25°C. A correção é feita de acordo com a equação 17 apresentada na seção 2.1.3. A Tabela 20 mostra os valores corrigidos de  $K_2$  para todos os ensaios realizados.

Tabela 20 –  $K_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ) corrigido para 25°C

| Velocidade de rotação (rpm) | $T_{\text{evap}}$ (g/min) | $K_{2,25}$ ( $\text{h}^{-1}$ ) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 50                          | 0,68                      | 0,078                          |
| 50                          | 0,80                      | 0,079                          |
| 50                          | 6,00                      | 0,081                          |
| 50                          | 2,88                      | 0,079                          |
| 100                         | 0,78                      | 0,141                          |
| 100                         | 0,65                      | 0,131                          |
| 100                         | 0,28                      | 0,145                          |
| 100                         | 7,03                      | 0,162                          |
| 100                         | 4,35                      | 0,155                          |
| 100                         | 3,19                      | 0,148                          |
| 150                         | 0,78                      | 0,250                          |
| 150                         | 0,65                      | 0,244                          |
| 150                         | 0,85                      | 0,350                          |
| 150                         | 6,00                      | 0,337                          |
| 150                         | 2,04                      | 0,257                          |
| 200                         | 0,80                      | 0,529                          |
| 200                         | 0,66                      | 0,499                          |
| 200                         | 0,31                      | 0,419                          |
| 200                         | 2,55                      | 0,569                          |
| 200                         | 4,87                      | 0,563                          |
| 250                         | 0,83                      | 0,715                          |
| 250                         | 0,67                      | 0,708                          |
| 250                         | 0,89                      | 0,717                          |
| 250                         | 6,84                      | 0,805                          |
| 250                         | 2,74                      | 0,753                          |
| 300                         | 0,90                      | 1,051                          |
| 300                         | 0,85                      | 1,062                          |
| 300                         | 0,32                      | 1,002                          |
| 300                         | 1,18                      | 1,260                          |
| 300                         | 2,39                      | 1,437                          |

#### 4.3 Coeficiente de reoxigenação $K_{2,25}$ em função do nível de agitação

O coeficiente de reoxigenação pode ser expresso em função do nível de agitação da água. O parâmetro geralmente utilizado para representar o nível de agitação é a potência específica,  $P_E$  ( $\text{W/m}^3$ ), definida como a razão entre a potência dissipada (Tabela 4) e o volume do líquido. A potência dissipada é função da velocidade de rotação, N.

Para esta análise foram selecionados três grupos de ensaios em que a taxa de evaporação pode ser considerada aproximadamente constante dentro de cada grupo. Cada grupo é composto de seis ensaios com as velocidades de rotação de 50, 100, 150, 200, 250 e 300 rpm.

São apresentados a seguir os resultados destes ensaios representados pelos gráficos de  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação e da potência específica. Os dados de cada ensaio estão apresentados na Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 21 – Taxa de evaporação de 0,78 a 0,90 g/min

| Velocidade rotação (rpm) | $P_E$<br>(W/m <sup>3</sup> ) | $K_{2,25}$<br>(h <sup>-1</sup> ) | $T_{evap}$ (g/min) |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 50                       | 1,1                          | 0,079                            | 0,80               |
| 100                      | 9,2                          | 0,141                            | 0,78               |
| 150                      | 30,9                         | 0,250                            | 0,78               |
| 200                      | 73,3                         | 0,529                            | 0,80               |
| 250                      | 143,1                        | 0,715                            | 0,83               |
| 300                      | 247,4                        | 1,051                            | 0,90               |

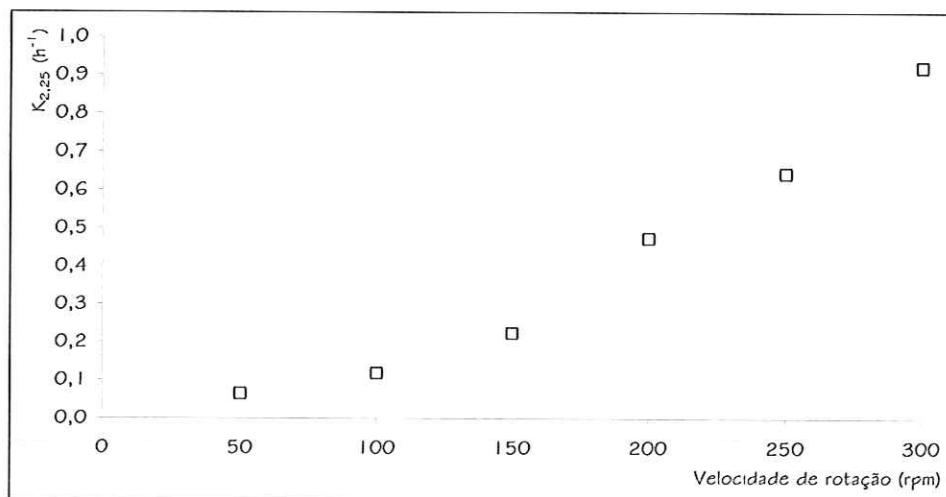
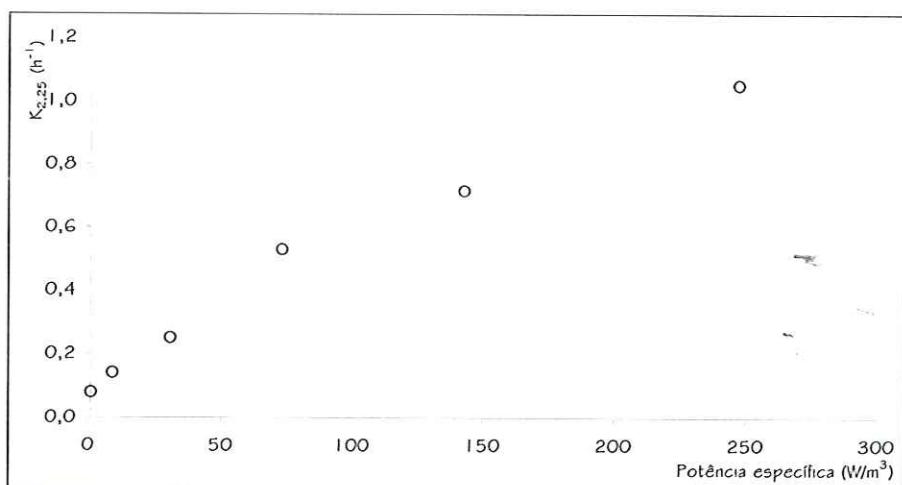
Figura 156 –  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$  0,78 a 0,90 g/min)Figura 157 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{evap}$  0,78 a 0,90 g/min)

Tabela 22 – Taxa de evaporação de 0,65 a 0,85 g/min

| Velocidade rotação (rpm) | $P_E$<br>(W/m <sup>3</sup> ) | $K_{2,25}$<br>(h <sup>-1</sup> ) | $T_{evap}$ (g/min) |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 50                       | 1,1                          | 0,078                            | 0,68               |
| 100                      | 9,2                          | 0,131                            | 0,65               |
| 150                      | 30,9                         | 0,250                            | 0,65               |
| 200                      | 73,3                         | 0,499                            | 0,66               |
| 250                      | 143,1                        | 0,708                            | 0,67               |
| 300                      | 247,4                        | 1,062                            | 0,85               |

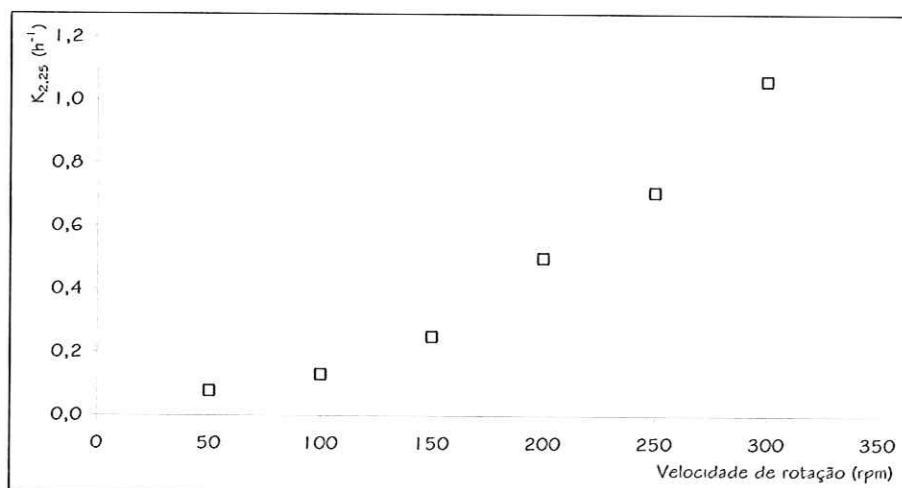
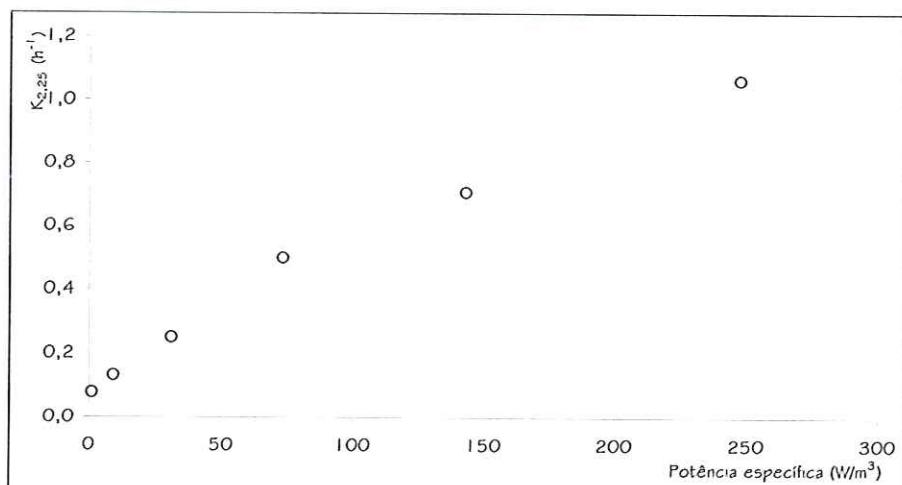
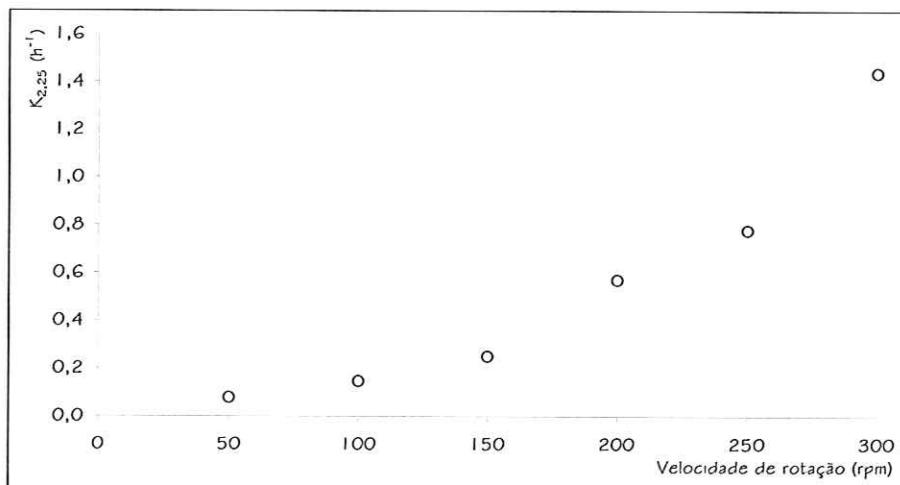
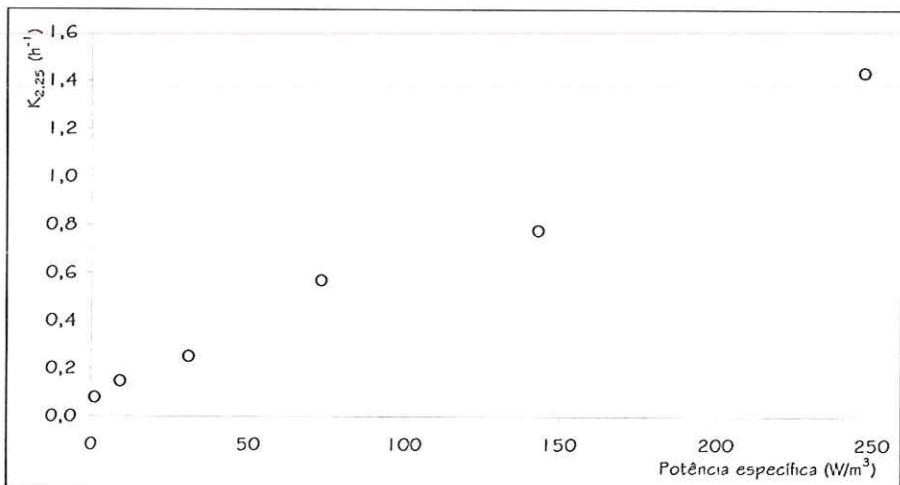
Figura 158 –  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$  0,65 a 0,85 g/min)Figura 159 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{evap}$  0,65 a 0,85 g/min)

Tabela 23 – Taxa de evaporação de 2,04 a 3,19 g/min

| Velocidade rotação (rpm) | $P_E$<br>(W/m <sup>3</sup> ) | $K_{2,25}$<br>(h <sup>-1</sup> ) | $T_{evap}$ (g/min) |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 50                       | 1,15                         | 0,079                            | 2,88               |
| 100                      | 9,16                         | 0,148                            | 3,19               |
| 150                      | 30,92                        | 0,250                            | 2,04               |
| 200                      | 73,29                        | 0,569                            | 2,55               |
| 250                      | 143,15                       | 0,753                            | 2,74               |
| 300                      | 247,36                       | 1,437                            | 2,39               |

Figura 160 –  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação ( $T_{evap}$  2,04 a 3,19 g/min)Figura 161 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{evap}$  2,04 a 3,19 g/min)

A análise anterior é apresentada em um único gráfico, Figura 162, permitindo visualizar que a “curva” para a maior taxa de evaporação apresenta valores superiores de  $K_{2,25}$ . Uma linha contínua é introduzida entre os pontos

apenas para facilitar a visualização. Observa-se que a diferença entre os valores de  $K_{2,25}$  aumenta com a velocidade de rotação, sendo significativa a partir de 200 rpm.

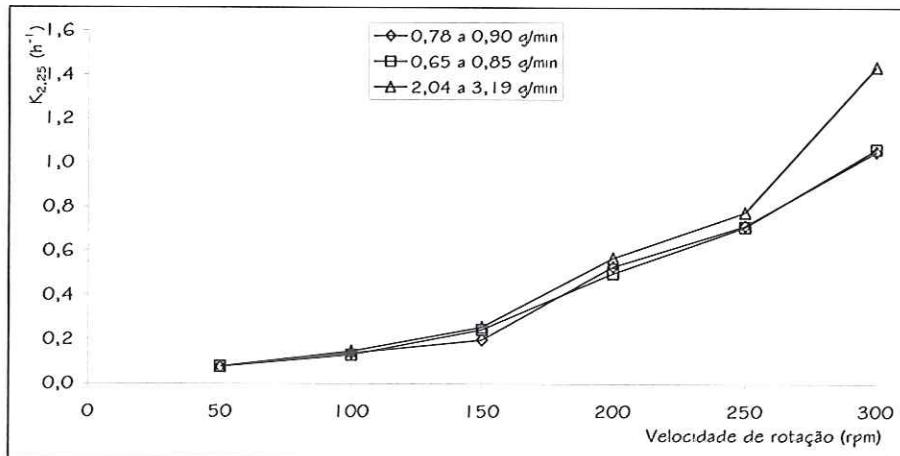


Figura 162 –  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação

A relação entre  $K_{2,25}$  e o nível de agitação, para todos os 30 ensaios, é apresentada na Figura 163, em função da velocidade de rotação, e na Figura 164, em função da potência específica.

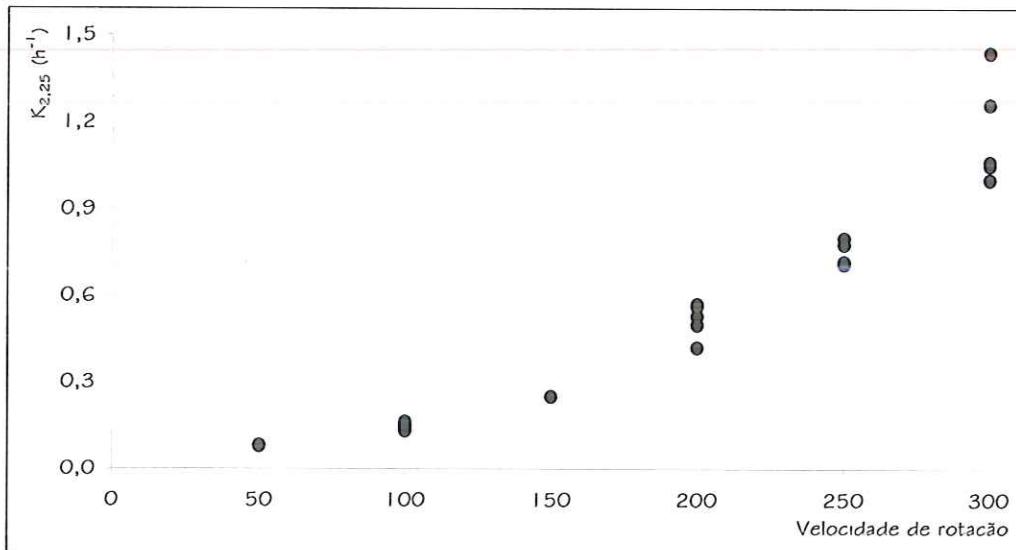


Figura 163 –  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação

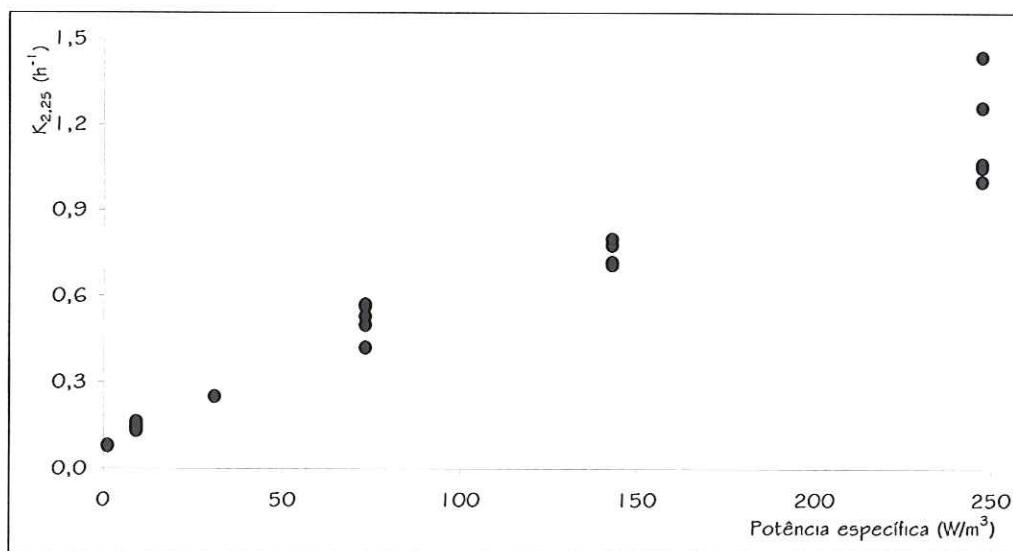


Figura 164 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica

Pode-se observar nos gráficos da Figura 156 a Figura 161, que existem duas regiões distintas de dependência entre o coeficiente de reoxigenação e o nível de agitação. A tendência geral é de um aumento do coeficiente de reoxigenação com o aumento do nível de agitação. As duas regiões podem ser observadas em gráfico bi-logarítmico do coeficiente de reoxigenação em função da potência específica, Figura 165, Figura 166 e Figura 167.

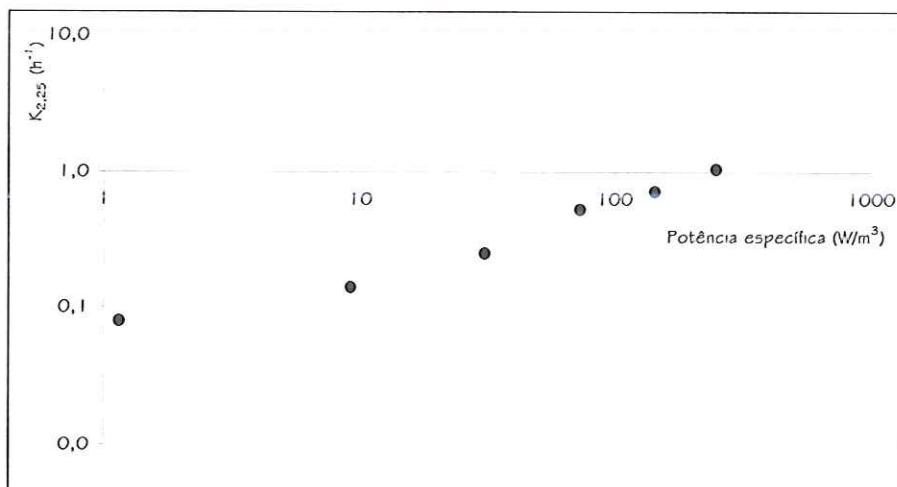


Figura 165 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{evap}$  0,78 a 0,90 g/min), bi-logarítmico

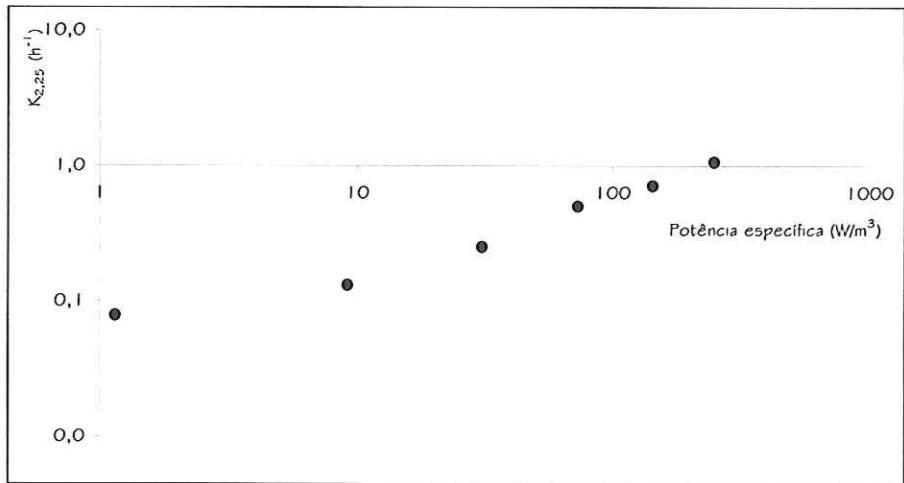


Figura 166 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{\text{evap}}$  0,65 a 0,85 g/min), bi-logarítmico

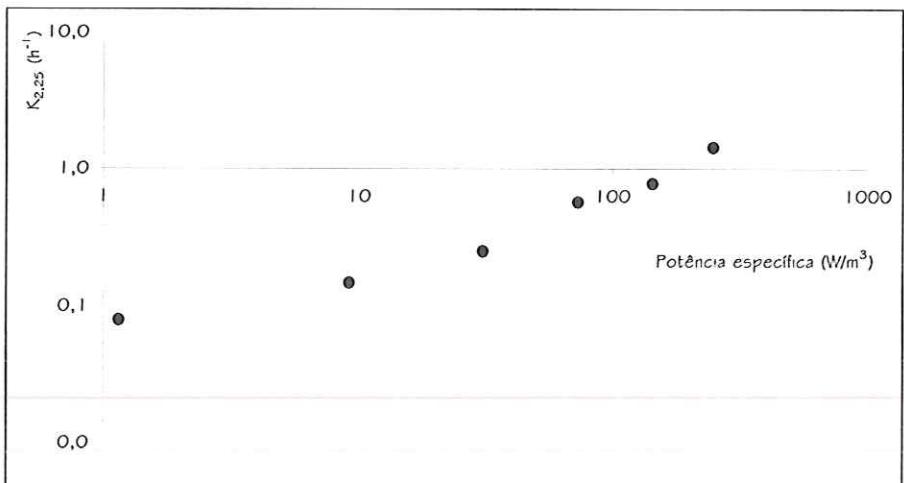


Figura 167 –  $K_{2,25}$  em função da potência específica ( $T_{\text{evap}}$  2,04 a 3,19 g/min), bi-logarítmico

Schulz (1989) sugere que as duas regiões de dependência de  $K_{2,25}$  com a dissipação de energia (ou nível de agitação) podem ser expressas de acordo com as seguintes funções:

Para a região de pouca dissipação de energia:

$$K_{2,25} \propto P_E^{n1}$$

Para a região de maior dissipação de energia:

$$K_{2,25} \propto P_E^{n2}$$

Sendo que  $n1 < n2$

Schulz (1989) obteve em seu trabalho,  $n1=0,257$  e  $n2 = 0,58$ . Schulz (1989) sugere, de acordo com trabalhos anteriores, que o expoente para baixas dissipações pode ser  $1/3$  e para dissipações maiores o expoente parece estar entre  $\frac{1}{2}$  e  $1$ .

A Figura 168, Figura 169 e Figura 170 apresenta o valor de  $n1$  e  $n2$ .

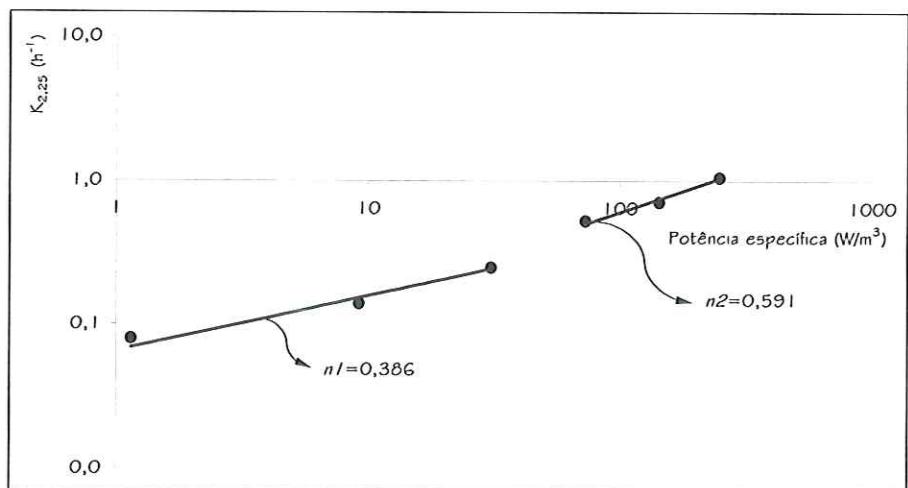


Figura 168 –  $n1$  e  $n2$  para  $T_{evap}$  0,78 a 0,90 g/min

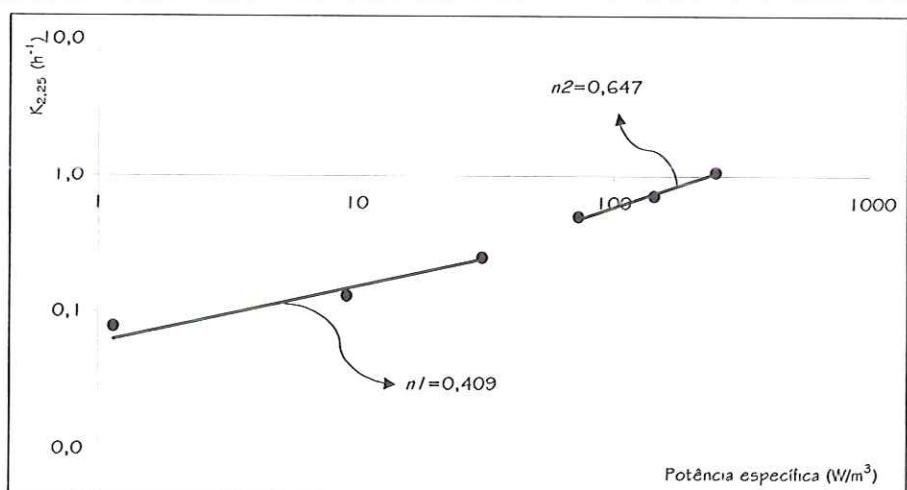


Figura 169 –  $n1$  e  $n2$  para  $T_{evap}$  0,65 a 0,85 g/min

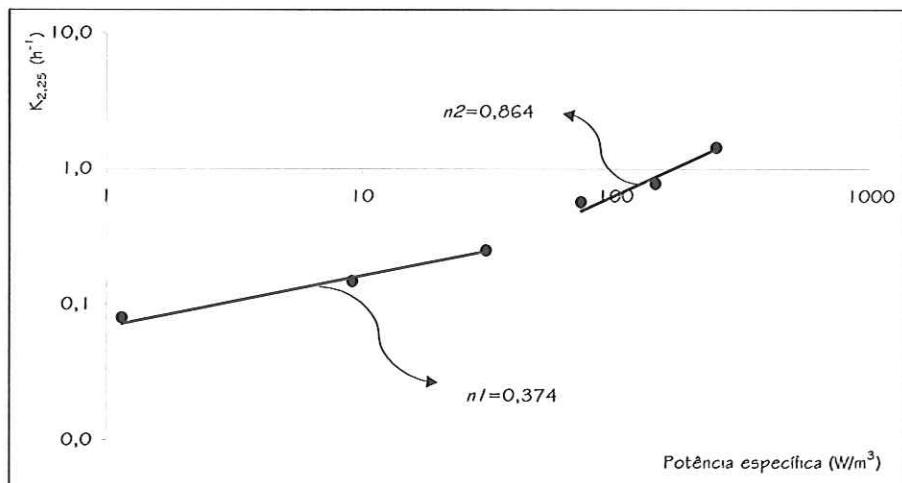


Figura 170 –  $n_1$  e  $n_2$  para  $T_{\text{evap}}$  2,04 a 3,19 g/min

#### 4.4 Coeficiente de reoxigenação $K_2$ em função da taxa de evaporação

Nas pesquisas realizadas por Costa (1992) e Oliveira (1996), os autores propuseram que o coeficiente de reoxigenação é influenciado pela umidade relativa do ar.

Nesta pesquisa, a “atmosfera” da qual o líquido recebe o oxigênio é fornecida artificialmente e controlada, portanto se configura como mais adequado relacionar-se o coeficiente de reoxigenação em função da taxa média de evaporação.

Os resultados obtidos são apresentados na forma de gráficos de  $K_{2,25}$  em função da taxa média de evaporação para cada velocidade de rotação. Os dados se encontram na Tabela 20. O valor de  $K_{2,25}$  é apresentado junto com o erro padrão de sua estimativa.

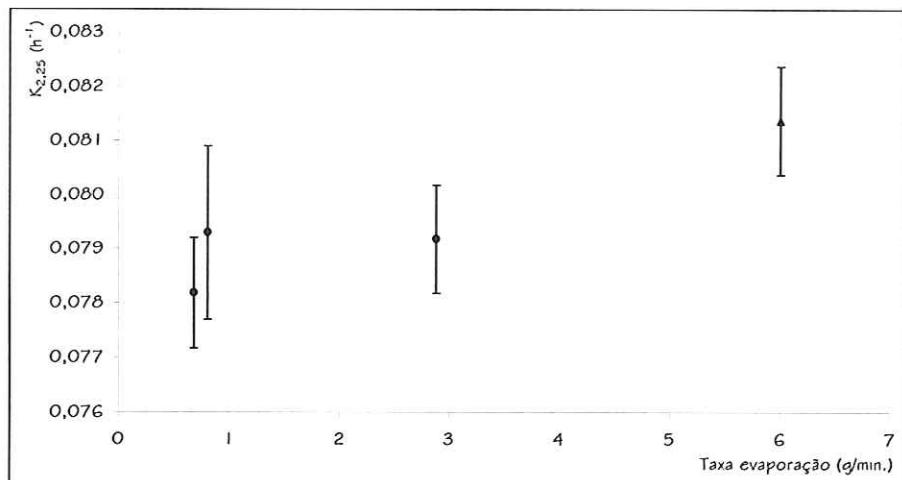


Figura 171 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 50 rpm

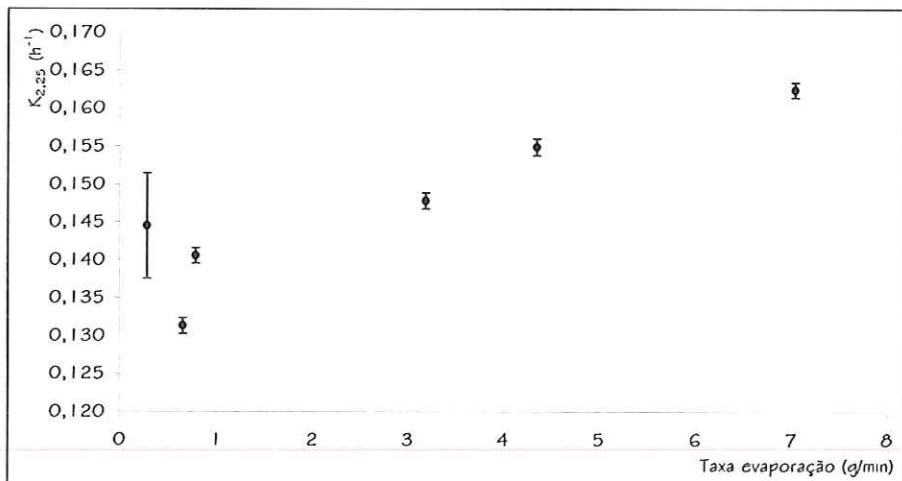


Figura 172 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 100 rpm

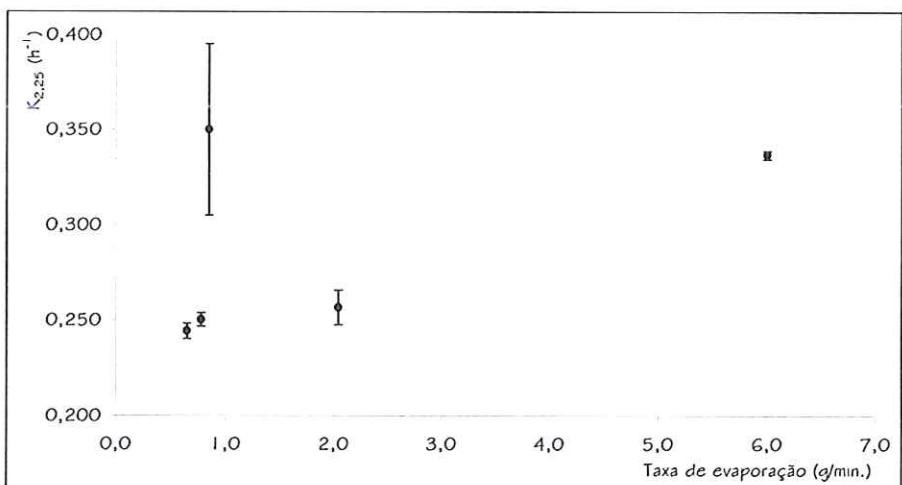


Figura 173 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 150 rpm

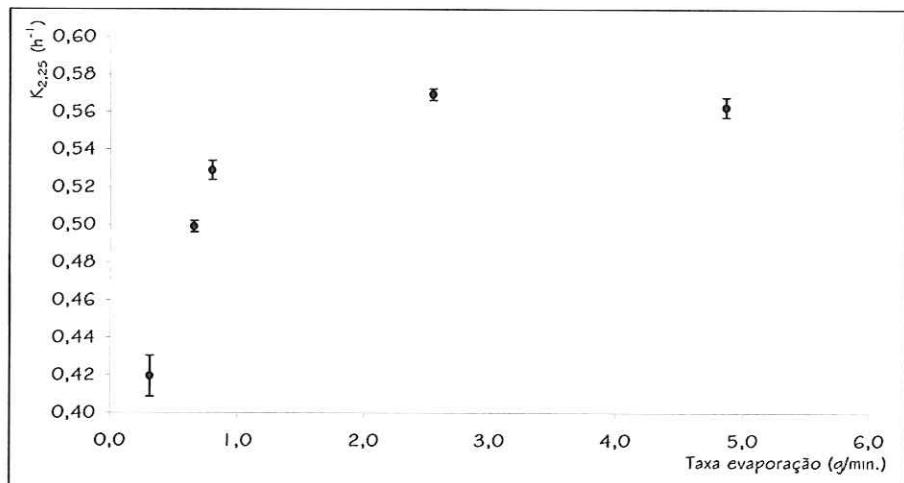


Figura 174 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 200 rpm

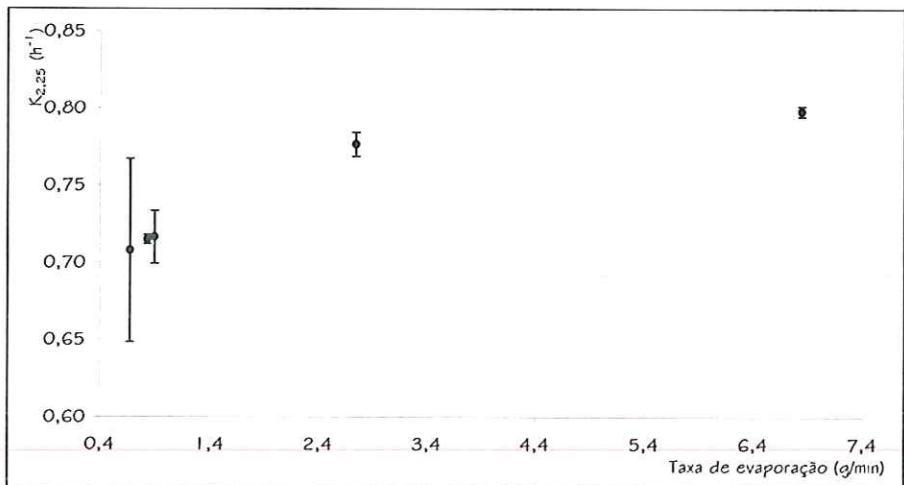


Figura 175 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 250 rpm

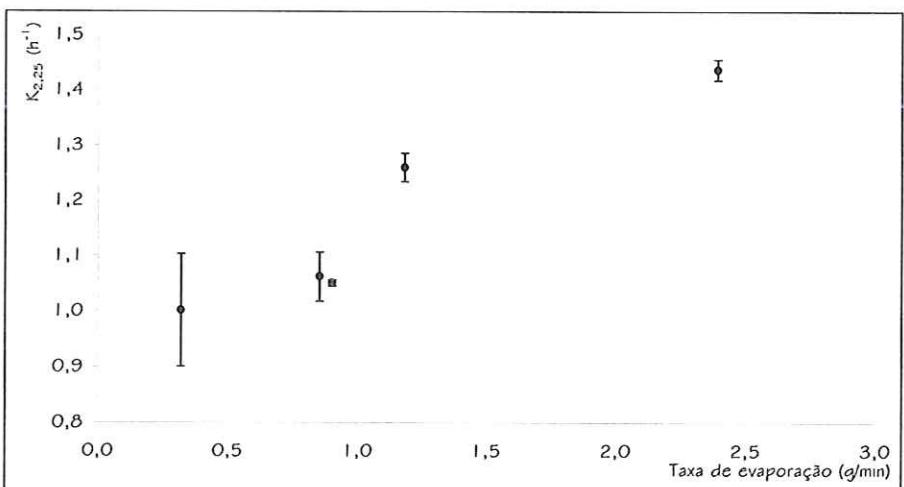


Figura 176 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação, 300 rpm

Observa-se que para todas as velocidades de rotação, o valor de  $K_{2,25}$  aumenta com a taxa de evaporação, comprovando a hipótese principal da pesquisa. Observa-se ainda na Figura 172 e na Figura 173 que a tendência crescente de  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação é afetada por um ponto (em cada figura). Este ponto apresenta erro padrão não compatível com o desvio dos demais pontos. Sugere-se que este valor de  $K_{2,25}$  possa ter sido mal estimado e deve-se desconsiderar o referido ponto na análise. A Figura 177 reúne o coeficiente de reoxigenação em função da taxa de evaporação para todos os níveis de agitação.

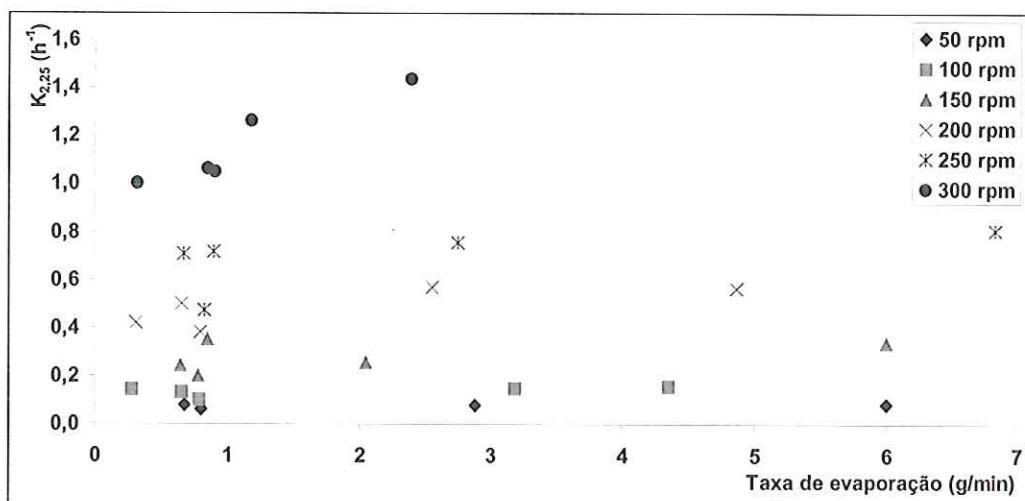


Figura 177 –  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação

#### 4.5 Considerações sobre o modelo utilizado

As análises apresentadas nas seções 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 foram feitas considerando-se os valores de  $K_{2,25}$  obtidos com metodologia clássica (denominação adotada neste trabalho). Para tanto, faz-se uma análise de regressão não linear com o modelo apresentado na equação 4.

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

Este ajuste permite a estimativa dos parâmetros  $K_2$ ,  $C_0$  e  $C_s$ ; as análises são feitas considerando-se o valor estimado de  $K_2$ , com nenhuma crítica sobre o valor estimado da concentração de saturação,  $C_s$ . Como a análise de regressão é puramente matemática, o ajuste fornece valores que melhor ajusta a função aos dados experimentais, sem considerar qualquer condição de

natureza física. Por exemplo, os valores de  $C_S$  que são estimados pelo ajuste, podem não coincidir com os valores que são calculados e tabelados em função da temperatura e da pressão (Tabela 2).

Para ilustrar a diferença entre os valores estimados e calculados de  $C_S$ , são apresentados na Tabela 24 os valores estimados de  $C_S$  com o uso da metodologia clássica e os valores de  $C_S$  esperados para as condições físicas respectivas. O cálculo de  $C_S$  esperado foi realizado de acordo com a equação C da Tabela 2, considerando-se a temperatura e a pressão na qual foi realizado o ensaio.

Tabela 24 – Comparação entre os valores de  $C_S$

| $C_S$<br>estimado<br>(mg/l) | $C_S$<br>calculado<br>(mg/l) | Temperatura<br>do ensaio<br>(°C) |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 6,95                        | 8,19                         | 26,2                             |
| 6,99                        | 8,38                         | 24,9                             |
| 7,43                        | 9,10                         | 20,5                             |
| 6,56                        | 8,58                         | 23,6                             |
| 7,05                        | 8,31                         | 25,4                             |
| 7,89                        | 8,38                         | 24,9                             |
| 6,94                        | 8,49                         | 24,2                             |
| 6,72                        | 8,63                         | 23,3                             |
| 7,24                        | 8,76                         | 22,5                             |
| 7,03                        | 8,63                         | 23,3                             |
| 7,37                        | 8,23                         | 25,9                             |
| 7,78                        | 8,22                         | 26,0                             |
| 6,41                        | 8,37                         | 25,0                             |
| 7,07                        | 8,73                         | 22,7                             |
| 6,77                        | 8,93                         | 21,5                             |
| 7,50                        | 8,37                         | 25,0                             |
| 8,02                        | 8,38                         | 24,9                             |
| 7,33                        | 8,51                         | 24,1                             |
| 7,99                        | 8,47                         | 24,3                             |
| 7,43                        | 8,65                         | 23,2                             |
| 7,44                        | 8,26                         | 25,7                             |
| 7,89                        | 8,31                         | 25,4                             |
| 7,67                        | 8,60                         | 23,5                             |
| 7,49                        | 9,10                         | 20,5                             |
| 7,28                        | 8,00                         | 27,5                             |
| 7,47                        | 8,52                         | 24,0                             |
| 6,77                        | 8,10                         | 26,8                             |
| 7,36                        | 8,44                         | 24,5                             |
| 7,03                        | 8,34                         | 25,2                             |
| 7,43                        | 8,86                         | 21,9                             |

Em todas os resultados apresentados na Tabela 24, o valor de  $C_S$  estimado é inferior ao valor de  $C_S$  calculado, conforme pode ser observado na Figura 178.

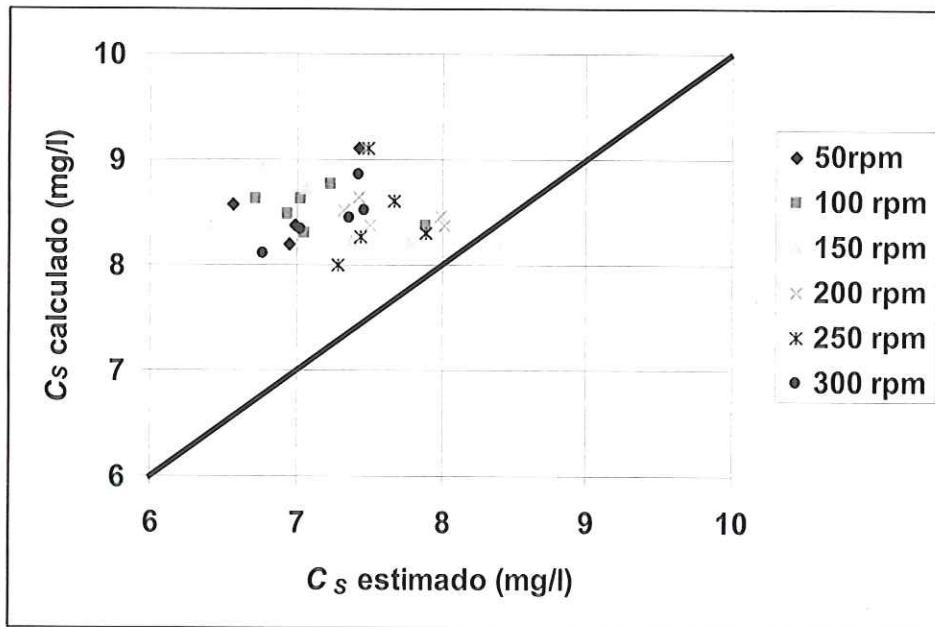


Figura 178 – Comparaçāo entre os valores de  $C_S$

Os resultados dos ensaios deveriam predizer valores de  $C_S$  aproximadamente iguais aos valores tabelados, fato que não foi verificado. Para explicar esta questão, é feita a análise a seguir.

A concentração de saturação do oxigênio em água,  $C_S$ , é função da temperatura, pressão e da concentração de sais dissolvidos. O valor de  $C_S$  pode ser obtido a partir de equações empíricas, Tabela 2, ou determinado experimentalmente. A estimativa de  $C_S$  reflete diretamente no grau do ajuste ao modelo, influenciando a estimativa de  $K_2$ . A Tabela 2 apresenta variações de até 2% no valor de  $C_S$  obtidos por diferentes equações. Já no método experimental, os erros estão associados às características do processo de medição, ou seja, os dois processos podem conter erros na estimativa de  $C_S$  refletindo em erros na estimativa de  $K_2$ .

O gráfico da Figura 179 apresenta a curva de reoxigenação de um ensaio típico, cuja velocidade de rotação  $N$  foi mantida em 300 rpm por aproximadamente de 6 horas, sendo em seguida reduzida para 100 rpm até o final do ensaio.

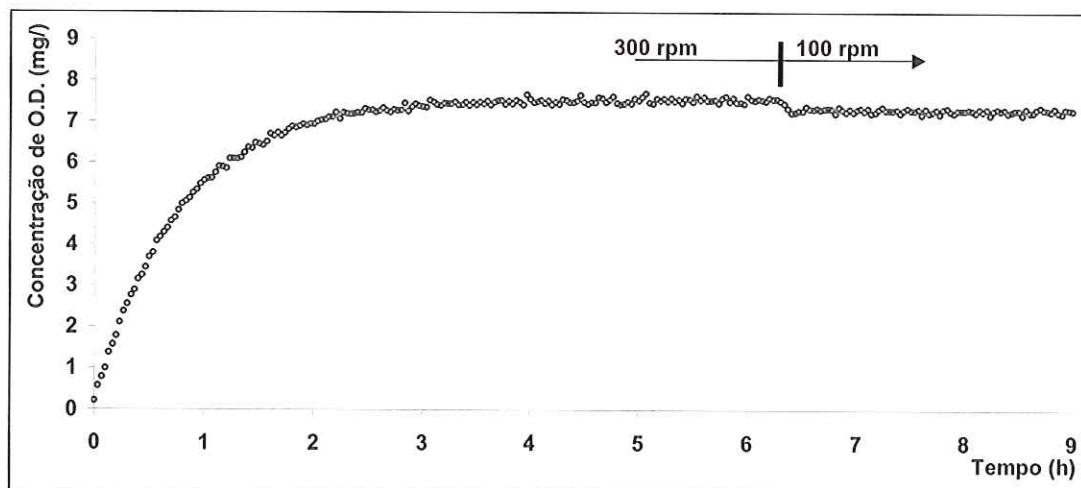


Figura 179 – Variação da concentração de saturação

Observa-se na Figura 179 que as condições de regime permanente foram atingidas após 4 horas do ensaio. A resposta do sistema ao estímulo da redução do nível de agitação, pode ser verificada na diminuição do valor da concentração de equilíbrio. Este ensaio foi realizado no início dos testes práticos e o medidor de O.D. ainda não havia sido calibrado, portanto o valor absoluto da medida não deve ser considerado. Considerando-se o valor médio de  $C_S$  durante o intervalo entre 4 e 6 horas (7,51 mg/l) e após 6 horas (7,31 mg/l), observa-se que houve uma redução de 2,73%.

Obviamente o valor de  $C_S$  não pode depender do nível de agitação da água. A variação no valor estável de  $C_S$ , medido nas duas condições de agitação pode ser explicada pelo fato de a concentração de saturação ser um parâmetro termodinâmico que deve ser medido em condições de equilíbrio. Sob elevadas condições de agitação, o sistema atinge equilíbrio meta-estável. Isto equivale a dizer que medidas da concentração de oxigênio dissolvido observadas no final de cada experimento, e que são utilizadas para estimar o valor de  $C_S$ , podem não representar o valor esperado de  $C_S$  em condições de equilíbrio termodinâmico.

Com base nestas considerações é proposto um novo modelo.

#### 4.5.1 Proposição de novo modelo

O desenvolvimento de modelos e de metodologias alternativas simplificadas e confiáveis para a previsão dos parâmetros é assunto investigado por diversos pesquisadores. Silveira (1999) desenvolveu uma metodologia que dispensa a coleta de medidas durante o regime transitório e determina o coeficiente de transferência em condições de regime permanente. Maia (2003) com base em um trabalho de Giorgetti et al. (1995) inseriu artificialmente um consumo de oxigênio no processo de reoxigenação, produzindo valores da concentração de equilíbrio inferiores aos valores de  $C_s$  fisicamente observáveis. Um borbulhamento sub-superficial de nitrogênio, com a vazão controlada, foi utilizado como sumidouro de oxigênio, provocando um "stripping" de oxigênio. A modelo matemático utilizado contemplou a existência de um sumidouro de oxigênio.

A hipótese fundamental para a utilização do novo modelo neste trabalho é considerar-se a existência de sumidouro de oxigênio oriundo de causas não provocadas, porém inerentes aos processos fluidodinâmicos. O sistema de agitação da água é composto por um agitador rotativo e pode haver a formação de vórtices nas bordas das pás do rotor, especialmente sob condições de velocidades de rotação elevadas. Vórtices deste tipo possuem uma zona de baixa pressão no seu centro. É sabido que quando há zonas de baixa pressão em um fluido em escoamento, parte dos gases dissolvidos migra para a fase gasosa, ocorrendo a formação de micro bolhas que se desprendem, sendo levado de volta à atmosfera constituindo-se assim, em um sumidouro "natural" do oxigênio dissolvido.

O mesmo ocorre nos canais de recirculação de água, equipamento comumente empregado no estudo do coeficiente de reoxigenação superficial, onde pode ocorrer um sumidouro de oxigênio na linha de sucção da bomba, se a mesma não for adequadamente projetada e construída.

Considerando-se a possibilidade da existência de um sumidouro de oxigênio, suposto como sendo de primeira ordem, o seguinte modelo é proposto:

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_S - C) - K_3 \cdot C \quad (50)$$

Em que  $K_3$  é denominado coeficiente de desoxigenação ( $T^{-1}$ ) A solução da equação (50) é:

$$C = \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S - \left( \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S - C_0 \right) \cdot e^{-(K_2 + K_3) \cdot t} \quad (51)$$

#### 4.5.1.1 Estimativa dos parâmetros $K_2$ , $K_3$ , $C_S$ e $C_0$

O ajuste para o modelo apresentado na equação (51) foi feito com a metodologia clássica, análise de regressão não linear pelo método dos mínimos quadrados. Foram estimados os parâmetros:  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $C_S$  e  $C_0$ , para todos os ensaios. Para ilustrar a qualidade do ajuste são apresentadas algumas curvas de reoxigenação nas figuras a seguir.

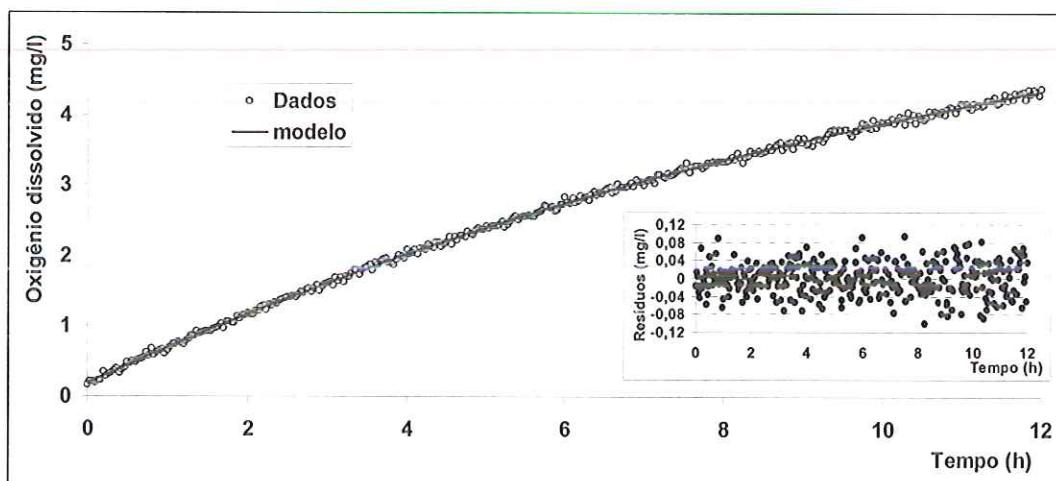


Figura 180 – modelo novo, 50 rpm

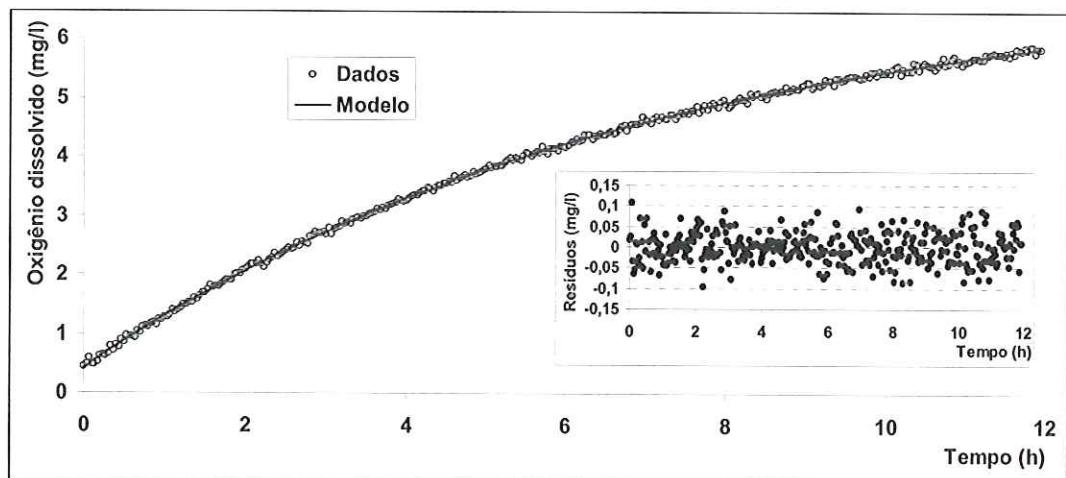


Figura 181 – modelo novo, 100 rpm

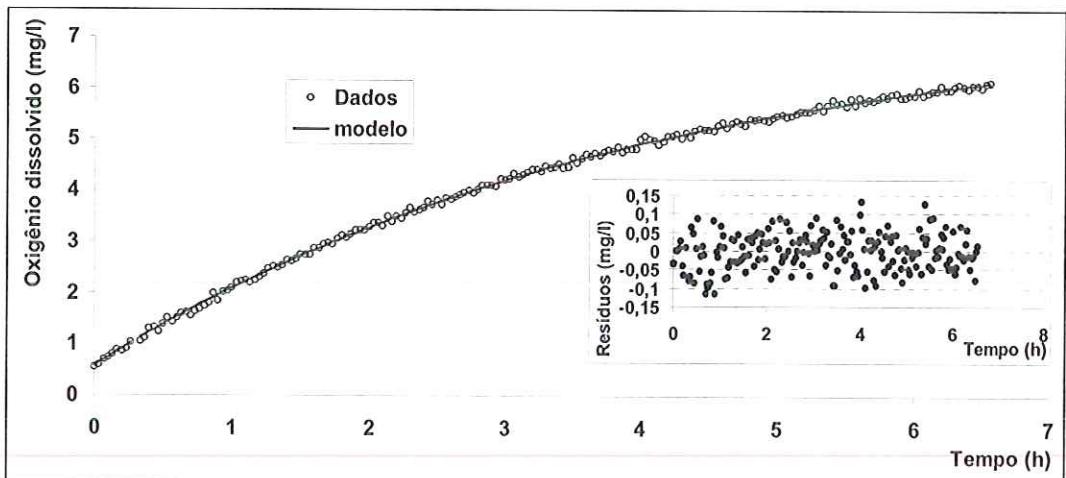


Figura 182 – modelo novo, 150 rpm

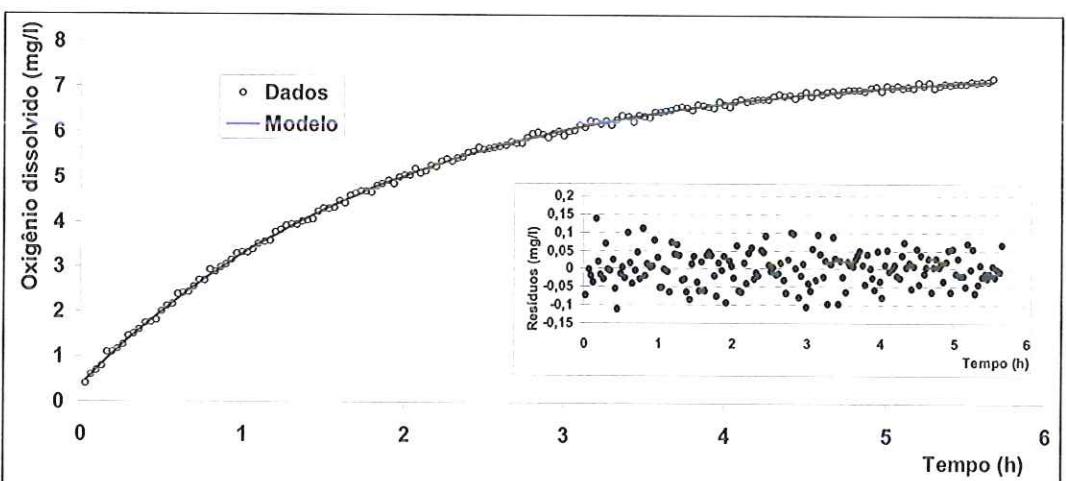


Figura 183 – modelo novo, 200 rpm

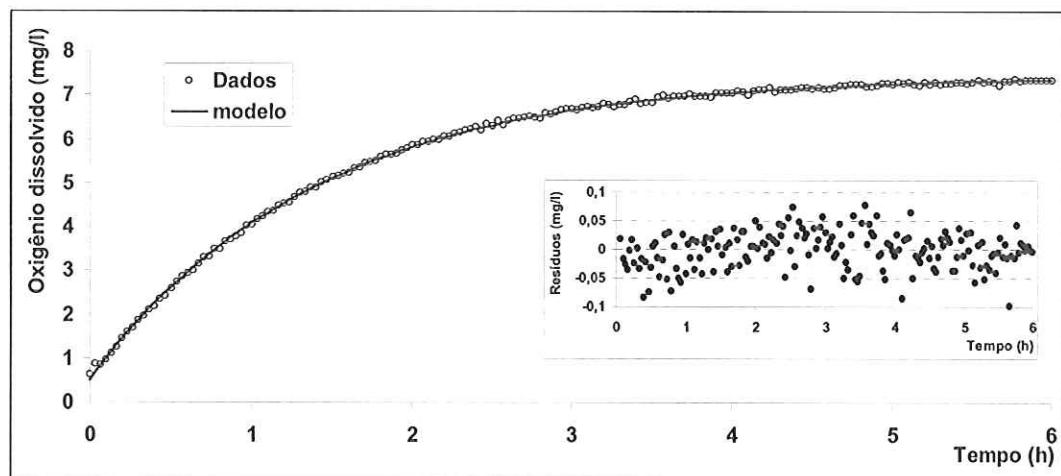


Figura 184 – modelo novo, 250 rpm

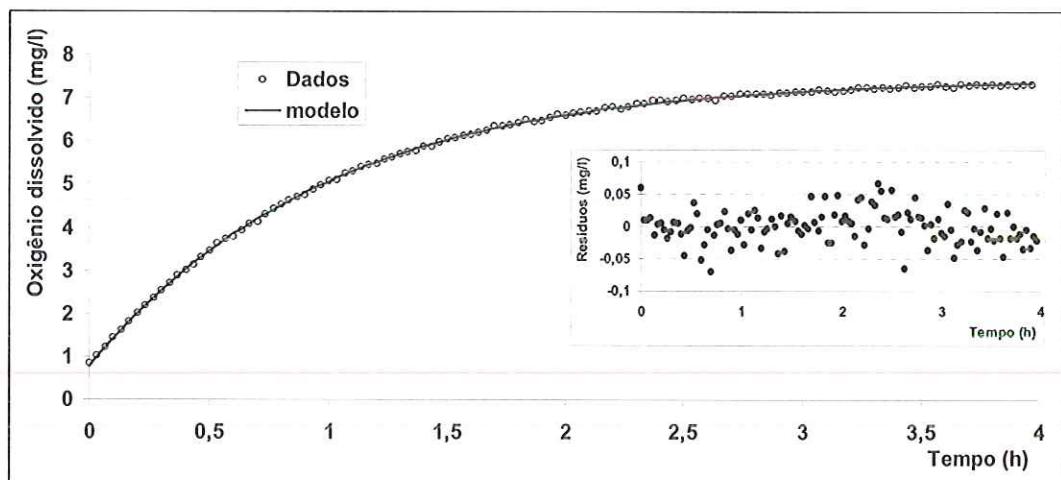


Figura 185 – modelo novo, 300 rpm

Os resultados deste ajuste produziram coeficientes de determinação  $R^2$ , sempre superiores a 0,999 e erro-padrão inferiores a 3%. Estes valores são bastante próximos aos observados na Tabela 19 (modelo clássico). A distribuição dos resíduos é bastante aleatória e os valores dos resíduos são menores que os resíduos do ajuste do modelo clássico. Os valores estimados de  $K_2$  e  $K_3$ , corrigidos para a temperatura de 25°C, e de  $C_S$  são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros estimados, novo modelo

| Ensaio | $K_{2,25} (\text{h}^{-1})$ | $K_{3,25} (\text{h}^{-1})$ | $C_s (\text{mg/l})$ | $C_s'$ |
|--------|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------|
| 1      | 0,0793                     | -3,1.10 <sup>-7</sup>      | 6,94                | 6,95   |
| 2      | 0,0781                     | 6,6.10 <sup>-9</sup>       | 6,99                | 6,99   |
| 3      | 0,0813                     | 8,9.10 <sup>-5</sup>       | 7,43                | 7,43   |
| 4      | 0,0792                     | 1,5.10 <sup>-5</sup>       | 6,56                | 6,56   |
| 5      | 0,1373                     | 0,003                      | 7,20                | 7,05   |
| 6      | 0,1253                     | 0,006                      | 8,27                | 7,89   |
| 7      | 0,1384                     | 0,006                      | 7,25                | 6,94   |
| 8      | 0,1434                     | 0,027                      | 7,61                | 6,72   |
| 9      | 0,1431                     | 0,016                      | 7,83                | 7,24   |
| 10     | 0,1424                     | 0,008                      | 7,31                | 7,03   |
| 11     | 0,2295                     | 0,016                      | 7,95                | 7,37   |
| 12     | 0,2201                     | 0,024                      | 8,64                | 7,78   |
| 13     | 0,3353                     | 0,015                      | 6,70                | 6,41   |
| 14     | 0,3005                     | 0,036                      | 7,91                | 7,07   |
| 15     | 0,2415                     | 0,015                      | 7,20                | 6,77   |
| 16     | 0,5580                     | -0,029                     | 7,11                | 7,50   |
| 17     | 0,4803                     | 0,019                      | 8,34                | 8,02   |
| 18     | 0,3989                     | 0,021                      | 7,71                | 7,33   |
| 19     | 0,5343                     | 0,035                      | 8,51                | 7,99   |
| 20     | 0,5223                     | 0,041                      | 8,00                | 7,43   |
| 21     | 0,6813                     | 0,033                      | 7,80                | 7,44   |
| 22     | 0,7444                     | -0,037                     | 7,50                | 7,89   |
| 23     | 0,6974                     | 0,019                      | 7,89                | 7,67   |
| 24     | 0,7794                     | 0,018                      | 7,66                | 7,49   |
| 25     | 0,7368                     | 0,040                      | 7,68                | 7,28   |
| 26     | 0,9859                     | 0,064                      | 7,96                | 7,47   |
| 27     | 0,9397                     | 0,123                      | 7,65                | 6,77   |
| 28     | 0,9309                     | 0,071                      | 7,92                | 7,36   |
| 29     | 1,1303                     | 0,129                      | 7,83                | 7,03   |
| 30     | 1,3517                     | 0,159                      | 7,89                | 7,43   |

Os valores de  $K_{2,25}$  estimados pela equação (4) são superiores aos estimados pela equação (51). Analisando as equações,

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

$$C = \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_s - \left( \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_s - C_0 \right) \cdot e^{-(K_2 + K_3) \cdot t} \quad (51)$$

observa-se que a equação (4) é formalmente idêntica à equação (51). A diferença está nos coeficientes que multiplicam  $C_s$  e  $t$ .

A equação (51) pode ser reescrita como:

$$C = C'_S - (C'_S - C_0) \cdot e^{-K'_2 \cdot t} \quad (52)$$

Em que:

$$C'_S = \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S \quad (53)$$

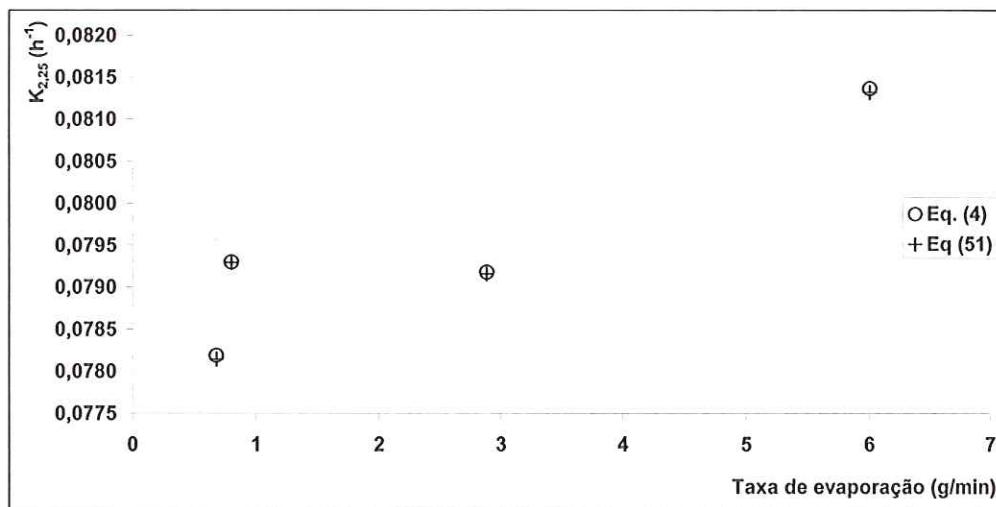
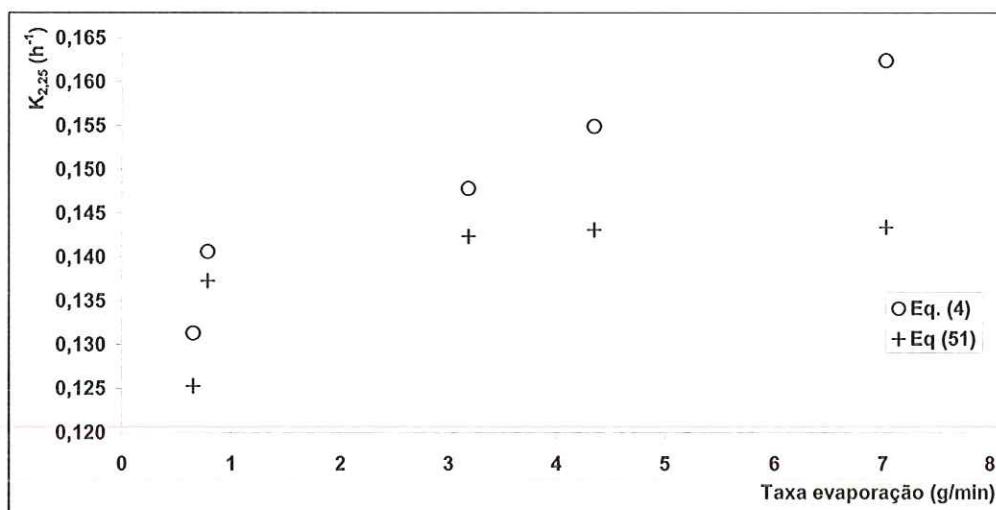
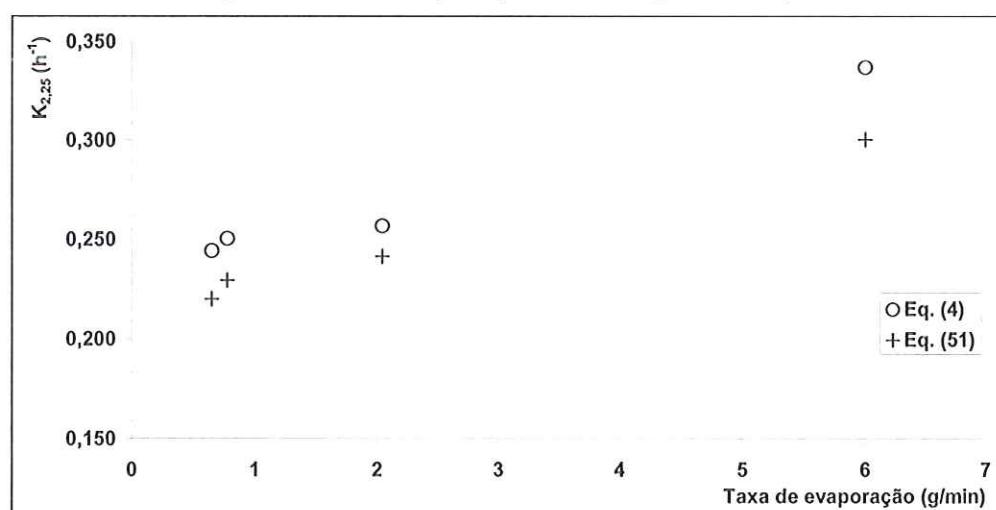
$$K'_2 = K_2 + K_3 \quad (54)$$

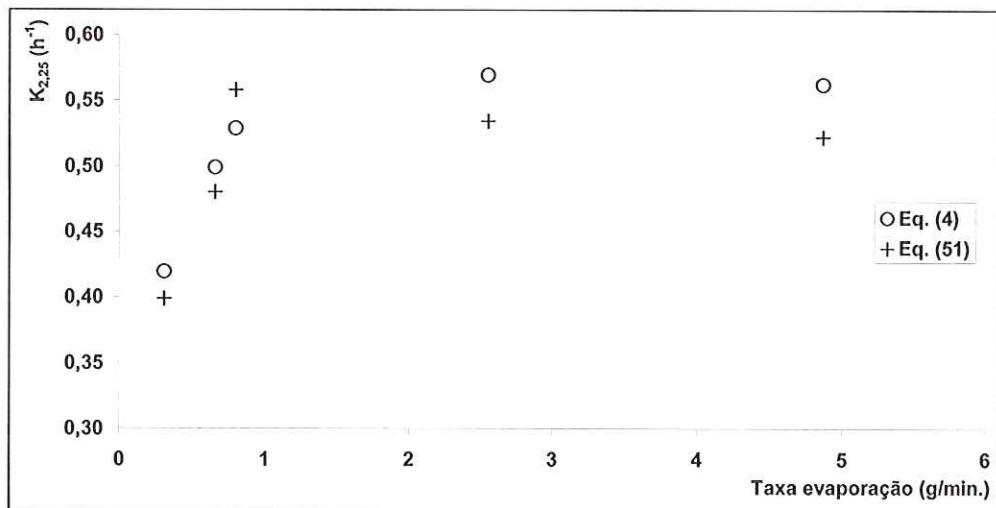
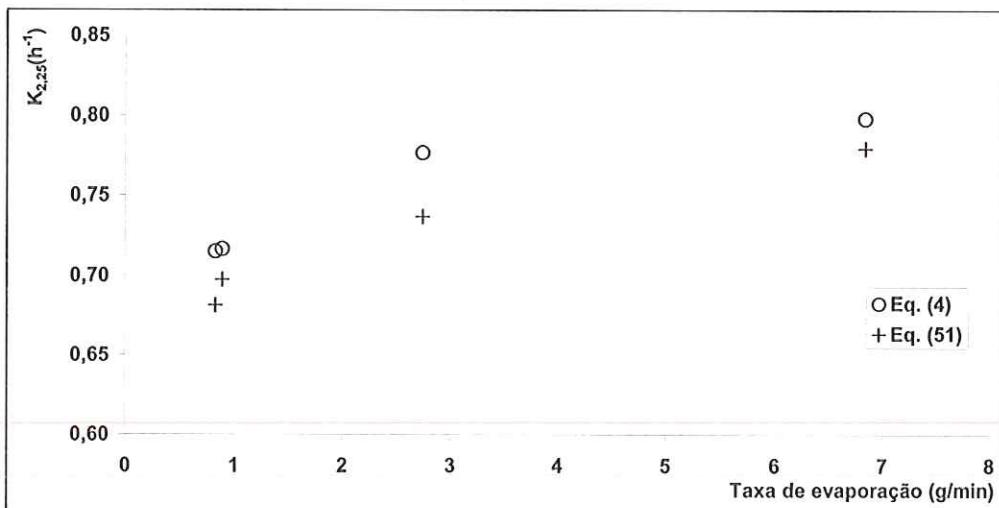
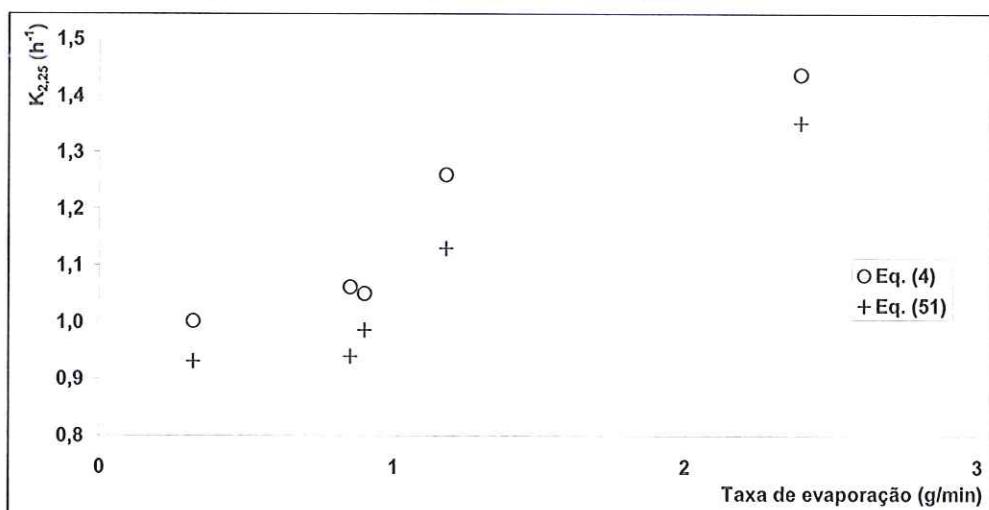
Em que  $C'_S$  a concentração de saturação sob as condições do processo e  $K'_2$  o coeficiente de reoxigenação superficial do processo (estimado pela equação 4). Portanto  $K'_2 = K_2$  quando  $K_3 = 0$ . Ainda, quando da utilização do modelo clássico, os valores estimados são  $K'_2$  e  $C'_S$ .

Observa-se que os valores estimados de  $C_S$  da Tabela 24 são sempre inferiores aos valores da Tabela 25, sugerindo que o novo modelo representa melhor o processo. Os valores estimados de  $C_S$  utilizando-se o novo modelo se aproximam mais dos valores esperados para  $C_S$ . Para os ensaios 1 a 4 (50 rpm) observa-se que os valores de  $K_2$  (Tabela 25) coincidem pois os valores estimados na Tabela 20, pois nestas condições,  $K_3$  (médio) é zero.

#### 4.5.1.2 Análise de $K_2$

São apresentados na seqüência, os valores de  $K_{2,25}$  estimados pela metodologia clássica (equação 4) e os valores de  $K_{2,25}$  estimados pelo ajuste do modelo da equação (51), em função das taxas de evaporação.

Figura 186 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 50 rpmFigura 187 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 100 rpmFigura 188 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 150 rpm

Figura 189 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 200 rpmFigura 190 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 250 rpmFigura 191 – Comparação entre  $K_{2,25}$  – 300 rpm

A relação entre  $K_{2,25}$  e a taxa de evaporação apresenta tendência crescente e semelhante em ambas estimativas, equação (4) e equação (51). Os valores que apresentaram erro padrão acima de 3% foram desconsiderados nesta análise, para os dois modelos.

#### 4.5.1.3 Análise de $K_3$

O valor estimado de  $K_3$  é corrigido para a temperatura de 25°C. Nas figuras a seguir são apresentados os valores estimados de  $K_{3,25}$  em função da taxa de evaporação, para cada velocidade de rotação.

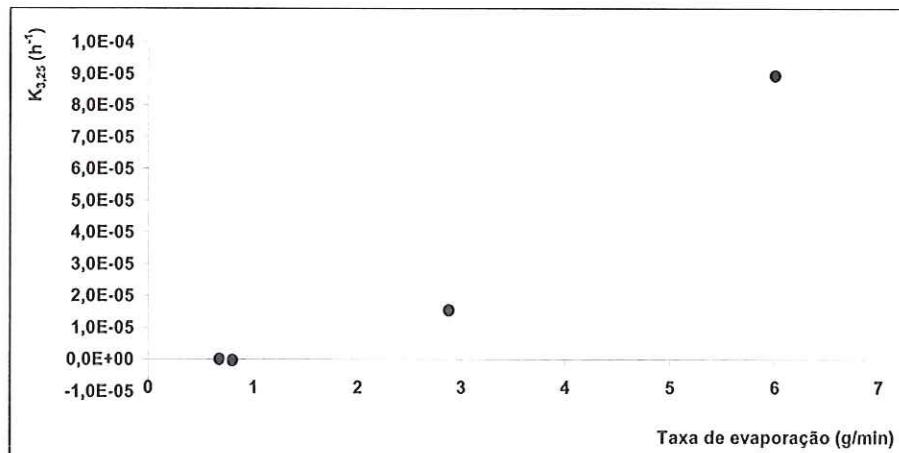


Figura 192 –  $K_{3,25}$  – 50 rpm

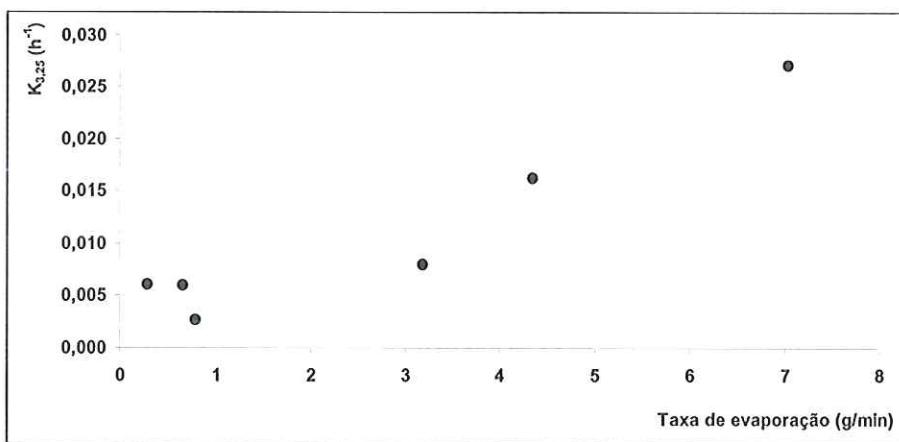
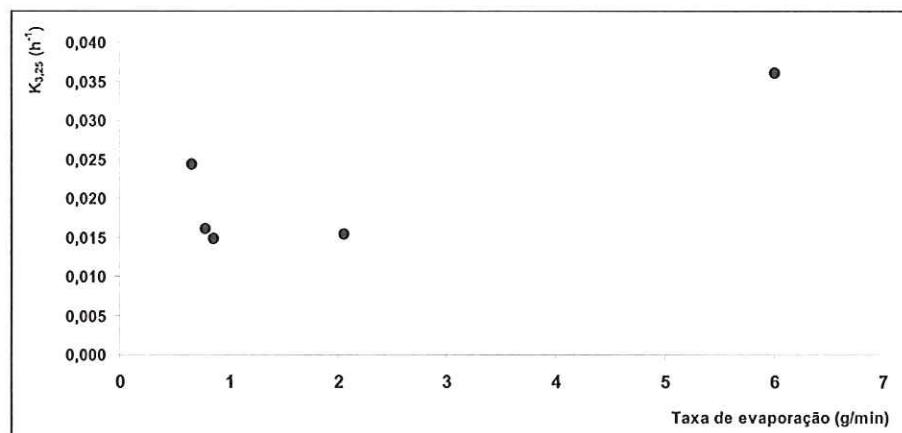
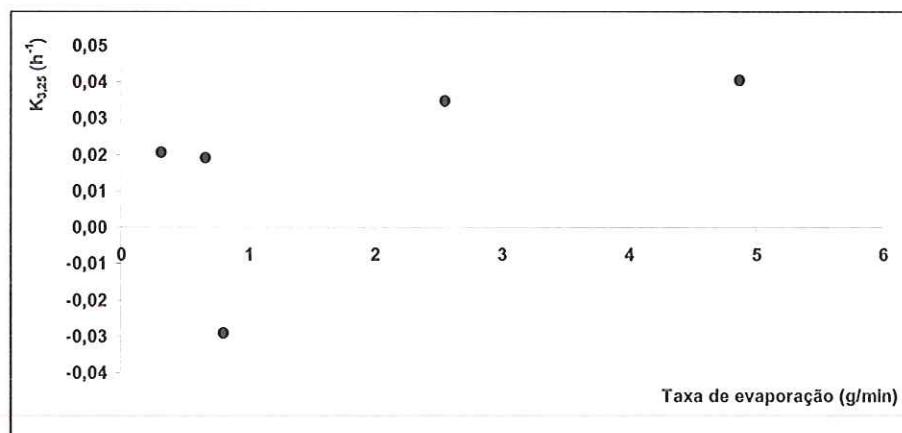
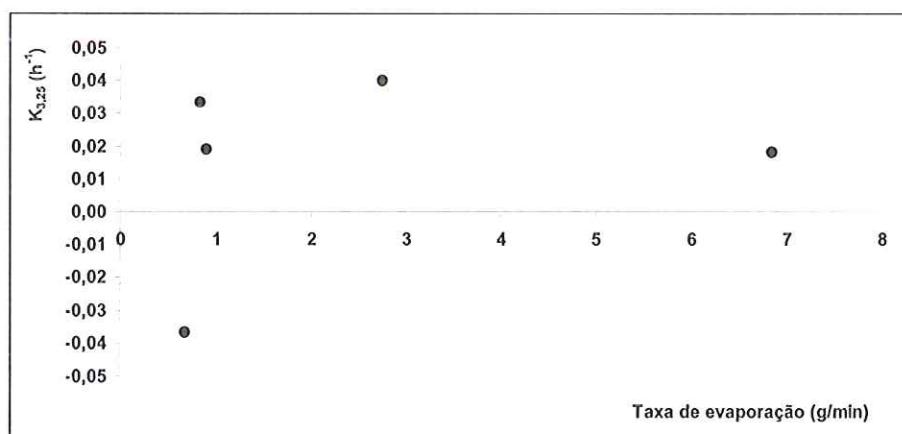
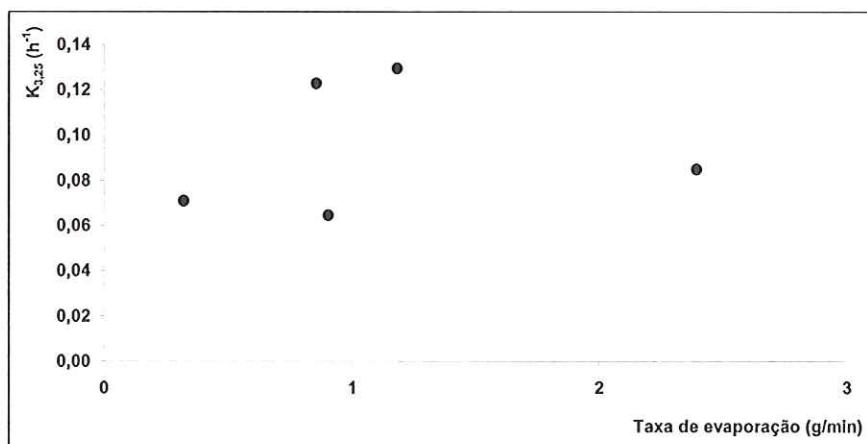


Figura 193 –  $K_{3,25}$  – 100 rpm

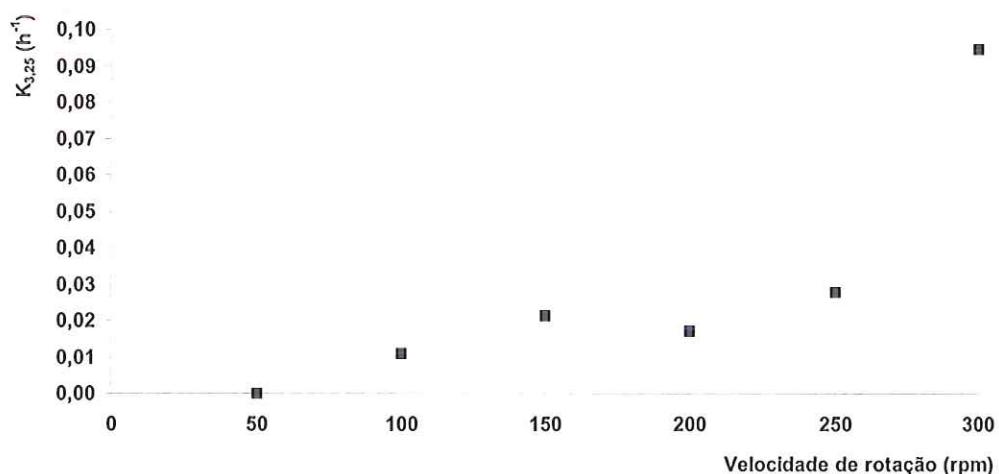
Figura 194 –  $K_{3,25}$  – 150 rpmFigura 195 –  $K_{3,25}$  – 200 rpmFigura 196 –  $K_{3,25}$  – 250 rpm

Figura 197 –  $K_{3,25}$  – 300 rpm

O parâmetro  $K_{3,25}$  não deve depender da taxa de evaporação, portanto deve apresentar um valor constante para cada velocidade de rotação. Porém este fato não foi comprovado para as baixas condições de agitação, especificamente para a velocidade de rotação de 50 rpm.

O valor médio de  $K_{3,25}$  é o valor que representa o parâmetro para cada velocidade de rotação. Com base nestes valores, pode-se fazer a seguinte análise.

O sumidouro de oxigênio durante o fenômeno de reoxigenação é quantificado pelo coeficiente de desoxigenação,  $K_{3,25}$ . O sumidouro de oxigênio tem origem na formação dos vórtices, que é uma função da velocidade de rotação. Portanto  $K_{3,25}$  é função da velocidade de rotação. Os valores de  $K_{3,25}$  são apresentados em função da velocidade de rotação na Figura 198.

Figura 198 –  $K_{3,25}$  em função do nível de agitação da água

Pode ser observado que  $K_{3,25}$  é proporcional à velocidade de rotação  $N$ . O gráfico da Figura 198 sugere que existem duas tendências distintas na relação  $K_{3,25} \times N$  separadas na altura de 150 e 200 rpm conforme já observado na seção 4.3.

Os resultados da Figura 198 confirmam a hipótese da existência de um sumidouro de oxigênio. Portanto pode-se concluir que quanto maior for a velocidade de rotação, mais significativo se torna o processo de desoxigenação conforme pode se verificar dos baixos valores de  $K_{3,25}$  relativos às baixas velocidades de rotação. Para a velocidade de rotação de 50 rpm o valor de  $K_{3,25}$  é muito próximo a zero sugerindo que não existe um sumidouro significativo neste nível de agitação.

#### 4.5.1.4 Estimativa de $K_2$ e $K_3$ pelo método do regime permanente

Os valores de  $K_2$  e  $K_3$  podem ser obtidos utilizando uma análise que é denominada neste trabalho por método do regime permanente, MRP. O método se baseia na observação das condições de equilíbrio do processo de reoxigenação. Observa-se que as equações 4 e 51 são formalmente idênticas:

$$C = C_S - (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (4)$$

$$C = \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S - \left( \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S - C_0 \right) \cdot e^{-(K_2 + K_3) \cdot t} \quad (51)$$

Em condições de regime permanente a equação 4 pode ser escrita como:

$$C = C'_S - (C'_S - C_0) \cdot e^{-K'_2 \cdot t} \quad (52)$$

em que

$$C'_S = \frac{K_2}{K_2 + K_3} \cdot C_S \quad (53)$$

$$K'_2 = K_2 + K_3 \quad (54)$$

Os valores de  $C'_S$  e  $K'_2$  são os parâmetros que foram estimados pelo modelo que não considera o sumidouro de oxigênio, equação 4, pois conforme

já discutido este modelo é referente às condições do processo (equação 52). O valor de  $C_S$  foi estimado utilizando-se o modelo da equação 51, mas também pode ser determinado experimentalmente, condições em que  $K_3$  é zero.

Portanto as equações 53 e 54 formam um sistema de duas equações cujas incógnitas são  $K_2$  e  $K_3$ .

Os valores de  $K_2$  e  $K_3$  são calculados, corrigidos para a temperatura de 25°C, e comparados com os valores estimados pelo ajuste da equação 51. A comparação entre os valores de  $K_2$  é apresentada na Figura 199 e a Figura 200 mostra a comparação entre os valores de  $K_3$ .

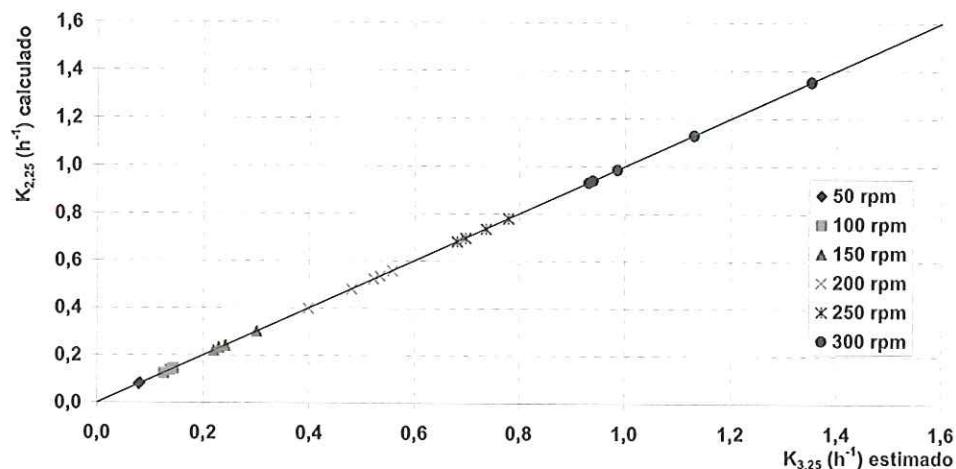


Figura 199 – Comparação entre  $K_{2,25}$  - MRP

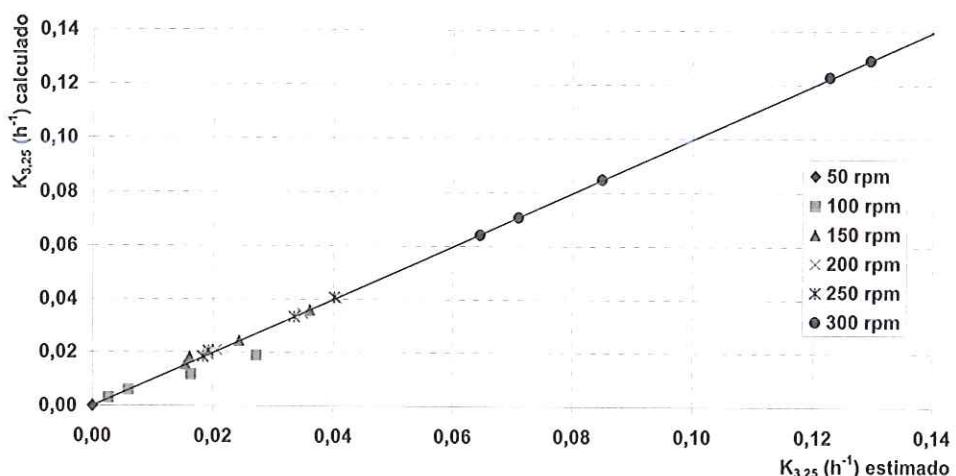


Figura 200 – Comparação entre  $K_{3,25}$  - MRP

A grande concordância entre os valores estimados e calculados se deve ao fato do prévio conhecimento de  $C'_S$ ,  $K'_2$  e  $C_S$ .

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho global foi bastante abrangente, envolvendo desde o projeto e construção dos equipamentos como o tanque para agitação da água, sistemas de umidificação e secagem do ar, passando pela seleção qualitativa da instrumentação e investindo bastante em estatística para melhor planejar os experimentos e extrair com mais eficiência informações sensíveis dos dados obtidos.

*a) A influência da umidade atmosférica no coeficiente de reoxigenação superficial*

Considerando-se o modelo da equação 4, ajustado aos dados experimentais utilizando a metodologia clássica, pode-se considerar que o objetivo principal foi atingido, qual seja da influência da taxa de evaporação sobre coeficiente de reoxigenação, conforme os resultados de  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação apresentados na seção 4.4. Os resultados mostram uma tendência crescente de  $K_{2,25}$  com o aumento da taxa de evaporação. A influência mais significativa foi verificada nos ensaios realizados com maiores níveis de agitação da água.

Considerando-se o modelo com sumidouro de oxigênio (equação 51), ajustado aos dados experimentais pôde-se verificar a mesma tendência de aumento no coeficiente de reoxigenação em função do aumento da taxa de evaporação.

Os modelos utilizados comprovam a hipótese de que a taxa de evaporação, que é função da umidade atmosférica, tem influência no processo de transferência de oxigênio através da interface gás-líquido, objetivo principal da pesquisa.

*b) Influência do nível de agitação sobre o coeficiente de reoxigenação*

A literatura documenta (SHULZ, 1989) a existência da relação entre  $K_{2,25}$  e o nível de agitação (em função da velocidade de rotação) apresentando tendência exponencial. A relação entre  $K_{2,25}$  e o nível de agitação (em função

da potência específica) apresenta tendência linear em gráfico bi-logarítmico. No entanto, para configurações físicas semelhantes à do sistema utilizado nesta pesquisa, observam-se dois regimes distintos de intensidade de transferência, separados aproximadamente na altura da velocidade de rotação de 150 rpm (seção 4.3). Os resultados sugerem que existe uma mudança no regime, primeiramente, com acentuada mudança na área da superfície livre, seguida possivelmente pela quebra da superfície livre para as maiores velocidades de rotação. A Figura 162 evidencia que existem diversas curvas de  $K_{2,25}$  em função da velocidade de rotação. As curvas cujos ensaios possuem maiores taxas de evaporação apresentam maiores valores de  $K_{2,25}$  indicando a influência da umidade atmosférica.

#### *c A utilização do modelo matemático adequado e a correta estimativa dos parâmetros do modelo*

A estimativa de  $K_{2,25}$  é muito susceptível às variações de  $C_s$  e  $C_0$ . Geralmente, a maioria das pesquisas nesta área, tem como o parâmetro principal o valor de  $K_2$ . Muitas vezes não se critica adequadamente o método empregado para a estimativa dos parâmetros. Neste trabalho procurou-se investir bastante na estimativa dos parâmetros com o objetivo de desenvolver um método adequado para esta estimativa, subsidiando as conclusões.

Os valores estimados de  $C_0$  não acarretam erros na interpretação do fenômeno. Caso o valor de  $C_0$  não seja da mesma ordem de grandeza do primeiro ponto experimental, sua estimativa é muito próxima deste valor. Este fato é justificável, pois o método utilizado para o ajuste analisa a somatória da diferença dos resíduos ao quadrado que pode fornecer valor de  $C_0$  diferente do primeiro ponto experimental se isto resultar em um menor valor da somatória.

O fato de a estimativa da concentração de saturação não corresponder aos valores tabelados para este parâmetro indicou que o modelo clássico não é adequado para a análise do processo de reoxigenação.

Verificou-se a hipótese de um sumidouro de oxigênio durante o processo de reoxigenação, objeto inovador na proposição do novo modelo. O ótimo ajuste do modelo proposto, evidenciado pelos elevados valores de  $R^2$ , indicou

que o novo modelo proposto foi uma alternativa bem sucedida e bastante coerente com o processo físico. Acredita-se que o modelo proposto signifique a possibilidade um avanço no estudo da transferência de gases através da interface água-atmosfera.

Com relação à estimativa dos parâmetros observa-se que quando o erro-padrão da estimativa possui valor elevado, acima de 5%, os valores de  $K_{2,25}$  não devem ser considerados. Nas análises de  $K_{2,25}$  em função da taxa de evaporação observa-se que estes pontos não estão em concordância com a tendência observada pelos demais pontos que possuem erro pequeno.

Fator relevante na análise da estimativa dos parâmetros é a distribuição dos resíduos que se aproxima de uma distribuição normal em quase todos os ensaios (seção 4.1). Em alguns casos verificaram-se resultados, para o gráfico dos resíduos em função do tempo (seção 4.1), tendenciosos em vez da aleatoriedade requerida para viabilizar o ajuste.

O método do regime permanente produz resultados compatíveis com a metodologia clássica (análise de regressão não linear – método dos mínimos quadrados). No entanto, os experimentos devem ser corretamente planejados. Sugestão: pode-se introduzir artificialmente um sumidouro de oxigênio, por exemplo um borbulhamento sub-superficial de nitrogênio. Este sumidouro tem o objetivo de aumentar o valor de  $K_3$ . A curva de reoxigenação deste processo fornece dados que permitem a estimativa de  $C'_S$  e  $K'_2$ . Um outro experimento pode ser realizado procurando-se eliminar todos os sumidouros e  $C_S$  é determinado. De posse destes valores,  $K_2$  e  $K_3$  podem ser calculados.

## 6. BIBLIOGRAFIA

---

ADENEY, W. E. & BECKER, H. G. – The Determination of the Rate of Solution of Atmospheric Nitrogen and Oxigen by Water. Part I. Philosophical Magazine S.6, v.38 n.225 p.317-337, September 1919.

ASCE – A standard for the Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, American Society of Civil Engineers, New York, 1984.

ASME – Fluid Meters, Their Theory and Application, report of ASME Research Committee on Fluid Meters, ASME, 1959.

BARBOSA J, A. R. - Desenvolvimento de metodologia para a determinação de coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1989.

BARBOSA J, A. R. - Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamentos naturais de água. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1997.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E. – Como Fazer Experimentos, Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. 2<sup>a</sup> edição, Editora da UNICAMP, Campinas, 2002.

BENNETT, J. P. & RATHBUN, R. E. – Reaeration in Open Channel Flow. Geological Survey Professional Paper, p 737, 1972.

BOWIE, G. L. et al – Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. 2 <sup>a</sup> ed. Georgia, Environmental Research Laboratory, p 455, 1985.

\* BRODKEY, R.S.; HERSEY, H.C. – Transport Phenomena – A Unified Approach, McGraw-Hill Book Co., New York, 1988.

532.05 B 864p  
536.2 B 784p te.3

BROWN, L. C.; BAILLOD, C. R. – Modeling and Interpreting Oxygen Transfer Data. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, v. 108 n.4, p 607-628, Aug, 1982.

BRUMLEY, B. – Turbulence Measurements Near the Free Surface in Stirred Grid Experiments, Cornell University, in Gas Transfer at Water Surfaces, D. Reidel Publishing Company, Holland, 1984.

BRUTSAERT, W. – Evaporation into the Atmosphere. Theory, History and applicarions. D. Reidel Publishing Company, 1982.

CASTELLAN, G. – Fundamentos de Físico Química, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1986.

CELERE, S. W. – Evaporação de água em superfície livre horizontal por convecção forçada, II Congresso Latino-americano de Transferência de calor e matéria, vol 1, pg 482-489, São Paulo, 1986.

CHAUDHURY, R.R.; SOBRINHO J.A.H.; WRIGHT R.M.; SREENIVAS M. – Dissolved Oxygen Modeling of the Blackstone River, Water Research, Vol. 32, nº 8, pp. 2400-2412, Elsevier Science Ltd., India, 1998.

CHERN, J.M.; CHOU, S.R.; SHANG C.S.- Effects of Impurities on Oxygen Transfer Rates in Diffused Aeration Systems, Wat. Res. Vol. 35, No. 13, pp. 3041–3048, Taiwan, 2001

CHUDACEK, M. W. – Does your tank bottom have the right shape?, Chemical Engineering, Oct. 1, pg 79-83, 1984.

COSTA, O. S. – Análise do Efeito da Umidade Atmosférica sobre o Coeficiente de Reaeração. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP,1992.

COULSON J.M.; RICHARDSON J.F. – Chemical Engineering, Volume 1, 3<sup>a</sup> edição, Pergamon Press, 1977.

CUNHA, A. C., - Transferência de gases em sistemas líquidos altamente agitados induzidos por hélice do tipo turbina em tanques cilíndricos.

Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1993.

DANCKWERTS, P.V. – Significance of Liquid-film Coefficients in gas Absorption. Industrial and Engineering Chemistry, v.43, n.6, p.1460-67, 1951.

DEWULF, J., HEIREMAN, B., LANGENHOVE, H. V. - The air/water exchange of volatile organic compounds from water in the transient and turbulent regime. Water Resources Vol. 32 No. 7 pp 2106-2112. Belgium, 1997.

DOEBELIN, E.O. - Measurement Systems: Application and Design. McGraw-Hill, 1990

EPA, U. S. Environmental Protection Agency – Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling, USA, 1985.

GAMESON, A. L. & TRUESDALE, G. A. – Some Oxygen studies in Streams. Institution Water Engineers J., v.13, n.12, p.175-187, 1967.

GIANSANTI, A. E. – A influência do índice de turbulência no valor do coeficiente de reaeração dos cursos d'água. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1986.

GIORGETTI, M. F. & GIANSANTI, A. E. – Avaliação do Nível de Turbulência em Águas Correntes e sua Correlação com o Coeficiente de Reaeração Superficial. São Carlos, ABES, Camboriú, Novembro, 1983.

GIORGETTI, M.F.; ROMA, W. N. L.; MANZOLLI, I.M.; CÔRTES S.G.C. – Reoxygenation and Deoxygenation of Industrial Waste Water in a Batch Reactor, experiments and modeling. International Symposium on Air-Water Gas Transfer, Germany, 1995.

GULLIVER, J. S. – Introduction to Air-Water Mass Transfer. Second International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces. American Society of Civil Engineering. Minneapolis, 1991.

HIGBIE, R. – The Rate of Absorption of Pure Gas into Still Liquid during Short Periods of Exposure. Trans. Am. Inst. Chem. Eng., v. 31 p365

HOLLAND, F.A. – Fluid Flow for chemical engineers. Edward Arnolds Publ., London, 82-105.

HOLLEY, E. R. – Oxygen transfer at the air-water interface. University of Illinois at Urbana-Champaign, Research Report, , p. 117-150, 1977

HOLLEY, E. R. & YOTSUKURA, N. – Field Techniques for Reaeration Measurements in Rivers. In: BRUTSAERT, W & JIRKS, G. H., ed. Gas Transfer at water surfaces. D Reidel Publishing Company, p.381-401, 1984.

HOUSE, L.B.; SKAVRONECK S. – Comparison of the Propane-Area Tracer Method and Predictive Equations for Determination of Stream-Reaeration Coefficients on Two Small Streams in Wisconsin. U. S. Geological Survey, Water Resources Investigations 80-105, New York, 1981.

JONES, FRANK E. – Evaporation of water: with emphasis on applications and measurements, Lewis Publisher Inc. 1992.

KISHINEVSKY, M. Kh. – Two Processes to the Theoretical Analysis of Absorption Process. Journal Appl. Chemistry. U.S.S.R. v. 28 pp.881-886, 1955.

KISHINEVSKY, M. Kh. & SEREBRIANSKY, V. T. – The Mechanism of Mass Transfer at the Gas-liquid Interface with Vigorous Stirring. Journal Appl. Chemistry. U.S.S.R. v. 289 pp.29-33, 1955.

KRENKEL,P. A. & ORLOB, G. T. – Turbulent diffusion and the Reaeration Coefficient. Journal of the Sanitary Engineering Division, New York, v.88, part 1, n.2, p.53-83, Mar. 1962.

LEU, H. G., OUYANG C.F., PAI T.Y. – Effects on Flow Velocity and Depth on the Rates of Reaeration and BOD Removal in a Shallow Open Channl, Water Science Technology, vol. 365, n° 8, pp. 57-67, Taiwan, 1997.

LEWIS, W. K. & WHITMAN, W. E – Principles of Gas Absorption. Absorption Symposium. Industrial and Engineering Chemistry, v. 16 n. 12 p. 1215-20, December, 1924

LISS, P. S. & SLATER, P. G. – Flux of Gases Across the Air Sea Interface. – Nature, v. 247 p. 181-184, Jan. 1974.

MACKAY, D. & LEINOMEN, P. J. – RATE OF Evaporation of Low Solubility Contaminants from Water Bodies to Atmosphere. Environmental Science & Technology, v.9,n.13,p.1178-80, Dec. 1975.

MAIA, G.D.N. – Análise dos parâmetros cinéticos no fenômeno de reoxigenação e desoxigenação na água. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 2003.

MAXWELL, W. H. & HOLLEY, E. R. – A Method for Deaeration Water. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v.95, n.1, p.577-580, Jan., 1969.

McCABE WARREN L.; SMITH JULIAN C. – Unit operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, 1993.

METCALF & EDDY - Wastewater engineering – Treatment, disposal and reuse. McGraw-Hill, Third edition New York, 1991.

MOMESSO, A. M. - Absorção e dessorção de gases através da interface ar-água em sistemas de agitação mecânica. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1996.

NEVERS, NOEL de – Air pollution control engineering, McGraw-Hill, 2000.

OEPA – Ohio Environmental Protection Agency – Determining the Reaeration Coefficient for Ohio Streams, Ohio1983.

OLIVEIRA, F. C de – Estudo da Influência da Umidade Atmosférica sobre o Coeficiente de Reaeração Superficial - Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1996.

ORLOB, GERALD T. - Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes, and Reservoirs, 1983.

RAINWATER, K. A. & HOLLEY, E. R. – Laboratory Studies on the Hydrocarbon Gas Tracer Technique for Reaeration Measuremts. Center for Research in Water Resources, Bureau of Engineering Research – University of Texas at Austin, p.114, Dec., 1983.

RATHBUN, R. E. et al – Preliminary Experiments with a Modified Tracers Technique for Measuring Stream Reaeration Coefficients. – U.S. Geological Survey. Open-File Report, v.256, n.75, Bay St. Louis, Mississippi, p.36, 1975.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. –Chemistry for Environmental Engineering, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill 1994.

SCHULZ, H. E. - Análise de uma formulação tentativa para processos de transferência em escoamentos turbulentos. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, 1991

SCHULZ, H. E. - Investigaçāo do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlaçāo com o nível de turbulência junto a superfície. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1989.

SCHULZ, H. E. - Transferência de gases em superfícies líquidas altamente agitadas . III Encontro Nacional de Ciências Térmicas ENCIT, Itapema, SC, 1990.

SHIAU, C. – Oxygen Transfer in Bubble and Bubbleless Aeration Systems. – PhD Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1995

SHIBA S. – Calibration of Nonsteady-DO-Measurement. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, EE1, p 278-282, April1981.

SILVEIRA, A. – Desenvolvimento de Metodologia para Determinaçāo do Coeficiente de Transferência Térmica na Interface Ar-Água. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 1999.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMMINATION OF WATER AND WASTEWATER. – 16<sup>a</sup> ed. , American Public Health Association. Washington, 1985.

STREETER, H.W. & PHELPS, E. B. – A study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. – Public Health Bulletin, n.46, U.S. Public Health Service, Washington, D. C. p. 75, 1925.

TERRON L. R. – Conceitos Fundamentais de Agitação de Líquidos, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Apostila de curso de Pós-Graduação, 1994.

TREYBAL, ROBERT E. – Mass Transfer Operation, McGraw-Hill, 3<sup>a</sup> edição, 1980.

TSIVOGLOU, E. C. et al – Tracer Measurement of Stream Reaeration II Field Studies. Journal of Federation, v.40, n.2, p.285-305, 1968.

UHL V. W.; GRAY J.B. – Mixing: theory and practice. Vol. 1, 2 e 3. New York, Academic Press, 1966.

660.284.2992 7031 m^y1. v2 v.1  
660.283 7044g CRHCP

ULBRECHT, J. J.; PATTERSON, G. K. - Mixing of Liquids by Mechanical Agitation, Gordon and Breach Sci. Pub., New York, 1985. *pebi*

Van Wylen, G.J.; Sonntag, R.E.; Borgnakke C.- Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1995.

WHITMAN, W. E. – The Two-Film Theory of Gas Absorption. Chemical and Metallurgical Engineering. V.29,n.4, pp 146-148, 1923.

YOTSUKURA, N.; STEDFAST D. A.; DRAPER R. E.; BRUTSAERT, W.H. – An Assesment of Steady-State Propane Gas Tracer Method for Reaeration, Tehe Cowaselon Creek. USGS Water Investigations Report, 83-4183, New York, 1983.