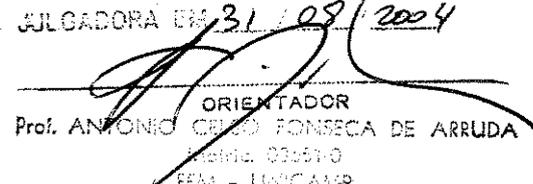


ESTE DOCUMENTO  
TESE DEFENDIDA POR Luis Melchert Faber  
Schmutzler E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 31/09/2004

  
ORIENTADOR  
Prof. ANTONIO CELSO FONSECA DE ARRUDA  
Matrícula: 031571-0  
FEM - UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação de oxigenadores de sangue  
utilizando princípios de transferência de massa  
e técnica de perda de carga.**

Autor: Luis Melchert Faber Schmutzler  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso F. de Arruda  
Co-orientador: Dr. Waldyr Parolari Novello

08/04

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS**

**Avaliação de oxigenadores de sangue  
utilizando princípios de transferência de massa  
e técnica de perda de carga.**

Autor: Luís Melchert Faber Schmutzler  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda  
Co-orientador: Dr. Waldyr Parolari Novello

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Materiais e processos de fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2004  
S.P . – Brasil

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| UNIDADE    | OC                                    |
| Nº LHAMADA | UNICAMP<br>Sch86a                     |
| V          | EX                                    |
| TOMBO BC/  | 62547                                 |
| PROC.      | 16-86-05                              |
| C          | <input type="checkbox"/>              |
|            | D <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO      | 11,00                                 |
| DATA       | 10/3/05                               |
| Nº CPD     |                                       |

Bil. id. 348541

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sch86a

Schmutzler, Luís Melchert Faber

Avaliação de oxigenadores de sangue utilizando princípios de transferência de massa e técnica de perda de carga / Luís Melchert Faber Schmutzler.--Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Antonio Celso Fonseca de Arruda, Waldyr Parolari Novello.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Oxigenadores. 2. Análise funcional. 3. Massa transferênci. 4. Fluorcarbonos. I. Arruda, Antonio Celso Fonseca de. II. Novello, Waldyr Parolari. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Avaliação de oxigenadores de sangue utilizando  
princípios de transferência de massa e técnica  
de perda de carga.**

Autor: **Luís Melchert Faber Schmutzler**

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda**

Co-orientador: **Dr. Waldyr Parolari Novello**

---

**Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, Presidente**

**Instituição: FEM UNICAMP**

---

**Profa. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia**

**Instituição: FEM UNICAMP**

---

**Profa. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire**

**Instituição: FEM UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Roger Josef Zemp**

**Instituição: FEQ UNICAMP**

---

**Prof. Dr. José Francisco Biscegli**

**Instituição: IDPC/SP**

Campinas, 31 de Agosto de 2004

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho aos que querem fazer deste mundo um lugar melhor.  
Paz na Terra aos HUMANOS de boa vontade, e boa vontade aos de nem tanta.

---

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores, que me mostraram os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Aos técnicos das oficinas por seus serviços.

Desejo fazer um agradecimento especial às Senhoras Bibliotecárias da BAE / UNICAMP, pois sua colaboração ao providenciar artigos de periódicos que não fazem parte do acervo da Universidade, foi muito importante.

E o sexto sentido da espécie humana será.....  
.....ler e escrever.

Este direito universal do ser humano deveria ser levado mais a sério.

Esta é uma homenagem aos professores, desde o mais humilde e não menos importante que ensina uma criança no jardim de infância a pegar em um lápis, até o orientador, que ensina o caminho para expandir os limites do conhecimento de nossa espécie.

LMFS 2004

## Resumo

SCHMUTZLER, Luis Melchert Faber, *Avaliação de oxigenadores de sangue utilizando princípios de transferência de massa e técnicas de perda de carga*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 281 p. Tese (Doutorado).

Oxigenadores de sangue tipo de membrana são construídos para trocarem gases de respiração através de uma área de contato, a sua chamada área de troca. Devido a características do processo de fabricação, esta área pode sofrer variações. Neste trabalho procurou-se desenvolver métodos de avaliação da variação desta área, por meio da medição da transferência de massa e da perda de carga. A técnica utilizando transferência de massa gerou dois métodos de avaliação, um utilizando como fase líquida a água destilada e o outro, uma emulsão de perfluorcarbono. No intuito de assegurar a funcionalidade da emulsão disponível e assim a precisão do trabalho, foi desenvolvido um método de validação para se avaliar a capacidade de dissolver Oxigênio da mesma. O outro método para avaliação da área de troca é baseado na perda de carga, sofrida por um fluxo de gás ao percorrer o circuito de membranas do oxigenador sob teste. Todos os métodos apresentaram resultados suficientemente satisfatórios, permitindo estabelecer diferenças de desempenho entre as unidades testadas e a validação da área de troca, por comparação com um padrão sendo que, os métodos de transferência de massa com água e o da perda de carga com gás são métodos não destrutivos. Os resultados obtidos utilizando-se o método com gás forneceram uma melhor resolução.

### *Palavras-Chave:*

Oxigenadores de sangue, método de análise, transferência de massa, perfluorcarbono, sangue artificial, perda de carga.

## **Abstract**

SCHMUTZLER, Luís Melchert Faber, *Membrane blood oxygenator evaluation using mass transfer principles and head loss techniques*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 281 p. Tesis (Doctorate)

Membrane blood oxygenators are built to exchange perspiration gases thru an exchange area, but due to the fabrication process characteristics, this exchange area may vary. In this work, exchange area evaluation methods were developed using mass transfer and head loss techniques. The mass transfer technique generated two methods, one using distilled water and other using perfluorocarbon emulsion. Envisaging assurance on the functionality of the perfluorocarbon emulsion and by the way, the quality of the work, a method for evaluating the Oxygen solving capability was also developed. The other area evaluation method is based on a gas flow head loss while passing thru the membrane inside of the under testing device. All methods presented satisfactory results, allowing establishing performance differences among tested units and the area validation by comparing to a standard device. The mass transfer water based and the gas flow head loss are non destructive methods. The results provided by the gas flow head loss method achieved a better level of resolution.

### *Key-Words:*

Blood oxygenators, analytical method, mass transfer, perfluorocarbon, artificial blood, head loss.

## Índice

|                                                                                                                                   |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Lista de Figuras.....                                                                                                             | xvii  |
| Lista de Tabelas.....                                                                                                             | xxix  |
| Nomenclatura.....                                                                                                                 | xxxii |
| Capítulo 1.....                                                                                                                   | 1     |
| Introdução                                                                                                                        |       |
| Objetivo.....                                                                                                                     | 4     |
| Capítulo 2.....                                                                                                                   | 5     |
| Revisão da Literatura.                                                                                                            |       |
| 2-1 As principais linhas de pesquisa na procura de um substituto artificial para as funções de transporte de gases do sangue..... | 5     |
| 2-1-1 Substitutos baseados em Hemoglobina.....                                                                                    | 6     |
| 2-1-2 Substitutos baseados em Perfluorcarbonos.....                                                                               | 7     |
| 2-1-2-a História dos perfluorcarbonos e como vieram a ser utilizados no desenvolvimento do Sangue artificial.....                 | 7     |
| 2-1-2-b A origem dos perfluorcarbonos, PFCs.....                                                                                  | 9     |
| 2-1-2-c Como dissolvem gases.....                                                                                                 | 10    |
| 2-1-2-d A evolução e o surgimento de novas moléculas.....                                                                         | 10    |
| 2-1-2-e Os emulsificantes.....                                                                                                    | 11    |
| 2-1-2-f O transporte de gases no sangue e na emulsão de perfluorcarbono.....                                                      | 11    |
| 2-1-2-g Os produtos até agora obtidos e uma comparação com o sangue verdadeiro.....                                               | 12    |
| 2-2 Oxigenadores de sangue para circulação extra corpórea.....                                                                    | 13    |

|                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| 2-2-1 A evolução dos equipamentos e os principais tipos..... | 13     |
| 2-2-1-a Bolhas.....                                          | 14     |
| 2-2-1-b Discos.....                                          | 14     |
| 2-2-1-c Líquido-líquido.....                                 | 14     |
| 2-2-1-d A membrana.....                                      | 15     |
| 2-2-2 Os oxigenadores de membrana.....                       | 15     |
| 2-2-2-a Uma visão do que já foi estudado. ....               | 16     |
| 2-2-2-b O que é estudado neste trabalho.....                 | 17     |
| 2-3 Busca em bancos de patentes.....                         | 17     |
| <br>Capítulo 3.....                                          | <br>18 |

### Modelagem Teórica.

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3-1: A força motriz da transferência de massa.....                             | 19 |
| 3-1-1: Transporte de massa difusivo.....                                       | 19 |
| 3-1-2: Transporte massa convectivo.....                                        | 20 |
| 3-1-3: Lei de Henry.....                                                       | 21 |
| 3-1-4: Lei de Raoult.....                                                      | 22 |
| 3-1-5: Lei de Dalton.....                                                      | 22 |
| 3-1-6: Números de Reynolds, Sherwood, Schmit e a equação de Coulburn.....      | 22 |
| 3-1-7: Pressão de vapor, a Equação de Antoine.....                             | 23 |
| 3-1-8: Transporte de massa em Colunas de Recheio e Trocadores de Membrana..... | 24 |
| 3-2: O método estacionário.....                                                | 27 |
| 3-2-1: Descrição.....                                                          | 28 |
| 3-2-2: Balanço de massa.....                                                   | 28 |
| 3-2-3: Limitações.....                                                         | 29 |
| 3-3: O método do balanço.....                                                  | 29 |
| 3-3-1: Balanço de massa.....                                                   | 30 |
| 3-3-2: Simulação numérica da transferência de massa.....                       | 31 |
| 3-3-3: Limitações.....                                                         | 34 |
| 3-3-4: Taxa de amostragem.....                                                 | 34 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3-3-5: Escolha do intervalo considerado para regressão linear.....            | 34 |
| 3-4: Emulsões de perfluorcarbono.....                                         | 35 |
| 3-4-1: Emulsões e sua interação com os instrumentos.....                      | 36 |
| 3-4-2: Determinação da Constante de Henry para Emulsões.....                  | 39 |
| 3-5: A cela de acumulação.....                                                | 42 |
| 3-5-1: Interações do Oxímetro Polarográfico com a montagem experimental.....  | 43 |
| 3-6: A perda de carga da fase gasosa no oxigenador.....                       | 47 |
| 3-6-1: Correção da queda de pressão na fase gasosa.....                       | 48 |
| 3-6-2: Escoamento da fase gasosa.....                                         | 49 |
| 3-6-3: Simulação do escoamento da fase gasosa.....                            | 52 |
| 3-7: Fórmulas para correlações para ajustes de curvas com duas variáveis..... | 53 |
| 3-8: Ensaios de transporte de massa normalizados.....                         | 54 |
| Capítulo 4.....                                                               | 55 |

## Experimental e Métodos

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4-1: Ensaios preliminares.....                                                                               | 60 |
| 4-1-1: Estudos relacionados ao funcionamento dos instrumentos.....                                           | 60 |
| 4-1-1-a: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo ABL5.....                                   | 61 |
| 4-1-1-b: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo YSI 5300.....                               | 62 |
| 4-1-1-c: A linearidade do YSI 5300 em função da $pO_2$ .....                                                 | 62 |
| 4-1-1-d: Determinação do tempo de resposta a um degrau para o YSI 5300.....                                  | 62 |
| 4-1-1-e: Comparação entre as leituras dos oxímetros ABL 5 e do YSI 5300.....                                 | 62 |
| 4-1-1-f: Análise do efeito do tempo de espera em uma seringa.....                                            | 63 |
| 4-1-2: Explorando o comportamento do oxímetro polarográfico YSI 5300 em relação à montagem experimental..... | 63 |
| 4-1-3: Avaliação da Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono, PFCE.....                          | 64 |
| 4-1-3-a: Ensaio variando a concentração da emulsão de perfluorcarbono.....                                   | 65 |
| 4-1-3-b: Ensaios para a determinação da Constante de Henry para emulsão de perfluorcarbono.....              | 65 |
| 4-1-3-c: Efeito da emulsão de perfluorcarbono na concentração de Oxigênio.....                               | 67 |
| 4-1-4: Determinação do volume da fase líquida e do tempo de amostragem.....                                  | 67 |

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4-1-5: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer as fibras dos oxigenadores..                                                                                                    | 68 |
| 4-1-5-a: Determinação experimental.....                                                                                                                                                           | 68 |
| 4-1-5-b: Simulação numérica.....                                                                                                                                                                  | 69 |
| 4-1-6: Determinação das características da coluna.....                                                                                                                                            | 70 |
| 4-1-6-a: Área específica do recheio da coluna.....                                                                                                                                                | 70 |
| 4-1-6-b: Porosidade do recheio.....                                                                                                                                                               | 70 |
| 4-1-6-c: Retenção de líquido.....                                                                                                                                                                 | 70 |
| 4-1-6-d: Teste de inundação.....                                                                                                                                                                  | 71 |
| 4-1-6-e: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer e o recheio da coluna.....                                                                                                    | 72 |
| 4-1-7: Experimentação numérica para a seleção de dados.....                                                                                                                                       | 73 |
| 4-1-7-a: Simulação numérica do $K_L a$ .....                                                                                                                                                      | 73 |
| 4-1-7-b: O efeito da variação da janela de seleção de pontos aplicada aos ensaios de 1 a 12.....                                                                                                  | 73 |
| 4-1-7-c: Comparação do efeito da variação da janela e da faixa seleção de pontos aplicada ao ensaio 53 com a simulação numérica.....                                                              | 74 |
| 4-1-7-d: Aplicação do método da faixa de seleção comparada com a simulação numérica para os conjuntos de ensaios {449, 451, 453}, {17, 19, 21} e {79, 81}.....                                    | 74 |
| 4-2: Ensaios para a determinação experimental dos coeficientes de troca de massa de oxigenadores de sangue e de uma coluna de recheio.....                                                        | 75 |
| 4-2-1: Ensaios com água, volume padronizado em 1,4 l.....                                                                                                                                         | 78 |
| 4-2-1-a: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com $0,25m^2$ de área de troca utilizando $H_2O$ .....                                                                             | 78 |
| 4-2-1-b: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com $0,5m^2$ de área de troca utilizando $H_2O$ .....                                                                              | 79 |
| 4-2-1-c: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com $0,5m^2$ de área de troca utilizando $H_2O$ , aumentando a taxa de aquisição de dados visando ao detalhamento do processo..... | 79 |
| 4-2-1-d: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com $1,6m^2$ de área de troca utilizando $H_2O$ .....                                                                              | 80 |
| 4-2-1-e: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com $1,6m^2$ de área de troca utilizando $H_2O$ , aumentando o tempo do experimento até a saturação.....                           | 81 |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4-2-1-f: Legenda de identificação dos ensaios com a coluna de recheio com 2,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O..... | 81  |
| 4-2-2: Ensaios com Emulsão de perfluorcarbono PFCE, diluído a 3,7 % w/v, volume padronizado em 1,4 l.....                                     | 82  |
| 4-2-2-a: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                   | 82  |
| 4-2-2-b: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                    | 83  |
| 4-2-2-c: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                    | 84  |
| Capítulo 5.....                                                                                                                               | 85  |
| <b>Resultados e Discussões</b>                                                                                                                |     |
| 5-1: Ensaios preliminares.....                                                                                                                | 85  |
| 5-1-1: Estudos relacionados ao funcionamento dos instrumentos.....                                                                            | 85  |
| 5-1-1-a: Análise da estabilidade da leitura de pO <sub>2</sub> feita pelo ABL5.....                                                           | 85  |
| 5-1-1-b: Análise da estabilidade da leitura de pO <sub>2</sub> feita pelo YSI 5300.....                                                       | 86  |
| 5-1-1-c: A linearidade do YSI 5300 em função da pO <sub>2</sub> .....                                                                         | 87  |
| 5-1-1-d: Determinação do tempo de resposta a um degrau para o YSI 5300.....                                                                   | 88  |
| 5-1-1-e: Comparação entre as leituras dos oxímetros ABL 5 e do YSI 5300.....                                                                  | 89  |
| 5-1-1-f: Análise do efeito do tempo de espera em uma seringa.....                                                                             | 90  |
| 5-1-2: Explorando o comportamento do oxímetro polarográfico YSI 5300 em relação à montagem experimental.....                                  | 92  |
| 5-1-3: Avaliação da Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono, PFCE.....                                                           | 96  |
| 5-1-3-a: Ensaio variando a concentração da emulsão de perfluorcarbono.....                                                                    | 96  |
| 5-1-3-b: Ensaios para a determinação da Constante de Henry para emulsão de perfluorcarbono.....                                               | 97  |
| 5-1-3-c: Efeito da emulsão de perfluorcarbono na concentração de Oxigênio.....                                                                | 100 |
| 5-1-4: Determinação do volume da fase líquida e do tempo de amostragem.....                                                                   | 103 |
| 5-1-5: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer fibras dos oxigenadores.....                                                | 106 |
| 5-1-5-a: Determinação experimental.....                                                                                                       | 106 |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5-1-5-b: Simulação numérica.....                                                                                                                                                                        | 107 |
| 5-1-6: Determinação das características da coluna.....                                                                                                                                                  | 110 |
| 5-1-6-a: Área específica do recheio da coluna.....                                                                                                                                                      | 110 |
| 5-1-6-b: Porosidade do recheio.....                                                                                                                                                                     | 110 |
| 5-1-6-c: Retenção de líquido.....                                                                                                                                                                       | 110 |
| 5-1-6-d: Teste de inundação.....                                                                                                                                                                        | 111 |
| 5-1-6-e: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer e o recheio da coluna.....                                                                                                          | 111 |
| 5-1-7: Experimentação numérica para a seleção de dados.....                                                                                                                                             | 113 |
| 5-1-7-a: Simulação numérica do $K_L a$ .....                                                                                                                                                            | 113 |
| 5-1-7-b: O efeito da variação da janela de seleção de pontos aplicada aos ensaios de 1 a 12.....                                                                                                        | 113 |
| 5-1-7-c: Comparação do efeito da variação da janela e da faixa seleção de pontos aplicada ao ensaio 53 com a simulação numérica.....                                                                    | 121 |
| 5-1-7-d: Aplicação do método da faixa de seleção comparada com a simulação numérica para os conjuntos de ensaios {449, 451, 453}, {17, 19, 21} e {79, 81}.....                                          | 126 |
| 5-2: Resultados da determinação experimental dos coeficientes de troca de massa de oxigenadores de sangue e de uma coluna de recheio.....                                                               | 132 |
| 5-2-1: Resultados dos ensaios com água, volume padronizado em 1,4 l.....                                                                                                                                | 132 |
| 5-2-1-a: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com $0,25\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ .....                                                                            | 132 |
| 5-2-1-b: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com $0,5\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ .....                                                                             | 148 |
| 5-2-1-c: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com $0,5\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ , aumentando a taxa de aquisição de dados visando o detalhamento do processo..... | 150 |
| 5-2-1-d: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com $1,6\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ .....                                                                             | 152 |
| 5-2-1-e: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com $1,6\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ , aumentando o tempo do experimento até a saturação.....                          | 154 |
| 5-2-1-f: Resultados dos ensaios com a coluna de recheio com $2,5\text{m}^2$ de área de troca utilizando $\text{H}_2\text{O}$ .....                                                                      | 155 |
| 5-2-1-g: Comparação entre os resultados obtidos para os oxigenadores com água.....                                                                                                                      | 158 |

|                                                                                                                                                 |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 5-2-2: Resultados dos ensaios com Emulsão de Perfluorcarbono PFCE, diluído a 3,7% w/v, volume padronizado em 1,4 l.....                         | 161     |
| 5-2-2-a: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                                   | 161     |
| 5-2-2-b: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                                    | 164     |
| 5-2-2-c: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                                    | 166     |
| 5-2-2-d: Comparação entre os resultados obtidos para os oxigenadores com PFCE.....                                                              | 168     |
| 5-3: Comparação entre os resultados obtidos com água e PFCE para os oxigenadores.....                                                           | 171     |
| 5-3-a: Comparação dos K <sub>L</sub> as utilizando as duas fases líquidas.....                                                                  | 171     |
| 5-3-b: Comparação dos K <sub>G</sub> s utilizando as duas fases líquidas.....                                                                   | 172     |
| 5-3-c: Comparação dos K <sub>V</sub> s utilizando as duas fases líquidas.....                                                                   | 174     |
| 5-4: Comparação realizada com os resultados dos ensaios de forma normalizada.....                                                               | 176     |
| 5-4-a: Comparação de K <sub>L</sub> as com escalas normalizadas.....                                                                            | 176     |
| 5-4-b: Comparação de K <sub>G</sub> s com escalas normalizadas.....                                                                             | 177     |
| 5-4-c: Comparação de K <sub>V</sub> s com escalas normalizadas.....                                                                             | 178     |
| 5-5: Resultados das correlações empíricas.....                                                                                                  | 179     |
| 5-6: Comparação entre o método de transferência de massa com o método da perda de carga para avaliar a área disponível para troca de gases..... | 180     |
| <br>Capítulo 6.....                                                                                                                             | <br>183 |
| Conclusões e sugestões para próximos trabalhos.                                                                                                 |         |
| 6-1: Conclusões sobre instrumentos e montagens experimentais.....                                                                               | 183     |
| 6-2: Conclusões sobre teste de emulsão de perfluorcarbono.....                                                                                  | 184     |
| 6-3: Conclusões sobre de área de troca disponível em oxigenadores de membrana com gás.....                                                      | 185     |
| 6-4: Conclusões sobre transferência de massa em oxigenadores de membrana.....                                                                   | 185     |
| 6-4-a: Teste de área disponível para troca de massa.....                                                                                        | 186     |
| 6-4-b: Coeficientes de troca de massa em oxigenadores de membrana.....                                                                          | 186     |
| 6-5: Sugestões para próximos trabalhos.....                                                                                                     | 187     |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Referências Bibliográficas.....                                                                                                                                            | 188 |
| Anexo I - Sites úteis na Internet.....                                                                                                                                     | 196 |
| Anexo II - Trabalhos apresentados pelo Autor desta Tese em Congressos durante o período de doutorado.....                                                                  | 197 |
| Anexo III - Trabalhos publicados pelo Autor desta Tese durante o período de doutorado.....                                                                                 | 199 |
| Anexo IV - Relatório de busca de Patentes – Âmbito Global.....                                                                                                             | 201 |
| Anexo V - Gráficos em 3D dos coeficientes de troca de massa apresentados separadamente para os diversos dispositivos e para as duas fases líquidas utilizadas.....         | 203 |
| Anexo VI - Gráficos apresentando separadamente para os diversos dispositivos estudados o efeito da queda de pressão na fase gasosa sobre os valores dos $K_L$ obtidos..... | 233 |
| Anexo VII - Gráficos comparativos entre as correlações numéricas para os diversos dispositivos estudados.....                                                              | 244 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Oxigenadores de sangue tipo membrana com áreas de troca de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> .....                  | 2  |
| Figura 2: Processo de fabricação de oxigenadores tipo membrana.....                                                       | 3  |
| Figura 3: Representação das fases líquida e gasosa em um trocador com membrana.....                                       | 26 |
| Figura 4: Representação das fases líquida e gasosa em um trocador tipo Coluna de Recheio.....                             | 27 |
| Figura 5: Esquema conceitual fora de escala de uma partícula emulsificada em água.....                                    | 38 |
| Figura 6: Vistas em topo e em corte do sensor Polarográfico utilizado pelo YSI5300.....                                   | 39 |
| Figura 7: Representação do efeito da perda de carga na fase gasosa sobre a $p^*O_2$ .....                                 | 48 |
| Figura 8: Descrição dos acidentes aos quais o fluxo de gás de teste é submetido.....                                      | 51 |
| Figura 9: Estratégia de procura de informações aplicada neste trabalho.....                                               | 57 |
| Figura 10: Diagrama dos ensaios de avaliação dos dispositivos de troca de massa.....                                      | 58 |
| Figura 11: Fluxograma explicativo das interações entre conceitos básicos.....                                             | 59 |
| Figura 12: Montagem experimental para avaliar o efeito da espera em seringa.....                                          | 61 |
| Figura 13: A montagem experimental para teste de emulsão de perfluorcarbono.....                                          | 66 |
| Figura 14: Montagem utilizada para medir a perda de carga contra a passagem do gás.....                                   | 69 |
| Figura 15: Descrição da montagem utilizada para o teste de retenção de líquido.....                                       | 71 |
| Figura 16: Montagem para a medição da perda de carga da fase gasosa no recheio da coluna.....                             | 72 |
| Figura 17: Montagem utilizada para a avaliação do coeficiente de troca de massa no caso dos oxigenadores de membrana..... | 76 |
| Figura 18: Montagem utilizada para a avaliação do coeficiente de troca de massa no caso da coluna com recheio.....        | 77 |

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 19: Vista do laboratório com a montagem experimental.....                                                                                                                                                          | 77  |
| Figura 20:Variação de $pO_2$ devido a influência do material da seringa utilizada para conter a amostra.....                                                                                                              | 85  |
| Figura 21: Corrente em $\mu A$ em função da pressão de Oxigênio em atmosferas. Dados do manual do fabricante do YSI 5300 sobre o sistema do eletrodo combinado do Polarímetro YSI5300.....                                | 87  |
| Figura 22: Dados do manual do fabricante do YSI 5300 colocados em um gráfico e interpolados para se achar a função do tempo de resposta do sensor.....                                                                    | 88  |
| Figura 23: Comparação entra as leituras realizadas pelo ABL 5 e pelo YSI 5300.....                                                                                                                                        | 89  |
| Figura 24: Exemplo de curva de calibração para a conversão da leitura do YSI de % para $pO_2$ em mmHg.....                                                                                                                | 90  |
| Figura 25: Desvio causado nas leituras de $pO_2$ pelo tempo de espera na seringa.....                                                                                                                                     | 90  |
| Figura 26: Leitura normalizada ensaio 1.....                                                                                                                                                                              | 92  |
| Figura 27: Reynolds normalizado ensaio 1.....                                                                                                                                                                             | 92  |
| Figura 28: Leitura normalizada ensaio 2.....                                                                                                                                                                              | 92  |
| Figura 29: Reynolds normalizado ensaio 2.....                                                                                                                                                                             | 92  |
| Figura 30: Leitura normalizada ensaio 3.....                                                                                                                                                                              | 93  |
| Figura 31: Reynolds normalizado ensaio 3.....                                                                                                                                                                             | 93  |
| Figura 32: Leitura normalizada ensaio 4.....                                                                                                                                                                              | 93  |
| Figura 33: Reynolds normalizado ensaio 4.....                                                                                                                                                                             | 93  |
| Figura 34: Leitura normalizada ensaio 5.....                                                                                                                                                                              | 93  |
| Figura 35: Reynolds normalizado ensaio 5.....                                                                                                                                                                             | 93  |
| Figura 36: Efeito da composição da fase líquida e da pressão parcial de Oxigênio nas leituras do ABL5 e do YSI5300.....                                                                                                   | 96  |
| Figura 37: Dados obtidos de acordo com o balanço de massa aplicado aos 7 ensaios para a avaliação da proporção entre a Constante de Henry para $O_2$ a $37^\circ C$ na fase PFC da emulsão Oxypherol FC-43 e na água..... | 97  |
| Figura 38: Ensaios de saturação com Oxigênio de alíquotas de água e de emulsão de perfluorcarbono com dados apresentados em $pO_2$ x tempo.....                                                                           | 100 |
| Figura 39: Ensaios de saturação com Oxigênio de alíquotas de água, emulsão de perfluorcarbono com dados apresentados em concentração de $O_2$ em v/v x tempo.....                                                         | 101 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 40: Ensaio de oxigenação da água realizados com oxigenador com área de $0,25\text{m}^2$ e utilizando 3 e 3,6 litros de água.....                                                                        | 103 |
| Figura 41: Ensaio de oxigenação da água realizados em quadruplicata com oxigenador com área de $0,25\text{m}^2$ , utilizando 1,4 litro de água, vazões de gás e líquido a 0,5 l/min.....                       | 103 |
| Figura 42: Ensaio de oxigenação da água realizados em duplicata com oxigenador com área de $0,25\text{m}^2$ , utilizando 1,4 litro de água, vazões de gás a 2 l/min. e líquido a 1 l/min.....                  | 104 |
| Figura 43: Perda de carga em cm $\text{H}_2\text{O}$ para um fluxo de gás para três modelos de oxigenadores de membrana, onde $P = 0,25$ $M = 0,5$ e $G = 1,6 \text{ m}^2$ .....                               | 106 |
| Figura 44: Perda de carga em cm $\text{H}_2\text{O}$ para um fluxo de gás para três oxigenadores de membrana, com $0,5 \text{ m}^2$ . OxA1 refere-se ao oxigenador OxA após ficar 6 meses cheio de água.       | 106 |
| Figura 45: Efeito de secagem causado pelo fluxo do gás de teste em minutos sobre o oxigenador OxA1 mostrado na figura anterior.....                                                                            | 107 |
| Figura 46: Resultados de simulação numérica da perda de carga em função da variação da vazão de gás e do número de fibras viáveis.....                                                                         | 108 |
| Figura 47: Volume de líquido retido em função da vazão de operação da coluna.....                                                                                                                              | 111 |
| Figura 48: Superfície de queda de pressão na fase gasosa em função das vazões de gás e de líquido.....                                                                                                         | 112 |
| Figura 49: Ensaio de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com $0,25 \text{ m}^2$ de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 1, 3, 5 e 7.....                  | 114 |
| Figura 50: Ensaio 1, 3, 5, 7, 9 e 11 de extração do Oxigênio da água utilizando um oxigenador com $0,25 \text{ m}^2$ de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 1, 3, 5 e 7..... | 114 |
| Figura 51: Dados dos ensaios de saturação 1, 3, 5, 7, 9 e 11 convertidos na forma do ln da razão das $p\text{O}_2$ versus os delta t dos intervalos em que as alterações ocorreram.....                        | 115 |
| Figura 52: Dados do ensaio 7 calculados a partir das mesmas fontes mas em três diferentes escalas, sendo que em cada caso de cálculo, todos os dados estavam na mesma escala.....                              | 116 |
| Figura 53: Dados dos ensaios de extração 2, 4, 6, 8, 10 e 12 convertidos na forma do ln da razão das $p\text{O}_2$ versus os delta t dos intervalos em que as alterações ocorreram.....                        | 117 |
| Figura 54: Quatro graus de discriminação de pontos de inicialização aplicados ao ensaio 7.....                                                                                                                 | 117 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 55: Regressão linear aplicada aos primeiros 4 pontos seleccionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.....                                                                                                                                               | 118 |
| Figura 56: Regressão linear aplicada aos primeiros 8 pontos seleccionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.....                                                                                                                                               | 119 |
| Figura 57: Regressão linear aplicada aos primeiros 10 pontos seleccionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.....                                                                                                                                              | 119 |
| Figura 58: Coeficientes de correlação obtido para as regressões lineares dos ensaios 1, 3, 5, 7, 9 e 11 variando o número de pontos utilizados de 4 a 14.....                                                                                                                                        | 120 |
| Figura 59: $K_{La}$ s obtidos para as regressões lineares dos ensaios 1, 3, 5, 7, 9 e 11 variando o número de pontos utilizados de 4 a 14, utilizando a mesma discriminação inicial....                                                                                                              | 120 |
| Figura 60: Ensaio de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,25 m <sup>2</sup> de área. Vazões de gás 4 l/min, e de líquido 1,25 l/min.....                                                                                                                                    | 121 |
| Figura 61: Quatro graus de discriminação de pontos de inicialização aplicados ao ensaio 53....                                                                                                                                                                                                       | 122 |
| Figura 62: Efeito dos posicionamentos e das aberturas da janela de seleção de dados para a regressão linear no $K_{La}$ obtido para o ensaio 53. A seleção chega a variar o valor em até seis vezes.....                                                                                             | 123 |
| Figura 63: Comparação entre dados experimentais do ensaio 53 e curvas calculadas pelas simulações com os $K_{La}$ s mínimo e máximo da Figura 63 e o obtido utilizando o método da faixa.....                                                                                                        | 125 |
| Figura 64: Comparação entre dados experimentais do ensaio 53 e curvas calculadas pelas simulações com o $K_{La}$ obtido pelo método da faixa com correção de meia queda de pressão na fase gasosa.....                                                                                               | 126 |
| Figura 65: Ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,25 m <sup>2</sup> de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 17, 19, e 21, e gás 2 l/min, e de líquido 1 l/min para 79 e 81.....                                                   | 127 |
| Figura 66: Curvas simuladas contra dados experimentais para os ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,25 m <sup>2</sup> de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 17, 19, 21, e de gás 2 l/min, e líquido 1 l/min para 79 e 81..... | 128 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 67: Curva simulada contra dados experimentais dos ensaios 449, 451 e 453 de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,5 m <sup>2</sup> de área. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min.....                                                                        | 128 |
| Figura 68: Curva simulada contra os dados experimentais do ensaio 450 de extração do Oxigênio da água com utilizando um oxigenador com 0,5 m <sup>2</sup> de área, complementar ao ensaio 451. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min.....                                                    | 129 |
| Figura 69: Curva simulada contra os dados experimentais dos ensaios 450, 452 e 454 de extração do Oxigênio da água com utilizando um oxigenador com 0,5 m <sup>2</sup> de área, condições de inicialização diferentes levam a atrasos diferentes. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min..... | 129 |
| Figura 70: Curvas simuladas contra os dados experimentais para os ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando a coluna com 2,5 m <sup>2</sup> de área. Vazões de gás 1,0 l/min, e de líquido 1,0 l/min para os ensaios 687, 697, 707.....                                                   | 130 |
| Figura 71: Curva simulada contra os dados experimentais dos ensaios 688, 698, 708, de extração do Oxigênio da água utilizando a coluna com 2,5 m <sup>2</sup> de área, condições de inicialização diferentes levam a atrasos diferentes. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,0 l/min.....          | 130 |
| Figura 72: Mapa dos resultados apresentados nos itens 5-2-1 e 5-2-2.....                                                                                                                                                                                                                             | 132 |
| Figura 73: Ensaio de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de 0,25 m <sup>2</sup> .....                                                                                                                                                                                                      | 133 |
| Figura 74: Ensaio de extração do Oxigênio da água com oxigenador de 0,25 m <sup>2</sup> .....                                                                                                                                                                                                        | 133 |
| Figura 75: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 4 l/min.....                                                                                                                                                                                                                            | 134 |
| Figura 76: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 2 l/min.....                                                                                                                                                                                                                            | 134 |
| Figura 77: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 1 l/min.....                                                                                                                                                                                                                            | 135 |
| Figura 78: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 0,5 l/min.....                                                                                                                                                                                                                          | 135 |
| Figura 79: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 4 l/min.....                                                                                                                                                                                                                          | 136 |
| Figura 80: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 2 l/min.....                                                                                                                                                                                                                          | 136 |
| Figura 81: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 1 l/min.....                                                                                                                                                                                                                          | 137 |
| Figura 82: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 0,5 l/min.....                                                                                                                                                                                                                        | 137 |
| Figura 83: K <sub>L</sub> as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O <sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,25 m <sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.....                         | 138 |
| Figura 84: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do K <sub>L</sub> a.....                                                                                                                                                                                               | 140 |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 85: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do $K_{La}$ ..                                                                                                                                                      | 140 |
| Figura 86: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,25\text{ m}^2$ com água.....                                           | 141 |
| Figura 87: $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com $0,25\text{ m}^2$ com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto..... | 143 |
| Figura 88: Mapa tridimensional dos $K_{La}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25\text{ m}^2$ na saturação ( $K_{La}$ ) e na extração ( $-K_{La}$ ) do Oxigênio da água.....                                                          | 144 |
| Figura 89: Mapa tridimensional dos $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25\text{ m}^2$ na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.....                                                                   | 145 |
| Figura 90: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25\text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio da água.....                                                            | 146 |
| Figura 91: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de $0,25\text{ m}^2$ variando a temperatura.....                                                                                                                                      | 147 |
| Figura 92: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de $0,25\text{ m}^2$ variando a temperatura.....                                                                                                                                        | 147 |
| Figura 93: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de $0,5\text{ m}^2$ .....                                                                                                                                                             | 148 |
| Figura 94: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de $0,5\text{ m}^2$ .....                                                                                                                                                               | 148 |
| Figura 95: $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp16, para oxigenador com $0,5\text{ m}^2$ com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto..... | 149 |
| Figura 96: $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com $0,5\text{ m}^2$ com água.....                                           | 149 |
| Figura 97: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de $0,5\text{ m}^2$ , taxa de aquisição aumentada para 1 a cada 5 segundos para detalhamento do ensaio.....                                                                           | 150 |
| Figura 98: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de $0,5\text{ m}^2$ , taxa de aquisição aumentada para 1 a cada 5 segundos para detalhamento do ensaio.....                                                                             | 151 |
| Figura 99: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de $1,6\text{ m}^2$ .....                                                                                                                                                             | 152 |
| Figura 100: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de $1,6\text{ m}^2$ .....                                                                                                                                                              | 152 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 101: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 $m^2$ com água.....        | 153 |
| Figura 102: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de extração de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 $m^2$ com água.....         | 153 |
| Figura 103: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com coluna de recheio com 2,5 $m^2$ ....                                                                                                                  | 155 |
| Figura 104: Ensaios de extração do Oxigênio da água com coluna de recheio com 2,5 $m^2$ .....                                                                                                                   | 155 |
| Figura 105: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp25, para coluna de recheio com 2,5 $m^2$ com água..... | 157 |
| Figura 106: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de extração de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para coluna de recheio com 2,5 $m^2$ com água.....  | 157 |
| Figura 107: Mapa tridimensional dos $K_L$ as obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 $m^2$ e para a coluna com 2,5 $m^2$ , na saturação da água com Oxigênio...                          | 158 |
| Figura 108: Mapa tridimensional dos $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 $m^2$ e para a coluna com 2,5 $m^2$ , na saturação e na extração do Oxigênio da água.....            | 159 |
| Figura 109: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para os oxigenadores de membrana com áreas de 0,25 0,5 1,6 $m^2$ e para a coluna com 2,5 $m^2$ , na saturação da água com Oxigênio.....                    | 160 |
| Figura 110: Ensaios de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 0,25 $m^2$ .....                                                                                                                        | 161 |
| Figura 111: Ensaios de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 0,25 $m^2$ .....                                                                                                                          | 161 |
| Figura 112: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,25 $m^2$ com PFCE.....       | 162 |
| Figura 113: $K_L$ as obtidos experimentalmente em ensaios de extração de $O_2$ e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,25 $m^2$ com PFCE.....        | 163 |
| Figura 114: Ensaios de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 0,5 $m^2$ .....                                                                                                                         | 164 |

|                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 115: Ensaio de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 0,5 m <sup>2</sup> .....                                                                                                                                       | 164 |
| Figura 116: K <sub>L</sub> as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O <sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,5 m <sup>2</sup> com PFCE..... | 165 |
| Figura 117: K <sub>L</sub> as obtidos experimentalmente em ensaios de extração de O <sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,5 m <sup>2</sup> com PFCE.....  | 165 |
| Figura 118: Ensaio de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 1,6 m <sup>2</sup> .....                                                                                                                                     | 166 |
| Figura 119: Ensaio de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 1,6 m <sup>2</sup> .....                                                                                                                                       | 166 |
| Figura 120: K <sub>L</sub> as obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O <sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 m <sup>2</sup> com PFCE..... | 167 |
| Figura 121: K <sub>L</sub> as obtidos experimentalmente em ensaios de extração de O <sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 m <sup>2</sup> com PFCE.....  | 167 |
| Figura 122: Mapa tridimensional dos K <sub>L</sub> as obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> na saturação (K <sub>L</sub> a) e na extração (-K <sub>L</sub> a) do Oxigênio da PFCE....     | 168 |
| Figura 123: Mapa tridimensional dos K <sub>G</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> na saturação (K <sub>G</sub> ) e na extração (-K <sub>G</sub> ) do Oxigênio da PFCE.....       | 169 |
| Figura 124: Mapa tridimensional dos K <sub>V</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> na saturação (K <sub>V</sub> ) e na extração (-K <sub>V</sub> ) do Oxigênio da PFCE.....       | 170 |
| Figura 125: Mapa tridimensional dos K <sub>L</sub> as obtidos para os oxigenadores de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                            | 171 |
| Figura 126: Mapa tridimensional dos K <sub>G</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m <sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                                          | 172 |
| Figura 127: Mapa tridimensional dos K <sub>G</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m <sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                                | 173 |
| Figura 128: Mapa tridimensional dos K <sub>V</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m <sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                                          | 174 |
| Figura 129: Mapa tridimensional dos K <sub>V</sub> s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 m <sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                                  | 175 |

- Figura 130: Mapa tridimensional dos  $K_{L}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.....176
- Figura 131: Mapa tridimensional dos  $K_{G}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.....177
- Figura 132: Mapa tridimensional dos  $K_{V}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.....178
- Figura 133: Comparação dos resultados e das resoluções obtidas pelos métodos da transferência de massa e da perda de carga na fase gasosa na avaliação da área efetiva de troca para três oxigenadores de membrana.....181
- Figura 134: Mapa tridimensional dos  $K_{L}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L,a}$ ) e na extração ( $-K_{L,a}$ ) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.....203
- Figura 135: Mapa tridimensional dos  $K_{G}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.....204
- Figura 136: Mapa tridimensional dos  $K_{V}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{V,s}$ ) e na extração ( $-K_{V,s}$ ) do Oxigênio da água.....205
- Figura 137: Mapa tridimensional dos  $K_{L}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,5 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L,a}$ ) e na extração ( $-K_{L,a}$ ) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.....206
- Figura 138: Mapa tridimensional dos  $K_{G}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,5 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.....207
- Figura 139: Mapa tridimensional dos  $K_{V}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,5 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{V,s}$ ) e na extração ( $-K_{V,s}$ ) do Oxigênio da água.....208
- Figura 140: Mapa tridimensional dos  $K_{L}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L,a}$ ) e na extração ( $-K_{L,a}$ ) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.....209
- Figura 141: Mapa tridimensional dos  $K_{G}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.....210

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 142: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio da água.....   | 211 |
| Figura 143: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para a coluna de recheio com área de $2,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{La}$ ) e na extração ( $-K_{La}$ ) do Oxigênio da água.....       | 212 |
| Figura 144: Mapa tridimensional dos $K_{Gs}$ obtidos para coluna de recheio com área de $2,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.....                | 213 |
| Figura 145: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para a coluna de recheio com área de $2,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio da água.....        | 214 |
| Figura 146: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{La}$ ) e na extração ( $-K_{La}$ ) do Oxigênio da PFCE..... | 215 |
| Figura 147: Mapa tridimensional dos $K_{Gs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.....        | 216 |
| Figura 148: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.....  | 217 |
| Figura 149: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{La}$ ) e na extração ( $-K_{La}$ ) do Oxigênio da PFCE.....  | 218 |
| Figura 150: Mapa tridimensional dos $K_{Gs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.....         | 219 |
| Figura 151: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.....   | 220 |
| Figura 152: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{La}$ ) e na extração ( $-K_{La}$ ) do Oxigênio da PFCE.....  | 221 |
| Figura 153: Mapa tridimensional dos $K_{Gs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.....         | 222 |
| Figura 154: Mapa tridimensional dos $K_{Vs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.....   | 223 |
| Figura 155: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                | 224 |
| Figura 156: Mapa tridimensional dos $K_{LAs}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....                                 | 225 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 157: Mapa tridimensional dos $K_{L}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE..... | 226 |
| Figura 158: Mapa tridimensional dos $K_{GS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE..... | 227 |
| Figura 159: Mapa tridimensional dos $K_{GS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....  | 228 |
| Figura 160: Mapa tridimensional dos $K_{GS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....  | 229 |
| Figura 161: Mapa tridimensional dos $K_{VS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,25 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE..... | 230 |
| Figura 162: Mapa tridimensional dos $K_{VS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $0,5 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....  | 231 |
| Figura 163: Mapa tridimensional dos $K_{VS}$ obtidos para o oxigenador de membrana com área de $1,6 \text{ m}^2$ na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.....  | 232 |
| Figura 164: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 233 |
| Figura 165: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 233 |
| Figura 166: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 234 |
| Figura 167: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 234 |
| Figura 168: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 235 |
| Figura 169: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 235 |
| Figura 170: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 236 |
| Figura 171: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 236 |
| Figura 172: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 237 |
| Figura 173: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 237 |
| Figura 174: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 238 |
| Figura 175: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 238 |
| Figura 176: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 239 |
| Figura 177: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 239 |
| Figura 178: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 240 |
| Figura 179: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                             | 240 |
| Figura 180: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                  | 241 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 181: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                                                                            | 241 |
| Figura 182: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                                                                 | 242 |
| Figura 183: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                                                                            | 242 |
| Figura 184: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do $K_{La}$ .....                                                                                                                 | 243 |
| Figura 185: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores $K_{La}$ .....                                                                                                            | 243 |
| Figura 186: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,25\text{ m}^2$ com água..... | 244 |
| Figura 187: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de extração de $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,25\text{ m}^2$ com água.....   | 245 |
| Figura 188: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,5\text{ m}^2$ com água.....  | 245 |
| Figura 189: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para 6 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $1,6\text{ m}^2$ com água.....      | 246 |
| Figura 190: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 8 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com coluna de recheio com $2,5\text{ m}^2$ com água.....        | 246 |
| Figura 191: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,25\text{ m}^2$ com PFCE..... | 247 |
| Figura 192: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador de membrana com $0,5\text{ m}^2$ com PFCE.....  | 247 |
| Figura 193: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com $O_2$ com oxigenador com $1,6\text{ m}^2$ com PFCE.....              | 248 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                              |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabela 1: A solubilidade de gases em líquidos.....                                                                                                                                                                           | 37      |
| Tabela 2: Planilha de variáveis experimentais exploradas nos ensaios.....                                                                                                                                                    | 64      |
| Tabela 3 : Características dos componentes utilizados nos ensaios.....                                                                                                                                                       | 75      |
| Tabelas 4,5,6 e 7: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O. ....                                                                          | 78      |
| Tabelas 8, 9 e 10: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O.....                                                                            | 79      |
| Tabelas 11 e 12: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O, aumentando a taxa de aquisição de dados visando ao detalhamento do processo..... | 79 e 80 |
| Tabelas 13, 14 e 15: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O.....                                                                          | 80      |
| Tabela 16: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O, aumentando o tempo do experimento até a saturação.....                                 | 81      |
| Tabelas 17, 18 e 19: Legenda de identificação dos ensaios com a coluna de recheio com 2,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando H <sub>2</sub> O.....                                                                    | 81      |
| Tabelas 20, 21 e 22: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE. ....                                                                                    | 82      |
| Tabelas 23, 24 e 25: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                                                                                      | 83      |
| Tabelas 26, 27 e 28: Legendas de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m <sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.....                                                                                      | 84      |
| Tabela 29: Constantes achadas pelos processos de regressão linear.....                                                                                                                                                       | 94      |
| Tabela 30: Fatores de qualidade das correlações empíricas ajustadas.....                                                                                                                                                     | 95      |
| Tabela 31: Compilação dos dados obtidos em $H_{(H_2O)}/H_{(PFCE)}$ .....                                                                                                                                                     | 97      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 32: Propriedades estatísticas dos dados analisados.....                                                                                                                                                                                                                  | 98  |
| Tabela 32: Constantes ajustadas para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com oxigenador de membrana com 0,25 m <sup>2</sup> com água.....                                                                                                        | 142 |
| Tabela 33: Constantes ajustadas para as Correlações Empíricas para cada dispositivo estudado, com água e com emulsão de perfluorcarbono. São mostradas as constantes da melhor forma encontradas para o ajuste e para a correlação simples, a cexp com 12, 16 ou 25 pontos..... | 179 |
| Tabela 34: Continuação das constantes achadas para as Correlações Empíricas.....                                                                                                                                                                                                | 179 |
| Tabela 35: Comparação entre os resultados obtidos na avaliação da área útil para troca. O Ox-B, de menor área, foi tomado como padrão para comparação.....                                                                                                                      | 180 |

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$a0$  a  $a8$  = Constantes ajustadas.

$A$  = Área considerada para o cálculo de transporte de massa.

$A$  = Área da superfície de troca em  $\text{cm}^2$ , dimensão:  $[\text{L}^2]$ .

$A_{(fibra)}$  = Área de escoamento interna da fibra.

$C_i$  = Concentração do soluto  $i$  (gás) na fase líquida em questão.

$C(O_2)_{entra}$ ,  $C(O_2)_{sai}$  = As concentrações do gás na entrada e saída do aparelho.

$D$  = Diâmetro interno da fibra ou tubo.

$d$  = Distância entre o Ímã e o sensor.

$D_{ab}$  = Coeficiente de difusão da espécie  $a$  no meio  $b$ , em  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

$Db$  = Diâmetro da base do cone.

$f_f$  = Fator de Fanning.

$f_h$  = Proporção da altura =  $Hl / Hf$

$f_u$  = Proporção do volume =  $Vl / Vf$

$f_u$  = Proporção do volume =  $Vl / Vf$

$f_v$  = Proporção entre a altura e a base do cone =  $Db / (2 + Hf)$

$g$  = Aceleração da gravidade.

$H$  = Constante de Henry  $\text{mmHg} \times \text{l} / \text{ml}(O_2)$ , dimensão:  $[\text{L}^2 / \text{t}^2]$ .

$Hc$  = Altura do cone do Elemeyer até o gargalo.

$Hf$  = Altura do cone do Elemeyer.

$h_L$  = Perda de carga do gás ao atravessar a fibra.

$Hl$  = Altura do líquido dentro do Elemeyer.

$i$  = iésimo componente.

$K_G$  = Coeficiente global de transferência de massa referenciado à fase gasosa, dimensão:  $[\text{t} / \text{L}]$ .

$K_i$  = Coeficiente associado a acidentes.

$K_{La}$  = Coeficiente global de transferência de massa volumétrico, dimensão:  $[1 / t]$ .  
 $K_L$  = Coeficiente global de transferência de massa referenciado a fase líquida, dimensão:  $[L / t]$ .  
 $K_L$  = Coeficiente convectivo de transferência de massa referenciado à fase líquida.  
 $K_m$  = Coeficiente convectivo de transferência de massa.  
 $K_V$  = Coeficiente global de transferência de massa de um dispositivo, dimensão:  $[L \cdot t]$ .  
 $L$  = Comprimento.  
 $L_i$  = Comprimento do ímã em metros.  
 $l$  = litro.  
 $M_a$  = Massa molecular da espécie a.  
 $M_{H_2O}$  = Massa de água no frasco.  
 $M_{Imã}$  = Massa do ímã utilizado no agitador.  
 $M_i/l$  = Relação entre a massa do ímã e do líquido no frasco =  $M_{ímã} / M_{H_2O}$   
 $N_{ag}$  = Número adimensional de aproveitamento geométrico =  $f_u \cdot f_h \cdot f_v$   
 $N^\circ_a$  = Fluxo molar da espécie a.  
 $N_{(fibras)}$  = Número de fibras.  
 $N(O_2)$  = Número de moles de Oxigênio transferido por minuto.  
 $R_o$  = Constante universal dos gases.  
 $P$  = Pressão absoluta do sistema.  
 $p$  = Pressão parcial em mmHg, dimensão:  $[M / (L \cdot t^2)]$ .  
 $p_i$  = Pressão parcial do componente i no sistema, ou tensão de i.  
 $P_i^{vap}$  = Pressão de vapor do componente i na temperatura do sistema.  
 $Q$  = Vazão do gás em  $m^3/s$ .  
 $Re$  = Número de Reynolds.  
 $Sc$  = Número de Schmit.  
 $Sh$  = Número de Sherwood.  
 $t$  = Tempo em segundos, dimensão:  $[t]$ .  
 $T$  = Temperatura em Kelvin.  
 $(t)$  = Refere-se ao instante t em que está acontecendo o experimento.  
 $(t_0)$  = Refere-se ao instante em que foi considerado o início do experimento.  
 $V$  = Velocidade.  
 $V_{liq.}$  = Vazão volumétrica do líquido em l/min.

$V_{liq}$  = Vazão volumétrica de líquido, em litros por minuto.

$V_l$  = Volume de líquido utilizado, em litros.

$V$  = Volume de fase líquida em litros.

$V_f$  = Volume do frasco utilizado, em litros.

$V_{(gás)}$  = Velocidade do gás em m/s.

$V_{gás}$  = Vazão volumétrica do gás em l/min.

$v/v$  = Proporção em volume por volume.

$w$  = Rotação do agitador, em rps.

$w/v$  = Proporção em peso por volume.

$X$  = Distância.

$x_i$  = Fração molar do componente  $i$  na fase líquida.

$y_i$  = Fração molar do componente  $i$  na fase gasosa.

.....

### ***Letras Gregas***

$\rho$  = Densidade em  $kg/m^3$

$\mu$  = Viscosidade em  $kg/(m.s)$

$\nu(T)$  = Viscosidade cinemática em  $m^2/s$

$\Delta P$  = Diferença de pressão em mmHg

.....

### ***Abreviações***

PFC – perfluorcarbono.

PFCE - emulsão de perfluorcarbono.

### ***Siglas***

DEMA - Departamento de Engenharia de Materiais.

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica.

# Avaliação de oxigenadores de sangue utilizando princípios de transferência de massa e técnica de perda de carga.

## Capítulo 1

### Introdução

Quando é necessária uma intervenção cirúrgica em órgãos do sistema circulatório e/ou respiratório, tipicamente coração e/ou pulmões, existe a necessidade de se prover ao corpo do paciente de um serviço de suporte à vida, ou seja, às funções vitais exercidas pelos órgãos a serem reparados cirurgicamente enquanto o trabalho é executado. Para intervenções no coração, há equipamentos para bombeamento de sangue baseados na tecnologia de bombas peristálticas, que exercem a função deste durante o procedimento cirúrgico. Para substituir ou incrementar, auxiliando o funcionamento dos pulmões, ou seja, das trocas de gases do corpo, utiliza-se os oxigenadores de sangue.

A técnica de apoio ao procedimento cirúrgico, onde é feita a substituição temporária das funções do coração e pulmões, é chamada de Circulação Extra Corpórea, e é montada em torno de bombeamento peristáltico e oxigenador de sangue. Quando é necessário apenas um reforço nas funções de troca de gases, utiliza-se um oxigenador de sangue intravascular, e ECMO.

Existem diversos tipos de oxigenadores de sangue, estando entre os principais, os de bolhas que podem ser do tipo ascendente ou descendente, o de discos que expõe um filme de sangue ao contato com o gás e o de membranas, sendo este último o objeto deste estudo.

Atualmente o controle de qualidade na produção de oxigenadores de sangue tipo membrana é feito procedendo-se dois tipos de teste: o de vazamentos entre os compartimentos destinados às fases gasosa e líquida. A estanqueidade é fundamental pois o vazamento de bolhas de gás na circulação sanguínea do paciente pode ser fatal. E a checagem da capacidade de transferência de gases para uma amostra de sangue, que é um teste realizado por amostragem seguindo o padrão da AAMI<sup>1</sup>, “Association for Advancement of Medical Instrumentation”, Associação para o

Avanço de Instrumentação Médica. Este teste é considerado destrutivo, pois a contaminação com sangue de boi inviabiliza a utilização posterior do dispositivo testado, por isso trata-se de um teste realizado por amostragem. O sangue sofre deterioração rápida neste tipo de ensaio, além de inutilizar o dispositivo testado.

Este trabalho pretende estudar a viabilidade de se utilizar substitutos sintéticos do sangue do tipo emulsão de perflourcarbono, PFCE, ou água para efetuar os testes, visando a alcançar uma redução de custos através da agilização do procedimento e da não inutilização do dispositivo testado, abrindo assim a possibilidade de que todos os aparelhos sejam testados também em relação a transferência de gases, assegurando um melhor controle de qualidade e agregando confiabilidade.

### Aspectos práticos

Oxigenadores de membrana como os mostrados na Figura 1 são fabricados enrolando-se um feixe de algumas fibras em paralelo em um carretel. As extremidades deste são encapsuladas em um polímero termo-fixo, por exemplo epóxi, e cortadas em uma operação mecânica. O corte visa a liberar as pontas expondo a luz das fibras, que serão as entradas e saídas destas de forma que resultara em um conjunto com muitas fibras curtas conectadas em paralelo para o fluxo de gás. Mas devido a um efeito característico da operação de corte, um número aleatório de fibras tem uma de suas extremidades entupidas nesta etapa, inutilizando-as e reduzindo o número de fibras operacionais, conseqüentemente a área disponível para a troca de gases e assim a capacidade de troca do dispositivo, como descrito na Figura 2.



Figura 1: Oxigenadores de sangue tipo membrana com áreas de troca de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> .

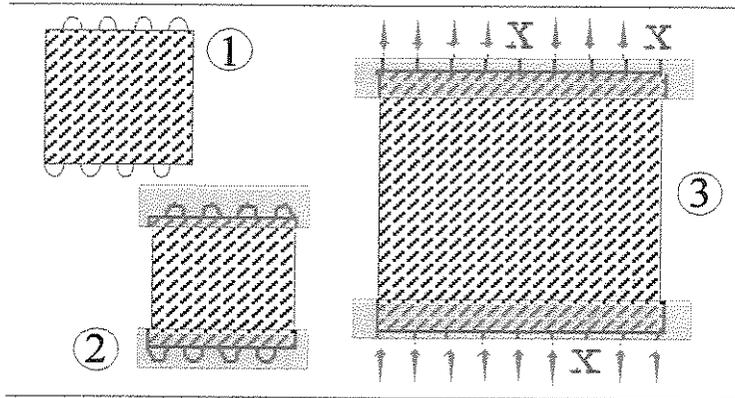


Figura 2: Processo de fabricação de oxigenadores tipo membrana, 1- Membranas enroladas em um carretel, 2- Pontas encapsuladas, 3- Pontas cortadas sendo que são representadas em vermelho as fibras com entupimento e em verde as livres.

A taxa de transferência de massa de um oxigenador de sangue tipo membrana é uma função do coeficiente de transferência de massa, da área de troca e do gradiente de concentração de gases. As vazões de gás e líquido influenciam a espessura das camadas limite e assim os coeficientes individuais de transporte de massa em cada fase, os quais governam a resistência ao transporte nos filmes, líquido e gasoso, que recobrem a área de troca do dispositivo, sendo que a resistência total à transferência de massa, é dada pela soma das resistências em cada parte do caminho percorrido.

Sendo assim, devemos desenvolver um método que cheque o teor de fibras com entupimento do dispositivo fabricado sem o condenar. Uma forma direta de se fazer isso é medir a taxa de transferência de massa do oxigenador para que se possa compará-la a um padrão e saber se a área de troca está dentro de um nível satisfatório. Outra forma, indireta, é medir a perda de carga ao escoamento de gás dentro das fibras, e compará-la a um padrão considerado satisfatório.

Introduções completas às questões de mercado, procedimentos para a utilização e desenvolvimento de oxigenadores são providas por Novelo<sup>2,3</sup>, Biscegli<sup>4</sup> e Souza<sup>5</sup>.

**Objetivo:** A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de procedimentos para a avaliação da área de troca e para o estudo do comportamento do coeficiente de transporte de massa em oxigenadores de sangue sendo que, utilizem como fluido a ser oxigenado, água e um substituto sintético de sangue. Para cumprir com a tarefa, deve também ser desenvolvido um procedimento para avaliar a Constante de Henry para uma emulsão de perfluorcarbono, o substituto sintético de sangue, a ser utilizado no estudo dos coeficientes de transporte de massa, e um outro procedimento para a avaliação da perda de carga sofrida por um fluxo de gás ao percorrer o interior das fibras dos oxigenadores de membrana estudados. A técnica da perda de carga sofrida por um fluxo de gás é utilizada na correção da pressão parcial do gás no cálculo do coeficiente de transporte de massa, e também é utilizada para avaliar indiretamente a área disponível para a troca de gases no dispositivo estudado. O interesse nos métodos utilizando água e a queda de pressão de um gás está no fato de não contaminarem o dispositivo testado podendo assim o teste não destrutivo ser aplicado a todas as unidades produzidas. O interesse no teste com emulsão de perfluorcarbono esta no detalhamento que pode ser obtido na avaliação do dispositivo testado devido a capacidade da emulsão de dissolver mais gás.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

Este trabalho é um estudo sobre como testar oxigenadores de sangue tipo membrana no que se refere a área disponível para a troca de gases. São abordados dois tipos de métodos. Um baseado na transferência de massa, utilizando como fase líquida a água ou um substituto sintético para as funções de transferência de gases realizada pelo sangue, uma emulsão de perfluorcarbono, PFCE. O outro, baseado na perda de carga utilizando um fluxo de gás.

Para utilizar um PFCE, um método para avaliar sua funcionalidade foi necessário e assim também foi desenvolvido. Por ser a intercessão de áreas, há focos distintos e assim a necessidade de se apresentar informações sobre diversos tópicos. Portando neste capítulo é apresentada uma revisão dividida em partes, sendo uma sobre oxigenadores de sangue discorrendo sobre evolução histórica, tipos, funcionamento e aplicação; e outra, sobre sangue artificial, seu conceito e as duas principais linhas de pesquisa nesta área.

A parte de balanço de massa e modelagem matemática do experimento, fenômenos do transporte e termodinâmica e simulações numéricas, é convenientemente descrita no Capítulo 3.

#### **2-1 As principais linhas de pesquisa na procura de um substituto artificial para as funções de transporte de gases do sangue.**

A literatura a respeito de substitutos para o sangue nas funções de transferência de gases é bastante extensa. Só no Web of Science constam atualmente mais de oitocentas referências para “artificial blood”, mas há ainda o Probe, Compendex, Chemical Abstracts, e o Biological Abstracts que indexam periódicos com artigos a esse respeito. Uma vez que o objetivo deste

trabalho não é desenvolver “sangue artificial”, o autor pretende apenas passar uma visão geral sobre o que existe na área.

Há muitos problemas associados com transfusões de sangue <sup>6</sup>. Além das limitações biológicas como tipagem sanguínea, vida útil relativamente curta, necessidade de estoque com temperatura controlada e a transferência de anticorpos, há os problemas patológicos, como transferência de células cancerosas, bactérias, vírus e os recentemente descobertos prions (doença de Creutzfeld-Jacob, ou Vaca Louca), e os problemas sociais como a proibição devida a questões religiosas <sup>7</sup>. Há também em alguns países mais desenvolvidos a previsão de colapso por desequilíbrio de oferta e demanda no suprimento de sangue. Estas são as principais motivações não-econômicas para justificar o desenvolvimento de um substituto sintético para o sangue, nas funções de transferência de gases. Informações adicionais podem ser encontradas nos sites da Internet [1, 2, 3, 4, 5 e 6 ] listados no Anexo 1.

Na perspectiva histórica <sup>8</sup>, o estudo das interações do sangue com o ar remetem a Serventus no ano de 1533, sendo que atualmente são duas as principais linhas de pesquisa em carregadores artificiais de gases para a substituição temporária do sangue <sup>9</sup>: a de origem animal onde se tenta desenvolver produtos a base de hemoglobina e a sintética, com produtos a base de perfluorcarbonos.

### 2-1-1 Hemoglobínicos.

A hemoglobina humana assim como a de origem bovina é encontrada em sua forma funcional em tetrâmeros, que quando aplicados na circulação sanguínea rapidamente dissociam em moléculas simples e causam problemas de toxicidade renal, não servindo assim para serem utilizadas como substitutos ou auxiliares na tarefa de transporte de gases na circulação.

A hemoglobina extracelular livre extraída de minhocas da espécie *Arenicola marina*, é uma exceção. A molécula desta espécie é cerca de 50 vezes maior que a humana, não sendo rapidamente dissociada e portanto, apresenta a vantagem de não afetar os rins <sup>10</sup>.

Um problema na utilização da hemoglobina é a garantia de uma fonte de matéria prima pura e livre de contaminantes biológicos. Visando encontrar uma forma conveniente para se utilizar a

hemoglobina, pesquisas tem sido realizadas e soluções como ligar moléculas com glutaraldeído, polimerizá-las ou encapsulá-las em vesículas de lipo-membranas formando pseudo células tem sido propostas. Há descrições de experimentos com bactérias e animais geneticamente modificados para produzir hemoglobina humana <sup>11,12</sup>.

## **2-1-2 Perfluorcarbonos.**

Como é de se esperar, quando há duas possíveis soluções para algum problema, há um debate intensamente disputado em torno de qual é a melhor opção. No caso dos candidatos a substitutos artificiais para a tarefa de carreadores de gases não é diferente. Alguns grupos defendem os perfluorcarbonos e perflubromos, ou seja, sintéticos em geral, outros, os derivados de hemoglobinas. Há prós e contras para ambos <sup>9, 12, 13</sup>.

### **2-1-2-a História dos perfluorcarbonos e como vieram a ser utilizados no desenvolvimento do Sangue artificial.**

Os perfluorquímicos foram pesquisados inicialmente visando servirem como refrigerantes de reatores nucleares na época do início do Projeto Manhattan. Eram necessárias substâncias com elevada estabilidade química, resistência à temperatura e às radiações de neutrons e gama. No entanto, descobriram que estes compostos também dissolviam muito oxigênio.

No final da década de 1950, perfluorcarbonos começaram a ser utilizados como aditivos lubrificantes na formulação de um combustível denominado JP-7, destinado para jatos de alta performance, especificamente para o motor J-58-P2 que equipava os SR-71 BlackBird, construídos pela equipe de Kelly Johnson na divisão "Skunk Works" da Lockheed, para a CIA operar as missões Oxcart <sup>14</sup>.

Em 1966 esta preciosa ferramenta foi utilizada por Clark <sup>15</sup> e sua equipe, que realizaram seu célebre experimento de respiração líquida. Mamíferos foram submersos por horas respirando um perfluorcarbono, PFC, em equilíbrio com uma atmosfera de oxigênio. Este experimento

inspirou pesquisadores nas áreas associadas à biomédica com a possibilidade de um substituto para o sangue nas funções de transferência de gases; e biotecnologia com a possibilidade de suprir culturas altamente aeróbias com maiores concentrações do gás.

Em 1968 Geyer <sup>16</sup> produziu em laboratório os primeiros animais chamados de “bloodless animals” ou animais sem sangue, pois todo seu sangue havia sido substituído por emulsões de perfluorcarbono, PFCE, resultando em um hematócrito menor que 1%. Os animais viveram por um período de vida normal, não apresentando sinais de debilitações por terem sido submetidos às transfusões das quais se recuperavam rapidamente; além disso exibiam imunidade ao envenenamento com monóxido de carbono enquanto estavam com a emulsão correndo nos seus sistemas circulatórios. Com isso foi mostrado ser possível produzir um substituto para as funções de transferência de gases executadas pelo sangue.

No ano de 1976, a Green Cross Corporation <sup>17</sup> do Japão colocou no mercado a primeira formulação padronizada a base de perfluorcarbonos emulsificados, PFCE, para pesquisas exploratórias com animais e culturas. Tratava-se do Oxypherol FC-43®, uma emulsão de Perflourotributilamina 20% w/v com o emulsificante Pluronic F-68 em água, com um tamanho médio de partícula da ordem de 0,086 micrometros.

No início dos anos 80 já havia um crescimento no número de pesquisas na área, facilitadas principalmente pela iniciativa da Green Cross Corporation de produzir emulsões padronizadas para o consumo em pesquisas.

Foram publicados trabalhos sobre a físico-química de emulsões de perfluorcarbonos, entre eles, um estudo comparativo entre emulsões, eritrócitos e soluções de hemoglobina utilizando sensores polarográficos visando o estudo da difusão do O<sub>2</sub> dentro das partículas de PFC e das células <sup>18</sup>, outro utilizando sensores polarográficos visando os fatores que restringem o transporte de O<sub>2</sub> para dentro e para fora da partícula de PFC, tais como a camada de emulsificante e o diâmetro da partícula <sup>19</sup>, e um terceiro, que trata de um estudo sobre suprimento de Oxigênio para uma cultura de células imobilizadas utilizando também perfluorcarbono emulsificado <sup>20</sup>. Em

todos estes trabalhos os sensores polarográficos mostram não serem capazes de dar uma leitura direta das concentrações do gás.

Nem todos os instrumentos são capazes de medir a concentração de oxigênio em uma amostra que esteja emulsificada, por exemplo, sensores polarográficos não são. A leitura máxima que pode ser obtida é a  $pO_2$  na fase que entra em contato com o sensor, no caso, a água, ficando uma parcela do gás como que escondida, fora do alcance do sensor, dificultando cálculos de concentrações. Assim sendo, o problema pode ser resolvido com uma conta, utilizando os dados fornecidos pelo fabricante da emulsão baseada na quantidade estimada de PFC utilizada no produto, no quanto o PFC é capaz de dissolver do gás e a pressão disponível deste.

Na Tabela 1 no Capítulo 3, há dados de solubilidade de vários gases em diversas substâncias mostrados como Constantes de Henry <sup>21</sup>.

#### **2-1-2-b A origem dos perfluorcarbonos, PFCs.**

As halogenações de alcanos com Cloro ou Bromo são reações exotérmicas. Com Flúor, é fortemente exotérmica podendo ser explosiva, sendo necessária sua diluição deste em gás inerte, e se dá de forma completamente aleatória, o que leva a formação de inúmeros isômeros <sup>22</sup>.

No início das pesquisas com PFCs visando transporte de gases, havia um sério problema de toxicidade causado pela presença de isômeros, os quais devido as semelhanças nas propriedades físicas são difíceis de serem separados. Havia basicamente dois tipos de processos: o da Halogenação em fase gasosa diluída com gás inerte e catalisada com  $CoF_3$ , e a Halogenação eletroquímica. Houve intensa pesquisa e atualmente há um processo de montagem por partes de moléculas previamente fluoretadas, a síntese seletiva, a qual gera um produto de alta pureza <sup>21, 23, 24, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32</sup>.

#### **2-1-2-c Como dissolvem gases.**

O mecanismo de dissolução para gases em perfluorcarbonos pode ser considerado como não polar e não associativo e determinado puramente pela forma.

Uma interpretação semi-empírica da solubilidade de gases que deriva da teoria de partículas interpreta a energia livre da solução como sendo a soma da energia livre para a formação de cavidades para o soluto no solvente mais a energia livre da interação do solvente com o soluto.

A avaliação numérica da tendência a solubilidade pode ser obtida utilizando-se o parâmetro de solubilidade de Hildebrand,  $\delta$ , onde substâncias com  $\delta$ s semelhantes tendem a se dissolver. Este parâmetro pode ser obtido tirando-se a raiz quadrada da energia de vaporização e dividindo o valor encontrado pelo volume molar<sup>21, 33</sup>,  $\delta = (\Delta E_v)^{1/2} / V$ .

#### **2-1-2-d A evolução e o surgimento de novas moléculas.**

A primeira geração de transportadores de gases artificiais para a substituição temporária do sangue era baseada em perfluor-decalina, perfluor-tripropilamina e perfluor-tributilamina, nos produtos Fluosol<sup>f</sup> e o Oxypherol<sup>f</sup>. Visando fins medicinais, muitas moléculas foram estudadas e testadas, no intuito de aperfeiçoar as emulsões e encontrar a solução de problemas de toxicidade, excreção do organismo e reações fisiológicas diversas<sup>21, 34, 35, 36, 37, 38, 39</sup>.

As emulsões de perfluorcarbonos servem a diversos fins, entre eles transportadores de gases. Na área medica podem ser utilizados emulsionados como substituto temporário para o sangue ou puros para ventilação líquida. Tem utilidade também em biotecnologia no cultivo de células altamente aeróbicas. Há aplicações como na oncologia para melhorar a oxigenação de tumores hipóxicos e assim a eficiência da medicação, em diagnósticos, atuando como contrastes em NMR ou ultrasonografias, e no tratamento de doença descompressiva devido a capacidade de solubilização do Nitrogênio<sup>40, 41, 42, 43, 44</sup>.

A tentativa mais recente foi o Oxygent<sup>f</sup> da Alliance Pharmaceutical, que é baseado na molécula n-perfluor-octilbrometo, o chamado perflubromo, emulsificado com EYP<sup>45</sup>, "egg yolk phospholipids" ou, fosfolipídeos de gema de ovo.

#### **2-1-2-e Os emulsificantes.**

Os emulsificantes são de vital importância nesta área, fazem a interface entre o perfluorcarbono que carrega o gás, com o organismo, então as propriedades de biocompatibilidade e reologia são função da natureza deste componente.

As emulsões da primeira geração, Fluosol<sup>f</sup> e o Oxypherol<sup>f</sup>, utilizaram como emulsificantes o Pluronic F-68<sup>f</sup>, que é composto por uma mistura tipo co-polímero de polioxietileno com polioxipropileno. O Oxygent<sup>f</sup>, da última geração, utiliza uma lecitina de ovo modificada, EYP<sup>46</sup>.

Há uma série de emulsificantes compostos, desenhados para estabilizarem as duas fases, contendo sacarídeos ligados a ramos polares, apolares e fluoretados, com capacidade de formarem nano-micelas de perfluorcarbonos, as quais por sua vez podem vir a funcionar como micro cápsulas para a distribuição de drogas, “drug delivery”<sup>47, 48</sup>.

#### **2-1-2-f O transporte de gases no sangue e na emulsão de perfluorcarbono.**

O Oxigênio é transportado no sangue em pequena parte dissolvido no plasma e a grande maioria combinada com a hemoglobina, nos eritrócitos, formando a oxi-hemoglobina. Há diversas enzimas trabalhando conjuntamente neste sistema, algumas acelerando a combinação e outras diminuindo a afinidade pelo gás. O sistema é complexo e é descrito pela fórmula dada por Adair, sendo que a hemoglobina possui uma curva de saturação na forma sigmoide com transição para a completa saturação a uma pressão parcial de Oxigênio próxima a disponível na atmosfera terrestre.

Na emulsão de perfluorcarbono, o Oxigênio é também transportado em pequena quantidade dissolvido no plasma, mas na partícula de perfluorcarbono há uma grande diferença em relação a Hemácia, ele vai dissolvido. A vantagem é a grande solubilidade do gás nesta substância, e uma característica marcante é que a concentração é função da pressão parcial do Oxigênio no meio, então, se o paciente respirar uma atmosfera pura de Oxigênio, para a partícula de PFC faz muita diferença, para a hemácia, nem tanto.

Os primeiros produtos como o Fluosol<sup>f</sup> e o Oxypherol<sup>f</sup>, que contam com 20% w/v de PFC dissolvem uma quantidade bastante inferior de gás comparado com o sangue. O Oxygent<sup>f</sup> com 90% w/v, quando submetido a uma atmosfera dissolve quantidades comparáveis<sup>49, 50</sup>.

É previsto em simulações um comportamento diferenciado conforme o diâmetro do tubo ou do capilar quando coexistem Hemácias e partículas de PFC emulsionadas. Se o tubo é estreito, da ordem de 10 $\mu$ m há a tendência de as hemácias se enfileirarem no centro devido ao gradiente de tensão de cisalhamento, ficando as partículas de PFC que são bem menores, na periferia. Se o tubo é maior que algumas centenas de  $\mu$ m, há uma tendência à homogeneidade <sup>51</sup>.

### **2-1-2-g Os produtos até agora obtidos e uma comparação com o sangue verdadeiro.**

Visando a utilização regular de substitutos sintéticos para as funções de transferência de gases do sangue em procedimentos médicos, pesquisas foram realizadas para se avaliar a concentração do componente ativo, PFC do tipo perfluorocetilbrometo, no sangue <sup>52</sup> e para se avaliar como a presença de carregadores de Oxigênio tipo perfluorcarbonos e derivados de hemoglobina afetam os testes laboratoriais mais rotineiros <sup>53</sup>.

Até o ano de 2003 havia um certo otimismo com o progresso do desenvolvimento de substitutos artificiais para o sangue na função do transporte de gases. O Oxygent<sup>f</sup> da Alliance Pharmaceutical, a base de PFCs, estava na terceira fase de testes, mas o FDA reprovou o pedido e solicitou novos testes, e a Alliance, que aparentava ser a empresa mais adiantada na pesquisa encerrou as atividades na área. O argumento do FDA é que em uma situação de emergência em um pronto socorro, o produto Oxygent<sup>f</sup> não apresentava nenhuma vantagem sobre a utilização de sangue normal, então não há razão para liberá-lo ao uso. Houve protestos por parte dos representantes do Pentágono, pois não possuem pronto-socorros móveis para as frentes de batalha. Aparentemente as pesquisas com poli-hemoglobínicos continuam. Estas informações foram adquiridas pelo autor ao assistir uma seção de discussão (workshop) sobre substitutos artificiais para o sangue no Congresso ASAIO 2003.

De toda esta revisão até aqui apresentada, o que interessa para este trabalho é saber a Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono que é utilizada, o Oxypherol FC-43 diluído, e como confirmá-la. O dado foi encontrado, mas não há um método para a confirmação.

## **2-2 Oxigenadores de sangue para circulação extra corpórea.**

Os primeiros experimentos com animais foram realizados por Gibon em 1937. Atualmente há diversos fabricantes de dispositivos oxigenadores de sangue sendo que os do tipo bolhas estão caindo em desuso e os de membrana dominam o mercado<sup>5</sup>. Há pesquisa no desenvolvimento de dispositivos “IVOX, intra vascular oxygenator” ou oxigenadores intra vasculares que seriam destinados à um suporte das funções de troca de gases feito de forma menos agressiva<sup>54, 55, 56</sup>.

### **2-2-1 A evolução dos equipamentos e os principais tipos.**

De forma bastante resumida, pode-se dizer que inicialmente havia no mercado oxigenadores de disco e de bolhas. Os do tipo de discos caíram em desuso devido a custos e dificuldades de operação. No início de década de 80 oxigenadores de bolhas e de membrana repartiam o mercado. Atualmente os do tipo de membrana dominam sendo utilizados em mais de 90% das cirurgias. Há experimentos bem sucedidos com oxigenadores líquido-líquido utilizando perfluorcarbono, no entanto, não há ainda aplicação comercial deste tipo de produto<sup>2, 5, 57</sup>.

Teoricamente, os oxigenadores de membrana são melhores que os de bolhas em biocompatibilidade, mas na prática não há diferença perceptível<sup>58</sup>. Quanto a transferência de Oxigênio para uma mistura de sangue com emulsão de perfluorcarbono, os oxigenadores de membrana levam nítida vantagem sobre os de bolhas<sup>59</sup>.

#### **2-2-1-a Bolhas de coluna ascendente.**

O princípio de funcionamento deste tipo de oxigenador é bastante simples, há uma coluna cheia de sangue e um fluxo de Oxigênio é injetado por baixo formando bolhas. Conforme as bolhas sobem há uma troca de gases em sua superfície e seu movimento causa uma mistura do

líquido. Os problemas principais são a espuma que se forma levando a necessidade de se “siliconizar” o sangue para garantir sua eliminação e a hemólise. Atualmente esta tecnologia está caindo em desuso <sup>5</sup>.

#### **2-2-1-b Discos.**

Oxigenadores de discos são constituídos por um conjunto de vários discos parcialmente submersos no sangue, estes giram levando uma fina camada de sangue aderida por estar molhando sua superfície ao contato com a fase gasosa e novamente submergem, levando esta alíquota de volta ao sangue <sup>2</sup>. Este tipo de dispositivo não é utilizado atualmente <sup>5</sup>.

#### **2-2-1-c Líquido-líquido.**

O contato líquido-líquido é considerado dentre os processos sintéticos, a melhor forma possível de se oxigenar o sangue. Testes em animais submetidos a oxigenação de seu sangue por contato com perfluorcarbono por longos períodos mostraram que a hemólise sofrida neste tipo de processo de oxigenação é praticamente zero <sup>57</sup>.

Devida a alta bio-compatibilidade as substâncias da família dos perfluorcarbonos tem sido estudadas nas funções de perfusão de órgãos para transplante e para ventilação líquida de pacientes <sup>60</sup>. Mais informações podem ser obtidas no “site” do Fluorovent<sup>r</sup> listado no Anexo 1.

#### **2-2-1-d A membrana.**

A membrana utilizada nos oxigenadores de sangue utilizados neste trabalho, a Oxyphan<sup>r</sup>, é produzida pela empresa Membrana, por um processo denominado Accurel<sup>r</sup>, onde o polímero polipropileno é misturado com óleos de soja e mamona, extrudado na forma de fibra e estirado.

Posteriormente a fase oleosa é separada, liberando um esqueleto altamente poroso constituído por uma estrutura de polímero rígido.

A chamada fibra consiste em um tubo polimérico de paredes altamente porosas e permeáveis, com diâmetro externo de 380 µm, sendo que o gás passa por dentro, e permeia para a fase líquida atravessando a parede porosa.

Mais informações podem ser obtidas no “site” da empresa Membrana, listado no Anexo 1.

### **2-2-2 Os oxigenadores de membrana.**

Estes dispositivos podem ser construídos de duas formas, com o fluxo de sangue passando por dentro ou por fora das fibras, sendo que a configuração atualmente preferida é por fora. As fibras podem ser de dois tipos: impermeáveis ou porosas, sendo que a grande maioria atualmente utiliza fibras porosas<sup>5</sup>, e os dispositivos estudados neste trabalho também.

As membranas porosas possuem uma melhor permeabilidade aos gases que as impermeáveis, no entanto em aplicações mais demoradas, por períodos maiores que cinco horas, começa a haver um problema de vazamento de plasma para dentro da luz das fibras<sup>61, 62</sup>.

Uma propriedade importante dos oxigenadores de membrana é a possibilidade de se controlar independentemente as saturações de Oxigênio e de Dióxido de Carbono, o que faz com que o controle da vazão da fase gasosa tenha ainda mais importância<sup>55, 63, 64</sup>.

Um oxigenador ideal deve possuir uma alta permeabilidade ao Oxigênio e ao Dióxido de Carbono, mas não deve deixar formar bolhas no lado do sangue. Deve ser impermeável à água e ter uma superfície de contato com o sangue perfeitamente bio-compatível<sup>65</sup>, o que levaria a maiores tempos de utilização e menores taxas de hemólise. Deve ser fácil de esterilizar, de produzir, de baixo custo, e livre de pinos<sup>66</sup>.

Segundo o Protocolo da AAMI<sup>1</sup>, resumidamente, o modelo do oxigenador deve ser testado em três vazões de sangue, a mínima e a máxima recomendada e uma intermediária; no entanto, praticamente todos os modelos no mercado conseguem satisfazer as exigências de saturações a

serem alcançadas, e o método não dá muitas informações sobre o aparelho testado. Há uma necessidade por um método de teste que detalhe melhor a performance do aparelho testado <sup>66</sup>.

### 2-2-2-a Uma visão do que já foi estudado.

É aceito que a maior parte da resistência ao transporte de massa esteja do lado da fase líquida, o sensível sangue. Isso faz com que para se conseguir um aumento na performance do aparelho, o fluxo deste deva ser trabalhado de forma a aumentar a convecção, mas precisa ser feito de forma muito gentil para não aumentar a taxa de hemólise. Recursos possíveis são enrolar as fibras de forma a cruzar camadas <sup>67</sup>, ou trançar as fibras antes de enrolá-las no carretel <sup>68</sup>. A resistência da fase líquida é um problema para os dispositivos oxigenadores intra-vasculares, pois o espaço é muito restrito <sup>54</sup>, sendo necessária a utilização de uma fibra com alta permeabilidade ao gás <sup>69</sup>, mas que não permita a formação de bolhas.

Existe uma área de interface entre a ciência dos oxigenadores de membrana e a biotecnologia; trata-se da transferência de massa de uma fase gasosa para uma fase líquida <sup>70, 71</sup>.

Para testar a propriedade de permeabilidade de materiais plásticos aos gases, foram utilizados oxigenadores de placas, com o material a ser testado, seu funcionamento em relação a transferência de massa foi avaliado utilizando balanços de massa para situações de escoamentos de diversas fases líquidas <sup>72, 73, 74</sup>.

Recentemente foram publicados estudos onde o escoamento da fase líquida é analisado com ênfase. A forma com que se dá o escoamento do sangue através do carretel de fibras enroladas define a perda de carga e o esforço sobre as hemácias <sup>75</sup>, a forma com a qual os feixes de fibras são cruzados também influencia o escoamento <sup>67</sup>. Correlações complexas foram desenvolvidas visando associar características como porosidades do feixe de fibras através de uma correlação modificada de Chilton-Coulburn e a transferência de massa <sup>76</sup>, ou ainda, o transporte de momento através da fórmula de Coulburn e a transferência de massa <sup>77</sup>.

No entanto ainda não foi publicado um trabalho em que se mostre um mapeamento dos coeficientes de transferência de massa em função da variação das condições dos escoamentos das fases líquida e gasosa.

### **2-2-2-b O que é estudado neste trabalho.**

Neste trabalho são desenvolvidos diversos métodos: para avaliar a Constante de Henry em uma emulsão de perfluorcarbono <sup>89</sup>, pois esta é necessária na aplicação do método para a avaliação dos coeficientes de troca de massa de oxigenadores de membrana, com a emulsão avaliada anteriormente e com água <sup>90</sup>. A queda de pressão na fase gasosa também deve ser determinada, porque é necessária para corrigir a pressão parcial do Oxigênio na fase gasosa, pois esta correção influi nos coeficientes de transporte de massa determinados anteriormente <sup>91</sup>. A perda de carga também serve a outro procedimento de avaliação de área disponível para troca de gases nestes dispositivos <sup>92</sup>.

Na data em que este texto foi escrito, final de Julho de 2004, uma patente relacionada ao processo de avaliação da área efetiva para troca de gases, fruto deste trabalho, estava em fase de elaboração pelo órgão da Universidade que possui esta competência.

### **2-3 Busca em bancos de patentes.**

Foi realizada uma busca em diversos bancos de Patente, em âmbito global e nada foi encontrado que conflitasse com o método para avaliar a área disponível para troca de gases em oxigenadores de membrana. O relatório da busca de Patentes pode ser encontrado no anexo IV.

## Capítulo 3

### Modelagem Teórica

Este capítulo tem como objetivo descrever as bases matemática, fenomenológica e as condições de contorno em relação aos experimentos abordados neste trabalho.

Por ser um trabalho de desenvolvimento de um método de teste, é analítico em essência. O comportamento dos instrumentos de medição bem como dos equipamentos, dos materiais, da montagem do experimento e os dispositivos a serem testados, deve ser previamente estudado e sua dinâmica conhecida. A barra de erros ou o intervalo de confiança dos dados obtidos, serão de importância como indicadores da qualidade do método desenvolvido.

Um bom ponto inicial para o projeto é considerar as limitações e disponibilidades de material, tempo e espaço. A principal é que há disponível apenas 0,5 l de emulsão de perfluorcarbono, PFCE, o substituto sintético de sangue para funções de transferência de gases, a base de perfluorcarbono, PFC, com o qual será avaliado o funcionamento de 3 modelos de oxigenadores de sangue, com áreas de troca de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>. O volume de emulsão é pequeno, não podendo haver erros ou perdas.

Dois tipos de ensaio são possíveis para se avaliar diretamente a capacidade de transferência de massa de um dispositivo. O método estacionário ou do balanço e o dinâmico. A área disponível à transferência também pode ser avaliada indiretamente, através da perda de carga imposta a um fluxo de gás ao percorrer as membranas. Para uma melhor compreensão dos métodos, é exposta a seguir uma apresentação simplificada dos tópicos relevantes ao assunto.

### 3-1: A força motriz da transferência de massa.

O transporte de massa pode ser classificado em duas formas: a curta distância, em escala molecular, existe o transporte difusivo, devido basicamente às diferenças de concentração; a distâncias maiores que a espessura da camada limite, existe o transporte convectivo, devido ao movimento do fluido. Os transportes difusivo e convectivo para massa podem ser interpretados de forma análoga à transferência de calor por condução e por convecção.

#### 3-1-1: Transporte de massa difusivo.

O transporte difusivo ocorre devido a diferença de concentração de um componente. Há a tendência da massa se distribuir homogeneamente em um meio, de modo análogo ao comportamento do calor, que tende a se distribuir homogeneamente em um meio, minimizando a diferença de temperatura e maximizando a Entropia. No caso do transporte de massa, a força motriz é o potencial químico de uma espécie a uma determinada concentração, portanto, para uma espécie “a”, sua difusão pode ser descrita pela Lei de Fick em função de seu gradiente de concentração, conforme a Eq.(1), em função da concentração de um componente “a” em um meio qualquer. A Eq.(2) é a Lei de Fick para um componente difundindo na fase gasosa tendo o gradiente de concentração sido convertido para o gradiente de pressão parcial.

Um exemplo clássico de difusão é o caso do grão de Nescafé<sup>f</sup> em um prato com água parada. Podemos observar que lentamente o grão vai se dissolvendo e tingindo a água, expandindo em um padrão circular a partir do seu ponto inicial. Se a água estiver fria, leva mais tempo do que se estivesse quente, pois a difusão ocorre em nível molecular e é função da agitação destas moléculas, portanto, quanto maior a temperatura maior a agitação, e maior o coeficiente de difusão.

$$\frac{N_a}{A} = -D_{ab} * \frac{\partial C_a}{\partial x} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$\frac{N_a^\circ}{A} = -D_{ab} * \frac{M_a}{R_o * T} * \frac{\partial P_a}{\partial x} \quad \text{Eq.(2)}$$

### 3-1-2: Transporte de massa convectivo.

O transporte convectivo ocorre devido a combinação de dois fatores: a movimentação do fluido e a difusão do soluto. Os fluxos conseguidos com o auxílio da movimentação do fluido são em geral bem maiores que os obtidos em fluidos em repouso. As Eq.(3) e Eq.(4) mostram as formas integradas do transporte convectivo para o fenômeno em líquidos e em gases, respectivamente.

$$\frac{N_a^\circ}{A} = k_m * (C_{a1} - C_{a2}) \quad \text{Eq.(3)}$$

$$\frac{N_a^\circ}{A} = -k_m * \frac{M_a}{R_o * T} * (P_{a1} - P_{a2}) \quad \text{Eq.(4)}$$

Voltando ao exemplo do Nescafé<sup>tr</sup>. Após observar a difusão do grão de Nescafé<sup>tr</sup> na água do prato em repouso, percebe-se que demora e que cada porção de água recebe o soluto da porção adjacente anterior, e assim sucessivamente até que todo o soluto se homogeneize no volume todo do líquido. Não seria mais rápido e eficiente se fosse possível trocar a porção seguinte de fluido, próxima à fonte de soluto por uma porção zerada de soluto? E se a porção removida, já contendo algum soluto, fosse levada para uma posição onde as porções adjacentes a ela tivessem concentração muito mais baixa? Isso é o que ocorre quando se utiliza a colher para mexer o café, e exatamente por estes motivos é tão mais rápido para se obter a homogeneização. O transporte convectivo é algo como multiplicar a velocidade do transporte por difusão utilizando a movimentação do fluido.

O termo coeficiente convectivo de transporte de massa refere-se ao transporte de massa quando este ocorre em uma única fase. O termo coeficiente de transporte de massa, que será utilizado neste trabalho refere-se ao transporte de massa de uma forma mais geral, que pode envolver duas fases, como neste caso. Quando se trata de duas fases, há uma correção feita em

uma das duas concentrações de modo a exprimi-la na fase da outra, para que o coeficiente seja calculado referenciado a uma fase específica. Os coeficientes utilizados neste trabalho são explicados adiante. A transferência de massa estudada neste trabalho utiliza  $p(t)$  como a tensão de Oxigênio na fase líquida em um instante  $t$ , e  $p^*$  como a tensão do gás na fase gasosa.

### 3-1-3: Números de Reynolds, Sherwood, Schmit e a Equação de Colburn.

O número de Reynolds,  $Re$ , descreve a relação entre as forças inerciais e viscosas e é descrito pela Eq.(5).

$$Re = \rho \cdot V \cdot D / \mu \quad \text{Eq.(5)}$$

O número de Sherwood,  $Sh$ , qualifica de uma forma geral o fenômeno de transferência de massa, descrevendo a relação entre os fenômenos difusivo e convectivo. Representa a relação entre a resistência à difusão dividida pela resistência à convecção, descrito pela Eq.(6).

$$Sh = K_L \cdot X / D_a \quad \text{Eq.(6)}$$

O número de Schmit,  $Sc$ , descreve a simultaneidade dos fenômenos de transferência de momento e massa, descrevendo-os como uma relação entre as forças viscosas e o fenômeno da difusão, descrito pela Eq.(7).

$$Sc = \mu / (\rho \cdot D_{ab}) \quad \text{Eq.(7)}$$

A Equação de Colburn tem a forma geral descrita pela Eq.(8). Ela associa os números adimensionais de Reynold, Sherwood e Schmit, envolvidos na descrição de processos de transferência de massa e pode ser ajustada, procurando-se valores para as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , de modo a representar um experimento ou algum tipo de equipamento.

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^c \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde  $a, b$  e  $c$  são constantes ajustadas para o experimento em questão, sendo que tendem a um número próximo em muitas situações.

### 3-1-4: Lei de Henry.

A lei de Henry Eq.(9), descreve o equilíbrio entre a pressão parcial de um gás e sua concentração na fase líquida com a qual esteja em equilíbrio.

$$p_i = H \cdot C_i \quad \text{Eq.(9)}$$

### 3-1-5: Lei de Raoult.

A Lei de Raoult descreve a relação entre a pressão parcial de um vapor e sua fração molar em uma mistura gasosa em equilíbrio com uma mistura líquida ideal, conforme descrito na Eq.(10).

$$p_i = y_i \cdot P = x_i \cdot P_i^{vap} \quad \text{Eq.(10)}$$

Compondo a Eq.(9) da Lei de Henry com a Eq.(10) da Lei de Raoult temos a Eq.(11):

$$y_i \cdot P = P_i = H \cdot C_i \quad \text{Eq.(11)}$$

### 3-1-6: Lei de Dalton.

A Lei de Dalton descreve a relação entre a pressão parcial de um gás e a pressão total de uma mistura gasosa ideal, conforme descrito na Eq.(12).

$$P_{total} = \sum_i P_i \quad \text{Eq.(12)}$$

### 3-1-7: Pressão de vapor, a Equação de Antoine.

A pressão de vapor de uma substância a uma dada temperatura pode ser calculada através da Equação de Antoine, conforme descrito na Eq.(13). Existem dados tabelados para uma ampla gama de espécies. Neste estudo é útil saber a pressão de vapor da água a 37°C, para tanto temos:

$$\log P_{H_2O}^{vap} = A - \frac{B}{(C+T)} \quad \text{em mmHg, e } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq.(13)}$$

Onde para água  $A= 7,96681$   $B= 1668,21$   $C=22,8$  e  $T$  em Kelvin, assim  $P^{vap}(37^\circ\text{C}) = 47$  mmHg.

$N^\circ_a$  = fluxo molar da espécie a.

$A$  = área considerada para o cálculo de transporte de massa.

$D_{ab}$  = Coeficiente de difusão da espécie a no meio b.

$M_a$  = Massa molecular da espécie a.

$R_o$  = Constante universal dos gases.

$K_m$  = Coeficiente convectivo de transferência de massa.

$K_L$  = Coeficiente convectivo de transferência de massa referenciado à fase líquida.

$T$  = Temperatura em Kelvin.

$P$  = Pressão absoluta do sistema.

$p_i$  = Pressão parcial do componente i no sistema, ou tensão de i.

$P_i^{vap}$  = Pressão de vapor do componente i na temperatura do sistema.

$y_i$  = Fração molar do componente i na fase gasosa.

$x_i$  = Fração molar do componente i na fase líquida.

$H$  = Constante de Henry para o gás i ( soluto ) no solvente da fase líquida em questão.

$C_i$  = Concentração do soluto i ( gás ) na fase líquida em questão.

$Re$  = Número de Reynolds.

$Sh$  = Número de Sherwood.

$Sc$  = Número de Schmit.

$\rho$  = Densidade.

$V$  = Velocidade.

$D$  = Comprimento.

$\mu$  = Viscosidade.

$X$  = Distância.

As relações acima são detalhadamente apresentadas nas referências: Van Ness <sup>78</sup>, Cremasco <sup>79</sup>, Treybal <sup>80</sup>, McCabe <sup>81</sup> e Welty <sup>82</sup>.

### **3-1-8: Transporte de massa em Colunas de Recheio e Trocadores de Membrana.**

O transporte de massa tem como força motriz a diferença de concentrações, que faz com que haja a difusão, responsável pelo transporte a curta distância, mas a agitação tem uma importante função, movendo e trocando o meio em contato com a área de troca, colocando em contato porções de fases “frescas”, proporcionando gradientes de concentração elevados. Como em uma corrente de eventos onde o evento mais lento determina a velocidade do conjunto, no transporte de massa, a difusão costuma ser a etapa mais lenta, portanto otimizando-a melhorando o fluxo da fase líquida, que é o de maior resistência à difusão, pode ser melhorado o desempenho do equipamento.

No caso de uma troca gás-líquido, a maior parte da resistência ocorre no filme de fase líquida. Para otimizar um equipamento destinado a esta finalidade, deve ser trabalhada a espessura do filme líquido através do qual se dá a difusão da massa transportada.

Em um trocador com membranas, existem feixes destas dispostos em camadas cruzadas. Isto faz com que a fase líquida tenha que percorrer frestas muito estreitas, que geram filmes finos, e facilitam a transferência de massa, conforme esquematizado na Figura 3. Neste tipo de dispositivo, a fase gasosa tem contato com a líquida através de uma parede de membrana porosa. Não se trata exatamente de um contato direto, sendo considerada como área de troca a área da

superfície externa da membrana utilizada na construção do aparelho. A área de troca real na superfície de uma membrana é uma variável complexa para se estimar, mas poderia ser considerada como a área das bolhas de tensão superficial nas saídas dos poros da membrana.

Em uma coluna de recheio, há um enchimento que pode ser de diversas formas sendo que o contato entre as fases é direto, conforme mostrado no esquema de Figura 4. Devido ao fato do contato ser direto, não há a possibilidade de se bombear separadamente as fases. A fase líquida cai e a fase gasosa sobe em contra-corrente. Conforme cai, o líquido está sujeito a diversos problemas, dentre eles os principais são: estagnação em reentrâncias, espessura elevada devido a tensão superficial e deficiências de molhamento. A estagnação consome a fase líquida e a área disponível para troca, a espessura elevada aumenta também a resistência à transferência de massa neste filme e a deficiência de molhamento não aproveita a área disponível para troca. Neste trabalho uma coluna é construída utilizando recheio tipo anel de Raschig de  $\frac{1}{4}$  de polegada. A intenção é comparar resultados e as duas tecnologias de transferência de massa.

É esperado que o trocador de membrana tenha uma eficiência em termos de troca de massa por unidade de área nitidamente superior ao trocador tipo recheio. Esta avaliação pode ser efetuada comparando-se os dados obtidos na forma de  $K_G$  ou  $K_L$ , pois são coeficientes de troca de massa determinados em função da área de troca disponível.

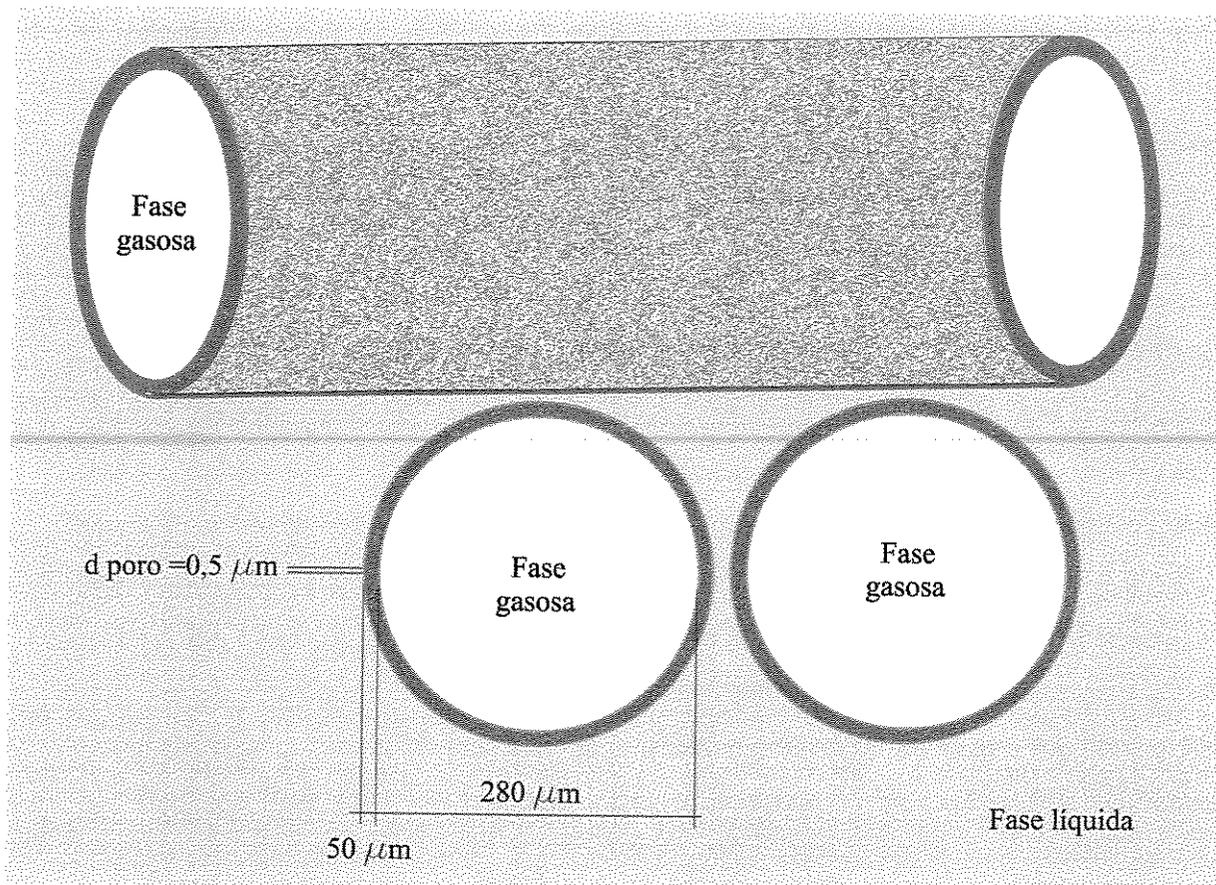


Figura 3: Representação das fases líquida e gasosa em um trocador com membrana. Os espaçamentos geram frestas com dimensões da ordem de micrometros.

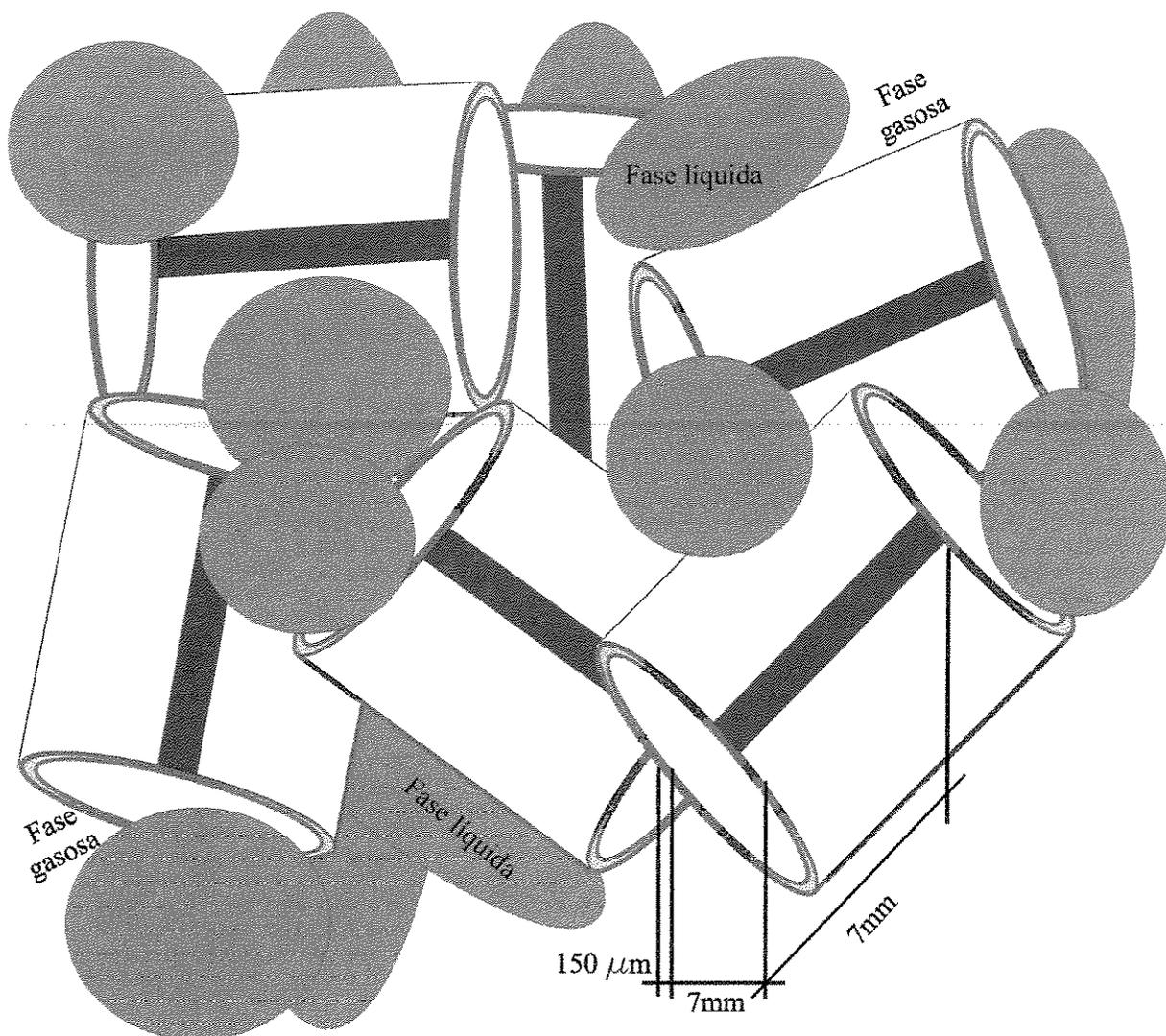


Figura 4: Representação das fases líquida e gasosa em um trocador tipo Coluna de Recheio com enchimento tipo Anéis de Raschig de medida próxima ao padrão de  $\frac{1}{4}$  de polegada. Os espaçamentos geram frestas com dimensões da ordem de milímetros.

### 3-2: O método do balanço.

O método de balanço de Oxigênio, também chamado de método estacionário<sup>70</sup>, é baseado na diferença entre as concentrações do gás nas correntes de entrada e saída como por exemplo, em um fermentador, é considerado o mais confiável e reprodutível.

No caso do oxigenador de membranas, seriam possíveis duas situações de balanço de massa: uma medindo a diferença na concentração do gás na fase gasosa que atravessa o oxigenador, outra baseada na diferença entre as concentrações do Oxigênio presente na fase líquida antes e depois de atravessar o dispositivo. Levando em conta as vazões, achamos o fluxo de matéria que foi transferido entre as fases. Medir a diferença de concentração de oxigênio em um fluxo de Oxigênio puro significa medir uma diferença muito pequena na vazão deste gás, o que não é fácil de ser feito na prática, no entanto, a medição da diferença das concentrações na fase líquida ao atravessar o oxigenador é de fácil execução.

### 3-2-1: Descrição.

O método estacionário pode ser facilmente adaptado e aplicado ao estudo de oxigenadores de membrana. Neste caso, um fluxo de Oxigênio puro é aplicado nas membranas, e um fluxo de água no compartimento destinado ao sangue. Há a necessidade de que a situação do experimento seja mantida constante durante algum tempo para que haja uma estabilização do experimento e da leitura, garantindo que a medida seja relativa a um estado estacionário. Se o experimento fosse mantido por 10 minutos a uma vazão de líquido de 1 l/min, necessitaríamos de 10 l de fase líquida para realizar o estudo.

### 3-2-2: Balanço de massa.

Na configuração de montagem descrita para este método, no estado estacionário, a quantidade de Oxigênio transferida da fase gasosa para a líquida será proporcional à vazão de líquido multiplicada pela diferença de sua concentração entre sua entrada e saída, conforme descrito no balanço de massa na Eq.(14).

$$N(O_2) = V_{liq} * ( C(O_2)_{entra} - C(O_2)_{sai} ) \quad \text{Eq.(14)}$$

$N(O_2)$  = Número de moles de Oxigênio transferido por minuto.

$V_{liq}$  = Vazão volumétrica de líquido por minuto.

$C(O_2)_{entra}$ ,  $C(O_2)_{sai}$  = As concentrações do gás na entrada e saída do aparelho.

### 3-2-3: Limitações.

Este método necessita de um volume grande das duas fases que são utilizadas no teste do dispositivo de troca de massa, há a necessidade de se esperar que a montagem entre em regime estacionário e em equilíbrio para só então se fazer a medição. Se fôssemos trabalhar apenas com água este seria o método escolhido, pois o procedimento matemático de tratamento dos dados é mais simples, mas como devemos testar o método com a emulsão de perfluorcarbono da qual dispomos de apenas meio litro, este método deve ser indeferido por indisponibilidade de reagente.

### 3-3: O método dinâmico.

Este método para a determinação do  $K_La$  é baseado no balanço de massa não estacionário para o Oxigênio. A principal vantagem para este estudo é o pequeno volume de fase líquida necessário.

A adaptação deste método para oxigenadores de membrana é semelhante a descrita para o método estacionário, só que ao invés da fase líquida circular em circuito aberto pelo oxigenador, ela é realimentada. Isso é, há um frasco que serve de reservatório e a fase líquida é bombeada em circuito fechado através do oxigenador e de volta para o frasco, gerando um acúmulo de Oxigênio dissolvido nela, chamado cela de acumulação. A medida do acúmulo em função do tempo nos dá a capacidade de transferir massa do dispositivo testado, no caso o oxigenador. Temos assim o  $K_La$ , que é uma medida do tempo de resposta do sistema que é descrito na Eq.(17). De posse dos dados do sistema como o volume da fase líquida, a área de troca e a Constante de Henry da fase líquida, podemos com a Eq.(18) e Eq.(19), calcular o  $K_G$  e o  $K_L$ , que representam eficiências de troca por unidade de área referenciados nas fases gasosa e líquida respectivamente. O  $K_V$  que descreve a capacidade de troca do dispositivo como uma peça, pode ser calculado com a Eq.(20).

### 3-3-1: Balanço de massa.

Na configuração de montagem descrita para este método, por ser um circuito fechado para a fase líquida, a quantidade de Oxigênio transferida da fase gasosa para esta será acumulada, e assim a força motriz para a transferência de massa varia com o tempo. Por isso é definida como  $(p^*O_2 - pO_2(t))$ , onde  $p^*O_2$  é a pressão de Oxigênio na fase gasosa, e  $pO_2(t)$  é a pressão na fase gasosa que estaria em equilíbrio com a fase líquida no instante  $(t)$ .

O balanço mostrado na Eq.(15) foi realizado em função da fase gasosa pelo fato de os dados serem colhidos em tensão de Oxigênio, por esta razão há o termo  $1/H$ , que é para converter a quantidade de gás dissolvido no volume  $V$  de fase líquida em unidades da fase gasosa.

Integrando a Eq.(15) obtem-se a Eq.(16). Substituindo os dados do sistema achamos a função para o  $K_La$ , Eq.(17), o qual por regressão linear dos pontos experimentais nos fornece seu valor.  $K_G$ ,  $K_L$  e  $K_V$  podem ser encontrados utilizando-se as equações Eq.(18), Eq.(19) e Eq.(20) respectivamente.

$$1/H \cdot V \cdot dp(O_2) / dt = K_G \cdot A \cdot (p^*O_2 - pO_2(t)) \quad \text{Eq.(15)}$$

$$\ln((p^*O_2 - pO_2(tf)) / (p^*O_2 - pO_2(to))) = K_G \cdot A \cdot H \cdot (to - tf) / V = K_La \cdot (to - tf) \quad \text{Eq.(16)}$$

$$K_La = \ln((p^*O_2 - pO_2(tf)) / (p^*O_2 - pO_2(to))) / (to - tf) \quad , K_La \text{ em (1/s)} \quad \text{Eq.(17)}$$

$$K_G = K_La \cdot V / (A \cdot H) \quad , K_G \text{ em ml(O}_2) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mmHg)} \quad \text{Eq.(18)}$$

$$K_L = K_La \cdot V / A \quad , K_L \text{ em ml(O}_2) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{mol} / \text{l})) \quad \text{Eq.(19)}$$

$$K_V = K_La \cdot V \cdot 60 \cdot 760 / H \quad , K_V \text{ em ml(O}_2) / (\text{min} \cdot \text{atm)} \quad \text{Eq.(20)}$$

$K_La$  = Coeficiente global de transferência de massa volumétrico, dimensão:  $[1 / t]$ .

$K_G$  = Coeficiente global de transferência de massa referenciado a fase gasosa, dimensão:  $[t / L]$ .

$K_L$  = Coeficiente global de transferência de massa referenciado a fase líquida, dimensão:  $[L / t]$ .

$K_V$  = Coeficiente global de transferência de massa de um dispositivo, dimensão:  $[L * t]$ .

$A$  = Área da superfície de troca em  $\text{cm}^2$ , dimensão:  $[L^2]$ .

$t$  = Tempo em segundos, dimensão:  $[t]$ .

$p$  = Pressão parcial em mmHg, dimensão:  $[M / (L * t^2)]$ .

$H$  = Constante de Henry mmHg x l / ml( $\text{O}_2$ ), dimensão:  $[L^2 / t^2]$ .

$V$  = Volume de fase líquida em litros, dimensão  $[L^3]$ .

### 3-3-2: Simulação numérica da transferência de massa.

Uma simulação numérica é realizada utilizando-se um modelo matemático. Este modelo deve levar em conta as características do experimento, descrever os fenômenos e balanços envolvidos, da forma mais detalhada possível. Em geral o modelo bem afinado quando simulado é capaz de gerar curvas que se aproximam dos dados experimentais. A qualidade dos dados e do modelo pode ser avaliada pela proximidade entre eles. Um modelo pode ser utilizado também para se checar qual a “Lei” que descreve o comportamento dos dados. Neste caso um modelo simples é útil, pois checa-se os dados contra a curva gerada por este “modelo simples”.

No caso deste trabalho, é necessário levar em consideração que o Oxigênio é muito pouco solúvel em água. Em equilíbrio com uma atmosfera do gás, a concentração na água é na faixa de mili-molar. A resolução nos instrumentos de leitura acoplados ao experimento de modo a ter uma resolução aceitável neste, é da ordem de  $\mu$ -molar. Isso faz com que equilíbrios de adsorção com vidros e mangueiras e absorção nos materiais poliméricos possam ter algum efeito visível nos resultados. Para altas concentrações, a permeabilidade das mangueiras pode vir a ser importante.

São cinco tipos principais de efeitos que influenciam este tipo de ensaio:

Ao iniciar o experimento, temos a fase líquida preenchendo todo o circuito, mas cada parte está em contato com uma diferente situação de equilíbrio. A maior parte do líquido está dentro da cela de acumulação, onde está o sensor, mas há líquido nas mangueiras, e na câmara do oxigenador. No circuito de gases do oxigenador, as membranas estão cheias com o gás da

desoxigenação, o Nitrogênio, portanto há uma alíquota de líquido com uma concentração mais baixa do Oxigênio dentro do oxigenador. O experimento é construído de modo que haja uma homogeneização rápida na cela de acumulação, e com mangueiras, as mais finas possíveis, para que menos líquido fique fora da homogeneização, e assim esta represente melhor a concentração média no sistema. Mas dentro do oxigenador não há como mexer. Nas mangueiras que trazem o gás ao oxigenador há o mesmo fenômeno. Estes dois problemas geram um efeito do tipo de atraso de fase, onde conforme o ensaio, há um período de tempo imprevisível durante o qual o sistema não reage ou reage até para o lado contrário, conforme as quantidades e espécies estacionadas nas mangueiras e no oxigenador. Este efeito pode ser visto nos ensaios de detalhamento do oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup>, os quais foram planejados de forma a realçar este efeito. Apesar da complexidade, este efeito não precisa ser modelado, pois os volume de líquido pode ser dimensionado de modo que a parte que fica fora da homogeneização da cela de acumulação seja pequena, e após um curto período de tempo a concentração do sistema convirja para um valor ainda suficientemente baixo para a execução de ensaio.

O efeito da transferência de massa realizada pelo oxigenador é descrito pelo balanço de massa e é o foco do experimento, e por isso deve ser considerado na modelagem matemática.

Há o efeito dos componentes aqui chamados de modo geral, como vazamentos virtuais e perdas, que são adsorções e absorções nos materiais que compõe o sistema. Estes funcionam como se fossem reservatórios em paralelo ao líquido do sistema, para onde ou de onde o Oxigênio é suprido em pequena quantidade, mas neste tipo de experimento com resolução na faixa de  $\mu$ -molar, deve-se ter cuidado. Adsorções e absorções seguem de forma geral um comportamento descrito como função de um equilíbrio de concentração, como exemplo as isotermas de adsorção de Langmuir, portanto, não devem exercer um efeito muito pronunciado em baixas concentrações, mas este deve crescer com o aumento da concentração. O material das mangueiras dissolve Oxigênio, no entanto a difusão através destas até o meio ambiente é lenta demais para se considerar um vazamento ou uma perda. Este ocorreria a partir do meio líquido, saturando a mangueira e desta vazando para o meio. A expressão “Vazamento Virtual” é utilizada na área de alto-vácuo referindo-se a fluxos de gases de e para materiais com capacidade de adsorção e absorção bem como frestas entre peças dentro de câmaras de vácuo<sup>83</sup>.

Há o efeito do vazamento que se deve tentar minimizar, que é o que ocorre na superfície do líquido no Elemeyer, que constitui a cela de acumulação. Há uma área de troca e uma fase gasosa acima desta. A minimização foi providenciada escolhendo-se um frasco onde o nível do líquido ficasse o mais próximo possível do gargalo, onde a área de troca é menor, desta forma minimizando também o volume da fase gasosa acima deste.

O sensor para o Oxigênio não fornece uma resposta instantânea. Há um atraso, e esta variação causa um erro e assim influencia o coeficiente determinado. Há um critério<sup>84</sup> onde o erro no  $K_La < 6\%$  se o tempo de acomodação do sensor à uma mudança em degrau  $\Gamma\rho < 1/K_La$ . Este atraso também não vai ser considerado no modelo. Ainda em relação ao tempo de resposta do sensor<sup>85</sup>, a velocidade de resposta é proporcional ao tamanho do degrau, e é diferente se o Oxigênio está entrando ou saindo da cela, sendo mais lenta na saída. Devido a sorções diversas, depende do estado anterior à medida. Tendo em vista as características acima, espera-se que os ensaios de saturação com Oxigênio sejam mais confiáveis para a determinação do  $K_La$  do que os de extração do gás. Espera-se também que os  $K_Las$  achados nos ensaios de extração sejam menores que os encontrados nos de saturação.

O balanço de massa geral considerando-se vazamentos virtuais e perdas é expresso em função destes  $i$  componentes na Equação (21).

$$\frac{1}{H} * V * \frac{d p(O_2)}{dt} = K_G * A * (p^*O_2 - pO_2(t)) - \sum_i K_{Gi} * A_i * (pO_2(t) - pO_{2\text{componente-}i}(t)) - K_{G\text{-Elemeyer}} * A_{\text{liquido}} * (pO_2(t) - pO_{2\text{gás da cela}}(t)) \quad \text{Eq.(21)}$$

Na simulação numérica para checar os dados obtidos, será considerado apenas o balanço de massa simples, deste modo podemos visualizar onde é a faixa de confiança para esta montagem em que este fenômeno considerado tem maior influência.

Resolvendo a equação para o balanço de massa simples e colocando-a na forma de  $pO_2(t) = F(t)$ , achamos a equação que descreve o comportamento da  $pO_2(t)$  em função do tempo dado um  $K_La$ , a Eq.(22), de modo que é possível conferir se o  $K_La$  achado experimentalmente representa realmente o conjunto de dados que o originou, e em que intervalo isso ocorre.

$$pO_2(t) = p^*O_2 - (p^*O_2 - pO_2(t_0)) / \exp [K_{La} (t-t_0)] \quad , pO_2(t) \text{ em mmHg} \quad \text{Eq.(22)}$$

Os índices representam:

$i$  = iésimo componente.

( $t$ ) refere-se ao instante  $t$  em que está acontecendo o experimento.

( $t_0$ ) refere-se ao instante em que foi considerado o início do experimento.

### 3-3-3: Limitações.

A análise dos dados produzidos no ensaio dinâmico é mais complexa e muitos fatores podem influenciar o resultado, no entanto devido ao pequeno volume de emulsão de perfluorcarbono disponível, este é o método escolhido para este estudo.

### 3-3-4: Taxa de amostragem.

A regressão linear consiste em um processo onde se ajusta uma reta a um conjunto de pontos, portanto, quanto maior o número de pontos melhor. No entanto, neste trabalho, os pontos devem ser lidos pelo operador em intervalos de tempo regulares e anotados à mão. Há um limite máximo na velocidade com a qual este trabalho pode ser realizado. Há também um tempo máximo para o experimento, devendo ser observadas as limitações do operador. A princípio, quanto mais pontos melhor. O ideal seria se houvesse uma placa de aquisição de dados para um computador. Tempo e qualidade seriam ganhos.

### 3-3-5: Escolha do intervalo considerado para regressão linear.

Neste tipo de ensaio é produzida uma tabela de dados onde em uma coluna temos as pressões parciais de Oxigênio lidas na fase líquida, e na outra o tempo. Esta tabela é convertida em uma coluna com  $\ln\{(p^*O_2 - pO_2(t)) / (p^*O_2 - pO_2(t_0))\}$  e outra com  $(t-t_0)$ , sendo o instante

considerado como to escolhido. Então faz-se uma regressão linear de modo a ajustar os pontos. O coeficiente angular achado corresponde ao  $K_La$  deste ensaio.

Como descrito na modelagem teórica da simulação, há um efeito de atraso no início do experimento, então alguns pontos serão descartados. Há o problema de vazamentos virtuais que se pronunciarão mais em concentrações mais elevadas. O oxigenador de sangue não é construído visando ser operado com tensões de Oxigênio muito elevadas. Basta lembrar que com uma pressão próxima de 0,2 atm do gás, o sangue está saturado. Portanto, há um limite máximo de  $pO_2$  na qual o ensaio é mais representativo para este estudo. Estas condições definem o intervalo dentro do qual os dados serão utilizados para a regressão linear. Este intervalo será ajustado e definido por comparação em um processo iterativo que começa com a escolha de dados, cálculo e regressão linear, achar o  $K_La$ , simular o modelo numérico com o  $K_La$  achado, comparar a curva da simulação com os dados experimentais, reajustar o intervalo. Como os ensaios serão realizados em triplicata, o desvio entre os  $K_Las$  encontrados também será utilizado como critério para auxiliar na escolha do intervalo a ser considerado para a regressão linear.

### **3-4: Emulsões de perfluorcarbono.**

Como podemos constatar a partir das equações que descrevem o balanço de massa utilizado no método, a constante de Henry,  $H$ , deve ser conhecida, e de forma confiável. O conhecimento do equilíbrio entre as fases é fundamental para se determinar a taxa de transporte de massa.

Conhecer a constante de Henry,  $H$ , para a água é fácil, está tabelada. Achar  $H$  para uma mistura de perfluorcarbono emulsificada, PFCE, ou seja, uma gotícula isolada dentro de uma camada de emulsificante, e ainda mais com o prazo de validade vencido, não é algo que se ache em tabelas ou que possa ser calculado com confiança. Deve ser determinado experimentalmente, sob a pena de invalidar os experimentos realizados com este produto.

### 3-4-1: Emulsões e sua interação com os instrumentos.

O perfluorcarbono, PFC, utilizado neste trabalho está na forma de emulsificado, PFCE, ou seja, está dividido em pequenas partículas e há uma camada de um emulsificante recobrimdo-as. Os emulsificantes são moléculas que tem a propriedade de interagirem com substâncias de polaridades diferentes. O exemplo clássico é o detergente, o dodecilbenzenosulfato de sódio. Esta molécula tem uma parte apolar que interage com gorduras, hidrocarbonetos e apolares em geral e outra parte que se dissocia em água criando uma interação com esta, e assim facilitando a remoção de substâncias insolúveis em água utilizando a água. O detergente dissolve basicamente hidrocarbonetos. Os PFCs são tão mais apolares que os hidrocarbonetos que não se dissolvem mutuamente, portanto houve a necessidade de se utilizar um emulsificante apropriado, o utilizado no produto empregado neste estudo, o Oxypherol FC43, é o emulsificante Pluronic F-68.

Uma consequência da propriedade dos emulsificantes de dissolverem substância de polaridades diferentes como neste caso, o PFC na água, é a aderência de um filme de água, uma camada limite do lado aquoso, conforme esquematizado na Figura (5). Esta camada impede o acesso mecânico, ou seja, o contato entre o PFC emulsionado e o sensor. Isso faz com que a leitura do instrumento seja limitada pela capacidade da água em transferir o Oxigênio do PFC para o sensor, fazendo com que sua leitura seja limitada a apenas a máxima quantidade que a água consegue dissolver. Por esta razão o Oxigênio na fase de PFCE fica praticamente invisível ao sensor. Portanto, nem todos os instrumentos são capazes de medir o teor de oxigênio em uma amostra que esteja emulsificada. A leitura máxima que pode ser obtida é a  $pO_2$  na fase que entra em contato com o sensor, no caso, a água, ficando uma parcela do gás como que escondida, fora do alcance do sensor, dificultando cálculos de concentrações.

Uma forma de resolver o problema, não aconselhável para este caso, é através de uma conta, utilizando-se os dados fornecidos pelo fabricante da emulsão baseada na quantidade estimada de PFC utilizada no produto, no quanto o PFC é capaz de dissolver do gás e a pressão disponível deste.

Os dados de um trabalho publicado sobre a solubilidade de vários gases em diversas substâncias<sup>21</sup>, são mostrados na Tabela 1 na forma de Constantes de Henry,  $H(\text{gás})$ .

**Tabela 1:** A solubilidade de gases em líquidos segundo Riess<sup>21</sup>, dados convertidos para a constante de Henry,  $H = mmHg \cdot l / ml(O_2)$ .

| Compostos a 37°C       | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | Compostos a 25°C                 | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Água                   | 30,4           | 1,17            | 47,5           | Etanol                           | 3,37           | 0,31            | 5,51           |
| Perfluordecalina       | 1,79           | 0,51            | 2,68           | Acetona                          | 2,97           | 0,13            | 4,63           |
| Perfluortripropilamina | 1,68           | 0,46            | 2,13           | CCl <sub>4</sub>                 | 2,73           | 0,31            | 5,10           |
| Perfluortributilamina  | 1,89           | 0,54            | 3,22           | n-C <sub>7</sub> F <sub>16</sub> | 1,39           | 0,37            | 1,97           |

Em uma emulsão os componentes das fases aquosa e emulsificada estão em equilíbrio em relação a tensão de oxigênio, mas como as espécies possuem diferentes solubilidades, apesar da mesma tensão existem diferenças nas concentrações. Os aparelhos só são capazes de medir a concentração do gás na fase que entra em contato com sua membrana permeável, permitindo que as moléculas entrem em contato com o sensor do instrumento.

No caso de uma partícula emulsificada, conforme esquematizado na Figura 5, há sempre uma camada de água aderida ao lado polar da camada de emulsificante que a recobre. A espessura do emulsificante, que está fora de escala, representa uma barreira considerada desprezível à difusão. O PFC da partícula emulsificada dissolve várias vezes mais O<sub>2</sub> que a água a qual exerce uma resistência que limita o fluxo ao sensor e acaba agindo como barreira à difusão do O<sub>2</sub> que está no PFC. Esta camada de água vai dissolver no máximo a concentração de O<sub>2</sub> proporcional a  $pO_2$  que já esta em equilíbrio neste sistema. Ficando assim o O<sub>2</sub> que esta dentro a partícula de PFC invisível ao sensor.

O medidor polarográfico de tensão de oxigênio YSI 5300 funciona baseado na reação química das moléculas em seu eletrodo combinado, que é composto pelo par Ag-Pt. Uma ddp é mantida constante, e a corrente gerada na reação é proporcional à taxa de moléculas que alcançam os eletrodos. O fluxo de moléculas que atravessam sua membrana e reagem nos eletrodos é proporcional à diferença de concentração entre o meio e a área de reação, onde se assume que seja zero, devido ao consumo pela própria reação. A cela consome o O<sub>2</sub>, funcionando como um

sumidouro, mantendo a concentração em seu interior baixa, provocando assim um fluxo que difunde do meio, no caso aquoso, para seu interior. O fluxo é proporcional à concentração no meio em contato com o sensor, e assim a corrente lida é uma função da concentração do meio na proximidade do sensor. A Figura 6 mostra um esquema do sensor.

As Figuras 5 e 6 mostram que há uma seqüência de resistências à difusão para que o  $O_2$  que está dissolvido na partícula de PFC alcance os eletrodos do sensor, sendo que este tem que atravessar uma camada de água, que no mínimo é composta pela camada limite laminar em contato com a superfície do sensor e a camada que molha o lado polar do emulsificante da partícula. O PFC não entra em contato com o eletrodo, por isso este consegue medir só o que a água permite passar por difusão, que é uma função do máximo que ela consegue dissolver.

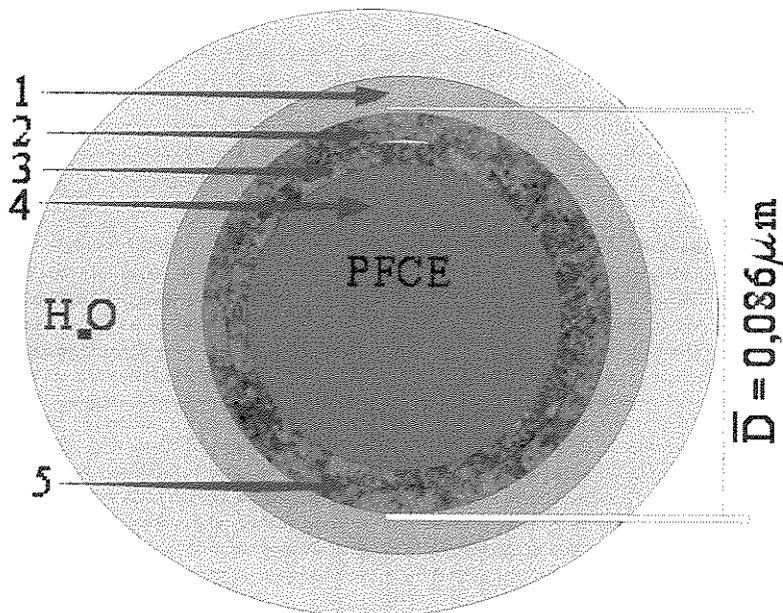


Figura 5: Esquema conceitual fora de escala de uma partícula de perfluorcarbono emulsificada em água. 1 - camada de água aderida ao lado polar do emulsificante, 2 - lado polar do emulsificante, 3 - lado apolar do emulsificante, 4 - Perfluorcarbono apolar Perfluortributiamina, 5 - Camada de emulsificante Pluronic F-68.

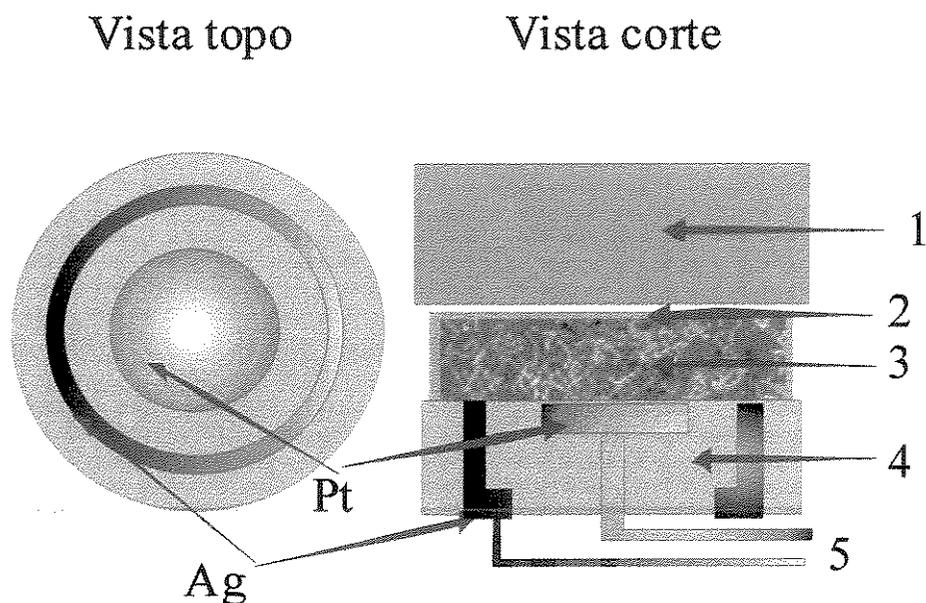


Figura 6: Vistas em topo e em corte do sensor Polarográfico utilizado pelo YSI5300. A voltagem de polarização é mantida constante na cela, ficando a corrente como função da quantidade de Oxigênio que atravessa a membrana, sendo assim proporcional à concentração. 1 - Camada limite do solvente, onde o  $O_2$  passa por difusão, 2 - Membrana de teflon, 3 - Solução de KCl, 4 - Isolante elétrico, 5 - ddp constante e  $i = f(\text{concentração})$ .

### 3-4-2: Determinação da Constante de Henry para Emulsões

O problema pode ser resolvido de uma forma simples com um balanço de massa, considerando-se duas alíquotas uma de água em equilíbrio com a atmosfera e outra da emulsão que foi purgada de seu oxigênio ao máximo. Ao misturá-las, a alíquota de emulsão absorve o  $O_2$  da água reduzindo sua tensão de  $O_2$ ,  $pO_2$ . São duas amostras de volume e  $pO_2$  bem determinadas. A mistura destas alíquotas produz uma mistura onde o volume e a  $pO_2$  são também bem definidas. Admitindo que a fase emulsificada, no caso PFC, atinge rapidamente o equilíbrio com a emulsão<sup>17</sup>, o que ocorre em um período em torno de 0,3 segundos, com um balanço de massa e medindo a  $pO_2$  de equilíbrio após a mistura, determina-se a relação entre a solubilidade do  $O_2$  na água e na fase PFC emulsificada.

No balanço de massa foi considerado que o número total de moles de  $O_2$  é constante, ou seja, o mesmo número de moles presente nas alíquotas a serem misturadas, estará presente depois da mistura, conforme descrito pela Eq. (23) do balanço de massa. Devem ser tomados alguns cuidados para não acrescentar mais  $O_2$  durante a mistura das alíquotas.

$$n^i(O_2)_{(H_2O\text{-aliquota})} + n^i(O_2)_{(H_2O\text{-emulsão})} + n^i(O_2)_{(PFC\text{-emulsão})} = n^f(O_2)_{(H_2O\text{-mistura})} + n^f(O_2)_{(PFC\text{-emulsão})} \quad \text{Eq.(23)}$$

$n^i(O_2)$  e  $n^f(O_2)$  são os números de moles de  $O_2$  antes e depois de efetuar a mistura, na água da alíquota e da emulsão, no PFC da emulsão e nos dois componentes da mistura.

A instrumentação existente no laboratório, não permite uma leitura da concentração de  $O_2$  nas partículas emulsificadas. Sendo assim, a quantidade de  $O_2$  presente na emulsão, foi determinada indiretamente pela medida de  $pO_2$  na fase aquosa, resultante da absorção de  $O_2$  no ato da mistura, pela fase de PFC emulsificada.

Desenvolvendo os termos temos:

$$n^i(O_2)_{(H_2O\text{-aliquota})} = p^i(O_2)_{(H_2O)} V^i_{(H_2O\text{-aliquota})} / H(O_2)_{(H_2O)}^{37^\circ C}$$

Eq.(24)

$$n^i(O_2)_{(H_2O\text{-emulsão})} = p^i(O_2)_{(emulsão)} V^i_{(H_2O\text{-emulsão})} / H(O_2)_{(H_2O)}^{37^\circ C} \quad \text{Eq.(25)}$$

$$n^i(O_2)_{(PFC\text{-emulsão})} = p^i(O_2)_{(emulsão)} V^i_{(PFC\text{-emulsão})} / H(O_2)_{(PFC)}^{37^\circ C} \quad \text{Eq.(26)}$$

$$n^f(O_2)_{(H_2O\text{-mistura})} = p^f(O_2)_{(mistura)} (V^i_{(H_2O\text{-aliquota})} + V^i_{(H_2O\text{-emulsão})}) / H(O_2)_{(H_2O)}^{37^\circ C} \quad \text{Eq.(27)}$$

$$n^f(O_2)_{(PFC\text{-emulsão})} = p^f(O_2)_{(mistura)} V^i_{(PFC\text{-emulsão})} / H(O_2)_{(PFC)}^{37^\circ C} \quad \text{Eq.(28)}$$

$p^i(O_2)_{(H_2O)}$ ,  $p^i(O_2)_{(emulsão)}$ , e  $p^f(O_2)_{(mistura)}$  são as tensões de oxigênio na alíquota inicial, na emulsão inicial e na mistura.

$H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(H_2O)}$ ,  $H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(PFC)}$  são as constantes de Henry para  $O_2$  em água e em PFC a  $37^{\circ}C$ .  $V^i_{(H_2O-aliquota)}$ ,  $V^i_{(H_2O-emulsão)}$ , e  $V^i_{(PFC-emulsão)}$ , são os volumes de água na alíquota, na emulsão, e o volume de PFC na emulsão.

Rearranjando os termos do balanço de massa, substituindo as Equações (24, 25, 26, 27 e 28) na Eq. (23), chegamos na expressão, que nos fornece a relação entre a constante de Henry para oxigênio na água e na fase PFC da emulsão, a Eq. (29).

$$\frac{p^f(O_2)_{(mistura)} \left( V^i_{(H_2O-aliquota)} + V^i_{(H_2O-emulsão)} \right) - p^i(O_2)_{(H_2O)} V^i_{(H_2O-aliquota)} + p^i(O_2)_{(emulsão)} V^i_{(H_2O-emulsão)}}{\left( p^i(O_2)_{(emulsão)} - p^f(O_2)_{(mistura)} \right) V^i_{(PFC-emulsão)}} = \frac{H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(H_2O)}}{H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(PFC)}} \quad \text{Eq. (29)}$$

A partir dos dados achados na literatura e mostrados na Tabela 1, podemos calcular o valor teórico ou máximo esperado, para a relação entre as constantes de Henry para o oxigênio na água destilada e em uma fase dispersa de PFC, considerando as concentrações utilizadas no Oxyherol FC-43. Esta relação é dada pela Eq. (30).

$$H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(H_2O)} / H(O_2)^{37^{\circ}C}_{(PFC)} = 16,1 \quad \text{Eq.(30)}$$

A constante de Henry de uma mistura é determinada por meio de um balanço de massa de  $O_2$ , Eq.(31), na mistura, com a composição desejada descrita pela Eq.(32). A concentração de PFC usualmente é especificada em w/v, mas deve ser convertida utilizando sua densidade para v/v, pois a constante de Henry é expressa em função do volume de solução. Rearranjando os termos chega-se à Eq.(33), que torna possível obter o valor para a constante de Henry para a mistura emulsificada.

$$n(O_2)_{(mistura)} = n(O_2)_{H_2O} + n(O_2)_{PFC} \quad \text{Eq.(31)}$$

$$n(O_2)_{(mistura)} = pO_{2(mistura)} V_{(mistura)} \left( X_{H_2O} / H_{H_2O} + (1 - X_{H_2O}) / H_{PFC} \right) \quad \text{Eq.(32)}$$

$$1 / H_{(mistura)} = \left( X_{H_2O} / H_{H_2O} + (1 - X_{H_2O}) / H_{PFC} \right) \quad \text{Eq.(33)}$$

$n(\text{O}_2)_{\text{PFC}}$  e  $n(\text{O}_2)_{\text{H}_2\text{O}}$  são os números de moles na fração aquosa e de PFC da mistura com descrições análogas as das Eq.(2) e Eq.(4).

$X_{\text{H}_2\text{O}}$  = Fração volumétrica de água na mistura  $V_{\text{H}_2\text{O}} / (V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{PFC}})$ , e  $X_{\text{PFC}} = (1 - X_{\text{H}_2\text{O}})$  = fração volumétrica de PFC na mistura  $V_{\text{PFC}} / (V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{PFC}})$ .

### 3-5: A cela de acumulação.

Este componente da montagem experimental deve acomodar a maior parte possível da fase líquida, a qual recebe o Oxigênio do oxigenador de membrana. Nele também é posicionado o sensor que deve monitorar a  $p(\text{O}_2)$  durante os ensaios de saturação e extração do gás do líquido de teste.

Na montagem o volume da fase líquida ficará dividido em três principais porções: a retida na cela de acumulação, a em trânsito nas mangueiras e bomba, e a de passagem dentro do oxigenador. Para que a medida seja representativa da condição média do sistema, é preciso que a relação entre o volume na cela e no restante do sistema, seja a maior possível. Deve ser levado em conta que, caso o volume seja muito grande, o ensaio será muito demorado, e também que não há muita emulsão de perfluorcarbono disponível.

No projeto do equipamento, deve ser considerado que o tempo de ausência de uma porção de fluido da cela de acumulação deve ser minimizado. Isso faz com que a “atualização” em termos de  $p(\text{O}_2)$  seja mais rápida e o incremento causado por cada alíquota, menor, melhorando assim a representatividade da tensão média de  $\text{O}_2$  no sistema, sobre a qual será calculado o  $K_L a$ .

A cela deve ser bem agitada, para que haja uma rápida homogeneização entre o fluxo que chega do oxigenador sob teste e o volume que está dentro. No entanto, não pode ser muito, pois isso incrementaria a turbulência na superfície, contribuindo para o vazamento através desta.

O material de construção deve ser de baixa adsorção de Oxigênio. O volume adequado para o frasco deve acomodar o líquido com um mínimo de ar e com a mínima área de interface entre as fases, de modo a minimizar o vazamento virtual através da superfície do líquido agitado dentro do frasco.

Ao iniciar um ensaio de saturação da fase líquida com Oxigênio, há um atraso para que o gás na mangueira venha a substituir o Nitrogênio utilizado anteriormente para extraí-lo da fase líquida, e vice-versa. Na relação entre os tempos de trânsito das alíquotas das fases líquida e gasosa, a gasosa deve demorar mais, para que haja homogeneização da líquida antes de mudar o gás e iniciar o regime do experimento, seja este de saturação ou extração.

### **3-5-1: Interações do Oxímetro Polarográfico com a montagem experimental.**

Uma fonte de dúvidas é o funcionamento do oxímetro polarográfico YSI5300 em relação a montagem experimental. Para tanto, uma pesquisa preliminar foi realizada visando a conhecer quais fatores e quanto influenciam a medição.

Um recipiente acumulador para a fase líquida que será carregada de  $O_2$  deverá ser construído, e nele a concentração do gás deverá ser monitorada.

Como a leitura do instrumento é influenciada pelo tamanho do recipiente, agitação, temperatura, distância entre o ímã do agitador magnético e o sensor ou a relação massa de líquido/ massa de ímã?

As questões acima definem as variáveis relevantes a serem pesquisadas.

Variáveis de importância:

$M_{H_2O}$  = Massa de água no frasco.

$M_{Imã}$  = Massa do ímã utilizado no agitador.

$L_i$  = Comprimento do ímã.

$w$  = Rotação do agitador.

$d$  = Distância entre o Imã e o sensor.

$V_f$  = Volume do frasco utilizado.

$V_l$  = Volume de líquido utilizado.

$H_f$  = Altura do cone do Elemeyer.

$H_l$  = Altura do líquido dentro do Elemeyer.

$H_c$  = Altura do cone do Elemeyer até o gargalo.

$Db$  = Diâmetro da base do cone.

$\nu(T)$  = Viscosidade cinemática da água nas diferentes temperaturas ensaiadas.

A partir das variáveis acima podem ser definidas as relações, sendo que, com exceção do Número de  $Re$ , os outros são propostas do Autor:

$f_v$  = Proporção entre a altura e a base do cone =  $Db / (2 * H_f)$

$f_u$  = Proporção do volume =  $V_l / V_f$

$f_h$  = Proporção da altura =  $H_l / H_f$

$Mi/l$  = Relação entre a massa do ímã e do líquido no frasco =  $M_{ímã} / M_{H_2O}$

$Nag$  = Número adimensional de aproveitamento geométrico =  $f_u * f_h * f_v$

$Re$  = Número de Reynolds =  $w * L_i * d / \nu(T)$

A forma dos cinco modelos matemáticos considerados foi desenvolvida levando-se em conta o funcionamento do sensor que é baseado na reação química do  $O_2$  em seu sistema de eletrodos, sendo que a corrente desenvolvida é uma função da disponibilidade desta espécie, portanto de sua concentração. Logo, se o instrumento é afetado pela disponibilidade de reagente e uma reação química, ele pode ser descrito por uma forma similar a equação de Arrhenius, Eq.(34), onde um termo pré-exponencial  $A$ , descreve a disponibilidade de reagentes para a reação, classicamente choques efetivos, e o termo exponencial  $Ea/(R*T)$ , descreve como efeitos térmicos afetam a velocidade desta reação, classicamente a Energia de Ativação. Nestes modelos, visando simplicidade, o termo exponencial deve descrever o efeito da temperatura na reação, na difusão através da membrana e na difusão através da solução da cela do sensor.

$$\text{Taxa de reação} = A * e^{Ea/(R*T)} \quad \text{Eq.(34)}$$

$$\text{Modelo (1): Leitura} = X * pO_2 * Re^a * Mi/l^b * f_h^c * f_v^d * f_u^e * e^{(F/T)}$$

$$\text{Modelo (2): Leitura} = X * pO_2 * Re^a * Mi/l^b * Nag^c * e^{(D/T)}$$

$$\text{Modelo (3): Leitura} = X \cdot pO_2 \cdot Re^a \cdot Mi/l^b \cdot e^{(C/T)}$$

$$\text{Modelo (4): Leitura} = X \cdot pO_2 \cdot Re^a \cdot Nag^b \cdot e^{(C/T)}$$

$$\text{Modelo (5): Leitura} = X \cdot pO_2 \cdot Re^a \cdot e^{(B/T)}$$

Onde  $X$  é o fator de escala da calibração do instrumento, e  $pO_2$  a pressão parcial de  $O_2$  na fase gasosa em equilíbrio com o sistema, que neste caso foi a atmosférica, pois torna todo o experimento mais estável.

Constantes a serem determinadas:  $a, b, c, d, e, F$  para cada modelo.

Para a montagem do sistema de equações, devemos garantir que haja homogeneidade dimensional e que todas as equações descrevam os fenômenos na mesma escala.

A homogeneidade dimensional é garantida quando descrevemos o erro como sendo uma leitura em uma condição alterada do experimento dividida por uma leitura padrão de calibração. A mesma escala é garantida utilizando-se um ensaio como padrão de toda a grade de experimentos. Opta-se assim para a utilização da forma normalizada para montar as equações.

Leitura normalizada = leitura experimental (n)/ leitura na condição padrão de calibração (p)

$$\frac{\text{Leitura } 1}{\text{Leitura } p} = \frac{X \cdot pO_2 \cdot Nag_1^a \cdot (M_1H_2O / M_1imã)^b \cdot (L \cdot R \cdot d / v)_1^c \cdot e^{(D1/T1)}}{X \cdot pO_2 \cdot Nag_p^a \cdot (M_pH_2O / M_pimã)_p^b \cdot (L \cdot R \cdot d / v)_p^c \cdot e^{(Dp/T2)}} \quad (\text{Normalização})$$

É fundamental para o alinhamento entre as condições experimentais que as calibrações  $X$  e as  $pO_2$  sejam as mesmas, pois caso contrário isso irá gerar erros que acarretarão dificuldades para se ajustar as correlações empíricas. Como a solubilidade do  $O_2$  varia com a temperatura, é necessário que se faça a correção da concentração do gás na fase líquida.

Leitura 1 / Leitura p (padrão) = variação da leitura devido às variações nas condições experimentais.

Assim dividindo as relações definidas anteriormente para qualquer ensaio experimental pelos valores das relações obtidas para um ensaio considerado padrão, temos as relações normalizadas, seguidas pelo índice n, como exemplos: dado normalizado = Dado-n = leitura(experimento n) / leitura(ensaio padrão),  $Re-n = Re(\text{experimento } n) / Re(\text{ensaio padrão})$ . Re refere-se ao Número de Reynolds.

Deste modo os modelos tomam a forma:

$$\text{Modelo(1): } Dado-n = Re-n^{a1} * Mi/l-n^{b1} * fh-n^{c1} * fv-n^{d1} * fu-n^e * e^{F1((T-Tr)/Tr*T)}$$

$$\text{Modelo(2): } Dado-n = Re-n^{a2} * Mi/l-n^{b2} * Nag-n^{C2} * e^{D2((T-Tr)/Tr*T)}$$

$$\text{Modelo(3): } Dado-n = Re-n^{a3} * Mi/l-n^{b3} * e^{C3((T-Tr)/Tr*T)}$$

$$\text{Modelo(4): } Dado-n = Re-n^{a4} * Nag-n^{b4} * e^{C4((T-Tr)/Tr*T)}$$

$$\text{Modelo(5): } Dado-n = Re-n^{a5} * e^{B5((T-Tr)/Tr*T)}$$

Onde  $Tr$  é a temperatura na condição do ensaio padrão, sendo  $r$  de referência e  $T$  a do ensaio a ser avaliado. Ambas em Kelvin.

Cada ensaio gera uma leitura que origina uma equação. O conjunto de equações é então resolvido para cada modelo linearizado ajustado por regressão linear. Assim obtém-se um ajuste para os valores das constantes procuradas. São 162 ensaios ajustados aos 5 modelos.

A qualidade das correlações achadas é avaliada pelo coeficiente R de correlação, que dá a medida do quanto o sistema ajustado se adequou aos dados, e pelo erro médio, definido como a soma dos módulos de todos os erros entre os pontos experimentais e os calculados pelas correlações para as mesmas condições experimentais, dividido pelo número de ensaios. Estes

ensaios têm como justificativa a importância em saber o quanto mudanças nas condições experimentais podem alterar a leitura feita pelo oxímetro polarográfico de uma amostra com um mesmo valor de  $pO_2$ .

### 3-6: A perda de carga da fase gasosa no oxigenador.

A princípio, a perda de carga na fase gasosa foi abordada neste trabalho como um detalhe, visando a correção da pressão parcial de Oxigênio na fase gasosa para a Equação de transferência de massa. Mas foi percebido que poderia originar um método de avaliação da área de troca em oxigenadores de membrana, baseado justamente na perda de carga, pois esta é proporcional à área de escoamento, que é proporcional ao número de fibras viáveis, que por sua vez é proporcional a área de troca, que esta sendo procurada.

Pelo fato de o comprimento da fibra ser mais de 100 vezes o seu diâmetro, pode-se inferir que pequenas diferenças no corte não gerem desvios que sejam importantes na composição da perda de carga.

Mesmo sendo de dimensões pequenas, as fibras são neste trabalho consideradas como tubos no que se refere ao escoamento, seguindo os procedimentos de cálculo padrão aplicado a tubos<sup>82</sup>,  
86

As membranas, ou fibras são como pequenos tubos com paredes porosas, seu diâmetro interno médio é de 280 $\mu$ m, e seus poros são de 0,5  $\mu$ m de diâmetro, o que confere um aspecto superficial razoavelmente liso com a relação da rugosidade pelo diâmetro,  $\epsilon / D = 1,8 \cdot 10^{-3}$ . A porosidade das paredes permite que o gás as atravesse dividindo o fluxo, parte percorrendo a fibra, parte vazando através das paredes. Torna-se assim necessário que se impeça esta fuga, de modo que seja medida a perda de carga do fluxo que percorre a fibra sem que este se divida saindo através das paredes das membranas. Isso é conseguido vedando-se as paredes das membranas por fora com água sob uma pressão levemente superior a aplicada pelo gás.

### 3-6-1: Correção da queda de pressão na fase gasosa.

A força motriz para a transferência de massa é considerada como baseada na diferença de concentrações. Como este sistema é referenciado na fase gasosa, o cálculo é feito sobre pressões parciais, então a força motriz é definida pela diferença entre a  $pO_2$  de equilíbrio com a fase líquida e a  $p^*O_2$  que é a pressão parcial de  $O_2$  na fase gasosa. Um fluxo de gás ao atravessar um duto sofre uma resistência ao seu movimento, e esta reflete como uma queda de pressão ao longo do caminho, isso faz com que seja necessário que uma pressão seja aplicada ao gás para que ele se mova e atravesse o caminho. Esta pressão que é perdida ao longo do duto é denominada perda de carga, e também causa uma alteração na pressão parcial dos gases envolvidos no escoamento. No caso das membranas influenciam o transporte de massa, pois causam um aumento na pressão parcial do gás conforme mostrado na Figura 7 e na Eq.(35).

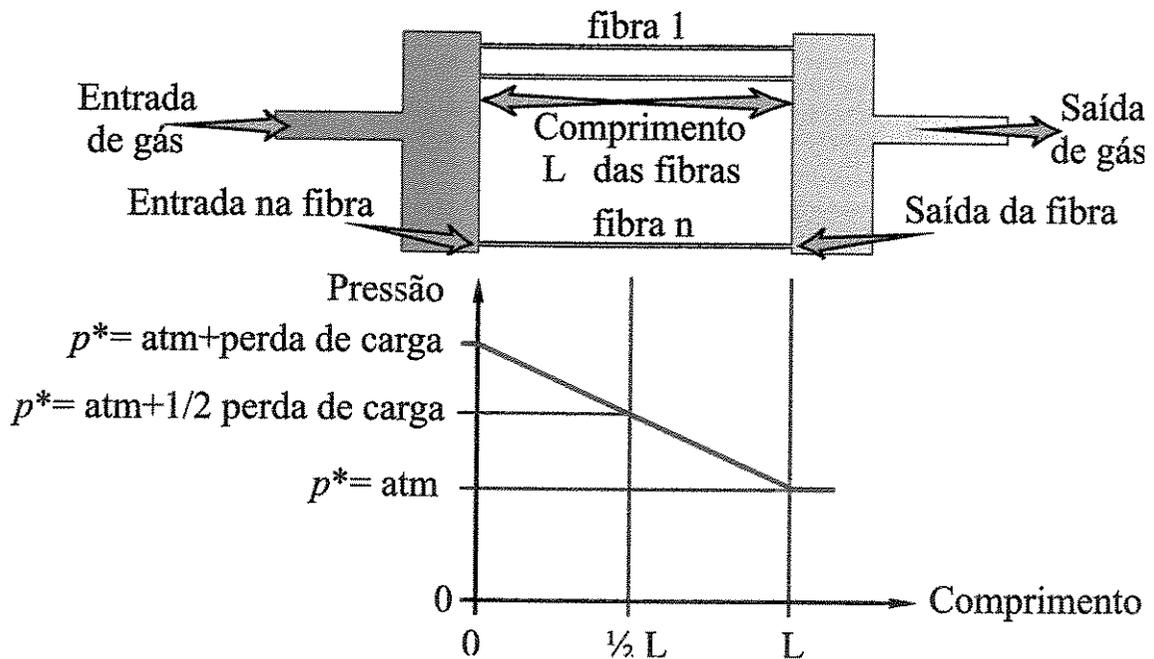


Figura 7: Representação do efeito da perda de carga na fase gasosa sobre a  $p^*O_2$ .

$$p^*O_2(\text{médio}) = 1/L \int_0^L (p^*O_2(L)) dL = Patm + 1/2h_L \quad \text{Eq.(35)}$$

O  $K_{La}$  será calculado de três formas para comparação: sem a correção da perda de carga na fase gasosa, com a correção de ½ perda de carga conforme a Eq.(35), e com a correção integral desta. Espera-se que a correção de ½ perda de carga seja a que mais se aproxime da realidade, gerando menores barras de erro e uma curva de simulação numérica que mais se aproxime dos dados experimentais.

### 3-6-2: Escoamento da fase gasosa

Conforme o regime de escoamento que ocorre, o aspecto de rugosidade da parede interna da membrana pode ou não ter importância no cálculo da perda de carga. Se o regime for turbulento, a rugosidade tem um efeito importante, influenciando o fator de fricção de Fanning,  $f_f$ , que deve ser calculado utilizando-se o procedimento com o gráfico de Moody, e a perda de carga fica mais sujeita às variações da rugosidade interna da fibra, que pode ocorrer de lote para lote. Dado difícil de se obter. Se for laminar, o  $f_f$  é função apenas do número de Reynolds,  $Re$ , e variações na rugosidade pouco influenciam na perda de carga e assim no resultado do teste.

Para avaliar o tipo de escoamento procede-se calculando do Número de Reynolds a partir de valores em unidades no S.I., segundo a Eq.(36), utilizando a velocidade do gás dentro da fibra,  $V_{(gás)}$ , calculada utilizando a Eq.(37), sendo  $\rho$  a densidade,  $\mu$  a viscosidade e  $Q$  a vazão.

$$Re = \rho_{(gás)} * V_{(gás)} * D_{(tubo)} / \mu_{(gás)} \quad \text{Eq.(36)}$$

$$V_{(gás)} = Q / (N_{(fibras)} * A_{(fibra)}) = 4 * Q / (\pi * D^2 * N_{(fibras)}) \quad \text{Eq.(37)}$$

$V_{(gás)}$  = Velocidade do gás em m/s.

$Q$  = Vazão do gás em m<sup>3</sup>/s.

$N_{(fibras)}$  = Número de fibras.

$A_{(fibra)}$  = Área de escoamento interna da fibra.

$D$  = Diâmetro interno da fibra.

$h_L$  = Perda de carga do gás ao atravessar a fibra.

$f_f$  = Fator de Fanning.

$K_i$  = Coeficiente associado a acidentes.

$\Delta P$  = Diferença de pressão.

$L$  = Comprimento.

$g$  = Aceleração da gravidade.

$\mu_{gás}$  = Viscosidade do gás.

$\rho_{gás}$  = Densidade do gás.

Os valores encontrados para o número de Reynolds para as vazões ensaiadas nestes dispositivos dentro das fibras ficam entre 2 e 15. Nas regiões dos distribuidores e suas entradas e saídas,  $Re$  é menor que 100. Isto define o escoamento como sendo seguramente do tipo laminar, em todo o circuito de escoamento de gás dentro deste modelo de oxigenador.

A perda de carga  $h_L$  pode ser calculada utilizando a Eq.(38) de Fanning, adequada para escoamentos que possam ser considerados não compressíveis, laminares e em tubos. Os  $K_i$ s são os coeficientes associados aos acidentes de entradas e saídas. A diferença de pressão  $\Delta P$  é associada à perda de carga  $h_L$  através da relação apresentada na Eq.(39), sendo  $L$  comprimento,  $g$  aceleração da gravidade.

$$h_L = V^2/g * (2*f_f*L / D + \sum_i K_i / 2) \quad \text{Eq.(38)}$$

$$\Delta P = h_L * \rho_{(fluido\ manométrico)} * g \quad \text{Eq.(39)}$$

Neste tipo de escoamento o fator de fricção de Fanning,  $f_f$ , não é função da rugosidade do tubo, ele é calculado diretamente utilizando o número  $Re$ ,  $f_f = 16/Re$ . O fato de o escoamento ser laminar implica em que o efeito da rugosidade da superfície fica amortecido por efeitos viscosos do fluido. Isto é interessante para este estudo, pois uma pequena variação na rugosidade ou na distribuição média do tamanho dos poros da membrana pode ser mascarada por este efeito da

viscosidade do gás, não desviando em demasia o resultado do teste, por não afetar a perda de carga.

Uma descrição dos fatores que influenciam o fluxo do gás ao atravessar o oxigenador é mostrada na Figura 8. A Eq.(40) descreve a composição da perda de carga, e a Eq.(41) apresenta a composição dos termos da Eq.(40), onde  $V_e$ ,  $V_f$  são as velocidades do gás nos circuitos dos distribuidores de entrada e saída e na fibra,  $K_{de}$ ,  $K_{ds}$ ,  $K_{fe}$ ,  $K_{fs}$  são os coeficientes associados aos acidentes de entradas e saídas dos distribuidores e da fibra, respectivamente.

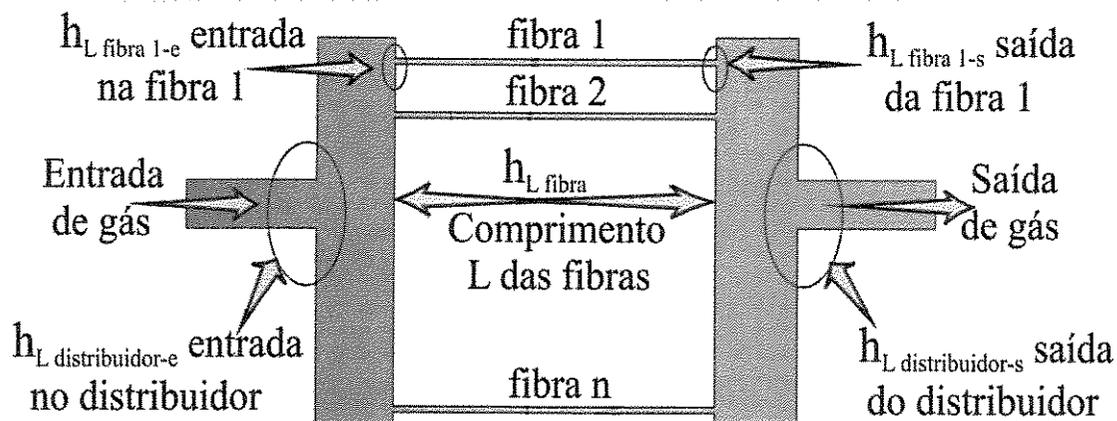


Figura 8: Descrição dos acidentes aos quais o fluxo de gás de teste é submetido ao percorrer o circuito de gases de um oxigenador de membranas.

$$h_{L(total)} = h_{L(distribuidor\ entrada)} + h_{L(fibras)} + h_{L(distribuidor\ saída)}$$

Eq.(40)

$$h_{L(total)} = V_e^2 / g * (4 * f_f * L / D + (K_{de} + K_{ds}) / 2) + V_f^2 / g * ((K_{fe} + K_{fs}) / 2 + 2 * f_f * L / D)$$

Eq.(41)

$V_e$ ,  $V_f$  são as velocidades do gás nos circuitos dos distribuidores de entrada e saída e na fibra.

$K_{de}$ ,  $K_{ds}$ ,  $K_{fe}$ ,  $K_{fs}$  são os coeficientes associados aos acidentes de entradas e saídas dos distribuidores e da fibra respectivamente.

Considerando um Oxigenador como padrão e outro como sob teste, substituindo a Eq.(37) e os demais valores; e dividindo a Eq.(41) para o oxigenador padrão pela Eq.(41) para o sob teste temos que:

Os termos relativos aos distribuidores de entrada e saída podem ser ignorados, pois são pequenos constantes e quando estas peças apresentam defeito, estes são fáceis de detectar com a inspeção visual. Os termos relativos ao  $h_{L(fibras)}$ , correspondem a maior parte da perda de carga à passagem do gás, e não são analisáveis visualmente, no entanto todos os termos com exceção do número de fibras são iguais aos dois e portanto se cancelam. Os termos que sobram compõem então a Eq.(42), que descreve a relação entre a perda de carga entre dois oxigenadores e a proporção entre os números de fibras ativas em cada um. A Eq.(39) pode ser substituída na Eq.(42) para descrever a relação entre o número de fibras e a queda de pressão nos dispositivos testados, gerando a Eq.(43).

$$h_{L \text{ total (teste)}} / h_{L \text{ total (padrão)}} = N_{fibras \text{ (padrão)}} / N_{fibras \text{ (teste)}}$$

Eq.(42)

$$\Delta P \text{ (padrão)} / \Delta P \text{ (teste)} = h_{L \text{ (padrão)}} / h_{L \text{ (teste)}} = N_{fibras \text{ (teste)}} / N_{fibras \text{ (padrão)}}$$

Eq.(43)

### 3-6-3: Simulação do escoamento da fase gasosa

A substituição da Eq.(36), Eq.(37) e a relação do fator de Fanning na Eq.(41), origina a Eq.(44) para a perda de carga  $h_L$ , em função da vazão  $Q$  e do número de fibras disponíveis  $N_{(fibras)}$ . Com esta equação é realizada uma simulação numérica com a finalidade de analisar o comportamento esperado para o sistema.

$$h_{L(fibras)} = 16 / (g \cdot D^4) \cdot [Q^2 / N_f^2 \cdot 1/\pi^2 \cdot \sum_i K_{fi} / 2 + Q / N_f \cdot 8 \cdot L / \pi \cdot \mu_{gás} / \rho_{gás}]$$

Eq.(44)

A utilidade desta simulação é verificar como se comporta a perda de carga em função da variação do número de fibras, e qual o efeito da vazão, de modo a se poder escolher melhores condições experimentais para se ter melhor resolução na avaliação de um oxigenador.

### 3-7: Fórmulas para correlações para ajustes de curvas com duas variáveis

Os dados experimentais encontrados para os  $K_{LAs}$  serão ajustados em correlações empíricas em função das vazões das fases gasosa e líquida. Serão utilizadas diversas formas matemáticas propostas pelo Autor para as correlações, identificadas e descritas a seguir, sendo em alguns casos necessário ajustar por regressão linear até 9 constantes.

Correlação exponencial com 12 ou 16 pontos, abreviação cexp 12 ou cexp 16, forma descrita na Eq.(45).

$$K_L a = a_0 * V_{Gas}^{a_1} * V_{Liq}^{a_2} \quad \text{Eq.(45)}$$

Correlação logarítmica com 12 ou 16 pontos, abreviação clog 12 ou clog16, forma descrita na Eq.(46).

$$K_L a = a_0 * a_1^{V_{Liq}} * a_2^{V_{Gas}} \quad \text{Eq.(46)}$$

Correlação polinomial 3ª ordem para a vazão do gás e 3ª ordem para a vazão do líquido com 12 ou 16 pontos, abreviação cp 3x3x12 ou cp 3x3x16, forma descrita na Eq.(47).

$$K_L a = a_0 + a_1 * V_{Liq} + a_2 * V_{Liq}^2 + a_3 * V_{Liq}^3 + a_4 * V_{Gas} + a_5 * V_{Gas}^2 + a_6 * V_{Gas}^3 \quad \text{Eq.(47)}$$

Correlação polinomial 4ª ordem para a vazão do gás e 4ª ordem para a vazão do líquido com 12 ou 16 pontos, abreviação cp 4x4x12 ou cp 4x4x16, forma descrita na Eq.(48).

$$K_L a = a_0 + a_1 * V_{Liq} + a_2 * V_{Liq}^2 + a_3 * V_{Liq}^3 + a_4 * V_{Liq}^4 + a_5 * V_{Gas} + a_6 * V_{Gas}^2 + a_7 * V_{Gas}^3 + a_8 * V_{Gas}^4$$

Eq.(48)

Correlação poli-logaritmica 3ª ordem para a vazão do gás e 3ª ordem para a vazão do líquido com 12 ou 16 pontos, abreviação cpl 3x3x12 ou cpl 3x3x16, forma descrita na Eq.(49).

Notação:  $K_L a$  é igual a  $a_0$  vezes  $a_1$  elevado a Vazão o líquido vezes  $a_2$  elevado a Vazão do líquido elevado ao quadrado vezes  $a_3$  elevado a vazão do líquido elevada ao cubo, e assim por diante.

$$K_L a = a_0 * a_1^{V_{Liq}} * a_2^{V_{Liq}^2} * a_3^{V_{Liq}^3} * a_4^{V_{Gas}} * a_5^{V_{Gas}^2} * a_6^{V_{Gas}^3}$$

Eq.(49)

Correlação poli-logaritmica 4ª ordem para a vazão do gás e 4ª ordem para a vazão do líquido com 12 ou 16 pontos, abreviação cpl 4x4x12 ou cpl 4x4x16, forma descrita na Eq.(50).

$$K_L a = a_0 * a_1^{V_{Liq}} * a_2^{V_{Liq}^2} * a_3^{V_{Liq}^3} * a_4^{V_{Liq}^4} * a_5^{V_{Gas}} * a_6^{V_{Gas}^2} * a_7^{V_{Gas}^3} * a_8^{V_{Gas}^4}$$

Eq.(50)

$V_{gás}$  = vazão volumétrica do gás em l/min.

$V_{liq.}$  = vazão volumétrica do líquido em l/min.

$a_0$  a  $a_8$  = constantes ajustadas.

### 3-8: Ensaios de transporte de massa normalizados.

Neste trabalho os resultados dos ensaios serão apresentados de duas formas, uma com as vazões de suas fases líquida e gasosa na unidade l/min, e outra, dividindo as vazões pelas vazões recomendadas pelo fabricante. Esta é a normalização para a apresentação e análise dos resultados. A vazão quando normalizada é igual a 1, refere-se a vazão indicada de operação do dispositivo.

Esta forma de visualização permite comparar eficiência nas condições de operação.

## Capítulo 4

### Experimental e Métodos

Este capítulo é dedicado à descrição dos materiais, das montagens experimentais, dos métodos experimentais utilizados para obter os dados e os métodos numéricos, para extrair a informação procurada dos dados experimentais. A estratégia de procura dos dados experimentais é dividida em duas partes distintas: os ensaios preliminares, e a avaliação dos dispositivos de troca de massa, descritos na primeira e na segunda etapa respectivamente.

Os métodos numéricos são utilizados na etapa dos ensaios preliminares como uma ferramenta analítica visando avaliar a qualidade obtida no ensaio preliminar. Quando foram encontradas as condições para se obter a qualidade desejada, o método foi considerado pronto para os ensaios de avaliação dos dispositivos de troca de massa.

Os ensaios preliminares são a etapa onde se pretende adquirir as informações necessárias para o método de análise dos dispositivos de troca de massa, tais como a Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono, características dos instrumentos e dos componentes a serem testados. Estas são informações essenciais para construir uma cela acumuladora e uma montagem adequada à exploração dos dispositivos de troca de massa.

A estratégia geral de desenvolvimento é descrita na Figura 9. Na Figura 10 é descrita a grade de exploração dos diferentes dispositivos com as duas fases líquidas e com os dois gases. Na Figura 11 é descrita de forma um pouco mais detalhada a interação entre os conceitos teóricos aplicados, o procedimento experimental prático e a experimentação numérica, de modo a se determinar o melhor caminho para obter dados com qualidade.

Inicialmente são experimentados os instrumentos, seu funcionamento, estabilidade e como se relacionam suas medidas. Estes tópicos serão abordados nos Itens 4-1-1-a e 4-1-1-b.

Para o ensaio dinâmico escolhido para a avaliação do coeficiente de troca de massa, uma alíquota definida de líquido deve ser contida em um frasco com uma rápida homogeneização. O sensor polarográfico deve ler o valor da tensão de Oxigênio,  $pO_2$ , neste frasco, e é importante que a maior parte do líquido esteja nele para representar da melhor forma possível a tensão média de Oxigênio no sistema. A interação do Oxímetro Polarográfico YSI 5300 com as variáveis de construção deste frasco, a cela acumuladora, é importante para se saber o que está realmente sendo medido, e é abordada no Item 4-1-2.

A constante de Henry,  $H$ , tem um papel fundamental no transporte de massa entre fases, como neste caso. Ela descreve a distribuição do soluto, neste caso o Oxigênio, entre as fases, e quanto dele se dissolverá na fase líquida a partir de uma pressão parcial,  $pO_2$ , na fase gasosa. Para avaliar a troca de massa em oxigenadores de membrana com emulsão de perfluorcarbono, é necessário saber quanto esta dissolve de Oxigênio. Esta tarefa é abordada no item 4-1-3.

As informações dos itens anteriores permitem a montagem de uma cela acumuladora para teste onde serão avaliados parâmetros de operação tais como: o volume de líquido a ser utilizado, o tempo do ensaio e a taxa de coleta de dados de tensão de Oxigênio,  $pO_2$ . Isto será abordado no item 4-1-4.

A queda de pressão na fase gasosa ao percorrer as membranas gera um efeito que deve ser corrigido conforme mostrado nas equações do Capítulo 3. A medição desta queda em função das vazões utilizadas é descrita no item 4-1-5-a, e a simulação numérica da Eq.(44), visando prever o comportamento do sistema para variações de maior amplitude na vazão do gás e no número de fibras, é abordada no item 4-1-5-b.

Uma coluna de recheio foi construída para comparar seu desempenho e operação com os oxigenadores de membrana. Sua caracterização é abordada no item 4-1-6-a, b, c, d, e.

Obtidos os dados experimentais inicia-se a etapa de processamento numérico para achar o valor do  $K_L a$ , etapa abordada no item 4-1-7. A primeira parte é a simulação numérica da Eq.(22) e está no item 4-1-7-a, a segunda é um estudo de como a seleção dos dados afeta o valor encontrado que é checado contra a simulação numérica e está no item 4-1-7-b e a terceira é o procedimento para encontrar o  $K_L a$  aplicado em outros ensaios e checados com a ferramenta de simulação numérica. Está no item 4-1-7-c.

De posse dos resultados obtidos nos itens descritos acima, os ensaios preliminares estarão concluídos e será possível realizar os ensaios de transferência de massa para a avaliação dos dispositivos a serem testados. São três modelos de oxigenadores de sangue tipo membrana e uma coluna de recheio, os quais devem ser submetidos a testes utilizando-se água destilada, abordados nos Itens 4-2-1 a, b, c, d, e e f; e utilizando emulsão de perfluorcarbono, que são abordados nos Itens 4-2-2 a, b e c conforme descritos na figura 10.

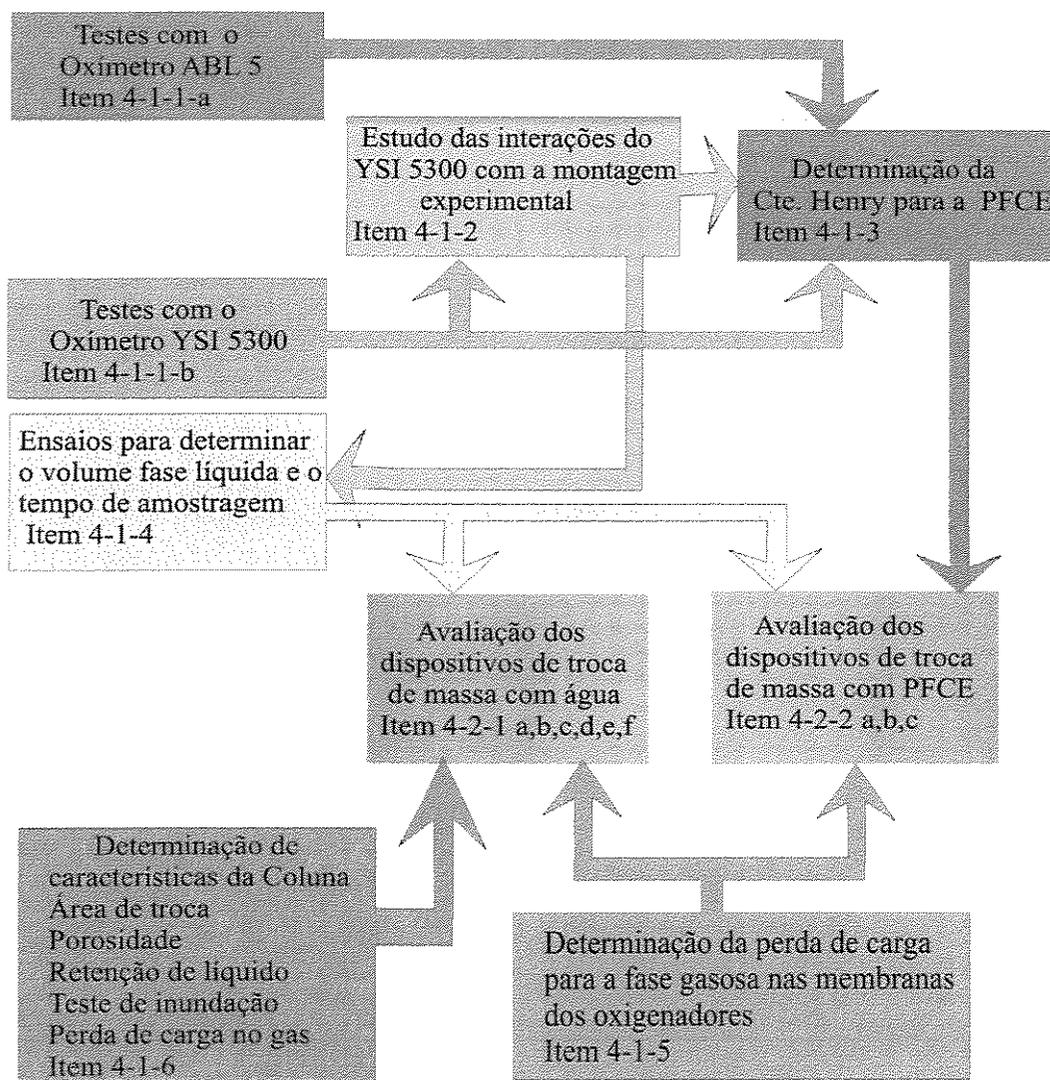


Figura 9: Estratégia de procura de informações aplicada neste trabalho. Ensaios preliminares e ensaios de avaliação dos dispositivos de troca de massa

Os ensaios devem ser realizados de forma alternada, sendo um de saturação com Oxigênio seguido por um de extração com Nitrogênio e assim por diante. Esta estratégia permite que se

utilize a mesma fase líquida para todos os ensaios do mesmo tipo, evitando a contaminação com algo que possa alterar a sua capacidade de dissolver gases, eliminando assim uma possível chance de erro experimental. Permite também uma melhor agilidade e redução de custo com fase líquida. Outra vantagem é que a extração do Oxigênio para o ensaio seguinte é aproveitada como um ensaio de extração para se avaliar o coeficiente de troca de massa na remoção do Oxigênio da fase líquida.

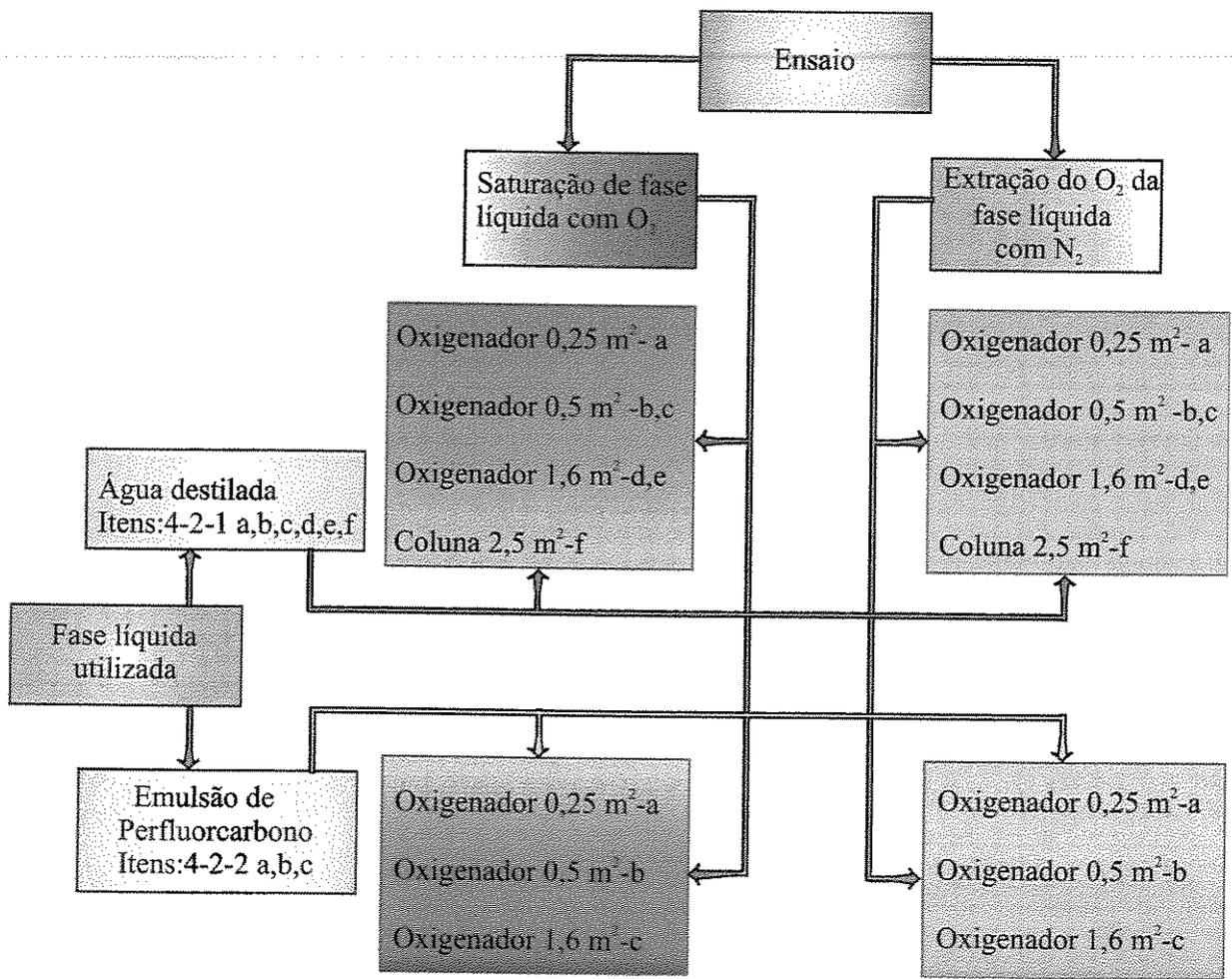


Figura 10: Diagrama dos ensaios de avaliação dos dispositivos de troca de massa dos itens 4-2-a e 4-2-b.

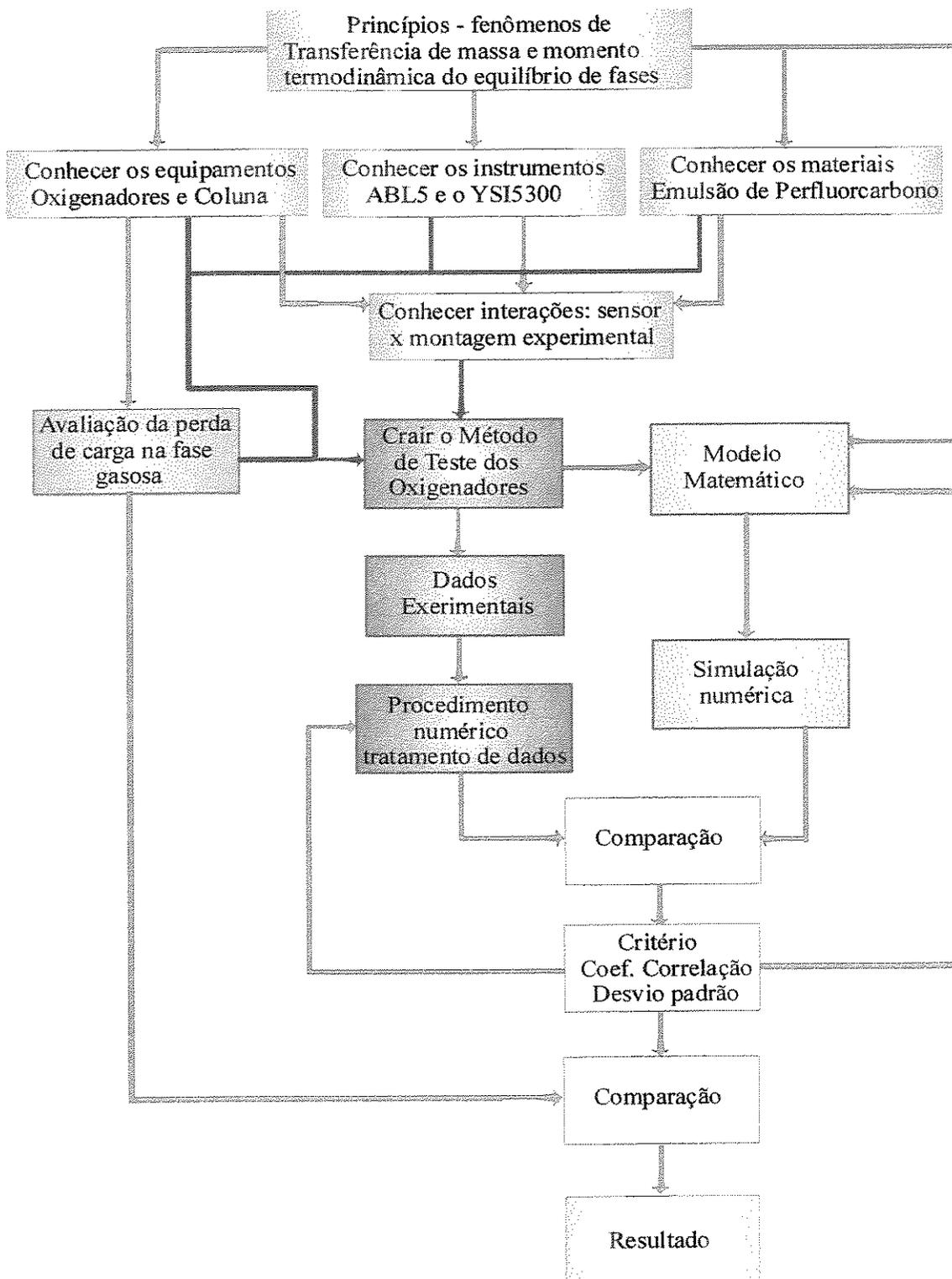


Figura 11: Fluxograma explicativo das interações entre conceitos básicos, dados experimentais e práticas numéricas no aprimoramento da análise dos dados, visando ao melhor resultado.

A aplicação dos conceitos de termodinâmica do equilíbrio de fases e fenômenos do transporte, especificamente momento e massa, aos equipamentos, instrumentos e materiais leva ao conhecimento das interações entre instrumentos e montagem experimental. Este permite criar um método de teste, que pode ser representado por um modelo matemático.

A avaliação da perda de carga na fase gasosa é uma aplicação do conceito de transporte de momento necessária no método de teste por transferência de massa e no modelo matemático, que gerou um outro método para teste dos oxigenadores.

Os dados experimentais passam por um procedimento de seleção e cálculo, e são comparados com o resultados da simulação numérica do modelo matemático e entre si através de análise de desvio padrão e coeficiente de correlação.

O resultado do trabalho é apresentado tendo a comparação entre os valores obtidos pelo método de transferência de massa e de perda de carga na fase gasosa, conforme a Figura 11.

#### **4-1: Ensaios preliminares.**

Para que o estudo seja o mais coerente possível, é necessário saber o que os instrumentos dizem com suas leituras e como as condições experimentais no ato de medição as influenciam. Quais fatores podem vir a serem problemáticos.

##### **4-1-1: Estudos relacionados ao funcionamento dos instrumentos.**

A exploração é iniciada analisando-se a estabilidade da leitura de  $pO_2$  feita pelo ABL5 em uma alíquota de água em uma seringa, primeiramente em equilíbrio térmico a  $37^\circ C$  e com a atmosfera, depois em equilíbrio com variadas  $pO_2$ , item 4-1-1-a. Continuam os ensaios, visando a analisar o comportamento do oxímetro polarográfico YSI 5300 4-1-1-b.

#### 4-1-1-a: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo ABL5.

Foram utilizados os seguintes equipamentos neste trabalho: Analisador de gases para uso médico ABL5 da Radiometer Copenhagen DK., cilindros de Oxigênio e Nitrogênio com reguladores de pressão e vazão, Elemeyer 250 ml, seringa de 10 ml de material plástico, Banho termostático Haake F3 com ajustes variando em 0,1 °C.

Estes ensaios são divididos em duas partes:

Na primeira uma alíquota de água em equilíbrio térmico a 37°C e em equilíbrio com a atmosfera é colocada dentro de uma seringa de plástico, mantida a temperatura constante e 10 leituras consecutivas são feitas utilizando o ABL5. Este ensaio visa a verificar a repetibilidade da leitura do ABL5 uma vez que tudo é mantido em uma situação de equilíbrio estável.

A segunda é uma repetição da primeira, porém com água purgada de Oxigênio, fora de equilíbrio com o meio o qual por sua vez está em equilíbrio com a atmosfera. A alíquota de água em um Elemeyer foi purgada com um fluxo de 0,5 l/min de Nitrogênio por 1 hora. Uma amostra de 20ml da água purgada foi retirada com uma seringa plástica para 20ml e analisada no ABL 5.

Tendo o dado do comportamento do instrumento frente a uma amostra inerte em equilíbrio com o meio ambiente, a comparação com uma outra amostra fora do equilíbrio mostra a influência na leitura causada pela seringa que está em equilíbrio com o meio.

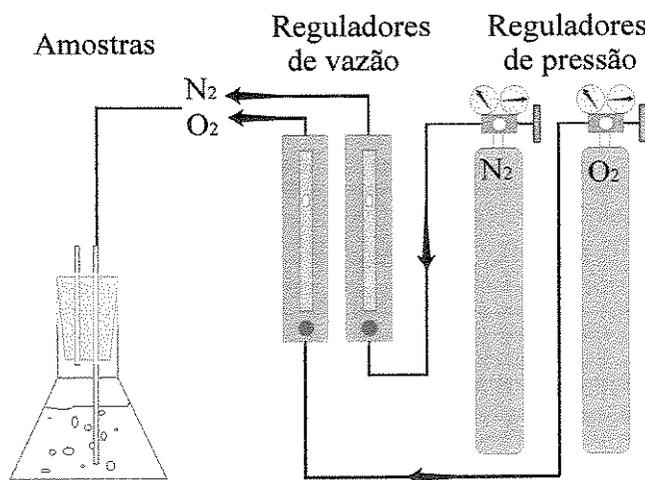


Figura 12: Montagem experimental para avaliar o efeito da espera em seringa sobre o valor determinado para leitura em diversas  $pO_2$ .

#### 4-1-1-b: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo YSI 5300.

Uma alíquota de água em um Elemeyer aberto, com agitação constante e em banho termostático a 37°C, foi monitorada com o sensor do instrumento YSI 5300 e um termômetro. A montagem foi observada por 4 horas. Foi utilizada uma montagem semelhante a da Figura 13.

#### **4-1-1-c: A linearidade do YSI 5300 em função da $pO_2$ .**

Este é um experimento computacional, dados de corrente de resposta do sensor do instrumento frente a diferentes valores de  $pO_2$ , provenientes do manual do fabricante do YSI 5300, foram colocados em gráfico e uma regressão linear foi aplicada. A intenção é verificar o quanto pode ser considerada linear a resposta do instrumento frente à variação de  $pO_2$ . Se for linear o suficiente, o procedimento com apenas um ponto experimental para a calibração do instrumento pode ser utilizado.

#### **4-1-1-d: Determinação do tempo de resposta a um degrau para o YSI 5300.**

Este experimento é computacional, dados de tempo de resposta do sensor do instrumento frente a variações em degrau no valor de  $pO_2$ , provenientes do manual do fabricante do YSI 5300, foram colocados em gráfico e uma função exponencial foi ajustada. A intenção é obter a função de resposta para se poder calcular o tempo de resposta do instrumento,  $\Gamma$ , frente à variação em degrau de  $pO_2$ .

#### **4-1-1-e: Comparação entre as leituras dos oxímetros ABL 5 e do YSI 5300.**

Segundo o manual do ABL 5, o instrumento tende a errar em medidas de  $pO_2$  elevadas. Como o YSI 5300 é tido como linear até 1 atm de  $O_2$ , foi realizado este ensaio comparativo. A montagem do item 4-1-1-a descrita na Figura 12 foi instrumentada com o YSI5300 e utilizada no ensaio. Ajustando as vazões dos gases, várias situações de  $pO_2$  foram fabricadas, então alíquotas com valor determinado pelo YSI 5300 foram submetidas a teste pelo ABL5.

#### **4-1-1-f: Análise do efeito do tempo de espera em uma seringa.**

Este experimento é planejado para avaliar o efeito na leitura causado pela espera para a amostra ser analisada. O ABL5 demora cerca de 2,5 minutos por análise, logo, uma taxa de amostragem maior, que leve a períodos entre coletas de amostras menores que este intervalo, fará com que amostras tenham que esperar em seringas para serem analisadas. Este ensaio avalia o efeito desta espera.

Um Elemeyer com água em equilíbrio térmico a 37°C é borbulhada com diversas misturas de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> de modo a gerar amostras com diversas pO<sub>2</sub>, conforme montagem descrita na Figura 12. Após atingir o equilíbrio, amostras são retiradas por uma seringa, analisadas imediatamente e novamente após 3 minutos. Os resultados são colocados em gráfico para se comparar o efeito da espera na seringa.

#### **4-1-2: Explorando o comportamento do oxímetro polarográfico YSI 5300 em relação à montagem experimental.**

Em oximetria aplicada à água, trabalha-se com concentrações muito baixas de Oxigênio. Como pode ser visto na segunda parte do item 4-1-1-a, o plástico da seringa influencia a leitura, daí a justificativa do estudo que se segue.

Foram utilizados os seguintes equipamentos neste trabalho: Oxímetro polarográfico YSI 5300, Yellow Springs Instruments Ohio USA. Banho termostático Haake F3 com ajustes variando em 0,1 °C. Agitador magnético Fisatom 752 A. Dois finais de tubo de PVC, tipo cap, um de 4 polegadas e o outro de 12 polegadas. Dois trocadores de tubo de cobre com 4 espiras cada, sendo um com 1,2 m e outro com 2,2 m, e enrolados para caberem dentro dos caps como serpentinas de aquecimento. Dois ímãs para o agitador magnético, um com 4,2g e o outro com 12,2g. Três Elemeyers, 250ml, 500ml, 2000ml.

Foram realizados 5 tipos de ensaios com diferentes combinações de características da montagem experimental, descritas na Tabela 2. As temperaturas exploradas foram: 25, 30, 35, 37,

40, e 45 °C, e as rpms no agitador magnético foram: 80, 240, 400, 560, 720, 880 e 1040, sendo que as mais rápidas não puderam ser utilizadas em todos os ensaios por problema de estabilidade do agitador magnético. A temperatura de 37°C foi incluída por ser a temperatura corporal e para um oxímetro esta é uma importante situação de operação, especialmente neste caso.

Por ser um estudo envolvendo equilíbrio de transferência de massa em diferentes temperaturas, foi tomado o cuidado de se esperar o equilíbrio térmico por meia hora e o equilíbrio de concentração de gases por mais uma hora. Só após o equilíbrio com a temperatura e com a atmosfera estar completamente desenvolvido, o instrumento teve sua escala regulada no valor de referência.

Tabela 2: Planilha de variáveis experimentais exploradas nos ensaios.

| Ensaio | M<br>ímã<br>g | L<br>ímã<br>cm | d ímã<br>sensor<br>cm | Vol<br>Liq.<br>ml | Vol<br>Elem.<br>ml | H<br>Liq.<br>cm | H<br>Elem.<br>Cm | diam.<br>Elem.<br>cm | M/M<br>g/g | Fv<br>d/(2.h)<br>cm/cm | fh<br>cm/<br>cm | fu<br>ml/m<br>l | Nag<br>- |
|--------|---------------|----------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------------------|------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------|
| 1      | 12,2          | 4              | 1                     | 200               | 250                | 5               | 10               | 8,3                  | 16,39      | 0,415                  | 0,5             | 0,8             | 0,166    |
| 2      | 4,2           | 1,8            | 1                     | 200               | 250                | 5               | 10               | 8,3                  | 47,61      | 0,415                  | 0,5             | 0,8             | 0,166    |
| 3      | 4,2           | 1,8            | 4                     | 400               | 500                | 7,5             | 12,5             | 9,8                  | 95,23      | 0,392                  | 0,6             | 0,8             | 0,188    |
| 4      | 12,2          | 4              | 10                    | 2000              | 2000               | 19              | 21,5             | 16,5                 | 163,93     | 0,384                  | 0,88<br>4       | 1               | 0,339    |
| 5      | 4,2           | 1,8            | 10                    | 2000              | 2000               | 19              | 21,5             | 16,5                 | 476,19     | 0,384                  | 0,88<br>4       | 1               | 0,339    |

A montagem experimental é semelhante a da Figura 13 mostrada no item a seguir, porem sem a proveta para a emulsão.

#### 4-1-3: Avaliação da Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono, PFCE.

Esta foi uma etapa difícil do trabalho. Quase 1000 ensaios foram realizados tentando medir a capacidade de dissolver o Oxigênio pela emulsão de perfluorcarbono, tanto com o ABL 5 como com o YSI 5300. Foram realizados ensaios variando a diluição da emulsão, a temperatura, o grau de agitação no Elemeyer, a distância do sensor ao ímã, a calibração do YSI 5300, e todos os resultados indicaram apenas a  $pO_2$  da água. Quase a metade da emulsão com validade de 1 ano,

que estava vencida há seis, foi gasta, até que foi encontrado um meio para medir sua capacidade de dissolver o Oxigênio.

#### **4-1-3-a: Ensaio variando a concentração da emulsão de perfluorcarbono.**

Dos ensaios exploratórios acima, foi escolhido como ilustração o da variação de concentração da emulsão de perfluorcarbono, ou seja, de diluição. Nestes ensaios os dois oxímetros disponíveis, o ABL5 e o YSI 5300 foram utilizados na avaliação, um confirmando o resultado do outro, junto com a montagem da Figura 13. Foram estudadas alíquotas da emulsão de perfluorcarbono marca Oxypherol FC-43 na sua concentração original, chamada de 100%, diluída a 50%, 25% e 10%, e água destilada, submetidas a equilíbrio com a atmosfera e com um fluxo de Oxigênio borbulhando no Elemeyer.

#### **4-1-3-b: Ensaios para a determinação da Constante de Henry para emulsão de perfluorcarbono.**

Foram utilizados os seguintes equipamentos: Oxímetro polarográfico YSI 5300, Yellow Springs Instruments Ohio USA. ABL-5 Gás analyser da Radiometer Copenhagen DK. Banho termostático Haake F3 ajustavel em 0,1 °C. Agitador magnético Fisatom 752 A. Travessa de PVC com 15 x 30 cm altura 15 cm. Um trocador de tubo de cobre com sete espiras e diâmetro externo 8 mm, dobrado para caber dentro da travessa. Um ímã para agitador magnético com 12,2g. Um Elemeyer de 250 ml. Uma Proveta de 50 ml. Duas seringas plásticas de 20 ml. Cilindro de N<sub>2</sub> com regulador de pressão e de vazão.

Procedimento para cada amostra:

As alíquotas de água destilada e de emulsão de perfluorcarbono foram colocadas na travessa acoplada ao banho termostático e deixadas entrar em equilíbrio térmico por uma hora. A emulsão sob borbulhamento de 0,5 l/min de N<sub>2</sub>, a água sob agitação em contato com o ar para entrar em equilíbrio com a atmosfera. Após atingir o equilíbrio térmico, mais uma hora foi esperada para que fosse atingido o equilíbrio de solubilidade na temperatura do experimento.

Nesta situação o YSI 5300 foi ajustado e três amostras foram retiradas da água e analisadas no ABL-5. Uma amostra da emulsão então foi retirada com uma seringa que também estava no banho termostático a 37°C, e analisada no ABL-5. Então a amostra de emulsão foi misturada com a água e os valores de  $pO_2$  final da mistura obtida foram analisados no YSI 5300 e três vezes no ABL-5 utilizando uma seringa. A agitação da água no Elemeyer é mantida constante durante todas as fases do experimento. Este detalhe é importante pelo fato de a agitação influenciar a leitura e assim qualquer alteração implica na introdução de erros experimentais nos dados obtidos.

A montagem experimental é descrita em detalhes na figura 13. Os frascos utilizados para as duas alíquotas ficam em equilíbrio térmico no mesmo banho termostático.

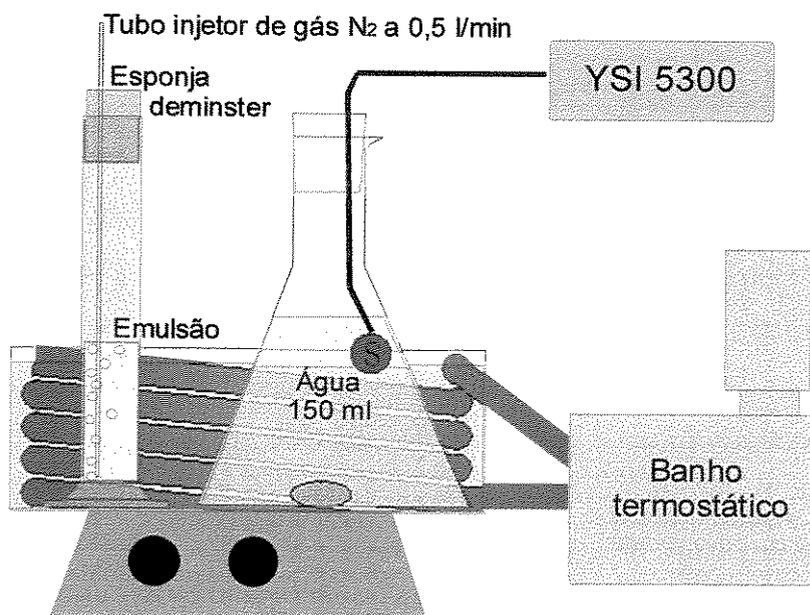


Figura 13: A montagem experimental para teste de emulsão de perfluorcarbono com detalhes de seus componentes.

#### **4-1-3-c: Efeito da emulsão de perfluorcarbono na concentração de Oxigênio**

Este ensaio foi realizado com os componentes utilizados no item anterior e na configuração descrita na Figura 13. A intenção é comparar a tensão com a concentração de Oxigênio, na água e no PFCE. Foram utilizadas duas alíquotas de 150 ml uma de cada vez, sendo uma de água destilada e outra de PFCE na concentração original. Neste ensaio o tubo injetor de gás foi utilizado no Elemeyer. Cada amostra em seu turno, elas foram expurgadas de Oxigênio e depois foram submetidas a um fluxo de 0,5 l/min deste gás, visando uma lenta saturação. Amostras foram colhidas com seringa e analisadas no ABL 5 a intervalos de 2,5 min.

Os resultados são apresentados em unidades de  $pO_2$  e concentração molar de  $O_2$ .

#### **4-1-4: Determinação do volume da fase líquida e do tempo de amostragem.**

O volume da fase líquida e o tempo de amostragem são variáveis intimamente ligadas: quanto maior o volume, maior o tempo do experimento e mais pontos poderão ser anotados. No entanto, não está disponível um volume grande de PFCE, quase a metade foi gasta nos ensaios preliminares para tentar caracterizar o material. A solução para o problema é fazer uma diluição, mas também não pode ser muito, pois poderá não ser possível verificar diferença com a água destilada.

O ABL 5 demora 2,5 minutos entre cada análise, isso demanda volumes grandes de fase líquida, então para se avaliar o que realmente pode ser realizado, os ensaios descritos a seguir foram planejados.

Primeiro ensaio, realizado utilizando a montagem da Figura 17 com um oxigenador de membrana de  $0,25\text{ m}^2$ , alíquotas de 3 l e 3,6 l de água destilada com a vazão de 2,5 l/min em conjunto com Oxigênio a uma vazão de 2 l/min. A  $pO_2$  foi monitorada com o ABL 5, fornecendo pontos a cada intervalo de 2,5 minutos.

Segundo ensaio, realizado em quadruplicata utilizando a montagem da Figura 17 com um oxigenador de membrana de  $0,25\text{ m}^2$ , alíquota de 1,4 l de água destilada com a vazão de 0,5 l/min em conjunto com Oxigênio a uma vazão de 0,5 l/min. A  $pO_2$  foi monitorada com o ABL 5 e com

o YSI 5300, fornecendo pontos a cada intervalo de 2,5 minutos, e a cada 30 segundos respectivamente.

Terceiro ensaio, realizado em duplicata utilizando a montagem da Figura 17 com um oxigenador de membrana de 0,25 m<sup>2</sup>, alíquota de 1,4 l de água destilada com a vazão de 1 l/min em conjunto com Oxigênio a uma vazão de 2 l/min. A pO<sub>2</sub> foi monitorada com o ABL 5 e com o YSI 5300, fornecendo pontos a cada intervalo de 2,5 minutos, e a cada 30 segundos respectivamente.

#### **4-1-5: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer as fibras dos oxigenadores.**

##### **4-1-5-a: Determinação experimental.**

Foram utilizados neste estudo três modelos de Oxigenadores de membrana com áreas de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>, produzidos pela Braile Biomédica com membrana tipo Oxyphan, uma bomba peristáltica regulada em 1 l/min, um tubo vertical com 1,5 m, manômetro em U com água, regulador de vazão de gás marca Matec Flow para 20 l/min e cilindro de gás padrão medicinal com regulador de pressão de um estágio.

Foram submetidos a este procedimento os três oxigenadores de membrana, todos foram aprovados nos testes convencionais de qualidade.

A vedação do vazamento através das paredes porosas das membranas é conseguida utilizando-se um circuito que circula água pelo exterior das membranas. A água ao sair sobe por um tubo de descarga, conectado a saída de gás do oxigenador gerando assim uma pressão proporcional a sua altura, e retorna por outro tubo sendo que há uma abertura na parte superior para evitar a formação de um sifão invertido. A pressurização externa das membranas visa apenas vedar o vazamento de gás pelos poros da superfície de troca.

A montagem do teste da área de troca consta de um circuito que faz com que uma vazão conhecida de gás percorra a luz das fibras. Isto é feito de modo a se poder medir a perda de carga que ocorre durante o escoamento através das membranas do oxigenador. Uma vez que o comprimento das fibras é semelhante, a perda de carga é proporcional ao número de fibras em

paralelo que dividem o fluxo de gás, e conseqüentemente a área disponível para troca. Assim a validação de uma área disponível pode ser feita comparando-se a perda de carga do dispositivo testado com um modelo padrão. A montagem experimental para o teste é descrita na Figura 14.

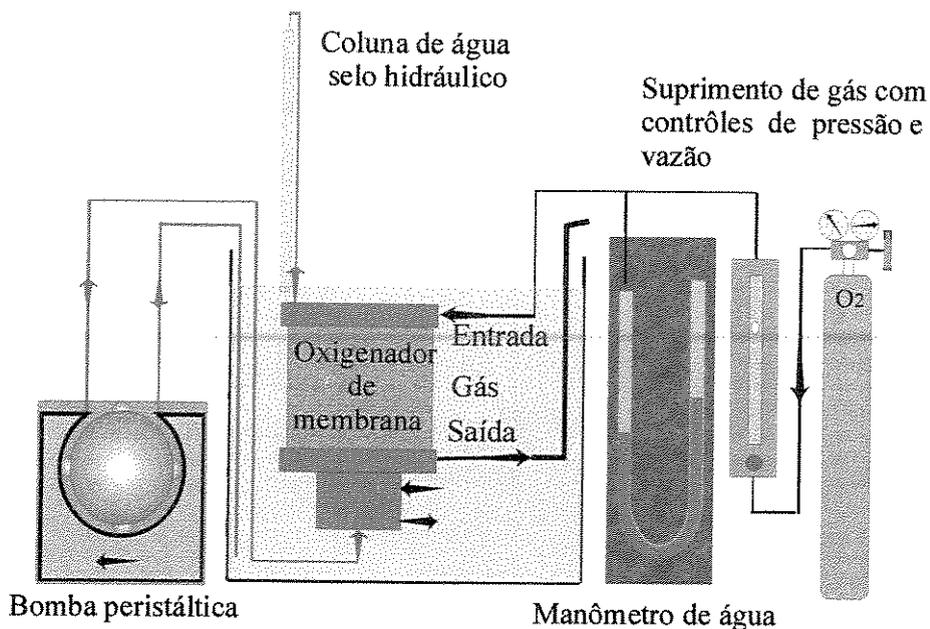


Figura 14: Montagem utilizada para medir a perda de carga contra a passagem do gás pela luz das membranas. A função da água é fechar o escoamento pelos poros da membrana promovendo uma pressão contrária proporcional a altura do selo hidráulico.

#### 4-1-5-b: Simulação numérica.

A simulação numérica foi realizada resolvendo a Eq.(44) para 5 vazões de gás entre 0,5 e 8 l/min variando o número de fibras. Os resultados foram normalizados. O número de fibras foi dividido pelo considerado perfeito e a perda de carga obtida, foi dividida pela deste modelo ideal.

#### **4-1-6: Determinação das características da coluna.**

##### **4-1-6-a: Área específica do recheio da coluna.**

A área específica foi determinada pelo cálculo da área de um anel tomado como padrão. Foram então contados e pesados 200 anéis. O recheio foi pesado até que representasse 2,5 m<sup>2</sup> de área de troca, e então carregado na coluna.

##### **4-1-6-b: Porosidade do recheio.**

A porosidade foi medida pela diferença no preenchimento com água de um volume conhecido. Uma proveta de 2000 ml foi preenchida com o material do recheio, em seguida foi medido o volume de água que coube junto com o recheio na proveta.

##### **4-1-6-c: Retenção de líquido.**

Este ensaio é executado enchendo a coluna com uma quantidade conhecida de água, então a válvula de saída é aberta e o volume de água que saiu, medido. A diferença é o volume do líquido que ficou retido. O ensaio deverá ser repetido cinco vezes e tirada sua média, e entre cada execução o recheio deverá ser seco sem ser removido para não alterar sua distribuição.

O processo de secagem foi tentado com Nitrogênio proveniente de um cilindro, no entanto, como 150 dos 200 bar de um cilindro não foram suficientes para uma secagem, foi montada uma ventoinha sopradora de ar, de modo a promover o processo conforme descrito na Figura 15.

A vazão do soprador é alta para o trabalho em questão, no entanto a perda de carga no recheio e no sistema de tubos funciona como uma restrição ao fluxo que causa uma queda nesta e um ligeiro aquecimento. A potencia dissipada pelo motor é então parcialmente convertida em calor. O ar aquecido torna-se relativamente mais seco, e capaz de remover mais água do recheio.

O tempo de secagem testado em uma corrida foi de 2h30min, sendo adotado no procedimento 4h para cada secagem. Foram realizadas em média duas secagens por dia consumindo uma semana para levantar o dado da retenção de líquido com 5 corridas.

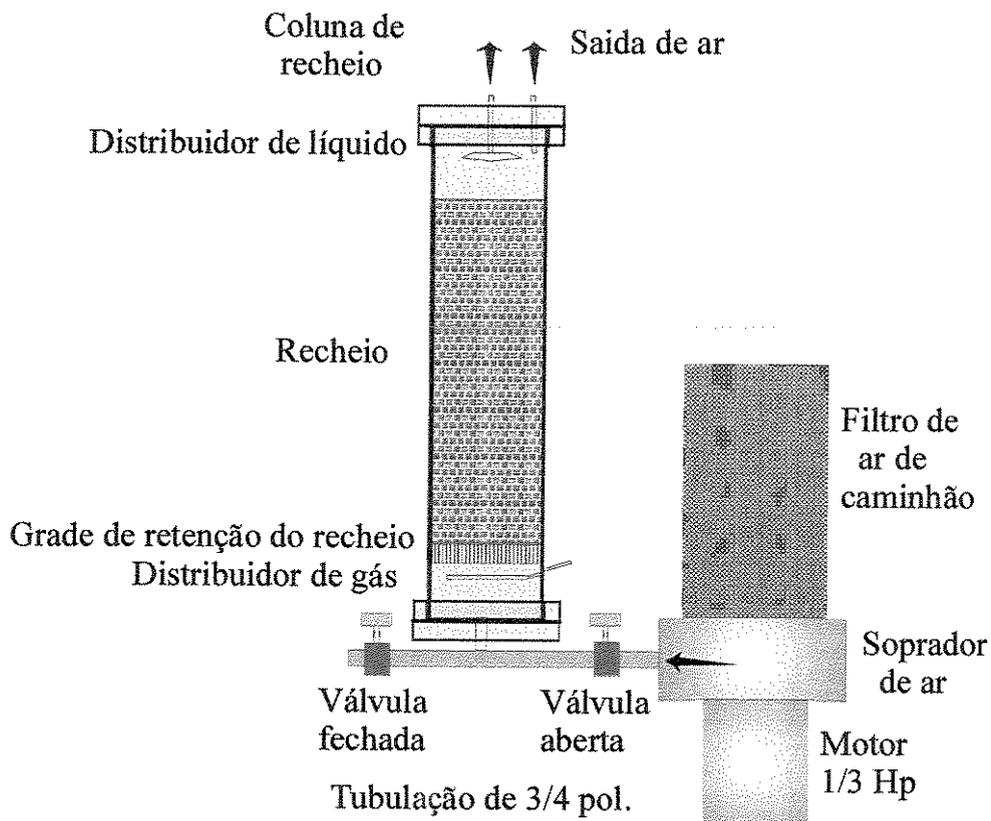


Figura 15: Descrição da montagem utilizada para o teste de retenção de líquido e secagem do recheio da coluna.

#### 4-1-6-d: Teste de inundação

Um volume conhecido de água, 3 litros, foi colocado no sistema. A bomba foi regulada para vazões predeterminadas e uma vez que são conhecidos os volumes de líquido necessários para encher o sistema menos o recheio, e a retenção do recheio, o volume que não estiver na cela de acumulação estará em trânsito dentro do recheio da coluna. Assim foi determinado o volume em trânsito no recheio da coluna. A montagem utilizada foi como a descrita na Figura 16.

#### 4-1-6-e: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer e o recheio da coluna.

No caso de uma coluna de recheio as fases estão em contato dentro do mesmo recipiente, então o volume de líquido presente na coluna influencia o espaço que sobra para a passagem do gás e assim sua queda de pressão.

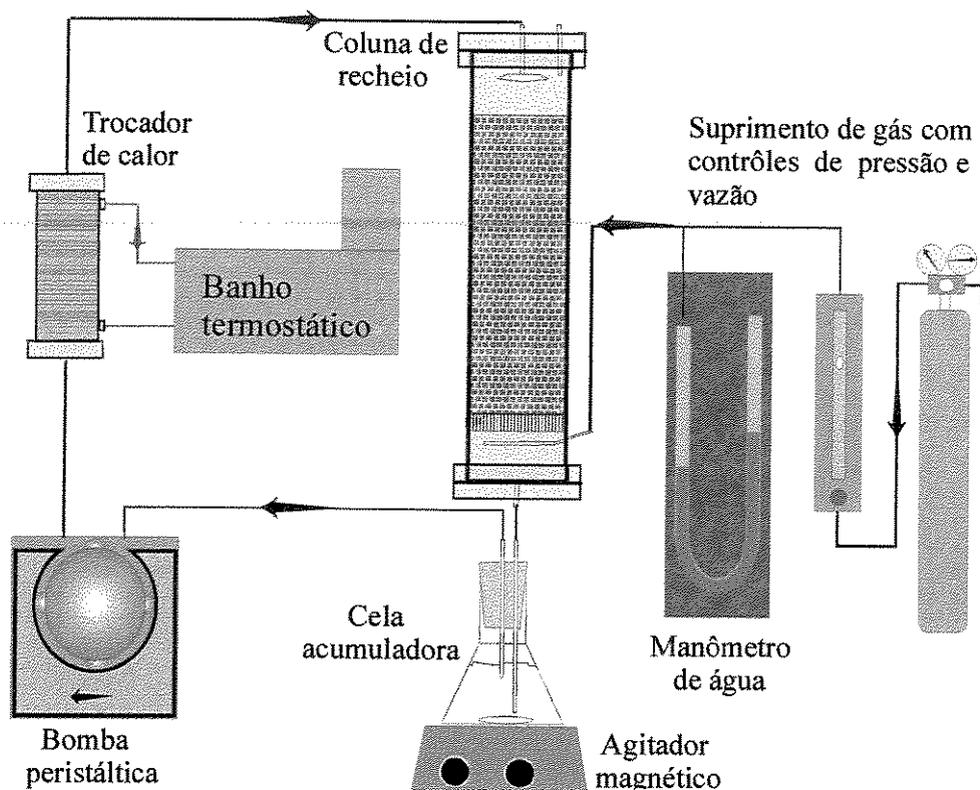


Figura 16: Montagem para a medição da perda de carga da fase gasosa no recheio da coluna. O controle de temperatura é externo, feito com um trocador de calor para cardiotoomia. O controle de vazão da fase líquida é necessário para controlar a parcela de inundação do recheio.

A perda de carga sofrida pela fase gasosa ao atravessar o recheio é mapeada utilizando a montagem da Figura 16 fazendo variar as vazões de líquido de 0,5 a 2,5 l/min e de gás, de 0,5 a 16 l/min. O dado da queda de pressão será utilizado na correção da pressão de Oxigênio no cálculo de transferência de massa.

#### 4-1-7: Experimentação numérica para a seleção de dados.

Alguns ensaios da secção 4-2-1-a e -b, foram escolhidos para serem realizados antes, de modo que os dados gerados servissem de teste para a parte experimental numérica do desenvolvimento do método de análise de dispositivos de troca de massa. Foram os ensaios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 com leitura a cada 30 segundos, 53 com leitura a cada 15 seg., 449, 451, 453 com leitura a cada 5 seg. visando ao detalhamento da curva, sendo que os conjuntos {9, 11} e {10, 12} são ensaios em duplicatas, os conjuntos {1, 3, 5, 7} e {2, 4, 6, 8} são ensaios em quadruplicatas realizados com o oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$  e o conjunto {449, 451, 453} refere-se a um ensaio em triplicata realizado com o oxigenador de  $0,5 \text{ m}^2$ . Foi utilizada a montagem da Figura 17, as vazões de gás e líquido estão descritas nas Tabelas da secção 4-2-1-a e -b.

##### 4-1-7-a: Simulação numérica do $K_L a$ .

A simulação numérica foi processada diversas vezes resolvendo a Eq.(22). Os valores calculados foram colocados no mesmo gráfico que os dados experimentais para comparação. Um atraso no eixo do tempo foi somado de modo a aproximar a curva dos dados calculados da seqüência de pontos experimentais, apenas deslocando-a, sem alterar seu perfil.

##### 4-1-7-b: O efeito da variação da janela de seleção de pontos aplicada aos ensaios de 1 a 12.

As seguintes etapas foram realizadas:

Os ensaios foram realizados de acordo com a descrição acima.

Os dados obtidos foram organizados em gráficos na forma  $pO_2$  x tempo.

A Eq.(16) foi aplicada gerando gráficos na forma  $\ln((p^*O_2 - pO_2(t_0)) / (p^*O_2 - pO_2(t))) \times (t_0 - t)$ .

Os resultados foram colocados em um gráfico, a posição da janela de seleção dos dados foi variada eliminando-se os primeiros 3 valores, causando um deslocamento como um atraso.

Utilizando os dados processados pela Eq.(16) sem aplicação de deslocamento de ponto inicial ou o atraso, foram realizadas regressões lineares variando o número de pontos.

Os coeficientes de correlação foram colocados em um gráfico para visualização do efeito do número de pontos.

Os desvios padrão dos ensaios 1,3,5 e 7 realizados como quadruplicata foram colocados em um gráfico.

Foram determinados e colocados em gráfico os valores obtidos para os  $K_L$  dos ensaios de saturação de Oxigênio de 1 a 11 em função do número de pontos utilizados nas regressões lineares.

#### **4-1-7-c: Comparação do efeito da variação da janela seleção de pontos aplicada ao ensaio 53 com a simulação numérica, o método da faixa.**

O ensaio 53 foi realizado com uma taxa de aquisição de dados de um a cada 15 s. ao invés dos anteriores que eram de um a cada 30 s. A intenção é melhorar a resolução.

Os dados experimentais foram colocados em gráfico  $pO_2$  x tempo, depois convertidos pela Eq.(16) e processados com até 3 deslocamentos de posição inicial, e então os  $K_L$ as determinados com até 15 pontos nas regressões lineares. Tudo isso foi colocado em gráfico para visualização do que ocorre quando se move uma janela de seleção de dados para regressão linear e sua abertura.

Os  $K_L$ as mínimos e máximos foram simulados, bem como valores escolhidos determinados para janelas com características padronizáveis, estas simulações foram colocadas em um gráfico com os dados experimentais para se avaliar o que realmente funciona.

#### **4-1-7-d: Aplicação do método da faixa de seleção comparada com a simulação numérica para os conjuntos de ensaios {449, 451, 453}, {17, 19, 21} e {79, 81}.**

Os ensaios 449, 451 e 453 foram realizados com uma taxa de aquisição de dados de um a cada 5 s. Então o  $K_L$ a foi determinado com as condições da janela de seleção identificadas no experimento anterior.

Foi realizada uma simulação com o valor obtido para o  $K_L$ a e esta colocada em um gráfico com os dados experimentais para comparação.

**4-2: Ensaios para a determinação experimental dos coeficientes de troca de massa de oxigenadores de sangue e de uma coluna de recheio.**

Esta etapa do trabalho visa determinar, utilizando o método dinâmico, os coeficientes de troca de massa dos três modelos de oxigenadores de membrana com água e com emulsão diluída de perfluorcarbono. Também serão determinados os coeficientes para a coluna de recheio com água, de modo a se poder comparar a eficiência e o funcionamento destes tipos de dispositivos<sup>87</sup>.

Uma vez determinadas as condições necessárias para se achar os coeficientes de troca de massa através da técnica dinâmica, podemos colocar em marcha uma seqüência de testes para avaliar o comportamento da coluna de recheio e dos três modelos de oxigenadores de membrana com água e com uma PFCE em relação a transferência de massa. A intenção é fazer um mapeamento dos coeficientes em função das vazões de líquido e de gás, variando estas em torno do valor de projeto especificado para cada modelo de oxigenador, conforme descritos na Tabela 3, e dentro dos limites da bomba peristáltica disponível.

Os ensaios devem ser realizados em triplicata, pois não só melhora a confiabilidade do dado obtido como também disponibiliza dados de desvio padrão que ajudam a identificar erros experimentais e a determinar qual tratamento matemático gera melhores resultados.

Tabela 3: Características dos componentes utilizados nos ensaios.

| Componente         | Área de troca<br>m <sup>2</sup>    | Volume (priming)<br>ml                  | Vazão recomendada<br>l/min | Vazões pesquisadas<br>l/min |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Lucchese Neo Nato  | 0,25                               | 80                                      | 0,8                        | 0,5 0,75 1,0 1,25           |
| Lucchese Infantil  | 0,5                                | 140                                     | 1,5                        | 0,5 1,0 1,5 2,0             |
| MRX Pediatrico     | 1,6                                | 300                                     | 4                          | 1,0 1,75 2,5                |
| Coluna de recheio  | 2,5 Raschig                        | estático (mín) 195<br>dinâmico(max) 750 | >2,5                       | 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5         |
| Bomba peristáltica | Vazão utilizada de 0,5 a 2,5 l/min |                                         |                            |                             |

A montagem experimental utilizada para determinar os coeficientes de troca de massa dos oxigenadores de membrana é mostradas na Figura 17, a utilizada para a coluna é mostrada na Figura 18. Uma vista da montagem geral no local de trabalho é mostrada na Figura 19.

Nas sub-seções seguintes são mostradas as tabelas de legenda dos ensaios onde é descrito o número do ensaio, as vazões de líquido e de gás que foram utilizadas, a situação na triplicata, a fase líquida, a área de troca do dispositivo ensaiado, se foi o oxigenador ou a coluna, e o gás utilizado se foi Oxigênio ou Nitrogênio.

O Oxigênio foi utilizado nos ensaios para a avaliação do coeficiente de troca de massa, levando a um  $K_{L,a}$  de saturação, o Nitrogênio foi utilizado para remover o oxigênio e retornar o sistema à condição inicial, para o ensaio seguinte levando a um  $-K_{L,a}$ , ou extração de Oxigênio.

O volume de líquido utilizado ficou padronizado em 1,4 l para todos os ensaios.

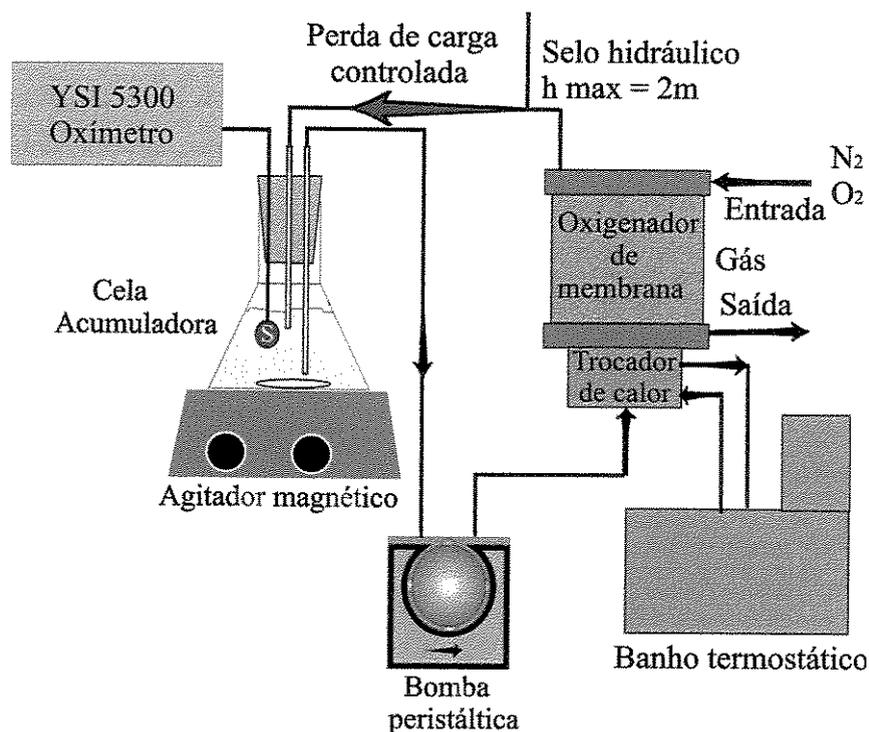


Figura 17: Montagem utilizada para a avaliação do coeficiente de troca de massa no caso dos oxigenadores de membrana. A vazão de gás é controlada com rotâmetro.

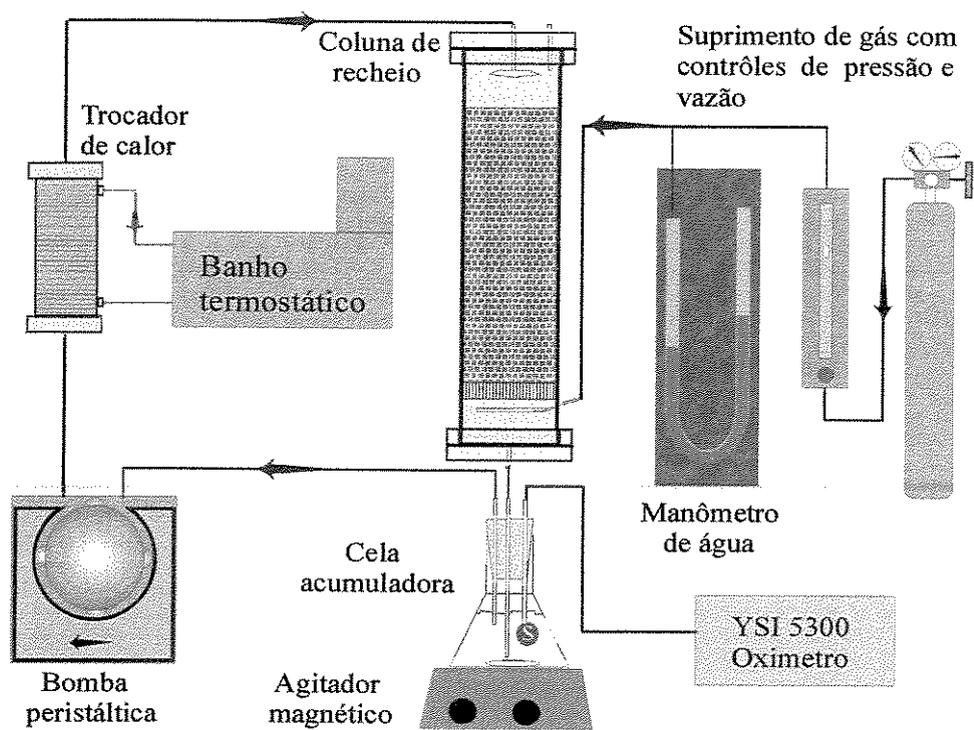


Figura 18: Montagem utilizada para a avaliação do coeficiente de troca de massa no caso da coluna com recheio.

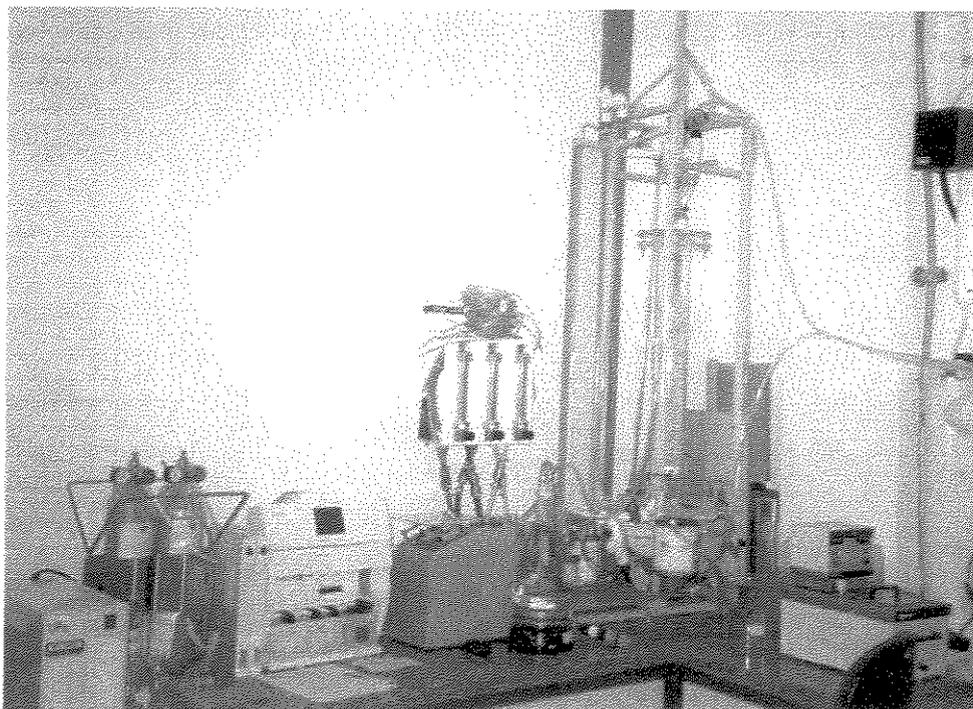


Figura 19: Vista do laboratório com a montagem experimental.

**4-2-1: Ensaios com água, volume padronizado em 1,4 l.**

**4-2-1-a: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, Tabelas 4,5,6 e 7.**

Tabela 4: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 71             | 72             | 95             | 96             | 23             | 22             | 53             | 54             |
| 2         | 65             | 66             | 89             | 90             | 9              | 10             | 42             | 41             |
| 1         | 59             | 60             | 83             | 84             | 30             | 29             | 47             | 48             |
| 0,5       | 1              | 2              | 77             | 78             | 17             | 18             | 36             | 35             |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

Tabela 5: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 73             | 74             | 97             | 98             | 25             | 24             | 55             | 56             |
| 2         | 67             | 68             | 91             | 92             | 11             | 12             | 44             | 43             |
| 1         | 61             | 62             | 85             | 86             | 32             | 31             | 49             | 50             |
| 0,5       | 3              | 4              | 79             | 80             | 19             | 20             | 38             | 37             |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

Tabela 6: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 75             | 76             | 99             | 100            | 27             | 26             | 57             | 58             |
| 2         | 69             | 70             | 93             | 94             | 13             | 14             | 46             | 45             |
| 1         | 63             | 64             | 87             | 88             | 34             | 33             | 51             | 52             |
| 0,5       | 5              | 6              | 81             | 82             | 4              |                | 40             | 39             |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

Tabela 7: Quadruplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 2,0       |                |                | 15             | 16             |
| 1,0       |                |                |                |                |
| 0,5       | 7              | 8              | 28             |                |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            |

**4-2-1-b: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, Tabelas 8, 9 e 10.**

Tabela 8: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 249            | 250            | 273            | 274            | 297            | 298            | 321            | 322            |
| 2         | 251            | 252            | 275            | 276            | 299            | 300            | 323            | 324            |
| 1         | 253            | 254            | 277            | 278            | 301            | 302            | 325            | 326            |
| 0,5       | 255            | 256            | 279            | 280            | 303            | 304            | 327            | 328            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

Tabela 9: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 257            | 258            | 281            | 282            | 305            | 306            | 329            | 330            |
| 2         | 259            | 260            | 283            | 284            | 307            | 308            | 331            | 332            |
| 1         | 261            | 262            | 285            | 286            | 309            | 310            | 333            | 334            |
| 0,5       | 263            | 264            | 287            | 288            | 311            | 312            | 335            | 336            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

Tabela 10: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 265            | 266            | 289            | 290            | 313            | 314            | 337            | 338            |
| 2         | 267            | 268            | 291            | 292            | 315            | 316            | 339            | 340            |
| 1         | 269            | 270            | 293            | 294            | 317            | 318            | 341            | 342            |
| 0,5       | 271            | 272            | 295            | 296            | 319            | 320            | 343            | 344            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

**4-2-1-c: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, aumentando a taxa de aquisição de dados visando ao detalhamento do processo, Tabelas 11 e 12.**

Tabela 11: Ensaio em Quadruplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0,5       | 441            | 442            | 443            | 444            | 445            | 446            | 447            | 448            |
| Vaz. líq. | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            |

Tabela 12: Ensaio em Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1,0       | 449            | 450            | 451            | 452            | 453            | 454            |
| Vaz. líq. | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            | 1,5            |

**4-2-1-d: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, Tabelas 13, 14 e 15.**

Tabela 13: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 465            | 466            | 495            | 496            | 525            | 526            |
| 4         | 467            | 468            | 497            | 498            | 527            | 528            |
| 2         | 469            | 470            | 499            | 500            | 529            | 530            |
| 1         | 471            | 472            | 501            | 502            | 531            | 532            |
| 0,5       | 473            | 474            | 503            | 504            | 533            | 534            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

Tabela 14: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 475            | 476            | 505            | 506            | 535            | 536            |
| 4         | 477            | 478            | 507            | 508            | 537            | 538            |
| 2         | 479            | 480            | 509            | 510            | 539            | 540            |
| 1         | 481            | 482            | 511            | 512            | 541            | 542            |
| 0,5       | 483            | 484            | 513            | 514            | 543            | 544            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

Tabela 15: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 485            | 486            | 515            | 516            | 545            | 546            |
| 4         | 487            | 488            | 517            | 518            | 547            | 548            |
| 2         | 489            | 490            | 519            | 520            | 549            | 550            |
| 1         | 491            | 492            | 521            | 522            | 551            | 552            |
| 0,5       | 493            | 494            | 523            | 524            | 553            | 554            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

4-2-1-e: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador, com 1,6m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, aumentando o tempo do experimento até a saturação, Tabela 16.

Tabela 16: Saturação máxima, ensaio em triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 555            | 556            | 557            | 558            | 559            | 560            |
| Vaz. líq. | 1,75           | 1,75           | 1,75           | 1,75           | 1,75           | 1,75           |

4-2-1-f: Legenda de identificação dos ensaios com a coluna de recheio com 2,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O, Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 8         | 651            | 652            | 681            | 682            | 711            | 712            | 741            | 742            | 771            | 772            |
| 4         | 653            | 654            | 683            | 684            | 713            | 714            | 743            | 744            | 773            | 774            |
| 2         | 655            | 656            | 685            | 686            | 715            | 716            | 745            | 746            | 775            | 776            |
| 1         | 657            | 658            | 687            | 688            | 717            | 718            | 747            | 748            | 777            | 778            |
| 0,5       | 659            | 660            | 689            | 690            | 719            | 720            | 749            | 750            | 779            | 780            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            | 2,5            | 2,5            |

Tabela 18: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 8         | 661            | 662            | 691            | 692            | 721            | 722            | 751            | 752            | 781            | 782            |
| 4         | 663            | 664            | 693            | 694            | 723            | 724            | 753            | 754            | 783            | 784            |
| 2         | 665            | 666            | 695            | 696            | 725            | 726            | 755            | 756            | 785            | 786            |
| 1         | 667            | 668            | 697            | 698            | 727            | 728            | 757            | 758            | 787            | 788            |
| 0,5       | 669            | 670            | 699            | 700            | 729            | 730            | 759            | 760            | 789            | 790            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            | 2,5            | 2,5            |

Tabela 19: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 8         | 671            | 672            | 701            | 702            | 731            | 732            | 761            | 762            | 791            | 792            |
| 4         | 673            | 674            | 703            | 704            | 733            | 734            | 763            | 764            | 793            | 794            |
| 2         | 675            | 676            | 705            | 706            | 735            | 736            | 765            | 766            | 795            | 796            |
| 1         | 677            | 678            | 707            | 708            | 737            | 738            | 767            | 768            | 797            | 798            |
| 0,5       | 679            | 680            | 709            | 710            | 739            | 740            | 769            | 770            | 799            | 800            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            | 2,5            | 2,5            |

**4-2-2: Ensaios com Emulsão de perfluorcarbono PFCE, diluído a 3,7 % w/v, volume padronizado em 1,4 l.**

**4-2-2-a: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE, Tabelas 20, 21 e 22.**

Tabela 20: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 109            | 110            | 105            | 106            | 117            | 118            | 125            | 126            |
| 2         | 111            | 112            | 103            | 104            | 119            | 120            | 127            | 128            |
| 1         | 113            | 114            | 101            | 102            | 121            | 122            | 129            | 130            |
| 0,5       | 115            | 116            | 107            | 108            | 123            | 124            | 131            | 132            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

Tabela 21: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 133            | 134            | 149            | 150            | 165            | 166            | 181            | 182            |
| 2         | 135            | 136            | 151            | 152            | 167            | 168            | 183            | 184            |
| 1         | 137            | 138            | 153            | 154            | 169            | 170            | 185            | 186            |
| 0,5       | 139            | 140            | 155            | 156            | 171            | 172            | 187            | 188            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

Tabela 22: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 141            | 142            | 157            | 158            | 173            | 174            | 189            | 190            |
| 2         | 143            | 144            | 159            | 160            | 175            | 176            | 191            | 192            |
| 1         | 145            | 146            | 161            | 162            | 177            | 178            | 193            | 194            |
| 0,5       | 147            | 148            | 163            | 164            | 179            | 180            | 195            | 196            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 0,75           | 0,75           | 1,0            | 1,0            | 1,25           | 1,25           |

4-2-2-b: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE, Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 345            | 346            | 369            | 370            | 393            | 394            | 417            | 418            |
| 2         | 347            | 348            | 371            | 372            | 395            | 396            | 419            | 420            |
| 1         | 349            | 350            | 373            | 374            | 397            | 398            | 421            | 422            |
| 0,5       | 351            | 352            | 375            | 376            | 399            | 400            | 423            | 424            |
| Vaz. líq. |                | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

Tabela 24: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 353            | 354            | 377            | 378            | 401            | 402            | 425            | 426            |
| 2         | 355            | 356            | 379            | 380            | 403            | 404            | 427            | 428            |
| 1         | 357            | 358            | 381            | 382            | 405            | 406            | 429            | 430            |
| 0,5       | 359            | 360            | 383            | 384            | 407            | 408            | 431            | 432            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

Tabela 25: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 4         | 361            | 362            | 385            | 386            | 409            | 410            | 433            | 434            |
| 2         | 363            | 364            | 387            | 388            | 411            | 412            | 435            | 436            |
| 1         | 365            | 366            | 389            | 390            | 413            | 414            | 437            | 438            |
| 0,5       | 367            | 368            | 391            | 392            | 415            | 416            | 439            | 440            |
| Vaz. líq. | 0,5            | 0,5            | 1,0            | 1,0            | 1,5            | 1,5            | 2,0            | 2,0            |

4-2-2-c: Legenda de identificação dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE, Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26: Primeira.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 561            | 562            | 591            | 592            | 621            | 622            |
| 4         | 563            | 564            | 593            | 594            | 623            | 624            |
| 2         | 565            | 566            | 595            | 596            | 625            | 626            |
| 1         | 567            | 568            | 597            | 598            | 627            | 628            |
| 0,5       | 569            | 570            | 599            | 600            | 629            | 630            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

Tabela 27: Duplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 571            | 572            | 601            | 602            | 631            | 632            |
| 4         | 573            | 574            | 603            | 604            | 633            | 634            |
| 2         | 575            | 576            | 605            | 606            | 635            | 636            |
| 1         | 577            | 578            | 607            | 608            | 637            | 638            |
| 0,5       | 579            | 580            | 609            | 610            | 639            | 640            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

Tabela 28: Triplicata.

| Vaz. gás  | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 6         | 581            | 582            | 611            | 612            | 641            | 642            |
| 4         | 583            | 584            | 613            | 614            | 643            | 644            |
| 2         | 585            | 586            | 615            | 616            | 645            | 646            |
| 1         | 587            | 588            | 617            | 618            | 647            | 648            |
| 0,5       | 589            | 590            | 619            | 620            | 649            | 650            |
| Vaz. líq. | 1,0            | 1,0            | 1,75           | 1,75           | 2,5            | 2,5            |

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

#### 5-1: Ensaio preliminares.

##### 5-1-1: Estudos relacionados ao funcionamento dos instrumentos.

##### 5-1-1-a: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo ABL5.

Primeira parte: As dez leituras forneceram a  $pO_2$  atmosférica com variação de  $\pm 1$  mmHg,  $pO_2 = (724 - 47) \cdot 0,2099 = 143 \pm 1$  mmHg, 724 mmHg era a pressão ambiente lida no barômetro na hora do experimento, e 47 mmHg a pressão de vapor da água a 37°C.

Segunda parte: A alíquota de água foi purgada de Oxigênio até 62 mmHg, foi colocada em uma seringa em equilíbrio com a atmosfera e ao longo do tempo foi observado um lento aumento na  $pO_2$  até 74 mmHg, conforme mostrado na Figura 20.

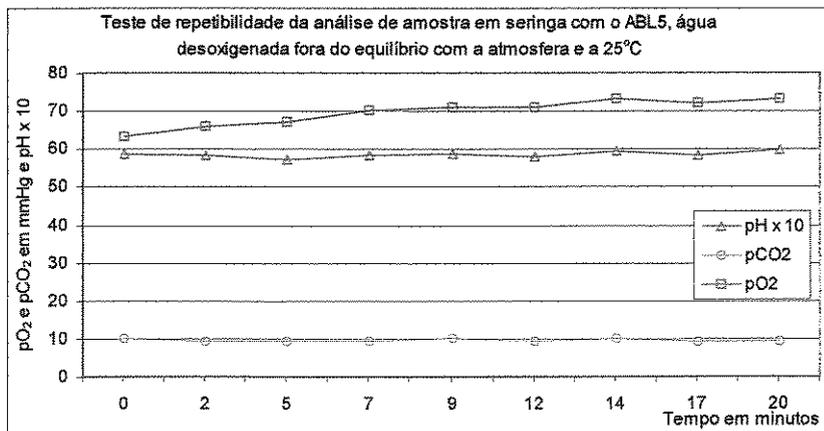


Figura 20: Variação de  $pO_2$  devido a influência do material da seringa de amostragem.

O Oxigênio dissolvido no polímero da seringa que estava em equilíbrio com o meio ambiente em uma  $pO_2$  maior, pode ter sido a fonte causadora do aumento desta espécie na amostra. A resolução do instrumento em relação à concentração de Oxigênio é na faixa de  $\mu$ -molar, isso significa que a solubilidade deste gás nos materiais do experimento deve ser observada.

#### **5-1-1-b: Análise da estabilidade da leitura de $pO_2$ feita pelo YSI 5300.**

Foi observado que em cerca de 15 minutos houve uma homogeneização térmica monitorando o termômetro de álcool, no entanto o controlador do banho termostático ainda trabalhava bastante tendo de repor a energia perdida para o ambiente. Como o ambiente estava relativamente frio, 23°C, a montagem a 37°C foi coberta com uma toalha visando reduzir a perda de calor por convecção natural. Cerca de 30 minutos após o início do experimento foi observado que o ciclo de acionamento do aquecedor do banho termostático havia caído de aproximadamente 25 para menos de 10%, e permanecia estável. Como a resolução do sensor do banho é de 0,1°C, neste ponto o experimento foi considerado termicamente homogeneizado e estabilizado.

A solubilidade do Oxigênio na água cai com o aumento da temperatura, então é de se esperar que a leitura do instrumento caia até que a alíquota entre em equilíbrio com a atmosfera na temperatura estudada. A leitura caiu lentamente até que foi dada como estável 3 horas após o início do experimento. A escala do YSI 5300 foi então regulada em 100.0%, onde permaneceu sem alterar-se. Desde que exposto a uma amostra estável, a estabilidade deste instrumento é muito boa.

A rotação do agitador mecânico foi reduzida para a metade. Como consequência foi observada uma queda na leitura, de 100.0% para 99.6%, a qual demorou cerca de 10 minutos para se estabilizar. Isso mostra que é necessário muito cuidado com a montagem experimental para garantir a qualidade do estudo.

5-1-1-c: A linearidade do YSI 5300 em função da  $pO_2$ .

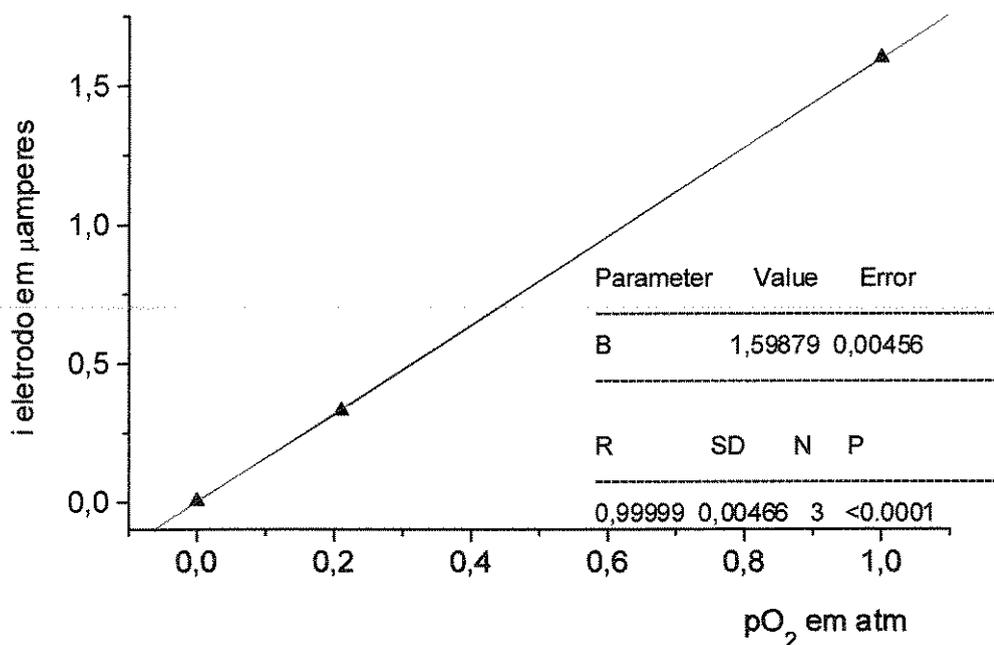


Figura 21: Corrente em  $\mu A$  em função da pressão de Oxigênio em atmosferas. Dados do manual do fabricante do YSI 5300 sobre o sistema do eletrodo combinado do Polarímetro YSI5300 para  $O_2$ .

Este instrumento fornece uma leitura em % da referência na qual foi calibrado. Por exemplo, se for regulado para considerar uma atmosfera de Oxigênio com 700 mmHg como 100%, quando o sensor for exposto a 350 mmHg de Pressão de Oxigênio, a leitura deverá ser 50%.

A Figura 22 mostra os dados do manual do fabricante sobre o sistema do eletrodo combinado de Pt-Ag do polarímetro para  $O_2$ . A corrente em  $\mu A$  foi colocada no gráfico como função da pressão de Oxigênio em atmosferas. Uma regressão linear foi realizada através dos pontos, e o coeficiente de regressão de 0,99999 mostra uma excelente linearidade, portanto, a calibração do instrumento pode ser realizada com apenas um ponto de referência, e a curva de

calibração pode ser uma reta passando pela origem e pelo ponto calibrado. É obtido deste modo a curva de conversão da leitura do instrumento em % para um dado em mmHg.

#### 5-1-1-d: E determinação do tempo de resposta a um degrau para o YSI 5300.

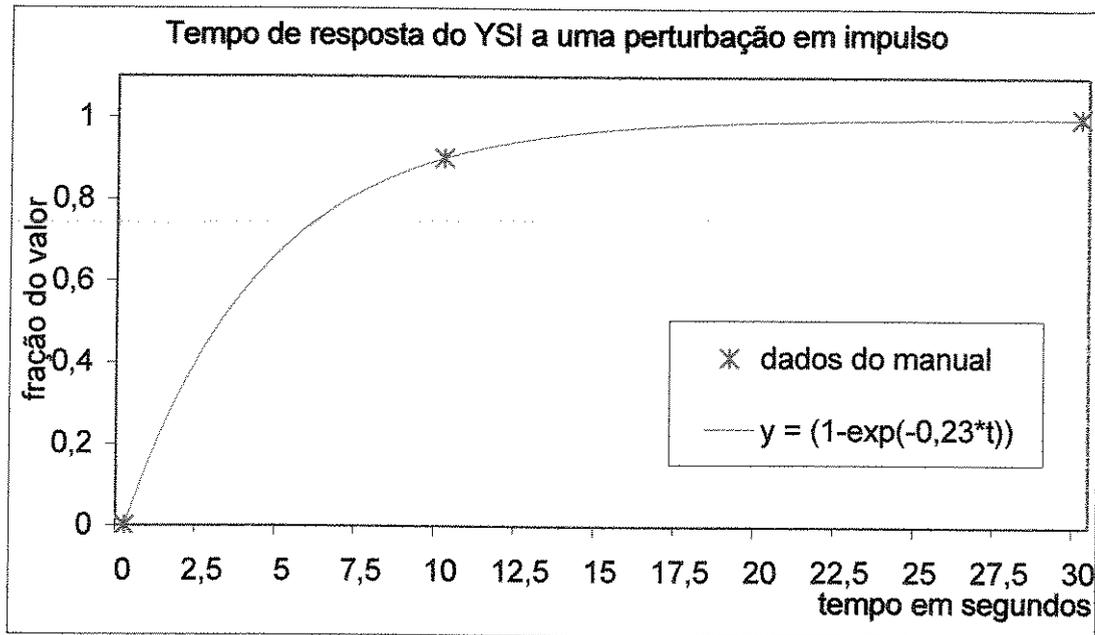


Figura 22: Dados do manual do fabricante do YSI 5300 colocados em um gráfico e interpolados para se achar a função do tempo de resposta do sensor.

Uma das fontes de erro no ensaio dinâmico é devida ao atraso do sensor em medir a variação na  $pO_2$ . Há um critério<sup>84</sup> para o qual é necessário se saber o tempo, denominado  $\Gamma$ , que o sensor leva para atingir 63,2% da perturbação, neste caso calculado a partir da exponencial ajustada,  $\Gamma = 4,34$  s.

O ensaio mais rápido neste trabalho e portanto, o mais sujeito a influências por atraso de sensor, obteve o  $K_{La} = 0,029$ , portanto  $1/K_{La} = 34,48$  s quase 8 vezes maior que o  $\Gamma$  do instrumento, o erro esperado deve ser menor que 6% por parte do atraso do sensor. Este instrumento satisfaz esta necessidade para este trabalho.

5-1-1-e: Comparação entre as leituras dos oxímetros ABL 5 e do YSI 5300.

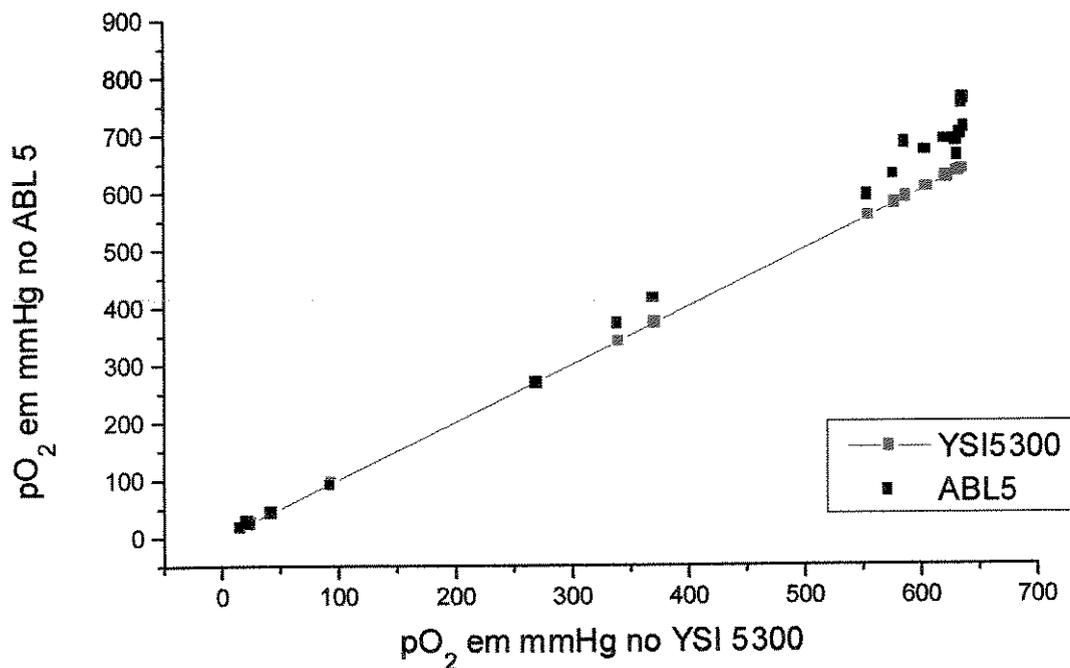


Figura 23: Comparação entre as leituras realizadas pelo ABL 5 e pelo YSI 5300.

Conforme esperado a Figura 23 confirma o desvio gerando um erro do ABL 5 em  $pO_2$  elevadas. O YSI confirma sua linearidade em  $pO_2$  elevadas possibilitando que uma reta seja ajustada entre seus pontos. Já o ABL 5 conforme avisado em seu manual, não é confiável em  $pO_2$  elevadas, pois é construído para analisar sangue.

Os resultados das Figuras 21 e 23 permitem que se assuma com razoável segurança o procedimento descrito na Figura 24 como procedimento padrão para a conversão da leitura do oxímetro polarográfico YSI 5300 da escala em % para a  $pO_2$  em mmHg, com um ponto de referência.

O padrão de referência adotado para a calibração do instrumento é a água em equilíbrio com a atmosfera a 37°C.

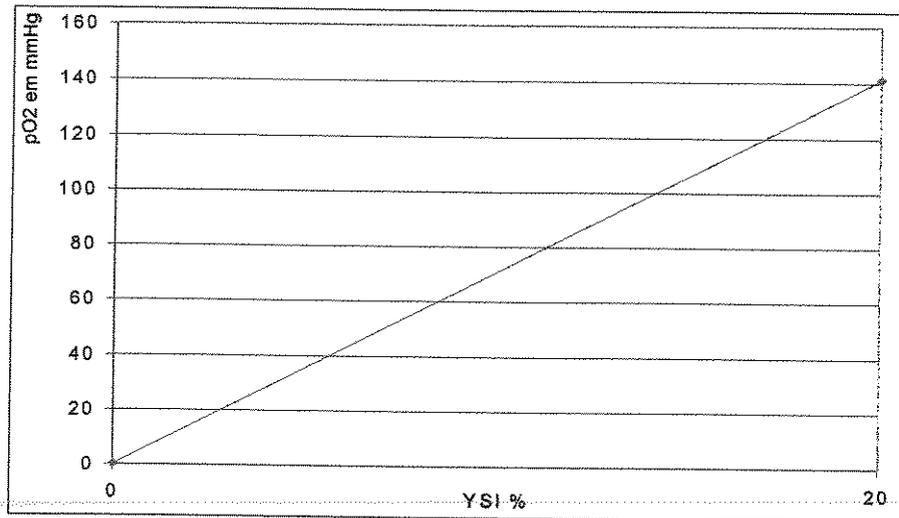


Figura 24: Exemplo de curva de calibração para a conversão da leitura do YSI de % para  $pO_2$  em mmHg.

**5-1-1-f: Análise do efeito do tempo de espera em uma seringa.**

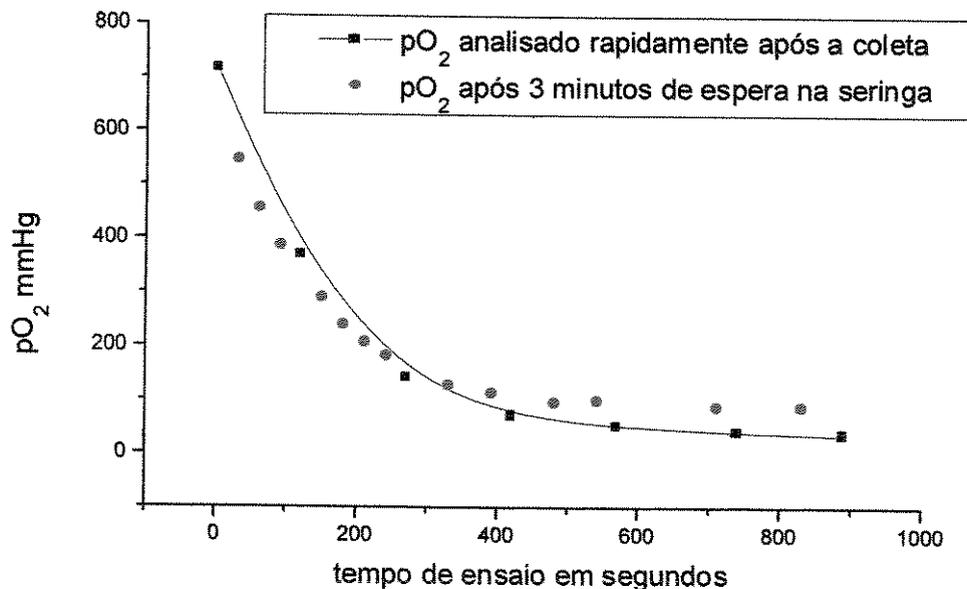


Figura 25: Desvio causado nas leituras de  $pO_2$  pelo tempo de espera na seringa.

Os resultados mostrados na Figura 25 mostram que há uma perda de qualidade na medição quando a amostra é analisada após 3 minutos na seringa. Os resultados mostrados na segunda parte do ensaio 5-1-1-a mostram que a espera na seringa altera a  $pO_2$  da amostra, neste ensaio

podemos verificar que quando a amostra possui uma  $pO_2$  igual a da atmosfera, não há alteração causada pelo período de espera para a análise, no entanto, quando a  $pO_2$  da amostra é maior que a do meio, há uma perda e quando é menor, há um acréscimo. Estas alterações são fruto da tendência do sistema amostra-seringa ao equilíbrio.

**Conclusões prévias sobre instrumentos e montagens experimentais que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

Para principiantes, em se tratando de oximetria, e devido às baixas concentrações, muita atenção deve ser dispensada aos procedimentos. Um atraso mantendo uma amostra durante alguns minutos em uma seringa pode comprometer os resultados.

O oxímetro polarográfico YSI 5300 apesar de ter uma repetibilidade de resultados bastante dependente da montagem, possui uma notável linearidade e boa resposta temporal para este tipo de estudo.

O analisador de gases ABL 5 é um instrumento de alta qualidade e independente da montagem, no entanto produz resultados crescentemente errados com pressões parciais de Oxigênio acima de 400 mmHg. Como dificuldade adicional apresenta uma taxa de leitura muito baixa, ou seja, uma a cada 2,5 minutos. Porém é um instrumento útil e preciso para o fim para o qual foi desenvolvido: o uso hospitalar.

**5-1-2: Explorando o comportamento do oxímetro polarográfico YSI 5300 em relação à montagem experimental.**

As Figuras 26, 28, 30, 32 e 34 apresentam os resultados experimentais normalizados para os cinco ensaios. As Figuras 27, 29, 31, 33 e 35 apresentam os números de Reynolds normalizados para os cinco ensaios. A normalização utilizou a mesma condição como referência tanto para leitura normalizada como para o Re normalizado. Foi utilizado como referência o ensaio que apresentou menor valor na leitura calibrada. O número de Reynolds calculado para este ensaio considerado padrão foi de 2680. A variação combinada entre as variáveis exploradas causou um desvio de até 35% no valor da leitura.

A combinação dos dados e variáveis experimentais para se ajustar as constantes, gerou uma matriz com 160 equações, para cada um dos 5 modelos de correlação.

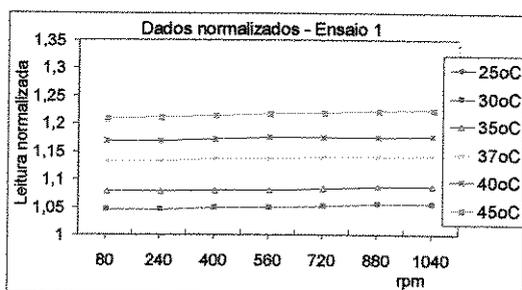


Figura 26: Leitura normalizada ensaio 1.

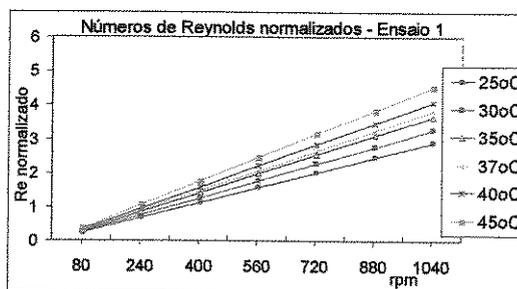


Figura 27: Reynolds normalizado ensaio 1.

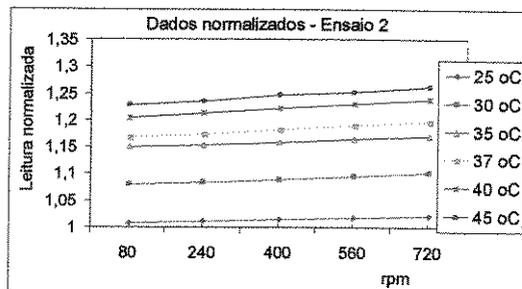


Figura 28: Leitura normalizada ensaio 2.

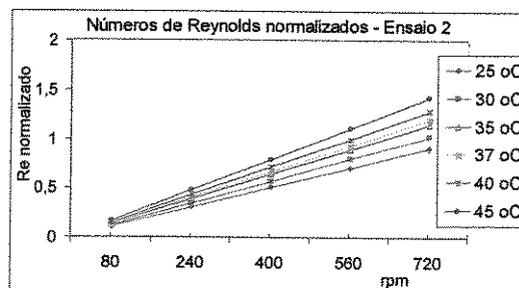


Figura 29: Reynolds normalizado ensaio 2.

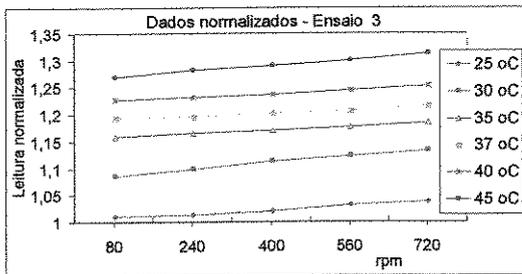


Figura 30: Leitura normalizada ensaio 3.

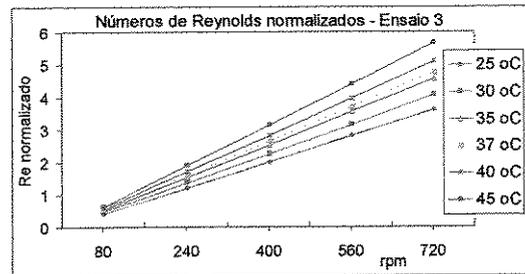


Figura 31: Reynolds normalizado ensaio 3.

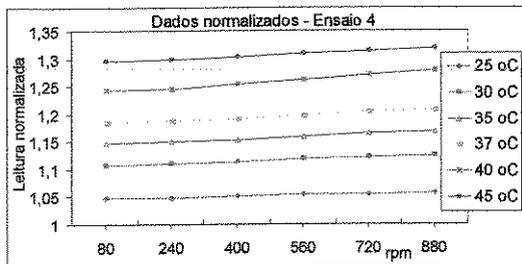


Figura 32: Leitura normalizada ensaio 4.

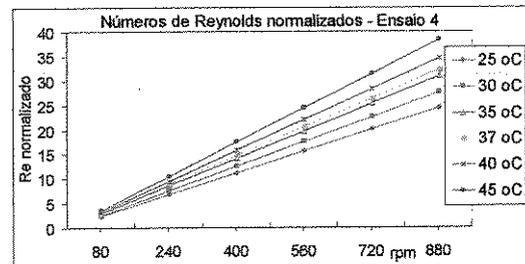


Figura 33: Reynolds normalizado ensaio 4.

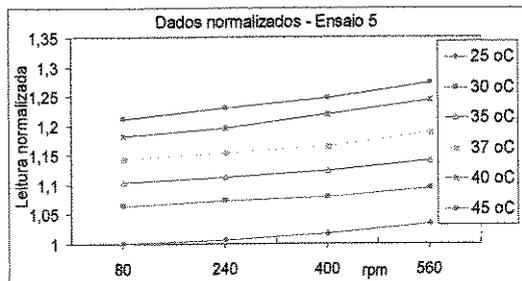


Figura 34: Leitura normalizada ensaio 5.

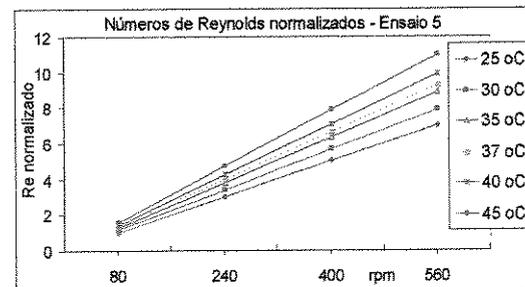


Figura 35: Reynolds normalizado ensaio 5.

As constantes ajustadas aos dados experimentais para os 5 modelos de correlação são mostradas na Tabela 29.

Os modelos de correlações são completados com as constantes ajustadas aos dados experimentais e apresentados abaixo como equações das correlações do modelo(1) ao modelo(5).

Tabela 29: Constantes achadas pelos processos de regressão linear

| Mod. | F         | e          | D          | c          | b           | a           |
|------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1    | 1066,1086 | -0,1789393 | -0,3825091 | -0,0397417 | 0,0119852   | 0,0143458   |
| 2    | X         | X          | 1061,0365  | -0,0891876 | 0,021434006 | 0,0177047   |
| 3    | X         | X          | X          | 1108,6499  | 0,001087117 | 0,01097206  |
| 4    | X         | X          | X          | 1063,2258  | -0,00865999 | 0,012274829 |
| 5    | X         | X          | X          | X          | 1094,1678   | 0,011202433 |

Os modelos montados com as constantes encontradas ficam sendo então correlações:

$$\text{Correlação(1): Dado-n} = \text{Re-n}^{0,0143458} * \text{Mi/l-n}^{0,0119852} * \text{fh-n}^{0,0397417} * \text{fv-n}^{0,38250912} * \text{fu-n}^{0,17893936} * e^{1066,1086((T-\text{Tr}) / \text{Tr} * T)}$$

$$\text{Correlação(2): Dado-n} = \text{Re-n}^{0,0177047} * \text{Mi/l-n}^{0,021434006} * \text{Nag-n}^{0,08918769} * e^{1061,0365 ((T-\text{Tr}) / \text{Tr} * T)}$$

$$\text{Correlação(3): Dado-n} = \text{Re-n}^{0,001087117} * \text{Mi/l-n}^{0,001087117} * e^{1108,6499 ((T-\text{Tr}) / \text{Tr} * T)}$$

$$\text{Correlação(4): Dado-n} = \text{Re-n}^{0,012274829} * \text{Nag-n}^{0,00865999} * e^{1063,2258 * ((T-\text{Tr}) / \text{Tr} * T)}$$

$$\text{Correlação(5): Dado-n} = \text{Re-n}^{0,011202433} * e^{1094,1678 * ((T-\text{Tr}) / \text{Tr} * T)}$$

A qualidade das correlações pode ser avaliada utilizando-se os dados da Tabela 30, onde são mostrados os coeficientes de correlação das regressões lineares e os erros médios entre os dados experimentais normalizados e os calculados utilizando as correlações de 1 a 5.

O modelo matemático mais detalhado obteve um fator de correlação aproximadamente 3% melhor que o mais simples, baseado na Equação de Arrhenius e no Número de Reynolds. Esta pequena diferença significa que as variáveis envolvidas no modelo mais simples são as mais influentes na leitura do sensor, ou seja, a Temperatura e a agitação, sendo que conforme a geometria, a agitação pode se tornar mais influente.

Tabela 30: Fatores de qualidade das correlações empíricas ajustadas.

| Modelo        | Fator correlação | Erro médio | Variáveis                       |
|---------------|------------------|------------|---------------------------------|
| Correlação(1) | 0,9156607        | 0,0210205  | T, Re, M/M, fv/fv, fh/fh, fu/fu |
| Correlação(2) | 0,910439         | 0,0222322  | T, Re, M/M, Nag                 |
| Correlação(3) | 0,8850646        | 0,0256712  | T, Re, M/M                      |
| Correlação(4) | 0,8863043        | 0,0256832  | T, Re, Nag                      |
| Correlação(5) | 0,8846301        | 0,0258095  | T, Re                           |

Os resultados desta secção mostram que é de grande importância para se evitar erros experimentais um bom controle da temperatura. Também é muito importante que a situação de posicionamento do sensor e a agitação do meio sejam as mesmas utilizadas na calibração.

Para uma leitura mais precisa, é importante utilizar a mesma montagem da calibração no experimento a ser realizado, isso implica em utilizar o mesmo tamanho de ímã para o agitador magnético e a mesma velocidade e distância ímã-sensor

**Conclusões prévias sobre instrumentos e montagens experimentais que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

Os testes de interações entre o oxímetro YSI 5300 e o tipo de instalação levaram a concluir que a temperatura é o item mais importante a ser controlado, seguida pelas características da geometria da cela acumuladora.

### 5-1-3: Avaliação da Constante de Henry para a emulsão de perfluorcarbono, PFCE.

#### 5-1-3-a: Ensaio variando a concentração da emulsão de perfluorcarbono.

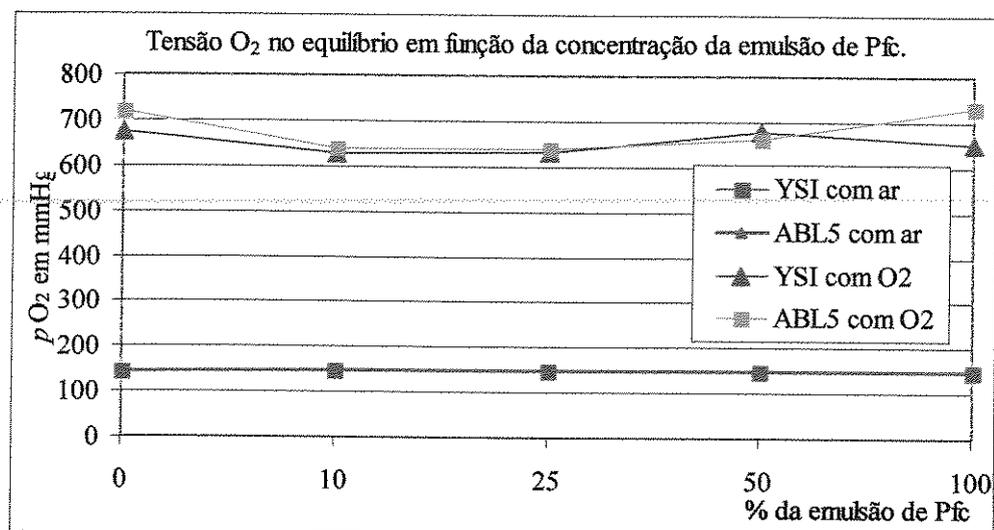


Figura 36: Efeito da composição da fase líquida e da pressão parcial de Oxigênio nas leituras do ABL5 e do YSI5300. A composição 100% de Pfc se refere a 100% da emulsão com 20% w/v de perfluorcarbono emulsionado, e 0% a água destilada pura. Os sensores dos dois equipamentos são incapazes de distinguir a presença do Oxigênio dissolvido no perfluorcarbono emulsionado.

**5-1-3-b: Ensaios para a determinação da Constante de Henry para emulsão de perfluorcarbono.**

Os resultados das misturas analisadas com os dois equipamentos de medição, o YSI5300 e o ABL-5, se encontram na Figura 37 e na Tabela 31.

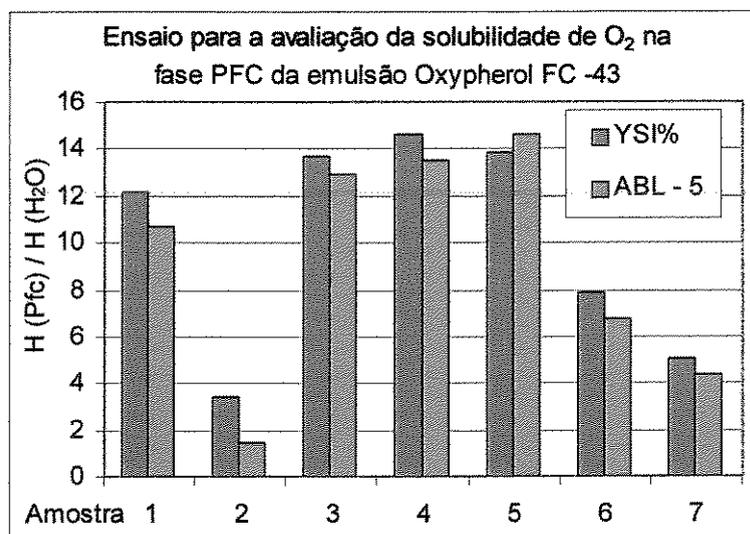


Figura 37: Dados obtidos de acordo com o balanço de massa aplicado aos 7 ensaios para a avaliação da proporção entre a Constante de Henry para  $O_2$  a  $37^\circ C$  na fase PFC da emulsão Oxypherol FC-43 e na água.

Tabela 31: Compilação dos dados obtidos em  $H_{(H_2O)}/H_{(Pfc)}$ .

| Ensaio | YSI - 5300 | ABL - 5 |
|--------|------------|---------|
| 1      | 12,15      | 10,67   |
| 2      | 3,40       | 1,49    |
| 3      | 13,71      | 12,90   |
| 4      | 14,62      | 13,49   |
| 5      | 13,85      | 14,64   |
| 6      | 7,85       | 6,74    |
| 7      | 5,08       | 4,36    |

Tabela 32: Propriedades estatísticas dos dados analisados.

| Propriedade                                                                                | Valor          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Média das medidas aceitas,<br>$H_{\text{PFC}} / H_{\text{H}_2\text{O}} =$                  | 13,86          |
| Estimativa de desvio médio,<br>$d = S [ X_i - X_m ] / N =$                                 | 0,128          |
| Estimativa de desvio padrão,<br>$s = \text{Sqr}(S [ X_i - X_m ]^2 / (N-1)) =$              | 0,0992         |
| Limite de confiança da média,<br>$+ - t * s / \text{Sqr}(N) =$                             | 0,2898         |
| Dado obtido com o intervalo de<br>confiança, $H_{(\text{H}_2\text{O})}/H_{(\text{PFC})} =$ | 13,9 $\pm$ 0,3 |

Os dados originados nos experimentos são mostrados na Tabela 31 e na Figura 37 onde a forma gráfica auxilia a observação da concordância entre as medidas. Os dados obtidos passam por um processo de avaliação, seleção e exclusão. O tratamento estatístico aplicado gerou os dados exibidos na Tabela 32.

Os dados foram tratados segundo o procedimento sugerido por Bacchan<sup>88</sup> sendo que os resultados dos ensaios número 2, 6 e 7 foram descartados por estarem muito longe da média. Foi considerado erro experimental, pois estas amostras foram transferidas de béquer para béquer na etapa da mistura, enquanto nos outros ensaios a transferência foi realizada com o auxílio de uma seringa, o que reduz a entrada de ar, e com ele a entrada do O<sub>2</sub>. Utilizando o procedimento estatístico denominado Teste – Q, os dados do ensaio número 1 também foram excluídos.

Foram calculados então os valores da média, a estimativa de desvio médio e a estimativa de desvio padrão, para possibilitar a utilização da função t-Student, com a qual foi obtido o limite de confiança desta média para 99% de probabilidade. Estes resultados são mostrados na Tabela 32.

O valor achado neste caso para a relação entre a constante de Henry para o oxigênio na água e no perfluorcarbono é  $H_{(\text{H}_2\text{O})}/H_{(\text{PFC})} = 13,9 \pm 0,3$ . Comparado o valor obtido com o valor citado por Green Cross Coporation, (1976) para o Oxypherol FC-43 que é de 14,0, vemos que o

resultado alcançado é satisfatório, tanto para o método quanto para o produto, tendo em vista que a validade do Oxypherol é de 1 ano, e o utilizado neste experimento está vencido há 6 anos.

O valor previsto pelo cálculo com os dados da literatura foi  $H_{(H_2O)}/H_{(PFC)} = 16,1$ , com o modelo que considerou apenas água e PFC, não levando em conta os outros componentes como sais que reduzem a solubilidade do  $O_2$  e o emulsificante, portanto um valor máximo teórico, maior que o especificado para o produto testado. Serve como referência para o teste.

A constante de Henry para uma mistura feita a partir de uma diluição da emulsão deste perfluorcarbono pode ser calculada com a Eq.(33). Substituindo o valor encontrado para a relação entre as constantes de Henry para água e para o emulsificado utilizado neste caso e colocando a constante de Henry para a água em evidência obtém-se a Eq.(51)

$$1 / H_{mistura} = 1 / H_{H_2O} (X_{H_2O} + (1-X_{H_2O}) / 13,9) \quad (51)$$

A qual na forma final fica:  $H_{mistura} = H_{H_2O} / (X_{H_2O} + (1-X_{H_2O}) / 13,9) \pm 0,3 \text{ mmHg} \cdot l / ml(O_2)$

Substituindo o valor da constante de Henry para a água na relação obtida mostrada na Tabela 32, obtemos a constante de Henry para o componente emulsificado  $H(O_2)^{37oC}_{(PFC)} = 2,18 \pm 0,05 \text{ mmHg} \cdot l / ml(O_2)$ , o qual comparado com dados da Tabela 1 no Cap. 3, mostra que de fato trata-se de um perfluorcarbono, neste caso emulsificado.

O procedimento apresentado mostrou um grau satisfatório de precisão e exatidão podendo ser utilizado como ensaio de checagem de emulsões para diversos fins.

A exatidão pode ser verificada comparando o valor obtido para  $H_{(H_2O)}/H_{(PFC)} = 13,9$  com o fornecido pelo fabricante que é de 14. A precisão pode ser avaliada pela proporção entre o intervalo de confiança para 99% de probabilidade e o valor obtido, ou seja, 0,3 para 13,9 sendo satisfatória para sua utilização.

A emulsão estudada mostrou uma estabilidade ao longo do tempo melhor que a esperada. Com este procedimento chegamos aos valores descritos abaixo e tidos por suas qualidades estatísticas como confiáveis.

O problema de acesso ao soluto dissolvido em fases emulsificadas em sistemas com equilíbrio de fases onde só uma entra em contato com o sensor não é raro. Este método pode ser utilizado em outras aplicações.

A partir de um volume conhecido utilizando este método, um componente pode ser identificado pela sua capacidade de sequestrar o soluto, neste caso o oxigênio, de um meio.

### 5-1-3-c: Efeito da emulsão de perfluorcarbono na concentração de Oxigênio

A emulsão devido ao PFC é capaz de dissolver mais Oxigênio que a água, no entanto os sensores aqui utilizados não são capazes de acessar o gás na emulsão. As Figuras 38 e 39 mostram os mesmos ensaios, o primeiro com as medidas de  $pO_2$ , o segundo com as unidades em volume de  $O_2$  dissolvido por litro de fase líquida, ou seja, concentração. Esta ilustração mostra a importância de se obter um dado confiável para a Constante de Henry para a fase líquida utilizada.

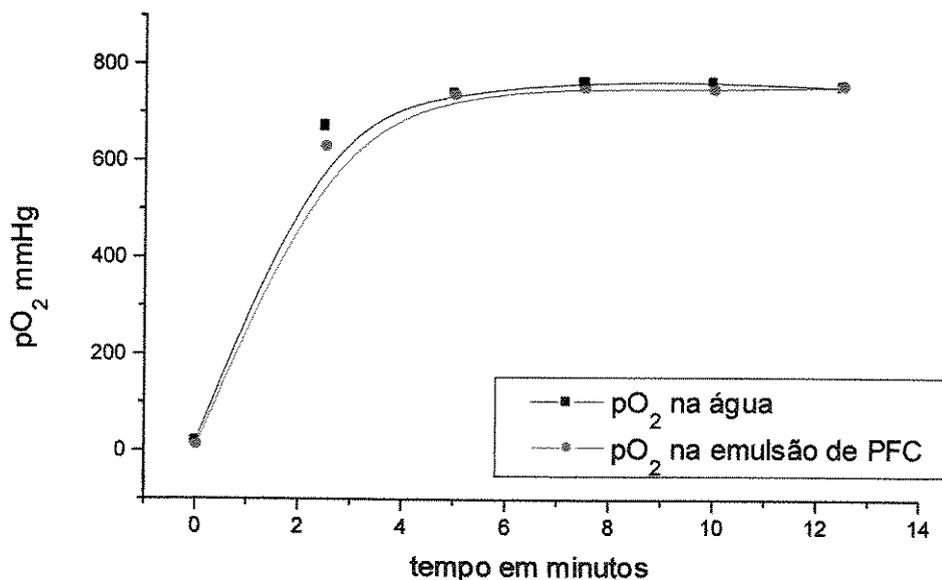


Figura 38: Ensaio de saturação com Oxigênio de alíquotas de água e de emulsão de perfluorcarbono com dados apresentados em  $pO_2$  x tempo.

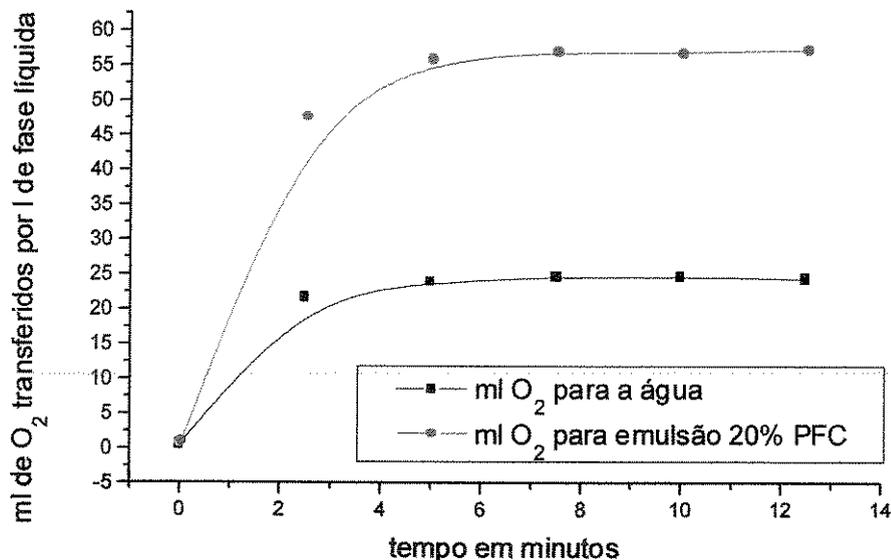


Figura 39: Ensaio de saturação com Oxigênio de alíquotas de água e de emulsão de perfluorcarbono com dados apresentados em concentração de O<sub>2</sub> em v/v x tempo.

**Conclusões prévias sobre o teste da emulsão de perfluorcarbono e a Constante de Henry que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

Os instrumentos ABL 5 e YSI 5300 não percebem o Oxigênio que está na fase emulsificada.

O procedimento apresentado mostrou um grau satisfatório de precisão e exatidão podendo os dados obtidos, por suas qualidades estatísticas, serem considerados como confiáveis. Pode ser utilizado em ensaios para avaliar a solubilidade de gases em emulsões destinadas a diversos fins.

A exatidão pode ser verificada comparando-se o valor obtido para  $H_{(H_2O)}/H_{(PFC)} = 13,9 \pm 0,3$  como sendo de 14, igualando-se ao valor fornecido pelo fabricante, que se pode considerar como boa.

A precisão pode ser avaliada pela proporção entre o intervalo de confiança para 99% de probabilidade, e o valor obtido, ou seja,  $\pm 0,3$  para 13,9 sendo satisfatório para sua utilização.

A emulsão estudada mostrou uma estabilidade melhor do que a esperada ao longo do tempo, pois já tinha seis anos, sendo que a validade é de apenas um ano.

O problema de acesso ao soluto dissolvido em fases emulsificadas, em sistemas com equilíbrio de fases, onde só uma das fases entra em contato com o sensor, é bastante comum. Portanto este método pode ser utilizado em outras aplicações.

A partir de um volume conhecido e utilizando-se este método, um componente pode ser identificado pela sua capacidade de seqüestrar o soluto de um meio, neste caso o oxigênio.

5-1-4: Determinação do volume da fase líquida e do tempo de amostragem.

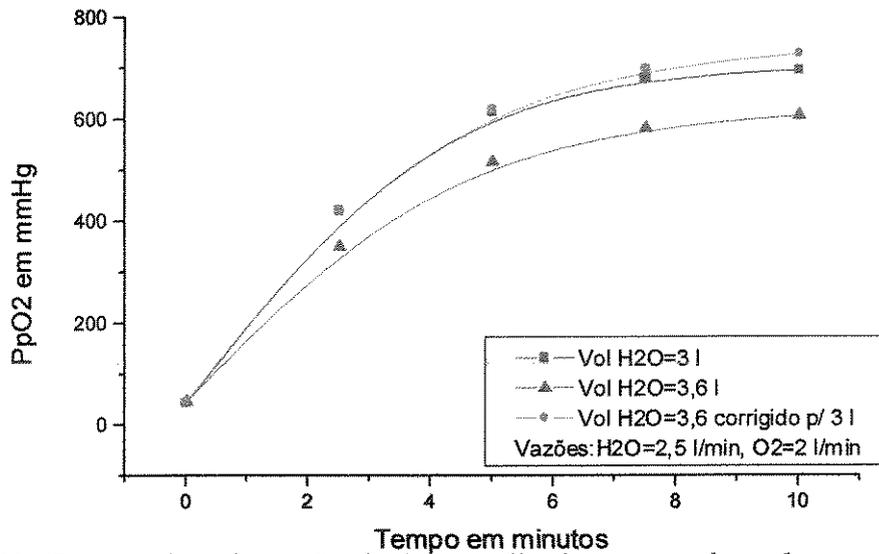


Figura 40: Ensaio de oxigenação da água realizados com oxigenador com área de 0,25m<sup>2</sup> e utilizando 3 e 3,6 litros de água.

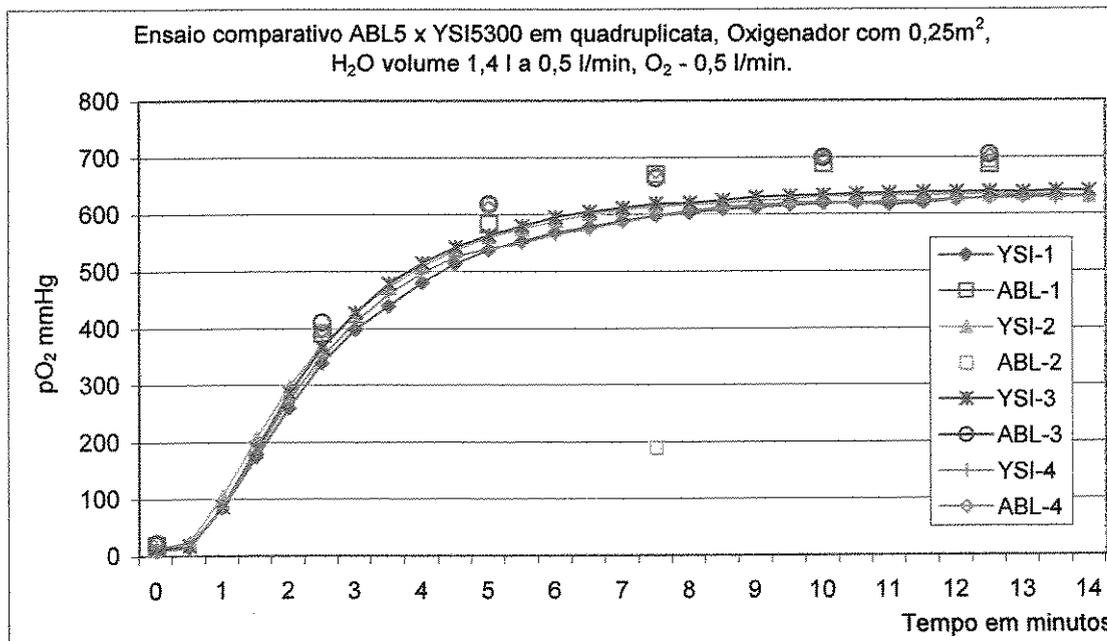


Figura 41: Ensaio de oxigenação da água realizados em quadruplicata com oxigenador com área de 0,25m<sup>2</sup>, utilizando 1,4 litro de água, vazões de gás e líquido a 0,5 l/min. Análise com o ABL 5 lendo a cada 2,5 minutos e com o YSI 5300 a cada 30 segundos.

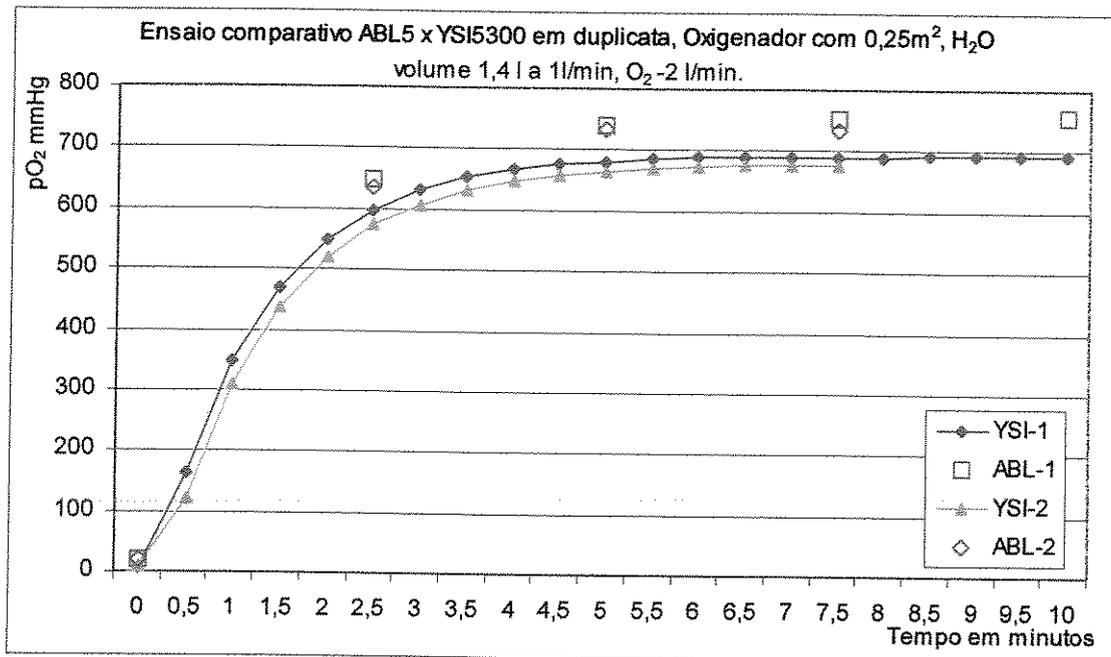


Figura 42: Ensaio de oxigenação da água realizados em duplicata com oxigenador com área de 0,25m<sup>2</sup>, utilizando 1,4 litro de água, vazões de gás a 2 l/min. e líquido a 1 l/min. Análise com o ABL 5 lendo a cada 2,5 minutos e com o YSI 5300 a cada 30 segundos.

Os ensaios da Figura 40 revelam que a taxa de aquisição de 1 leitura a cada 2,5 minutos obtida pelo ABL 5 é muito pequena, pois mesmo com 3,6 litros de água poucos pontos foram obtidos e mesmo assim foi necessário deixar atingir uma saturação elevada. Para que o oxigenador possa ser estudado em uma faixa de saturação menor, seria necessário um volume muito grande de fase líquida, próximo a 10 l, novamente inviável, não só pelo tempo necessário, mas principalmente pela falta de PFCE. Esta figura traz uma outra informação. Apesar de um  $K_{LA}$  semelhante para as saturações com 3 e com 3,6 l de água, se calculado com os 3 primeiros pontos, quando a curva da saturação com 3,6 l é corrigida a número de moles constante para 3 l, ou seja, o mesmo número de moles presente nos 3,6 l de fase líquida colocados em 3 l desta, ela mostra uma concentração de Oxigênio nitidamente superior à curva do ensaio com 3 l. Se fosse o efeito do erro do ABL 5, que quanto maior a tensão de Oxigênio maior o erro, esta diferença deveria ser mascarada, minimizada ou até sumir. No entanto não só não sumiu como se destacou. Este efeito é uma evidência do “vazamento” que pode estar ocorrendo em tensões de Oxigênio mais

elevadas, e é uma razão para se tentar evitar ter que considerar pontos obtidos nestas condições. Com esta informação, torna-se aconselhável dimensionar o ensaio para que pontos com  $pO_2$  abaixo de 400 mmHg sejam obtidos em quantidade suficiente para a avaliação.

Os ensaios das Figuras 41 e 42 foram realizados com os dois instrumentos de avaliação de  $pO_2$ , o ABL 5 e o YSI 5300, sendo que os da Figura 41 foram realizados em quadruplicata e os da outra, em duplicata. Todos mostraram boa reprodutibilidade. O YSI 5300 permite uma taxa de aquisição de dados bem mais rápida que o ABL 5, isso possibilita a utilização de menores volumes de fase líquida e melhores resultados, mesmo saturando apenas até  $pO_2$  mais baixas como 400mmHg. Os erros de leitura do ABL 5 em  $pO_2$  mais elevadas são novamente bem visíveis. Fica evidente outra fonte de erros devida à baixa taxa de aquisição de dados nos ensaios da Figura 41. A vazão da fase líquida é mais baixa tornando a esta taxa de aquisição possível ver o atraso causado devido ao fluxo desta no sistema. O  $K_{La}$  calculado com os dados do ABL 5 nestas condições é menor que o calculado com os dados do YSI 5300, com o qual é possível escolher estudar pontos associados ao efeito do oxigenador e menos sujeitos aos efeitos do atraso de inicialização da montagem. Os ensaios da Figura 42 mostram uma menor influência deste efeito, devido a uma maior vazão de fase líquida.

**Conclusões prévias sobre o volume da fase líquida e o tempo de amostragem que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

O ABL 5 é muito lento para a aquisição de dados na taxa que se faz necessário.

O volume de fase líquida de 1,4 l é adequado. Vai ser necessário diluir o PFCE.

O YSI 5300 é suficientemente rápido para a taxa de aquisição de dados necessária para se trabalhar com 1,4 l de fase líquida.

É conveniente não considerar no cálculo do  $K_{La}$  os pontos obtidos em que a  $pO_2$  é maior que 400 mmHg.

**5-1-5: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer as fibras dos oxigenadores.**

**5-1-5-a: Determinação experimental.**

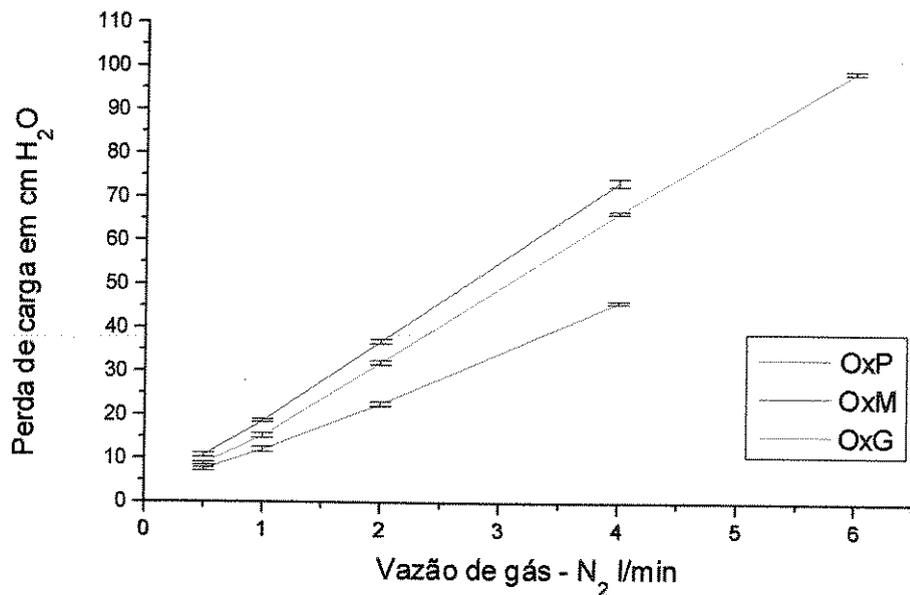


Figura 43: Perda de carga em cm H<sub>2</sub>O para um fluxo de gás para três modelos de oxigenadores de membrana, onde P = 0,25 M = 0,5 e G = 1,6 m<sup>2</sup>.

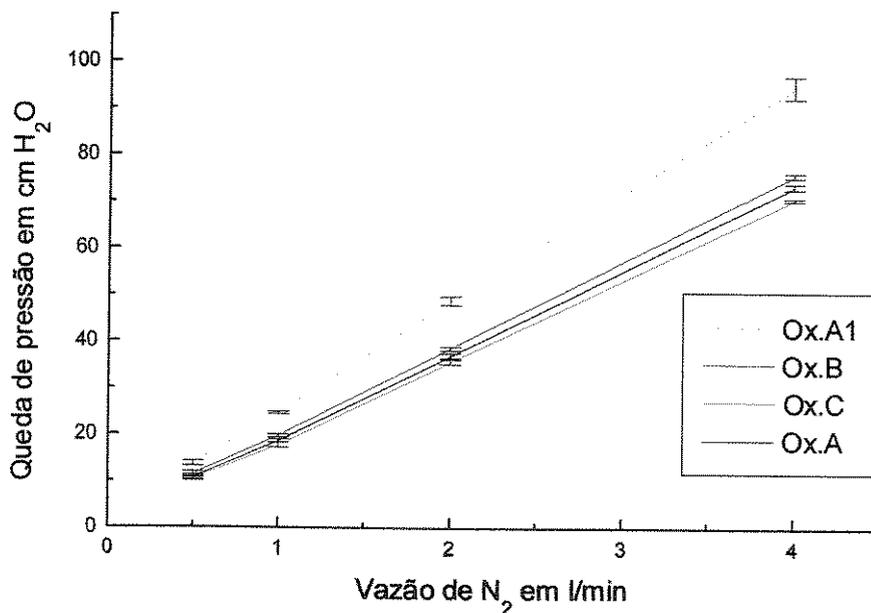


Figura 44: Perda de carga em cm H<sub>2</sub>O para um fluxo de gás para três oxigenadores de membrana, com 0,5 m<sup>2</sup>. Ox.A1 refere-se ao oxigenador Ox.A após ficar 6 meses cheio de água

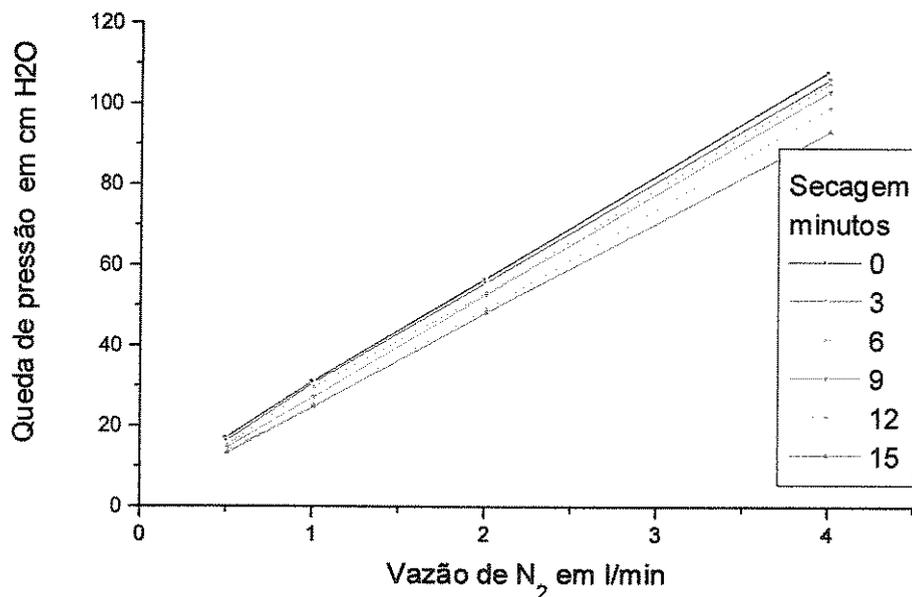


Figura 45: Efeito de secagem causado pelo fluxo do gás de teste em minutos sobre o oxigenador OxA1 mostrado na figura anterior.

Os ensaios experimentais mostrados nas Figuras 44 e 45 foram realizados em quintuplicatas. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente<sup>88</sup> quanto à determinação de suas barras de erro.

O alinhamento dos pontos experimentais é uma evidência de que o escoamento seja do tipo laminar, o que afasta a hipótese de que pequenas diferenças na rugosidade tenham importante influência sobre o desempenho do teste.

#### 5-1-5-b: Simulação numérica.

A simulação foi realizada tendo em vista a visualização do efeito da variação do número de fibras e da vazão do gás de teste sobre a perda de carga de um dispositivo. Isto foi realizado comparando os dados calculados para um hipotético oxigenador sob teste com um dispositivo idealizado como padrão. O procedimento numérico foi rodado com as vazões 0,5, 1, 2 e 4 l/min utilizadas nos experimentos e 8 l/min para comparação. As perdas de carga foram normalizadas

em relação ao ensaio com o oxigenador padrão com a vazão de gás de 0,5 l/min. Os resultados são mostrados na Figura 46.

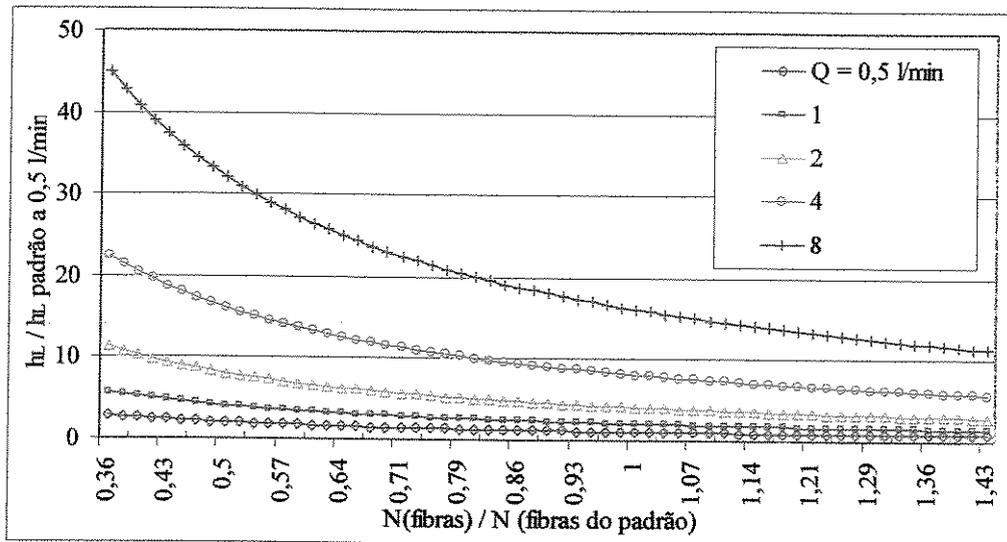


Figura 46: Resultados de simulação numérica da perda de carga em função da variação da vazão de gás e do número de fibras viáveis. Dados normalizados em relação a um oxigenador idealizado como padrão com vazão de gás em 0,5 l/min.

Como estavam disponíveis apenas 3 oxigenadores de membrana e todos aprovados no teste de qualidade, foi realizada uma simulação numérica com o propósito de estimar o que aconteceria se o número de fibras fosse muito diferente do aceitável, e o que pode ocorrer se a vazão do gás de teste for aumentada até 8 l/min.

A simulação numérica mostra que quanto maior a vazão, maior a separação entre as medidas de dois oxigenadores, pois  $h_L$  é proporcional a  $Q^2 + Q$ . Mostra também que quando o número de fibras é reduzido a separação aumenta de forma também exponencial, pois  $h_L$  é proporcional a  $1/(N_f^2 + N_f)$ , facilitando diagnosticar unidades com menos fibras. Ela fornece uma visão mais ampla, mas bem consistente com os dados experimentais.

Nota-se que uma vazão maior melhora distinção entre os dispositivos testados e suas barras de erro. No entanto, recomenda-se utilizar vazão e pressão calculadas para não comprometer a estrutura do dispositivo testado.

O teste é executado sem condenar o oxigenador, o que torna possível que seja aplicado em todas as unidades fabricadas, sendo eficaz em determinar se a área de troca disponível é aceitável, por comparação a um padrão de fabricação.

A separação nas barras de erro demonstra que o método fornece uma boa resolução no teste dos oxigenadores. Foram revelados detalhes que permitiram estabelecer diferenças de desempenho entre as unidades testadas. Este método de avaliação da área disponível para troca é preciso e rápido.

**Conclusões prévias sobre a determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer as fibras que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

O aumento da vazão de gás favorece a resolução entre os oxigenadores testados.

O teste é sensível de forma exponencial à redução no número de fibras viáveis.

A utilização de um fluxo em escoamento laminar torna este método menos susceptível às possíveis variações na rugosidade da superfície interna da fibra.

O teste é executado sem comprometer o oxigenador, o que o torna útil para ser aplicado em todas as unidades fabricadas.

O método é eficaz para comprovar se a área de troca disponível está de acordo com as especificações do fabricante.

Foi demonstrado que o método fornece uma boa resolução no teste dos oxigenadores. Foram revelados detalhes que permitiram estabelecer diferenças de desempenho entre as unidades testadas.

Este método de avaliação da área disponível para troca, embora seja um processo indireto, se comparado ao método envolvendo transporte de massa, citado na referência, é mais preciso e rápido.

## **5-1-6: Determinação das características da coluna**

### **5-1-6-a: Área específica do recheio da coluna**

A área superficial do recheio da coluna pode ser achada por dois métodos: utilizando-se uma tabela para recheios semelhantes, ou pela área e número de canudos cortados para confeccionar o enchimento.

Por semelhança com outro recheio achamos os anéis de Raschig de  $\frac{1}{4}$  pol, o qual nos dá uma área total de troca de  $2,54 \text{ m}^2$ , no entanto devemos considerar que a espessura da parede do anel é maior e isso colabora com a área total de troca.

Levando em conta o número de canudos picados e sua área, chegamos na área de  $2,51 \text{ m}^2$ , no entanto, pesando 200 unidades com área conhecida e comparando com a massa que foi utilizada para encher a coluna, achamos a área de  $2,5 \text{ m}^2$ , que é o valor adotado para o trabalho por ser mais específico, portanto o mais confiável.

### **5-1-6-b: Porosidade do recheio**

A porosidade foi determinada em triplicata, sendo que os valores achados foram:  $\epsilon = 0,937$ ,  $\epsilon = 0,936$  e  $\epsilon = 0,938$ . Esta ficou assim determinada como sendo  $\epsilon = 0,937 \pm 0,001$ . Porosidade superior a do Anel de Raschig tabelado, que é de 0,73.

### **5-1-6-c: Retenção de líquido.**

O teste de retenção de líquido foi realizado cinco vezes configurando assim uma quintuplicata. O resultado foi  $V = 195 \pm 5 \text{ ml}$

#### 5-1-6-d: Teste de inundação

O volume total de líquido na coluna é a soma do que está em movimento com o que fica retido no recheio após a parada, ou seja, o volume em movimento é o volume que não está dentro do Elemeyer, menos o volume de líquido que fica retido no recheio, determinado no item anterior.

Os dados exibidos na Figura 47 mostram que o recheio da coluna não sofre inundação na vazão máxima de líquido na qual será operada.

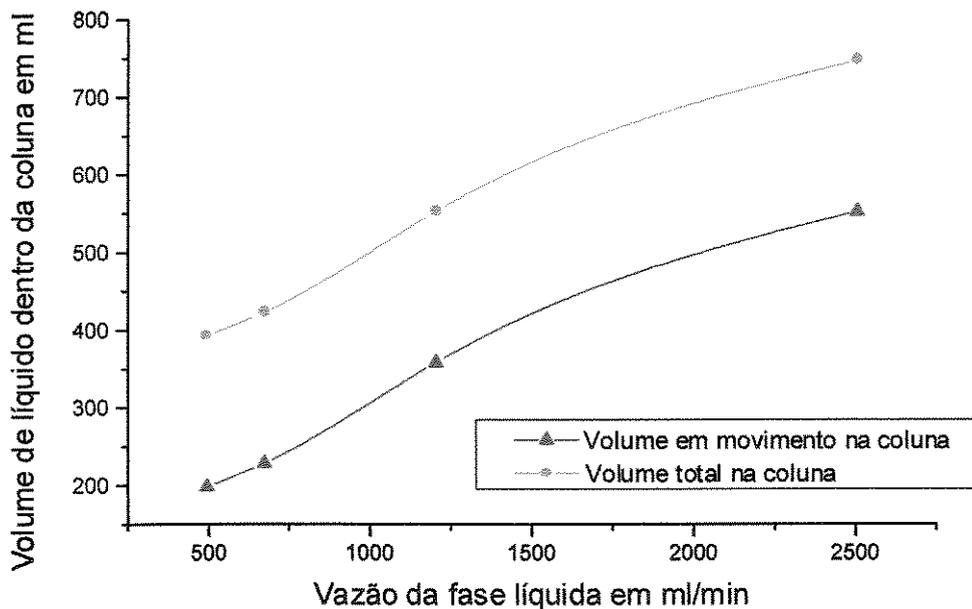


Figura 47: Volume de líquido retido em função da vazão de operação da coluna.

#### 5-1-6-e: Determinação da perda de carga da fase gasosa ao percorrer e o recheio da coluna.

A perda de carga da fase gasosa tem como importância neste caso a correção da  $pO_2$  para o cálculo dos coeficientes de transporte de massa. No caso de uma coluna de recheio conforme é possível comprovar com os dados da Figura 48, o fluxo de gás divide espaço para escoar com o

fluxo de líquido que ocorre em contra corrente por gravidade, tornando-se assim função de ambas as vazões.

Queda de pressão na coluna em função das vazões de líquido e gás

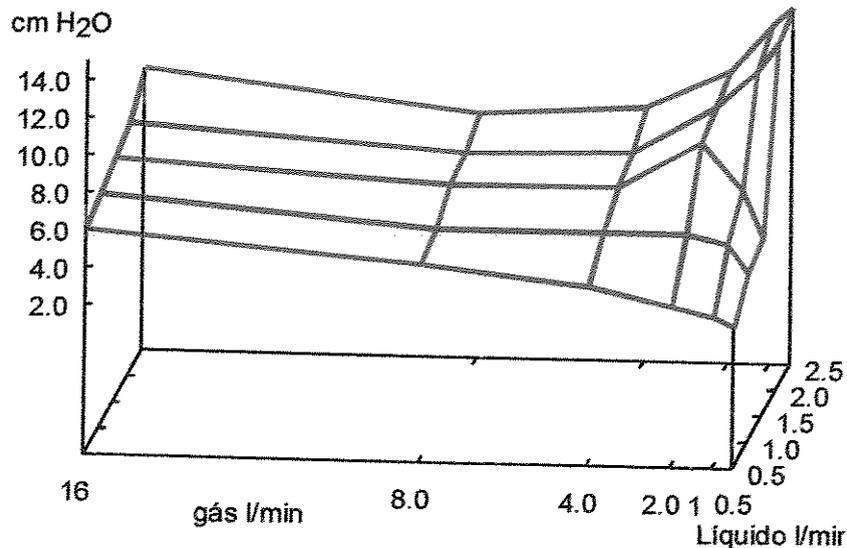


Figura 48: Superfície de queda de pressão na fase gasosa em função das vazões de gás e de líquido.

**Conclusões prévias sobre a determinação das propriedades da coluna que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

Esta coluna de recheio para a troca de massa foi caracterizada para permitir a comparação entre as técnicas de troca com recheio e com membrana. Os dados de queda de pressão da fase gasosa em função das vazões, mostrados na Figura 48, são utilizados na correção da  $p^*O_2$  utilizada no cálculo do  $K_{La}$ .

A retenção de líquido em sistemas à base de membrana é muito menor do que em sistemas a base de recheio de anéis tipo Raschig, para uma mesma capacidade de troca.

### **5-1-7: Experimentação numérica para a seleção de dados.**

Esta subsecção descreve o procedimento de análise dos dados experimentais e a lógica que levou ao procedimento adotado, o método da faixa.

Como ferramentas de análise há o desvio padrão entre as triplicatas de ensaios, o coeficiente de correlação das regressões lineares de cada ensaio, obtidos quando se procede com a regressão linear para o cálculo do  $K_{La}$ ; e com as simulações numéricas, que por sua utilidade e importância merecem um sub-item.

#### **5-1-7-a: Simulação numérica do $K_{La}$ .**

Como foi descrito no Capítulo 3, há um balanço de massa simplificado descrito pela Eq.(16) e simulado pela Eq.(22), e há o detalhado, descrito parcialmente pela Eq.(21). Os dados experimentais são processados para determinação do  $K_{La}$  baseados no modelo simplificado, que leva em conta apenas o efeito idealizado para o oxigenador de membrana no balanço de massa, no entanto, os dados são obtidos por um sistema real sujeito em maior ou menor grau a todas as variações descrita no item sobre simulação do Capítulo 3.

Uma vez que o  $K_{La}$  tenha sido determinado por um procedimento baseado no modelo simplificado, se os dados experimentais que o definiram são realmente causados pelo efeito modelado, quando este modelo simples for simulado com o  $K_{La}$  obtido, as curvas simulada e experimental devem se sobrepor ou pelo menos chegarem mais próximas numa região em que o efeito mais importante seja o modelado.

#### **5-1-7-b: O efeito da variação da janela de seleção de pontos aplicada aos ensaios de 1 a 12.**

Na Figura 49, os ensaios 1, 3, 5 e 7 mostram nitidamente mesmo com taxa de aquisição de 1 medida a cada 30s, um atraso na reação do sistema ao início do experimento devido ao escoamento das fases nos tubos, atrasos menos pronunciados no caso dos ensaios 9 e 11, que contam com maiores vazões. Este efeito também é nítido nos ensaios mostrados na Figura 50.

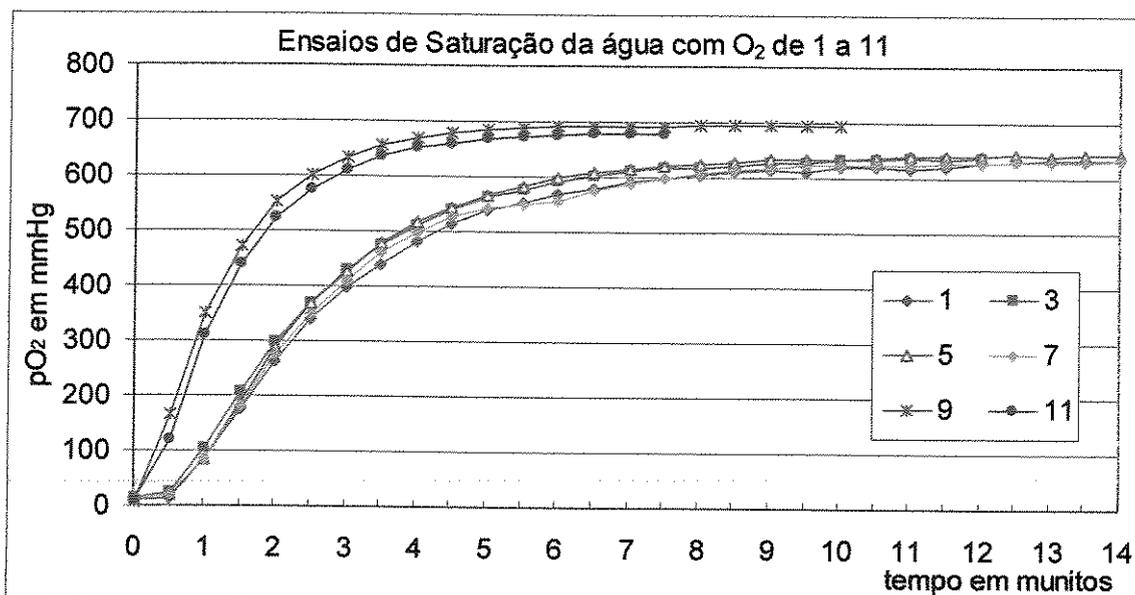


Figura 49: Ensaio de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup> de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 1, 3, 5 e 7, e gás 2 l/min, e de líquido 1 l/min para 9 e 11.

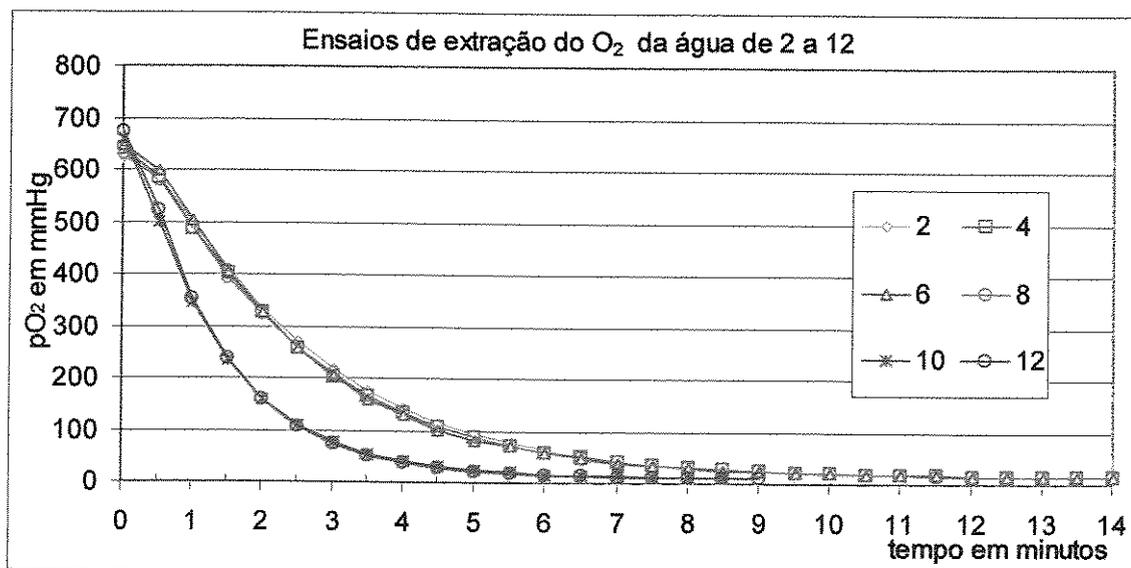


Figura 50: Ensaio 1, 3, 5, 7, 9 e 11 de extração do Oxigênio da água utilizando um oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup> de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 1, 3, 5 e 7, e gás 2 l/min, e de líquido 1 l/min para 9 e 11.

A primeira etapa da análise numérica consiste em aplicar a Eq.(16) aos pontos experimentais de modo a se fazer um gráfico entre o ln das variações de  $pO_2$  em função dos deltas ts, conforme mostrado nas Figuras 51, 52 e 53.

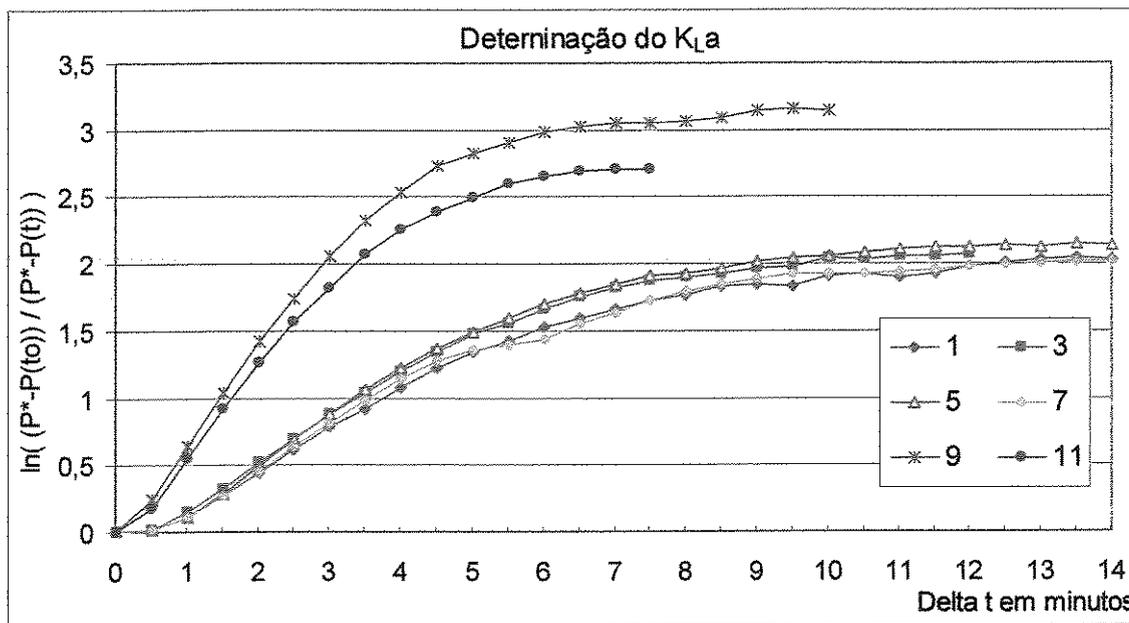


Figura 51: Dados dos ensaios de saturação 1, 3, 5, 7, 9 e 11 convertidos na forma do ln da razão das  $pO_2$  versus os delta t dos intervalos em que as alterações ocorreram.

Os atrasos que variam com as condições experimentais, característicos deste tipo de montagem, não são compatíveis com a técnica de regressão linear para se achar a inclinação da curva, pois o atraso altera a inclinação e o valor do  $K_L a$  se estes pontos iniciais forem considerados. Portanto, o ponto inicial precisa ser modificado.

Na figura 51 é possível verificar que há uma região após a inflexão positiva causada pela inicialização do experimento, em que há uma reta com inclinação constante e bem definida para cada conjunto de condições experimentais. Os ensaios 1, 3, 5, e 7 possuem uma inclinação característica e menor que os ensaios 9 e 11. Este efeito pode ser observado também nos ensaios de extração de Oxigênio.

A Figura 52 é uma demonstração de que por o  $K_{La}$  ser uma espécie de constante de tempo do experimento, e ser determinada através de um  $\ln$  de uma razão entre  $pO_2$ , o que importa é que as medidas estejam na mesma escala, e neste caso, não a unidade utilizada.

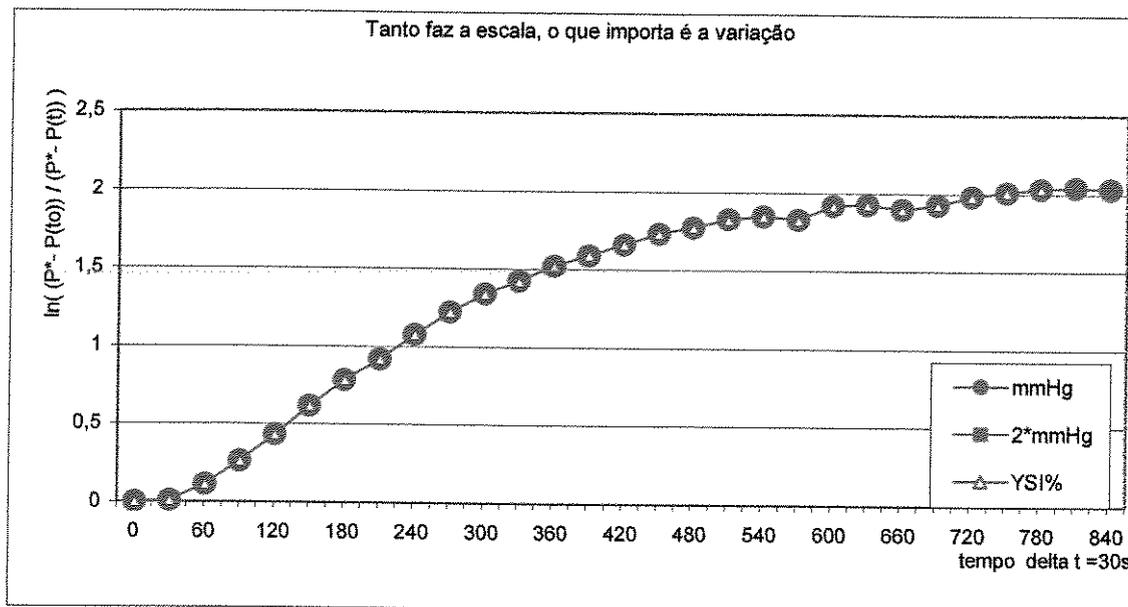


Figura 52: Dados do ensaio 7 calculados a partir das mesmas fontes mas em três diferentes escalas, sendo que em cada caso de cálculo, todos os dados estavam na mesma escala.

Um estudo do deslocamento do ponto considerado como inicial é mostrado na Figura 54, onde sucessivamente os três primeiros pontos foram excluídos do procedimento de cálculo. Após excluir o primeiro minuto, verifica-se a ausência do efeito da inicialização na curva obtida, tornando esta mais adequada à regressão linear para a determinação do  $K_{La}$ .

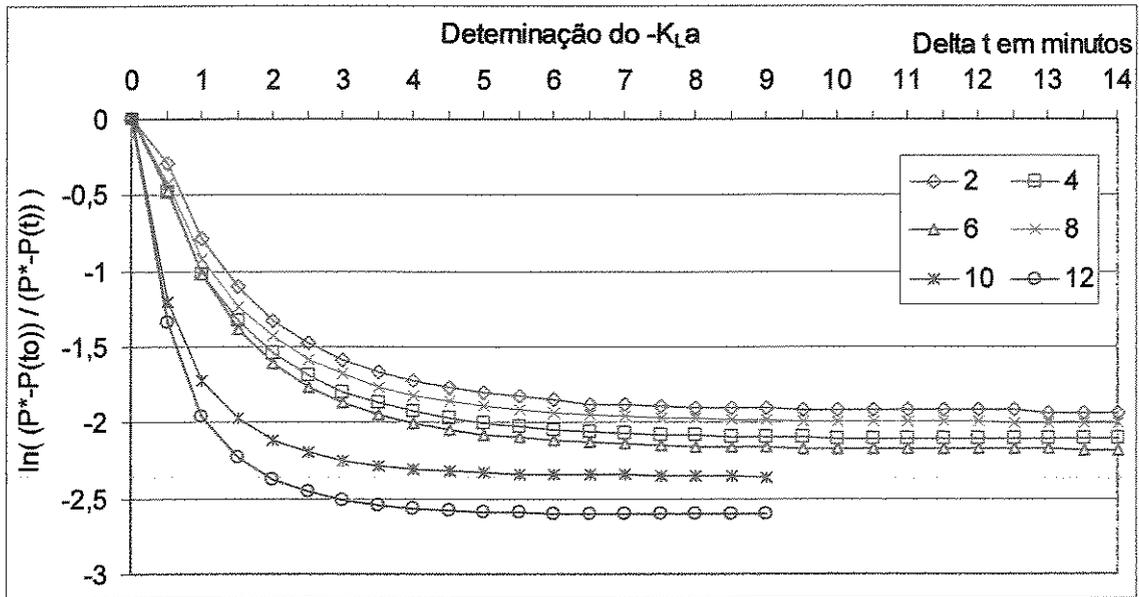


Figura 53: Dados dos ensaios de extração 2, 4, 6, 8, 10 e 12 convertidos na forma do  $\ln$  da razão das  $pO_2$  versus os delta t dos intervalos em que as alterações ocorreram.

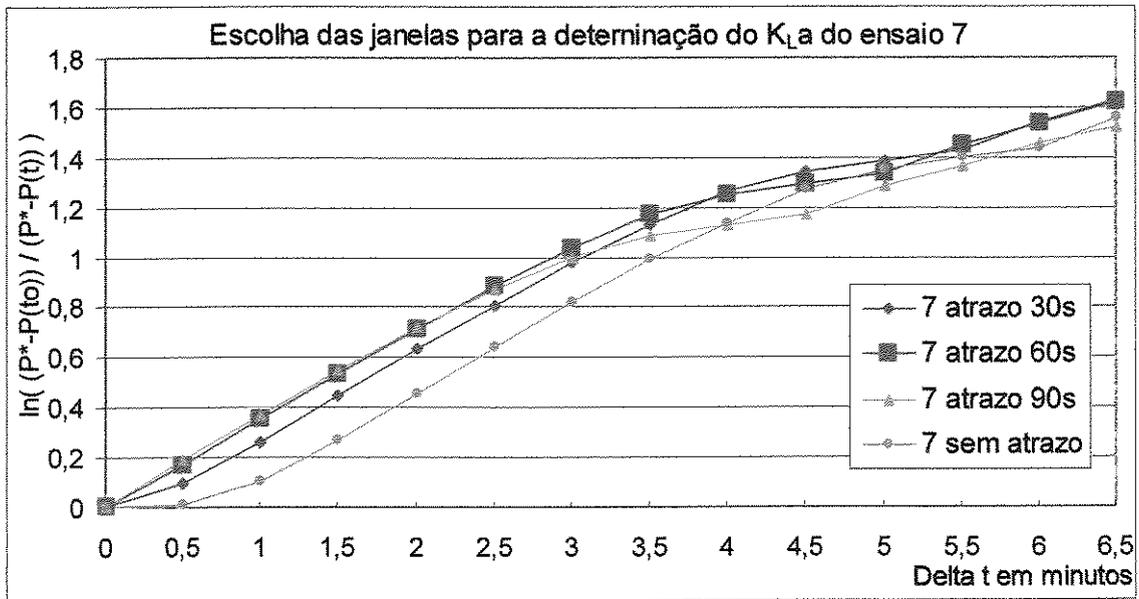


Figura 54: Quatro graus de discriminação de pontos de inicialização aplicados ao ensaio 7.

A próxima etapa é determinar quantos pontos utilizar na regressão linear, ou seja, qual é o efeito do número de pontos.

O ensaio número 7 foi escolhido ao acaso para a demonstração na forma de Figuras. No entanto, este procedimento foi aplicado a todos os ensaios deste item. Mantendo o início da janela de discriminação ignorando o primeiro minuto do ensaio, foram realizadas regressões lineares variando o número de pontos considerados, ou seja, a base da janela foi mantida fixa em 1 minuto, e a abertura foi variada de 4 a 14 pontos. As Figuras 55, 56 e 57 são as regressões lineares do ensaio número 7 com 4, 8 e 10 pontos. Os  $K_L$ s são os coeficientes angulares destas retas ajustadas.

A Figura 58 mostra os 36 coeficientes de correlação obtidos para as regressões lineares dos ensaios 1, 3, 5, 7, 9 e 11 considerando 4, 6, 8, 10, 12 e 14 pontos. Há uma nítida tendência, em todos os ensaios, de que quanto maior o número de pontos, menor o coeficiente de correlação, ou seja, quanto mais alta a  $pO_2$ , menos os dados se encaixam no modelo matemático simples desenvolvido para esta situação. A Figura 59 mostra a variação no  $K_L$  com o número de pontos.

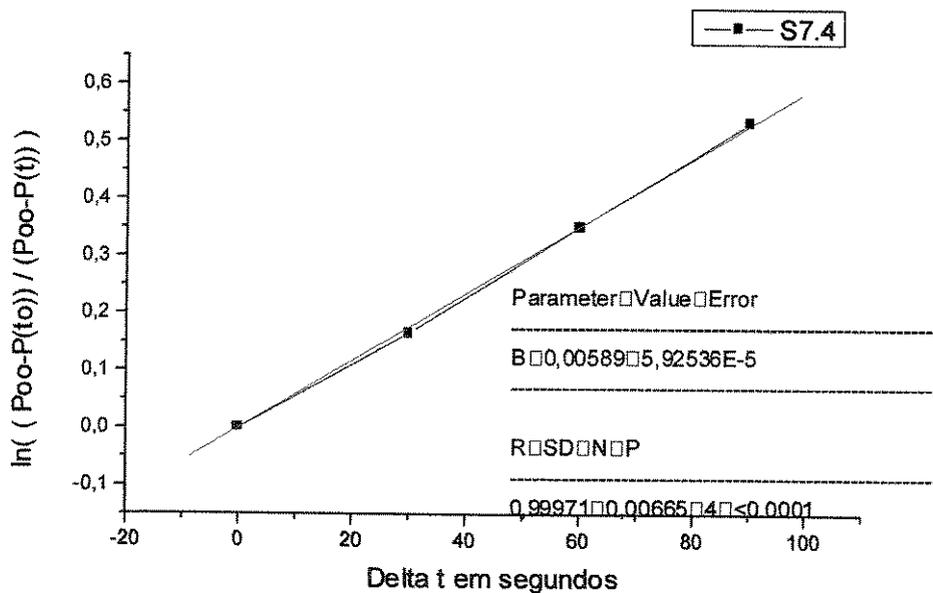


Figura 55: Regressão linear aplicada aos primeiros 4 pontos selecionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.

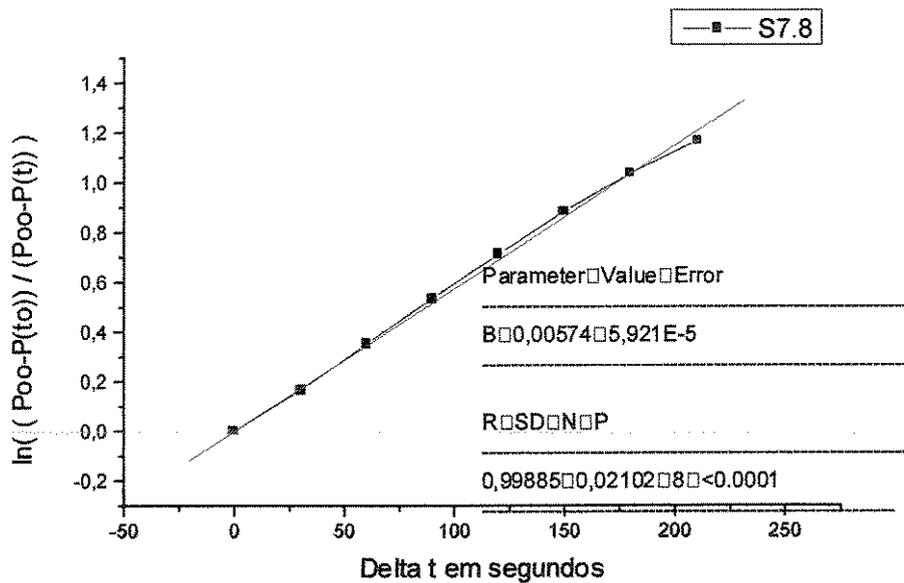


Figura 56: Regressão linear aplicada aos primeiros 8 pontos selecionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.

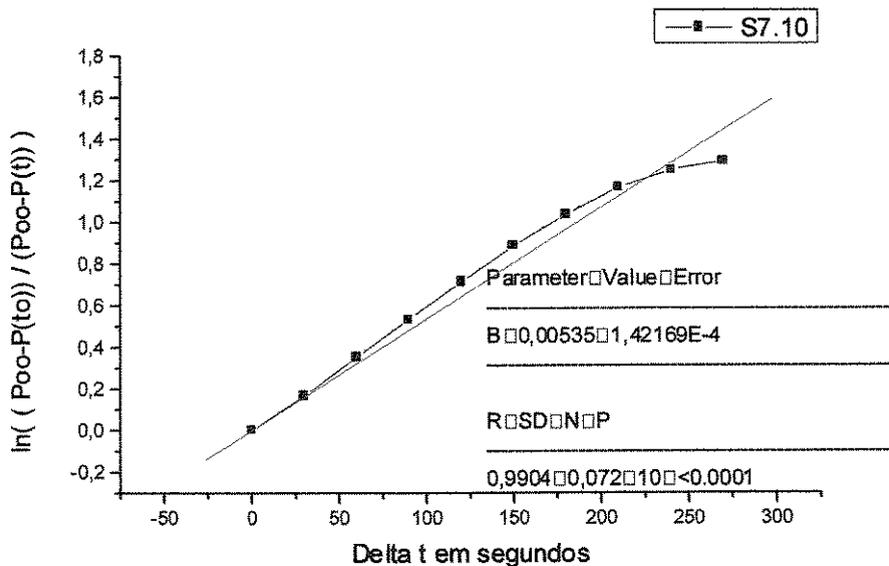


Figura 57: Regressão linear aplicada aos primeiros 10 pontos selecionados do ensaio número 7, com uma janela de discriminação inicial de 1 minuto.

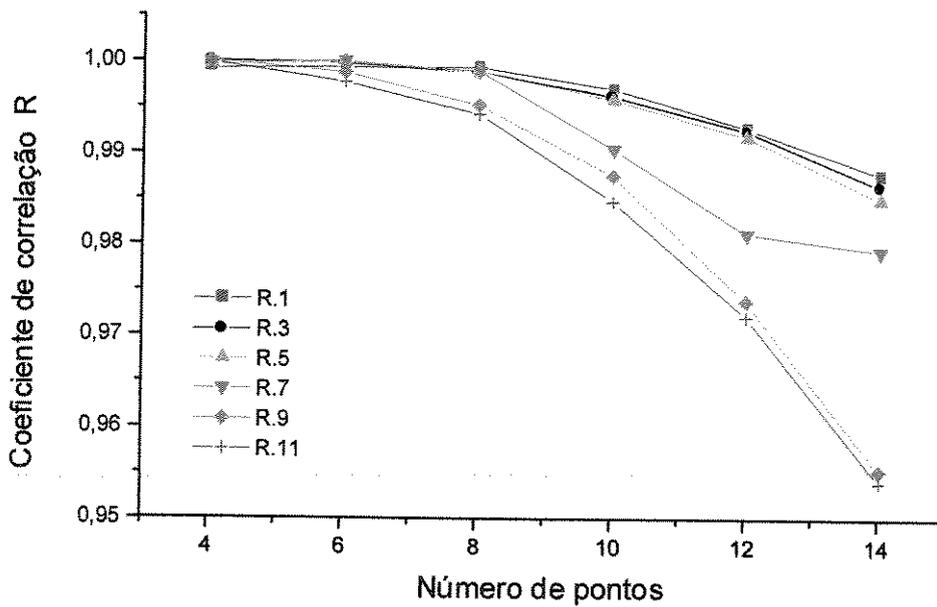


Figura 58: Coeficientes de correlação obtido para as regressões lineares dos ensaios 1, 3, 5, 7, 9 e 11 variando o número de pontos utilizados de 4 a 14.

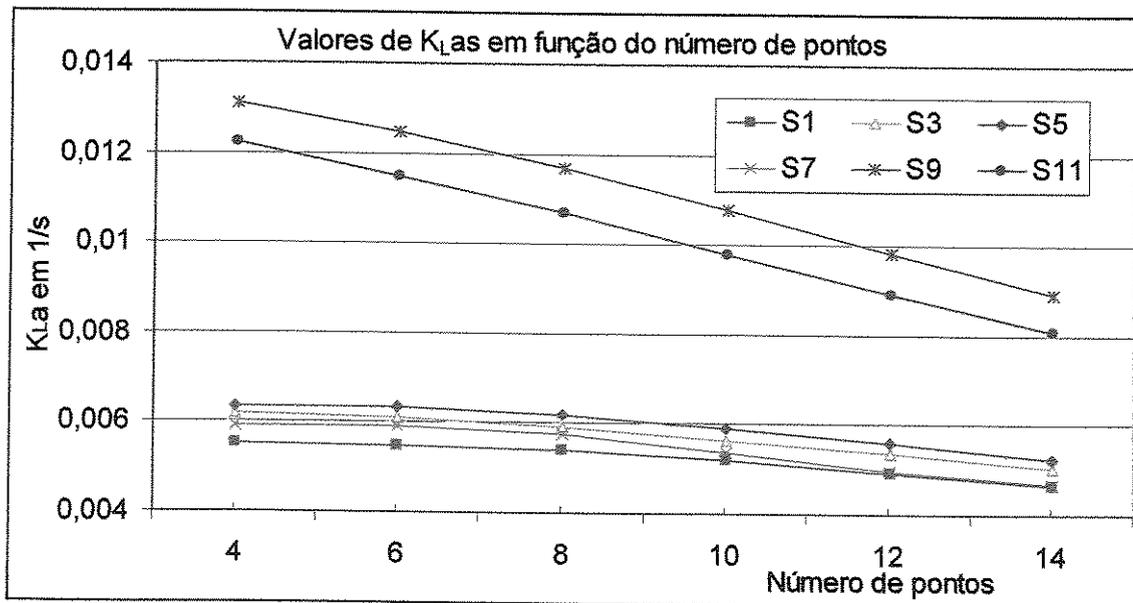


Figura 59:  $K_{La}$ s obtidos para as regressões lineares dos ensaios 1, 3, 5, 7, 9 e 11 variando o número de pontos utilizados de 4 a 14, utilizando a mesma discriminação inicial.

Neste item verificou-se a necessidade de se ter uma janela de discriminação de pontos experimentais para a regressão linear. Determinou-se a posição para abrir a janela, mas não foi possível determinar onde fechá-la. Foi percebido que deve haver um limite superior na janela, pois o modelo não descreve o comportamento dos dados nestas condições de  $pO_2$  mais elevada.

#### 5-1-7-c: Comparação do efeito da variação da janela e da faixa seleção de pontos aplicada ao ensaio 53 com a simulação numérica.

Este ensaio foi realizado de forma mais detalhada de modo a se verificar critérios para determinar a abertura e o fechamento da janela de discriminação de pontos experimentais para a regressão linear que determinará o valor do  $K_{1a}$ . A taxa de amostragem foi aumentada para uma medição a cada 15 segundos.

A Figura 60 mostra os dados experimentais em  $pO_2$  mmHg versus tempo.

A Figura 61 mostra a discriminação de até 4 pontos iniciais aplicada na fórmula do ln da razão das  $pO_2$  em função do tempo. A escala de tempo se refere ao ensaio padrão, e ficou como referência.

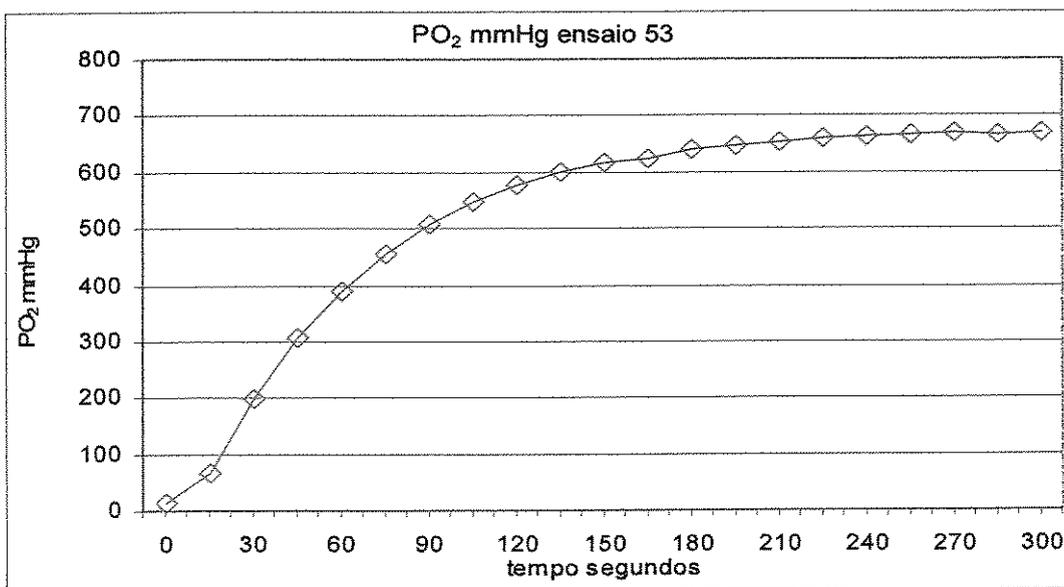


Figura 60: Ensaio de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$  de área. Vazões de gás  $4 \text{ l/min}$ , e de líquido  $1,25 \text{ l/min}$ .

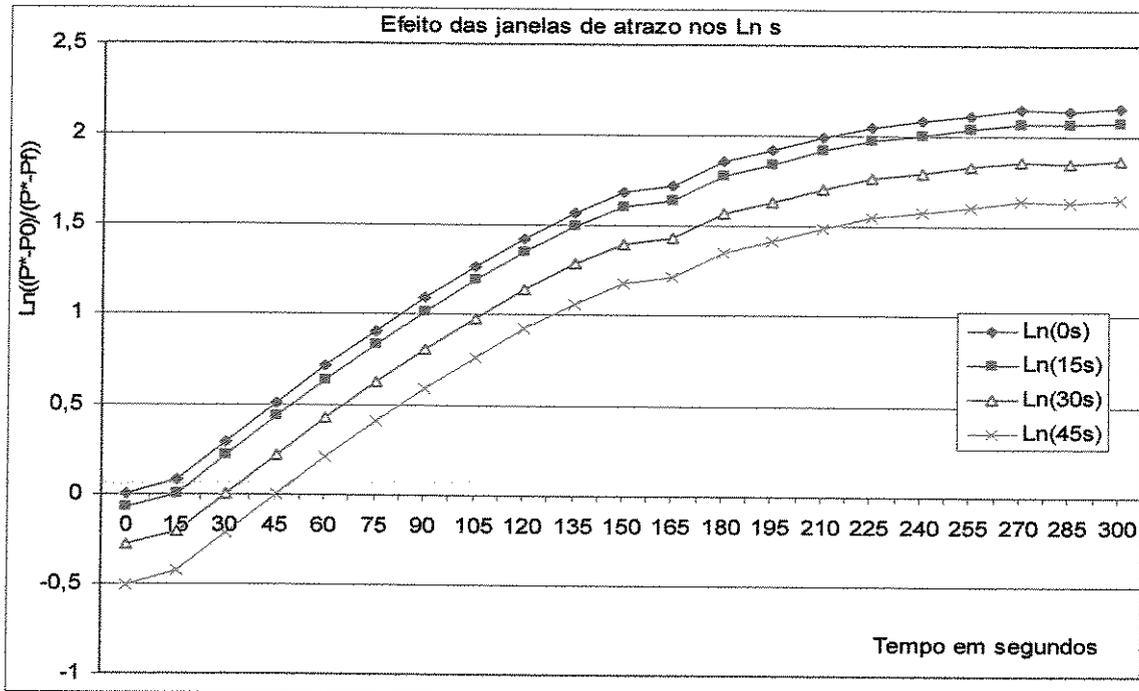


Figura 61: Quatro graus de discriminação de pontos de inicialização aplicados ao ensaio 53.

Utilizando as 4 curvas resultantes da discriminação de ponto inicial, foram realizadas regressões lineares utilizando de 2 a 15 pontos, que geraram 54 diferentes situações de posicionamento e abertura da janela de seleção de dados, conforme mostrado na Figura 62. A variação nos  $K_L$ s obtidos chega a ser de até 6 vezes, ou seja, o maior valor obtido é 6 vezes maior que o menor obtido. Verifica-se que claramente é necessário um critério de seleção para que este estudo represente alguma coisa.

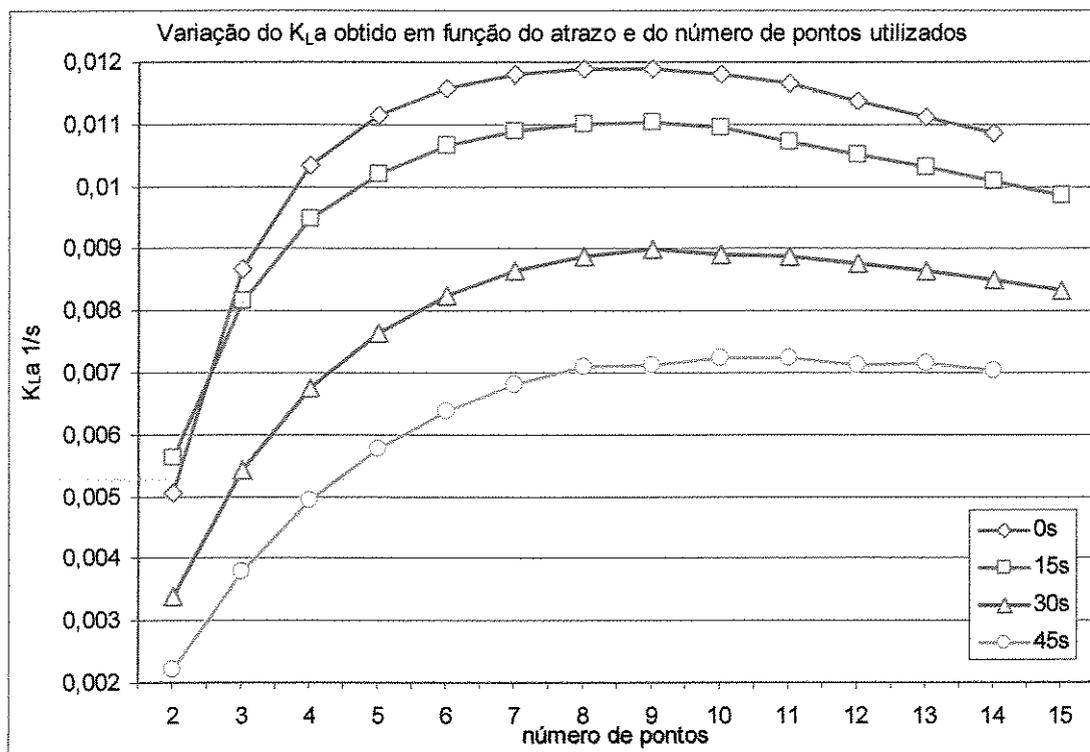


Figura 62: Efeito dos posicionamentos e das aberturas da janela de seleção de dados para a regressão linear no  $K_{La}$  obtido para o ensaio 53. A seleção chega a variar o valor em até 6 vezes.

Tendo em vista o efeito da janela de seleção na liberdade de resultados, conclui-se que há a necessidade de outra ferramenta para calibrar este procedimento numérico, pois o experimentador pode se perder e vir a gerar um dado sem representatividade nenhuma. Aqui o balanço de massa aplicado em uma simulação numérica torna-se vital para a determinação de um critério padrão para a seleção de pontos, ou seja, para definir a regra da janela de seleção de pontos experimentais para este tipo de experimento.

Foram realizadas inúmeras simulações com  $K_{La}$ s resultantes de diversas formas de seleção de pontos, até que foi percebido que não era o atraso inicial que deveria ser padronizado, era um nível de  $pO_2$ , que quando atingido significava que o experimento já estava funcionando e a fase de inicialização já havia terminado.

Especificamente nesta montagem experimental, com as vazões utilizadas e volumes de cela de acumulação das mangueiras e das câmaras de líquido dos oxigenadores, quando a  $pO_2$  na cela

de acumulação atinge 100 mmHg, os efeitos de retardo causados pela circulação de fases já se resolveram, desaparecendo e restando o efeito da transferência de massa do oxigenador, que é o que se deseja ver. Assim foi escolhido o critério do ponto inicial para a janela de seleção de pontos experimentais para a regressão linear onde se acha o valor do  $K_{La}$ .

A Figura 63 mostra os resultados de 3 simulações numéricas contra os dados experimentais do ensaio 53. As simulações foram realizadas com os  $K_{La}$ s máximo e mínimo da Figura 62, mostrando o quanto estes não se ajustam aos dados. A terceira simulação realizada com um outro  $K_{La}$ , funciona muito bem, é resultado de um processo de seleção de pontos onde a janela inicia sempre em uma mesma  $pO_2$ , 100mmHg, suficientemente alta para não ser afetada pelo efeito da inicialização do experimento, e é fechada em uma  $pO_2$  não muito alta, onde ainda não há um efeito muito pronunciado dos “vazamentos”.

Há duas linhas horizontais na Figura 63: a verde é onde se inicia a janela de seleção de pontos, a vermelha, é onde se fecha esta janela. Por utilizar uma faixa fixa este método foi chamado “método da faixa”.

A faixa ideal para a seleção de pontos seria a mesma faixa de operação do oxigenador de sangue do tipo membrana, que seria a faixa entre as saturações venosa e arterial. No entanto, para se completar a etapa de inicialização do experimento em uma  $pO_2$  tão baixa, seria necessário um volume de fase líquida bem maior que o disponível, e para coletar pontos experimentais em quantidade suficiente, seria necessário uma placa de aquisição de dados, que também não está disponível. Portanto, a faixa de seleção de dados para a regressão linear fica como começando em 100 mmHg e terminando em 300 mmHg, que já é alto em relação à saturação arterial do sangue, mas não em relação à água e à PFCE, e permite selecionar uma quantidade suficiente de dados ainda sem a influência dos “vazamentos virtuais”.

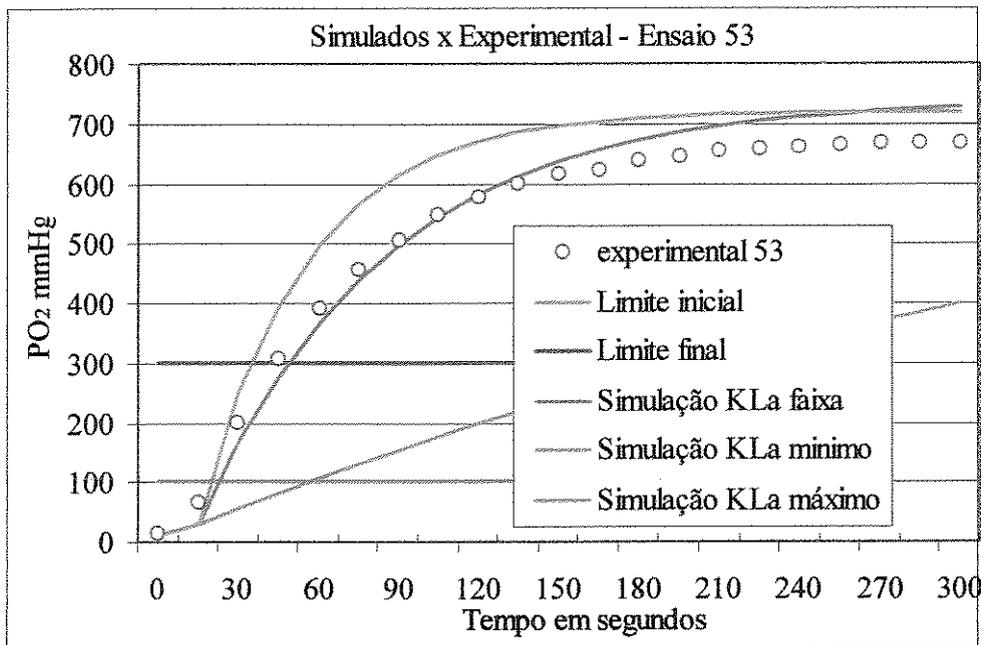


Figura 63: Comparação entre dados experimentais do ensaio 53 e curvas calculadas pelas simulações com os  $K_{La}$ s mínimo e máximo da Figura 63 e o obtido utilizando o método da faixa.

O efeito da correção da  $p^*O_2$  é muito sutil chegando a ser de difícil visualização nos gráficos das Figuras 63 e 64, pois este oxigenador apresentou neste ensaio uma queda de pressão baixa que implica em uma correção bem pequena. Já o efeito dos “vazamentos” é bem nítido, fazendo com que os pontos experimentais fiquem abaixo da curva de transferência de massa simulada nas regiões de  $pO_2$  elevadas, neste ensaio acima de 580 mmHg. Vê-se aqui uma vantagem da utilização do modelo simplificado para a simulação numérica, a possibilidade de diagnóstico pela diferença.

O intervalo de  $pO_2$  dentro do qual há concordância entre os dados experimentais e a curva simulada é o viável para a seleção de pontos para o procedimento de determinação do  $K_{La}$ .

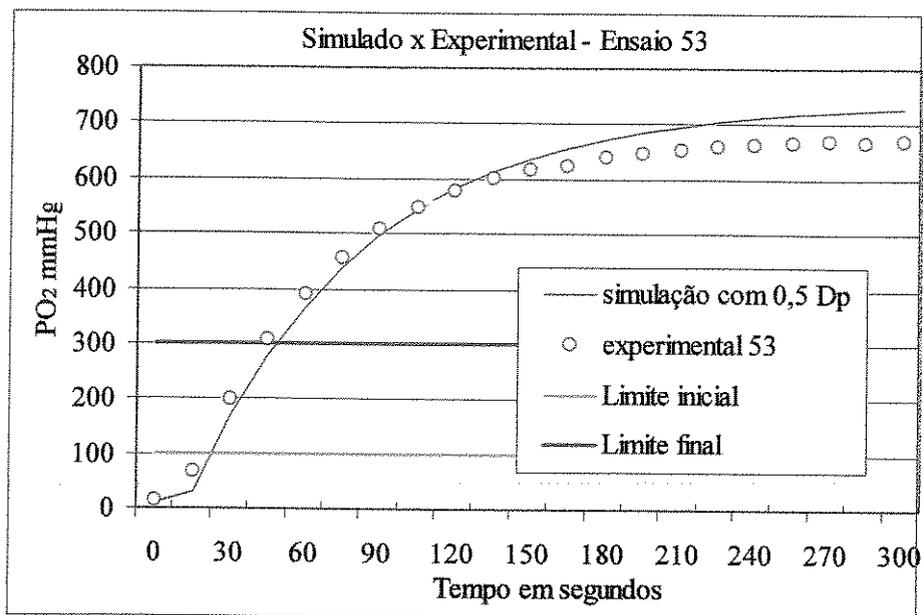


Figura 64: Comparação entre dados experimentais do ensaio 53 e a curva calculada pela simulação com o  $K_L a$  obtido pelo método da faixa com correção de meia queda de pressão na fase gasosa.

**5-1-7-d: Aplicação do método da faixa de seleção comparada por simulação numérica para os conjuntos de ensaios {17, 19, 21}, {79, 81} e {449, 451, 453}.**

Os ensaios 19, 21, 79 e 81 foram realizados com o oxigenador de  $0,25 \text{ m}^2$  de área de troca e com uma taxa de aquisição de dados de 1 a cada 15 segundos. Os ensaios 449, 451, 453 foram realizados com o de  $0,5 \text{ m}^2$  a uma taxa de 1 a cada 5 segundos, visando a um maior detalhamento do que ocorre no sistema.

A Figura 65 traz as condições e os dados experimentais dos ensaios 17, 19, 21, 79, e 81. A Figura 66 traz os dados experimentais e as simulações com  $K_L a$ s obtidos pelo método de seleção de dados da faixa.

A Figura 67 traz os dados experimentais para os ensaios 449, 451 e 453 de saturação e as simulações com  $K_L a$ s obtidos pelo método de seleção de dados da faixa. A Figura 68 traz os dados do ensaio complementar de extração, o ensaio 450, mostrando a necessidade de se utilizar outra faixa para a seleção de pontos para o cálculo do  $K_L a$  na extração, devido as adsorções e

absorções de Oxigênio pelos materiais da montagem experimental. A eliminação do Oxigênio acaba atrasando mais a inicialização dos experimentos do tipo de extração do que nos casos de saturação. Nos ensaios de saturação 449, 451 e 453, o atraso foi da ordem de 45s, no ensaio de extração 450, foi de 105s.

A Figura 69 traz os dados dos ensaios de extração 450, 452 e 454, complementares aos ensaios de saturação 449, 451 e 453 da Figura 67, com as simulações numéricas obtidas com o  $K_{La}$  achado com a faixa selecionada para extração. Pode ser verificado que uma pequena diferença na condição inicial reflete em um atraso maior na inicialização do experimento.

Figura 70 traz os dados experimentais para os ensaios 687, 697 e 707, de saturação da água com Oxigênio utilizando a coluna com  $2,5 \text{ m}^2$  de área e a curva simulada com o  $K_{La}$  obtido utilizando o método da faixa aplicado entre 100 e 250 mmHg.

Figura 71 traz os dados experimentais para os ensaios 688, 698 e 708, de extração do Oxigênio da água utilizando a coluna com  $2,5 \text{ m}^2$  de área e a curva simulada com o  $K_{La}$  obtido utilizando o método da faixa aplicado entre 120 e 180 mmHg. Nos ensaios com a coluna, a eliminação do Oxigênio acaba atrasando mais a inicialização dos experimentos do tipo de extração do que a inicialização nos ensaios de saturação. Nos ensaios de saturação, o atraso foi da ordem de 65s, no ensaio de extração foi de 170 s.

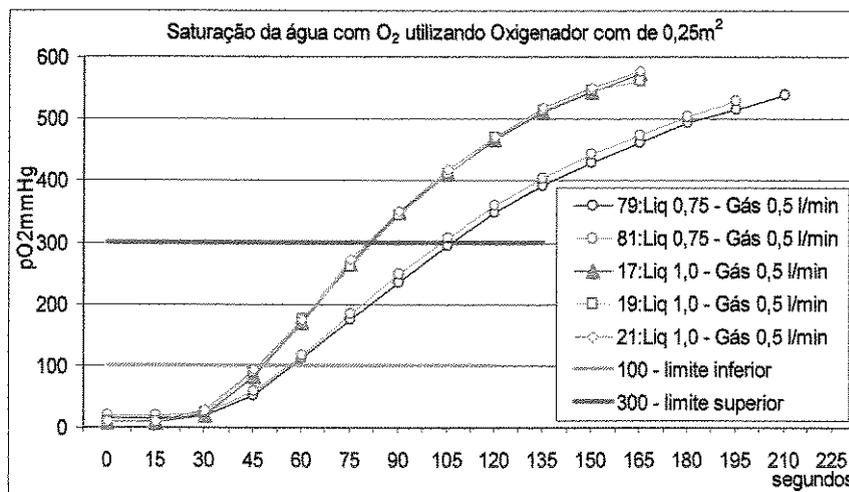


Figura 65: Ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$  de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 17, 19, e 21, e gás 2 l/min, e de líquido 1 l/min para 79 e 81.

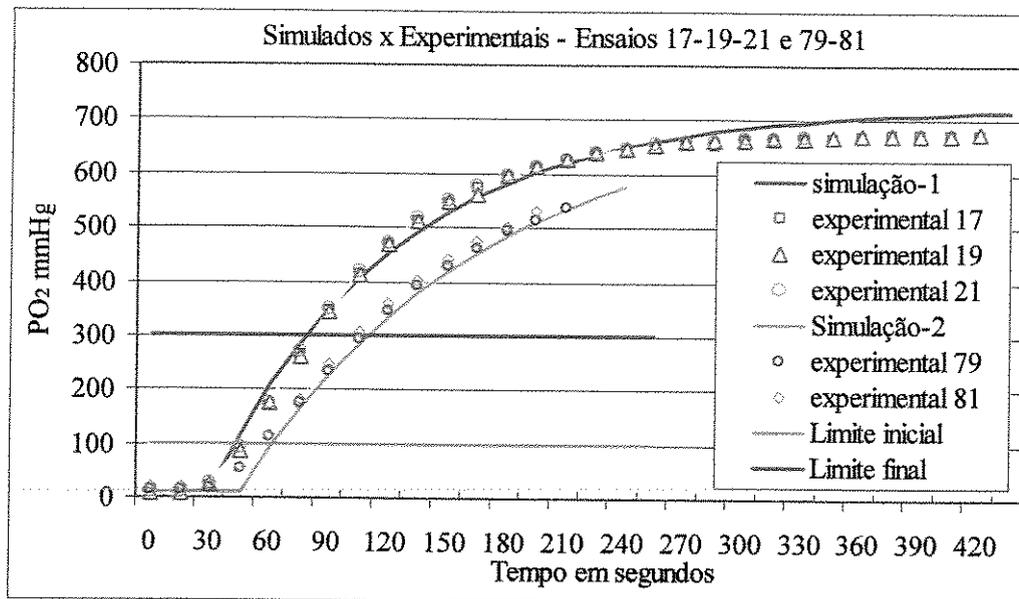


Figura 66: Curvas simuladas contra os dados experimentais para os ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup> de área. Vazões de gás 0,5 l/min, e de líquido 0,5 l/min para os ensaios 17, 19, 21, e de gás 2 l/min, e líquido 1 l/min para 79 e 81.

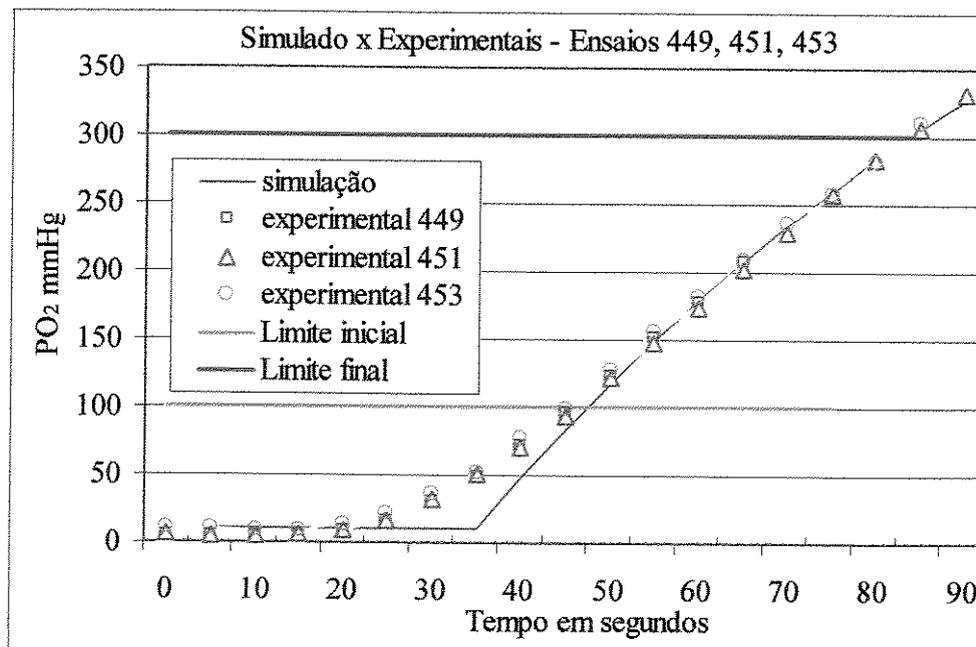


Figura 67: Curva simulada contra os dados experimentais dos ensaios 449, 451 e 453 de saturação da água com Oxigênio utilizando um oxigenador com 0,5 m<sup>2</sup> de área. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min.

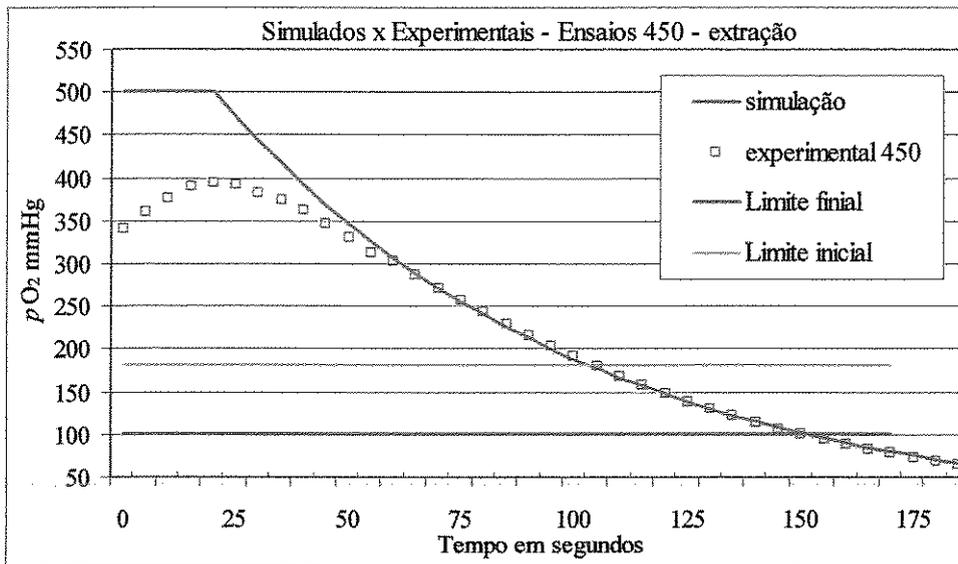


Figura 68: Curva simulada contra os dados experimentais do ensaio 450 de extração do Oxigênio da água com utilizando um oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$  de área, complementar ao ensaio 451. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min.

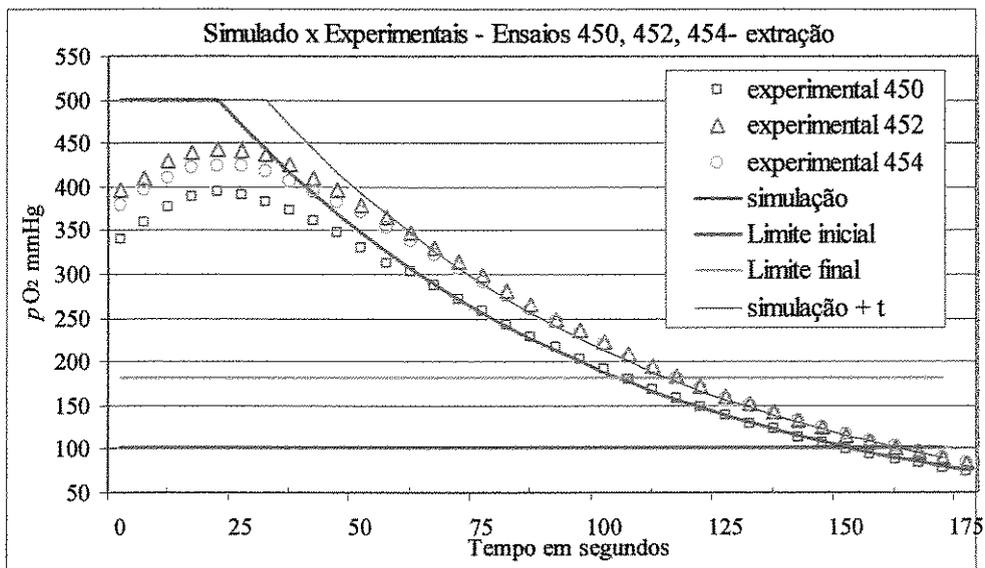


Figura 69: Curva simulada contra os dados experimentais dos ensaios 450, 452 e 454 de extração do Oxigênio da água com utilizando um oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$  de área, condições de inicialização diferentes levam a atrasos diferentes. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,5 l/min.

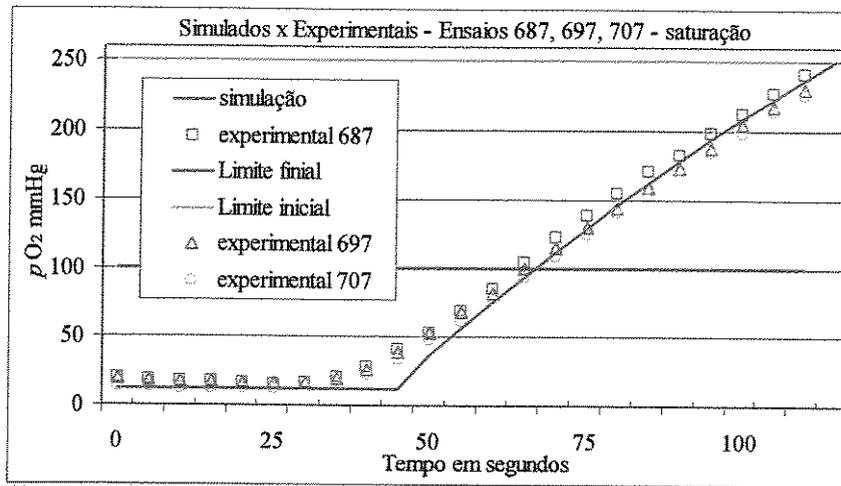


Figura 70: Curvas simuladas contra os dados experimentais para os ensaios de saturação da água com Oxigênio utilizando a coluna com 2,5 m<sup>2</sup> de área. Vazões de gás 1,0 l/min, e de líquido 1,0 l/min para os ensaios 687, 697, 707.

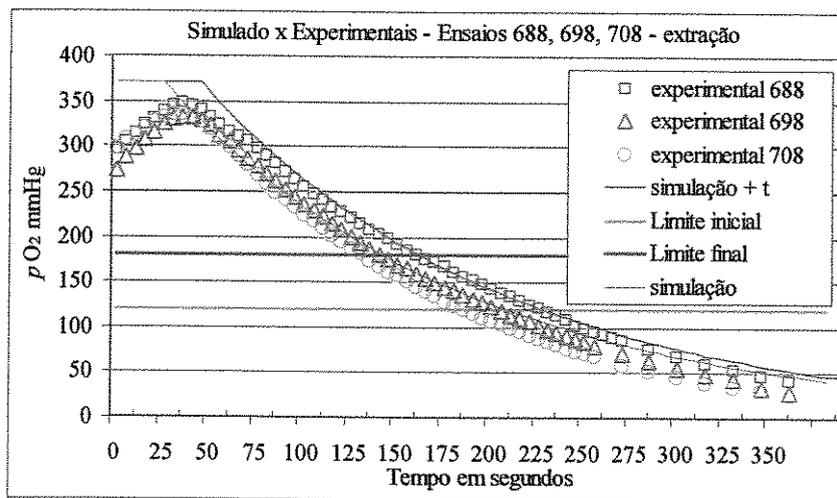


Figura 71: Curva simulada contra os dados experimentais dos ensaios 688, 698, 708, de extração do Oxigênio da água utilizando a coluna com 2,5 m<sup>2</sup> de área, condições de inicialização diferentes levam a atrasos diferentes. Vazões de gás 1 l/min, e de líquido 1,0 l/min.

A correção da  $p^*O_2$  com metade da queda de pressão na fase gasosa ao atravessar o dispositivo parece melhorar sensivelmente o ajuste na obtenção do  $K_{LA}$ , e será abordada nos ensaios a seguir.

Utilizando o método da faixa com os mesmos limites para os ensaios de saturação e de extração, foram obtidos para os oxigenadores em ensaios de extração valores de  $K_{L,a}$  equivalentes a 51% dos valores para os ensaios de saturação, para a coluna de recheio, os  $K_{L,a}$  de extração ficaram em média em 49% do valor dos seus equivalentes para saturação. Ajustando a faixa para os ensaios de extração utilizando as simulações, são obtidos  $K_{L,a}$ s com diferenças de em média até 10%. A diferença entre os  $K_{L,a}$ s obtidos para os ensaios 687, 697 e 707 de saturação e os seus análogos 688, 698 e 708, de extração ficou próxima a 1%.

As diferenças entre os  $K_{L,a}$ s obtidos para a extração e saturação parecem ser uma comprovação dos “vazamentos virtuais” causados pelas adsorções a absorções de Oxigênio nos materiais da montagem experimental. O fato de a diferença média ser maior no caso da coluna, pode ser explicada pela maior retenção de fluídos das fases líquida e gasosa em seu interior, pois gera um efeito tipo dispersão.

Os gráficos em 3D dos coeficientes achados são montados com os dados de saturação e extração obtidos com a mesma faixa, de 100 e 300 mmHg, de modo a possibilitar a comparação do efeito da posição da faixa.

**Conclusões prévias sobre a experimentação numérica para a seleção de dados que serão necessárias nas próximas etapas deste trabalho:**

A determinação de uma faixa de seleção de dados para o processo de determinação do  $K_{L,a}$  pode incrementar a precisão dos coeficientes determinados.

Levando em conta a qualidade dos ajustes alcançados unanimemente nos ensaios analisados, o método da faixa aplicado entre as  $pO_2$  de 100 e 300 mmHg, foi considerado bom o suficiente e o trabalho prossegue em direção à análise dos dispositivos de troca de massa utilizando este método.

A faixa de seleção entre 100 e 300 mmHg será aplicada aos ensaios tanto de saturação como de extração de Oxigênio, da água e do PFCE.

**5-2: Ensaios para a determinação experimental dos coeficientes de troca de massa de oxigenadores de sangue e de uma coluna de recheio.**

Na seção 5-2 são apresentados os resultados das análises de transferência de massa realizados com o método desenvolvido nas seções anteriores. A Figura 72 trás um mapa do estudo dos oxigenadores de membrana e da coluna de recheio.

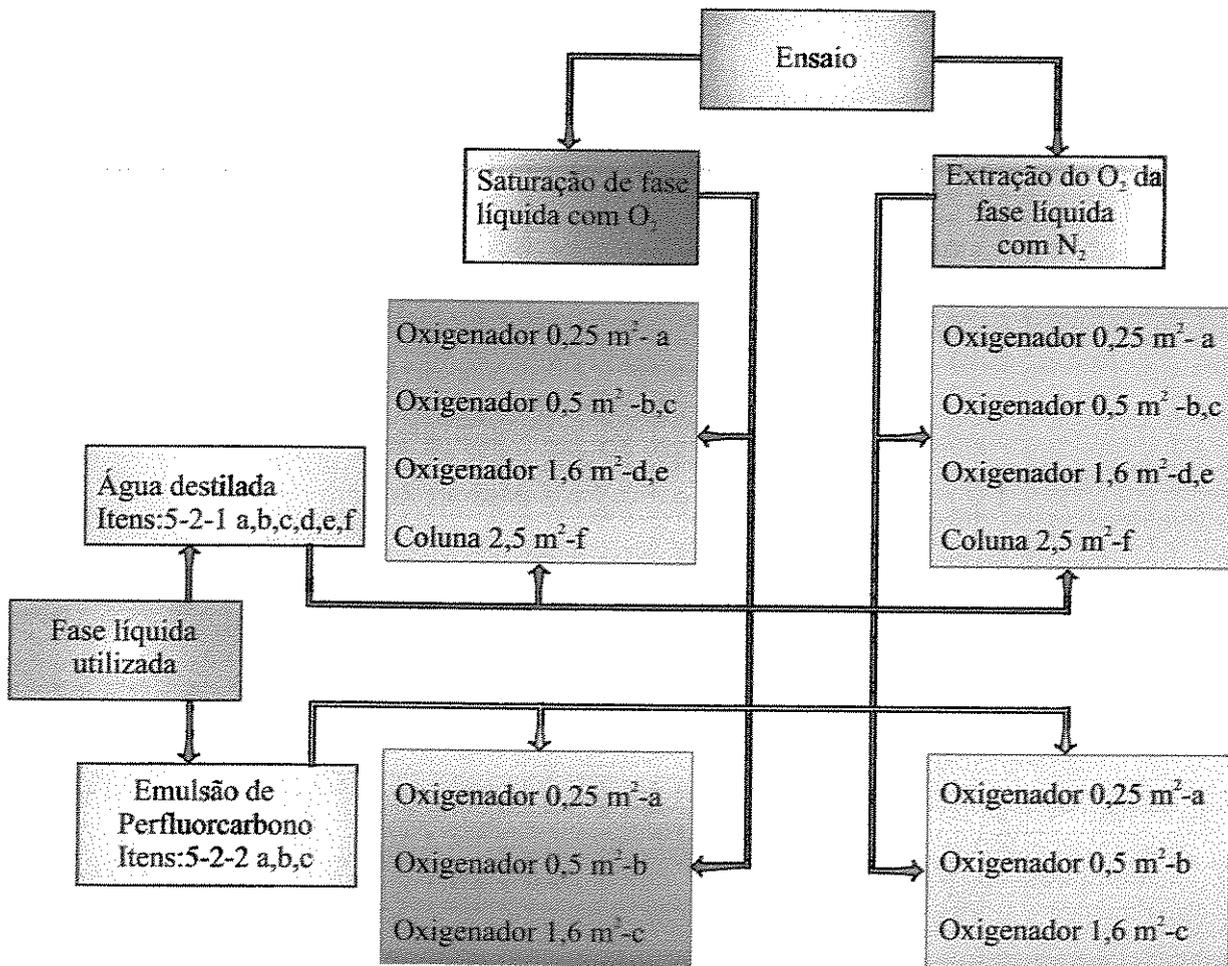


Figura 72: Mapa dos resultados apresentados nos itens 5-2-1 e 5-2-2.

5-2-1: Resultados dos ensaios com água, volume padronizado em 1,4 l.

5-2-1-a: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com  $0,25\text{m}^2$  de área de troca utilizando  $\text{H}_2\text{O}$ .

Os dados experimentais para o oxigenador de  $0,25\text{ m}^2$  obtidos nos ensaios de saturação da água com Oxigênio estão na Figura 73, e os dados dos ensaios de extração estão na Figura 74.

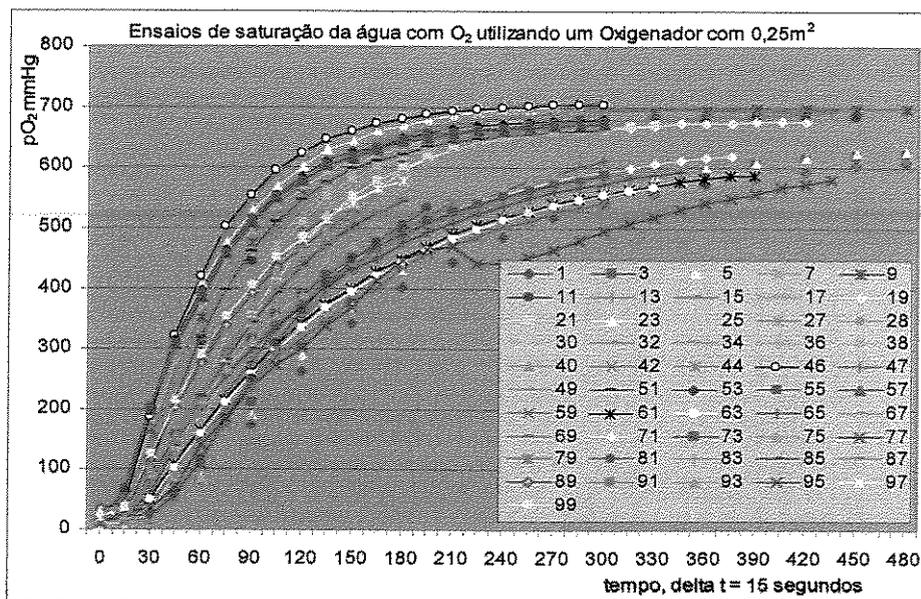


Figura 73: Ensaio de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de  $0,25\text{ m}^2$ .

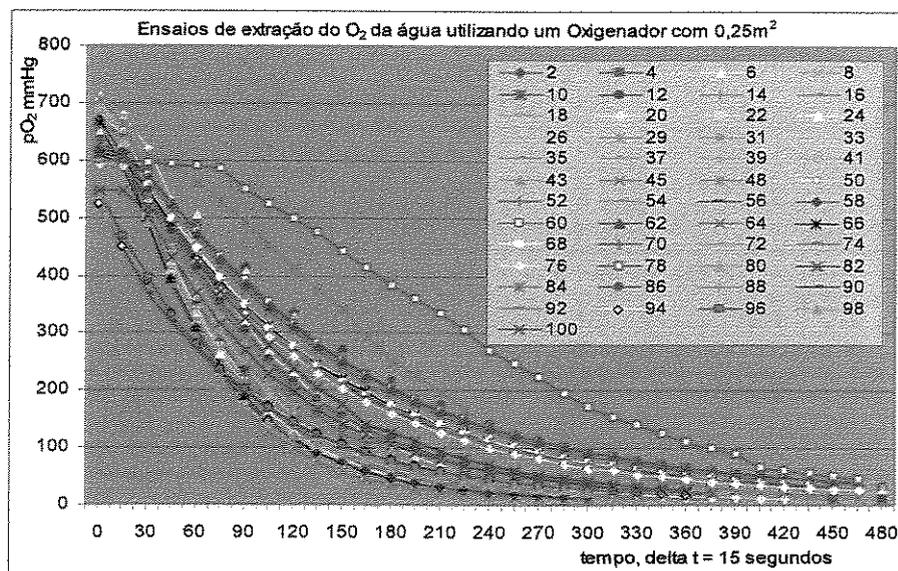


Figura 74: Ensaio de extração do Oxigênio da água com oxigenador de  $0,25\text{ m}^2$ .

Exclusivamente nesta primeira série de ensaios, onde o oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup> é estudado com água e devido ao grande número de pontos, são apresentados de forma separada por vazões de gás os gráficos que demonstram como o método da faixa foi aplicado para a seleção dos pontos experimentais para a regressão linear com a qual se determina o K<sub>L</sub>a.

As Figuras 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 e 82 mostram a faixa de seleção entre pO<sub>2</sub> de 100 e 300 mmHg nos gráficos, sendo que os ensaios estão separados em Figuras por vazões da fase gasosa. As quatro primeiras Figuras são relativas a ensaios de saturação com Oxigênio, as quatro demais a ensaios de extração do Oxigênio com fluxo de Nitrogênio.

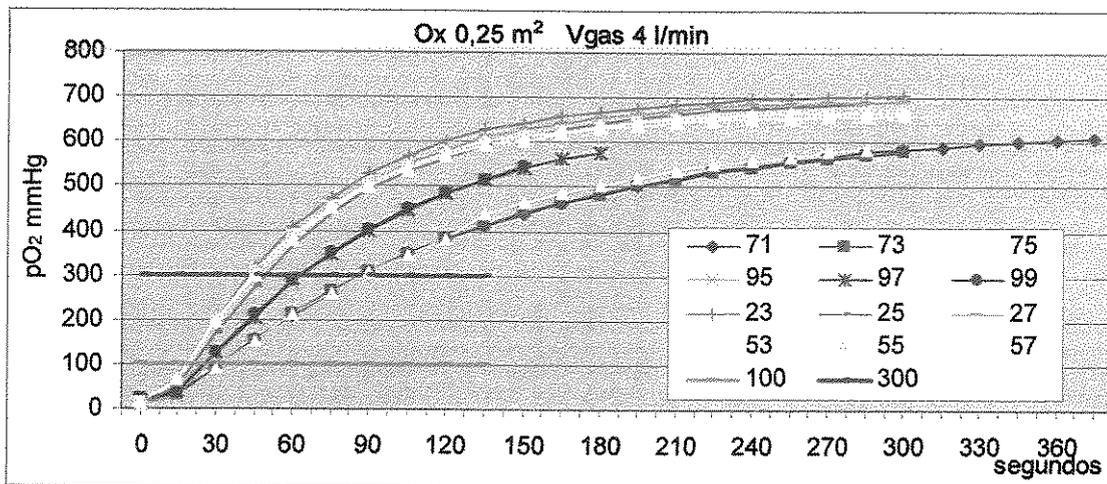


Figura 75: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 4 l/min.

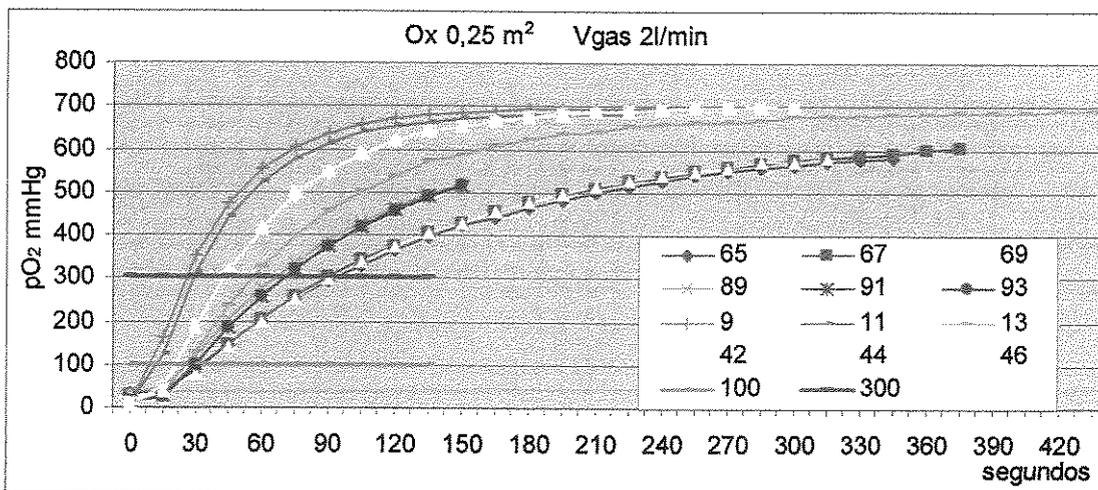


Figura 76: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 2 l/min.

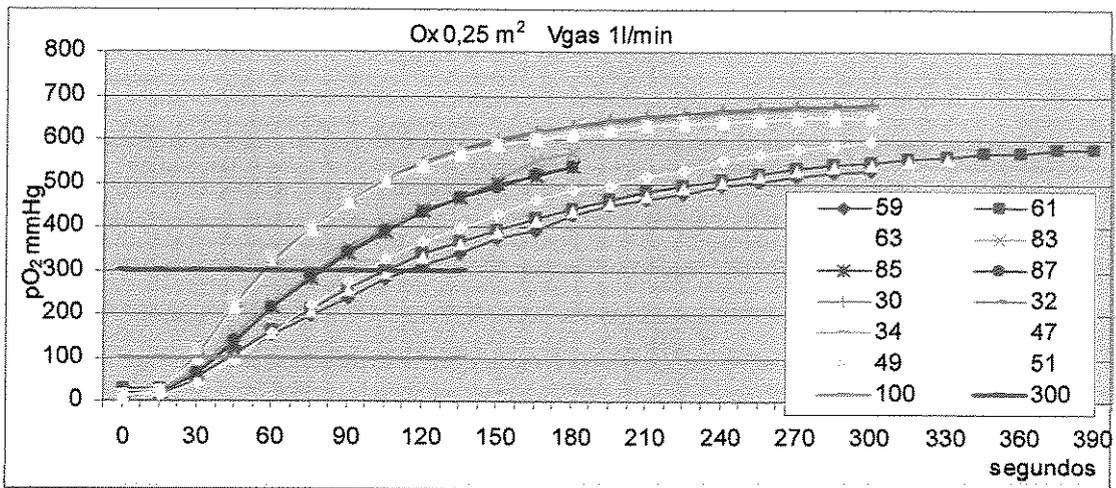


Figura 77: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 1 l/min

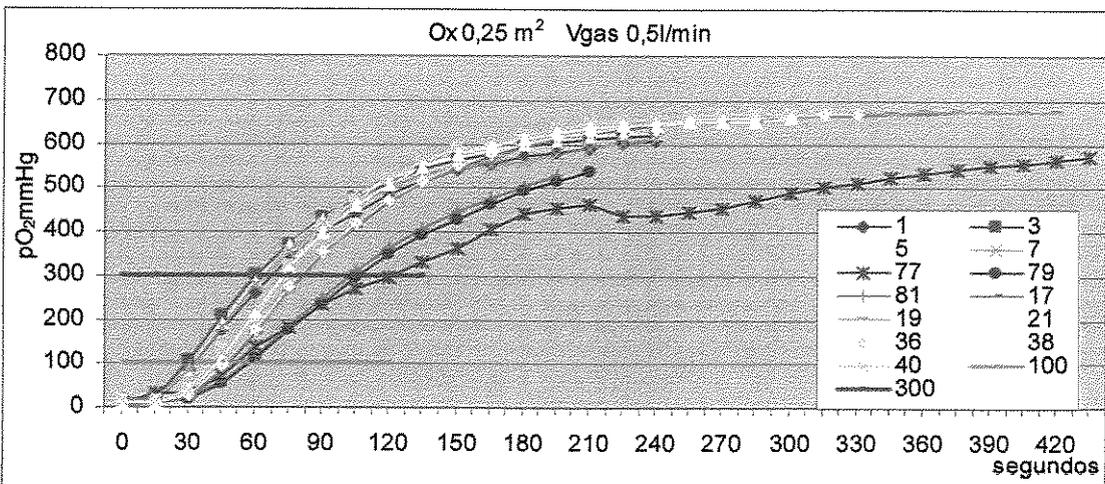


Figura 78: Método da faixa aplicado a ensaios com Oxigênio a 0,5 l/min.

Dentre os ensaios de saturação da água com Oxigênio, o número 77 foi desconsiderado por problemas experimentais. Todos os demais foram aproveitados.

Conforme a vazão da fase líquida, pode ser observada uma diferença na inclinação da curva, que é função do coeficiente de transporte de massa.

Dentre os ensaios de extração do Oxigênio da água com Nitrogênio, os números 48 e 78 foram desconsiderados por problemas experimentais. Todos os demais foram aproveitados

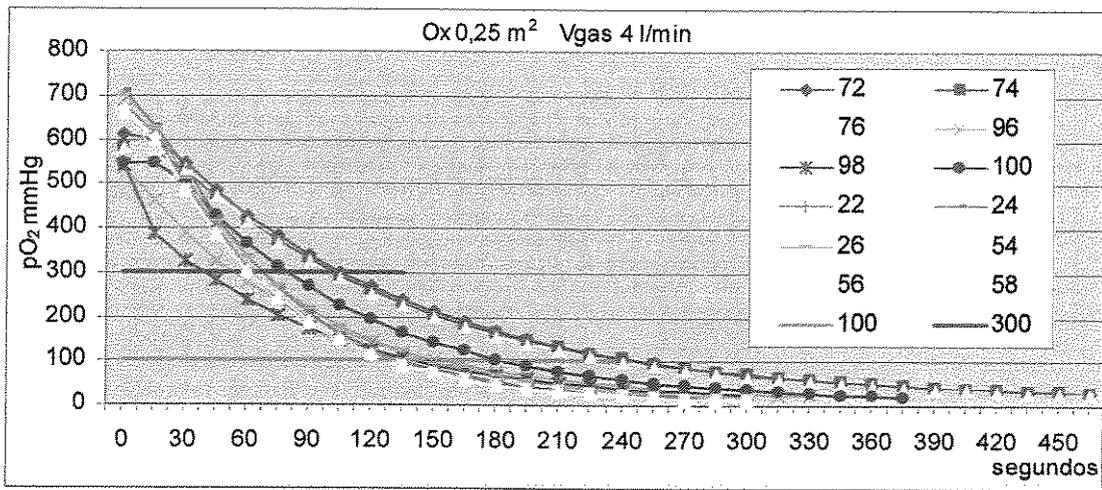


Figura 79: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 4 l/min.

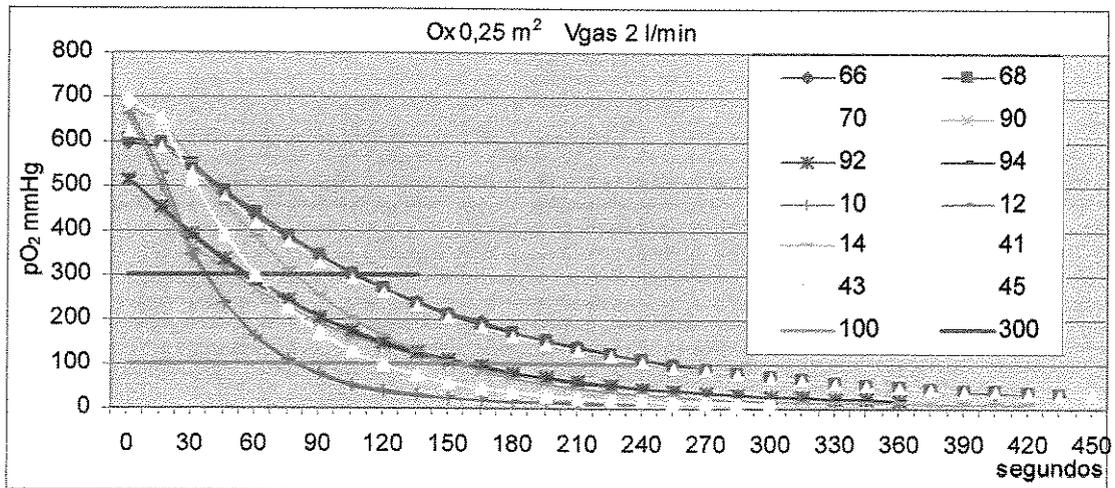


Figura 80: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 2 l/min.

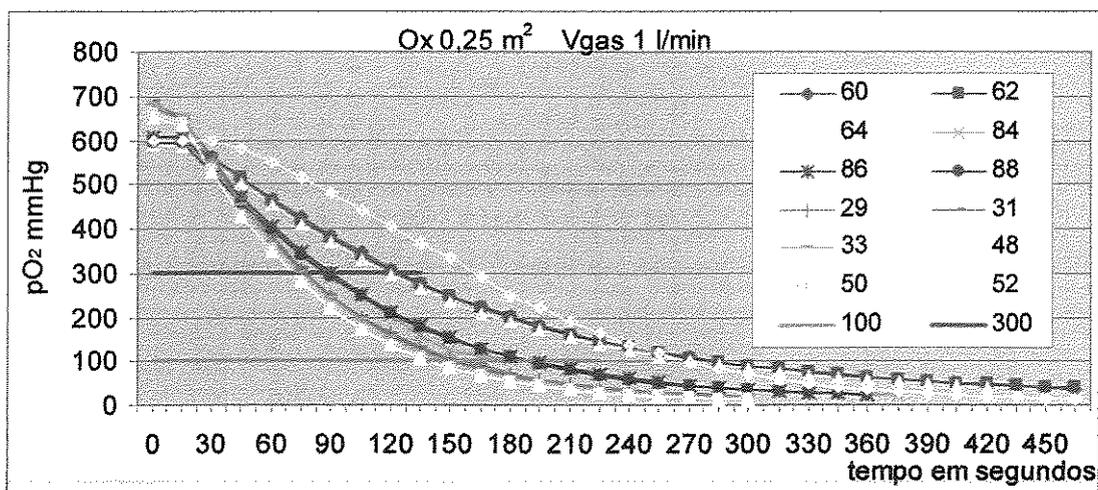


Figura 81: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 1 l/min.

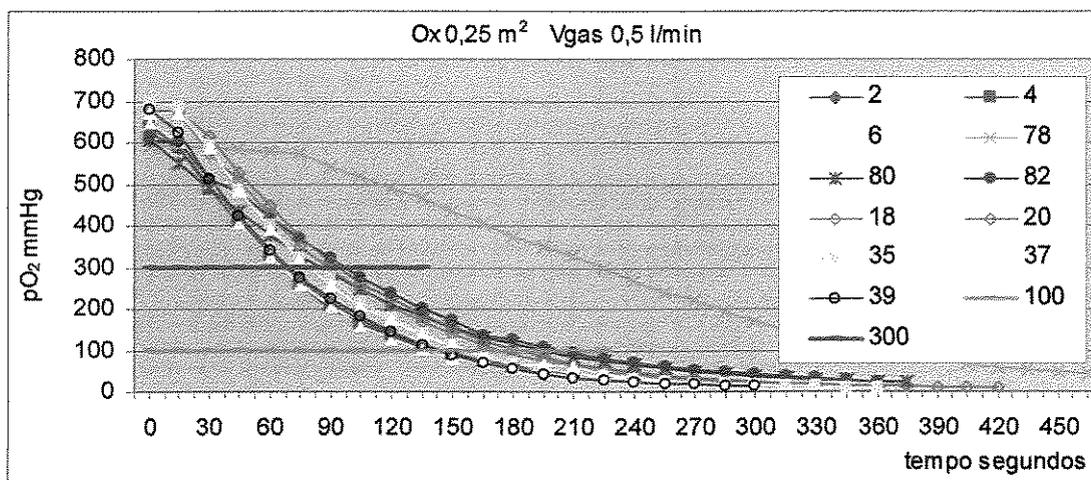


Figura 82: Método da faixa aplicado a ensaios com Nitrogênio a 0,5 l/min.

Os números dos ensaios estão nas legendas e as descrições dos ensaios estão nas Tabelas no Capítulo 4: Experimental e Métodos.

Os  $K_L$ as foram determinados utilizando-se o método da faixa, e seus intervalos de confiança foram determinados partir da triplicata. A Figura 83 mostra os  $K_L$ as obtidos com suas barras de intervalo de confiança, são mostrados também, em círculos vermelhos, pontos calculados com a correlação empírica,  $c_{exp12}$ , ajustada aos dados experimentais.

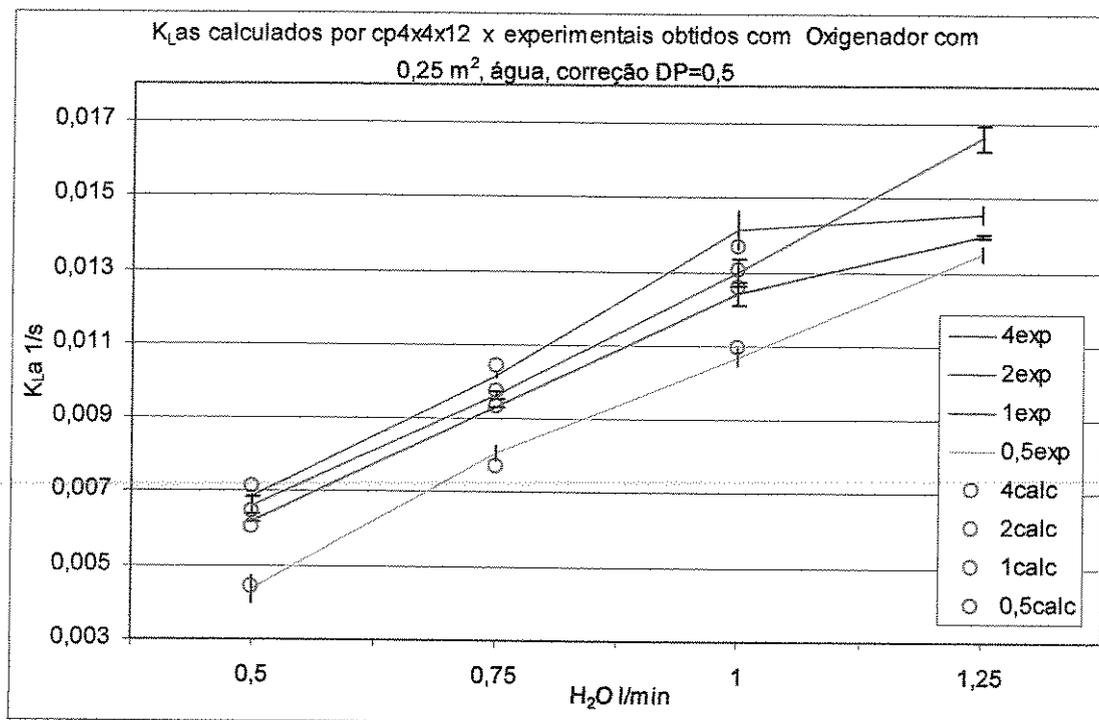


Figura 83: K<sub>La</sub>s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O<sub>2</sub> e nos círculos os que foram calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

A correlação empírica por causa da anomalia ocorrida na vazão de líquido em 1,25 l/min., foi ajustada levando em conta apenas os 12 pontos obtidos nas condições de vazão mais baixa.

Há uma queda abrupta no K<sub>La</sub> com vazão de líquido ajustada em 1,25 l/min e de gás em 4 l/min. Esta queda ocorreu de forma reprodutível nos três ensaios da triplicata, tanto que o intervalo de confiança é estreito.

A especificação deste oxigenador é uma vazão de líquido de 0,8 l/min, portanto quando submetido a uma vazão de 1,25 l/min, nesta condição de operação, está sendo forçado em mais de 60%. Há portanto, a possibilidade de que tenha ocorrido a formação de um caminho preferencial, devido a um pequeno colapso mecânico na estrutura do enrolamento de fibras do oxigenador.

Um caminho preferencial faria com que uma porção da fase líquida se esquivasse do enrolamento de fibras do trocador não sofrendo a troca, e outra tivesse sua vazão reduzida o que

influencia reduzindo a troca, a soma destes fatores explicaria o coeficiente mais baixo obtido nesta condição experimental.

Como seria este mecanismo de formação de caminho preferencial? Como funciona?

As fibras são enroladas em camadas sucessivas sobre um cilindro central. Como o ensaio com anomalia ocorria sempre na vazão mais alta da fase gasosa, justamente a que apresenta maior perda de carga, ou seja, com as fibras expostas a uma maior pressão isso identificaria um fator. Comparando com um manômetro de Bourdon, como se o tubo enrolado para pressão fosse a fibra do oxigenador enrolada sobre o cilindro central, percebe-se que na situação do ensaio da anomalia havia a maior pressão do ensaio dentro das fibras, fazendo força como que desenrolando elas, no sentido de separá-las do cilindro central. Havia também a maior força por fora das fibras que estavam sendo empurradas pelo fluxo de fase líquida. Esta argumentação leva a crer que a anomalia pode ter sido a formação de um pequeno caminho preferencial entre o cilindro central e o enrolamento de fibras. Biscegli <sup>4</sup>, descreve em seu trabalho problemas na transferência de massa que levaram a ajustar a tensão de enrolamento das fibras. Pode ter ocorrido também naquele caso a formação de caminhos referenciais.

Na determinação dos dados apresentados na Figura 83, a correção da pressão parcial de Oxigênio para o cálculo do  $K_{L,A}$  levou em conta como descrito no Capítulo 3, metade da queda de pressão na fase gasosa.

Nas Figuras 84 e 85 é discutido o efeito desta correção nos valores obtidos para os  $K_{L,A}$ s para o Oxigenador de  $0,25 \text{ m}^2$  com fase líquida água. Os gráficos com esta discussão para todos os outros dispositivos encontram-se no Anexo VI. Na Figura 84 são mostrados os  $K_{L,A}$ s calculados sem correção de  $pO_2$  devido à queda de pressão da fase gasosa, correção com meia queda de pressão e correção com toda a queda e pressão. A Figura 85 mostra uma comparação proporcional do efeito da correção, onde os  $K_{L,A}$ s obtidos sem a correção são considerados como 100% e os outros são mostrados em função destes.

Ao considerar a queda de pressão na fase gasosa, está sendo considerado que as fibras estão sendo expostas a uma pressão de Oxigênio maior, ou seja, uma  $p^*O_2$  maior, por isso para uma mesma troca em um mesmo ensaio, o coeficiente de troca de massa resulta em um valor menor.

Nota-se na Figura 85 que quanto maior a vazão de gás, maior a perda de carga na fase gasosa, e maior a diferença no valor obtido para o  $K_{La}$ , podendo chegar a quase 9% de diferença. O valor que foi considerado como correto, e que melhor resultado ofereceu contra a simulação, é o da correção de meia perda de carga.

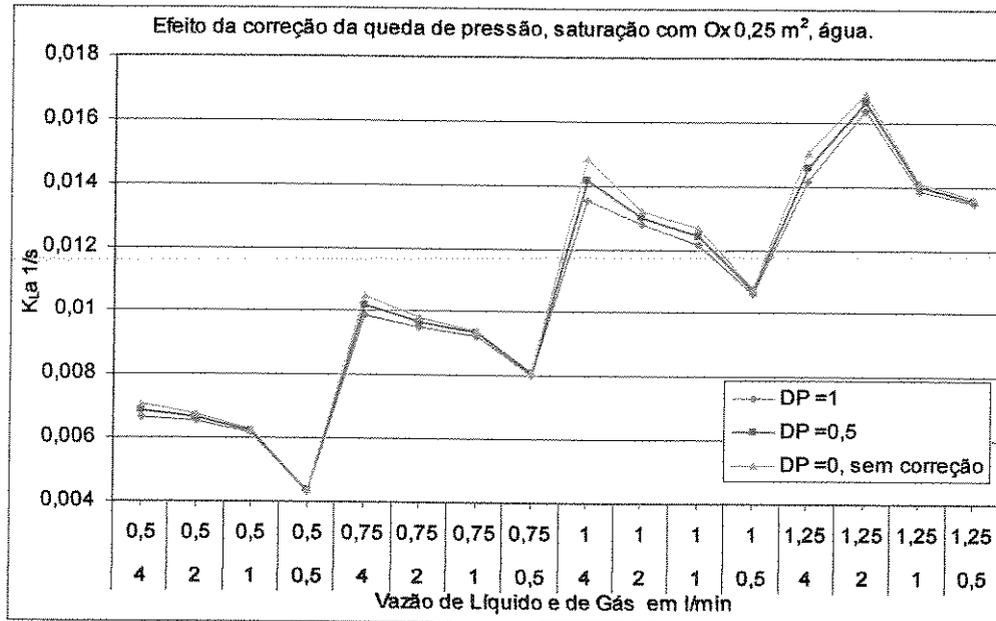


Figura 84: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

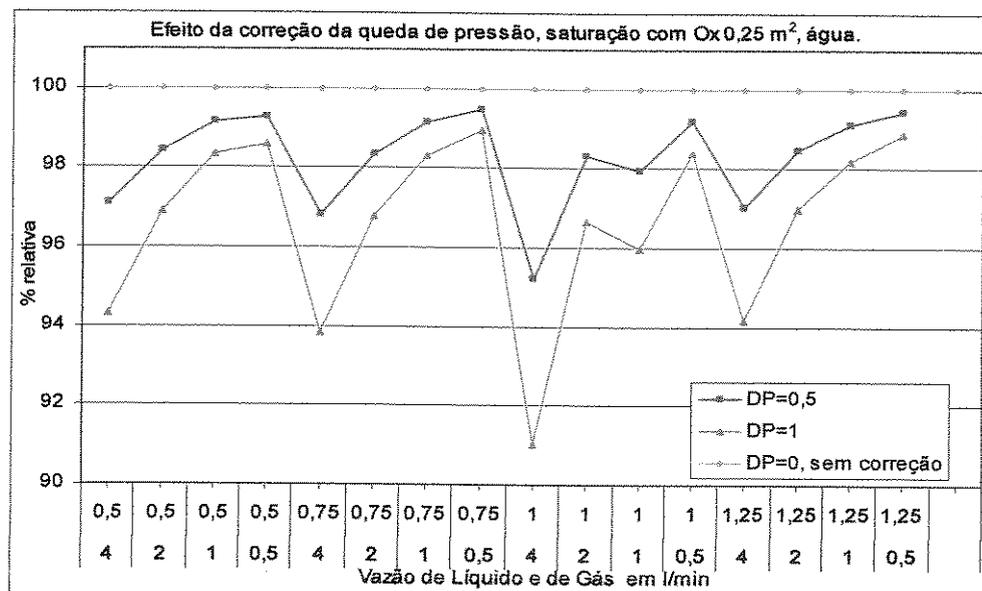


Figura 85: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

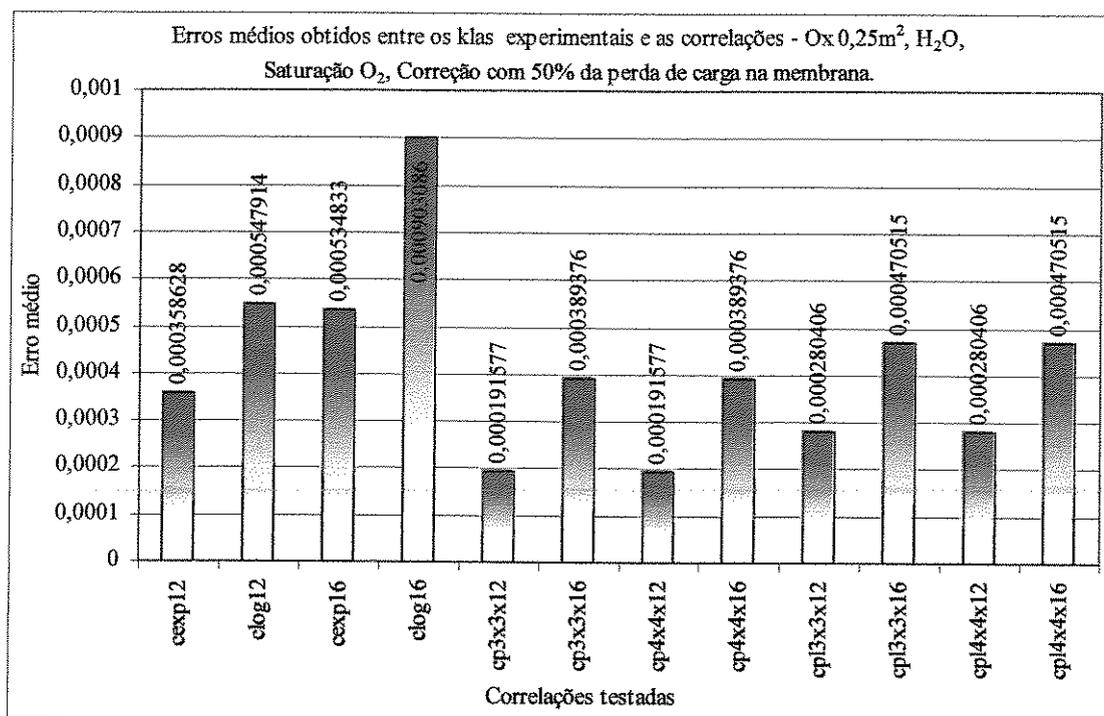


Figura 86: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> com água.

Foram ajustadas constantes para todas as 12 formas de correlação descritas no Capítulo 3, sendo que nos gráficos em complemento aos resultados experimentais obtidos, sempre são utilizados neste trabalho os valores calculados pelo modelo exponencial simples em função das vazões de gás e líquido, descrito pela Eq.(45). Neste estudo do oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> de área de troca com água, por ser o primeiro a ser apresentado são mostrados na Tabela 32 todas as constantes ajustadas para todas as correlações. Para os outros equipamentos estudados são apresentados no Anexo VII os quadros comparativos da qualidade dos ajustes obtidos para as formas de correlação ajustadas, equivalentes a Figura 86. Os pontos na forma de círculo são incluídos em todos os gráficos de resultados.

O termo DP nas legendas das Figuras sobre a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do K<sub>L</sub>a, referem-se à Diferença de Pressão, ou seja à perda de carga sofrida

pela fase gasosa quando seu fluxo atravessa as membranas. 1 significa que é considerada toda a perda de carga, 0,5 apenas a metade, e 0 nenhuma perda de carga considerada.

Ao final da apresentação dos resultados há uma Tabela específica para as constantes ajustadas para o modelo exponencial simples descrito pela Eq.(45), e para a melhor forma de ajuste encontrada, para cada equipamento com cada fase líquida.

Tabela 32: Constantes ajustadas para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> com água.

| Nome          | a0                   | a1                   | a2                   | a3                   | a4                   | a5                   | a6                  | a7                   | a8              |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| cexp12        | 0,011926<br>115      | 0,1462389<br>1       | 1,079808<br>988      |                      |                      |                      |                     |                      |                 |
| clog12        | 0,002503<br>925      | 4,4562624<br>79      | 1,076252<br>623      |                      |                      |                      |                     |                      |                 |
| cexp16        | 0,011586<br>631      | 0,1241429<br>94      | 1,002713<br>559      |                      |                      |                      |                     |                      |                 |
| clog16        | 0,003110<br>339      | 3,3375330<br>79      | 1,062477<br>491      |                      |                      |                      |                     |                      |                 |
| cp3x3x<br>12  | -<br>0,012538<br>577 | 0,0448397<br>95      | -<br>0,043602<br>441 | 0,0192307<br>69      | 0,007776<br>165      | -<br>0,003647<br>755 | 0,000515<br>363     |                      |                 |
| cp3x3x<br>16  | 0,000113<br>641      | -<br>0,0053540<br>85 | 0,025896<br>778      | -<br>0,0116577<br>72 | 0,005026<br>453      | -<br>0,001848<br>278 | 0,000215<br>983     |                      |                 |
| cp4x4x<br>12  | 0,017044<br>395      | -<br>0,0125883<br>34 | -<br>0,158345<br>641 | 0,3386243<br>39      | -<br>0,175677<br>769 | 0,003548<br>253      | 0,001284<br>808     | -<br>0,001598<br>593 | 0,000281<br>861 |
| cp4x4x<br>16  | 0,000443<br>101      | -<br>0,0053540<br>85 | 0,025896<br>778      | -<br>0,0116577<br>72 | 0                    | 0,003790<br>978      | -<br>0,000406<br>89 | -<br>0,000401<br>754 | 8,2365E-<br>05  |
| cpl3x3x<br>12 | 3,27089E<br>-06      | 7,16991E<br>+11      | 1,11107E<br>-15      | 2595346,9<br>61      | 2,886469<br>677      | 0,605104<br>45       | 1,073387<br>638     |                      |                 |
| cpl3x3x<br>16 | 0,000925<br>252      | 32,000773<br>23      | 0,238232<br>92       | 1,1085294<br>05      | 2,110053<br>196      | 0,725499<br>142      | 1,043188<br>74      |                      |                 |
| cpl4x4x<br>12 | 0,027700<br>757      | 0,4105853<br>7       | 3,1467E-<br>12       | 3,38867E<br>+23      | 6,20381E<br>-13      | 1,934965<br>42       | 0,964879<br>553     | 0,878839<br>754      | 1,027021<br>62  |
| cpl4x4x<br>16 | 1,99738E<br>-06      | 5,93174E<br>+15      | 1,16024E<br>-27      | 6,28395E<br>+20      | 1,17607E<br>-06      | 0,790634<br>174      | 2,280382<br>478     | 0,638563<br>336      | 1,067631<br>031 |

Os resultados dos ensaios de extração de Oxigênio da água com oxigenador de membrana com  $0,25 \text{ m}^2$  de área de troca são mostrados na Figura 87. Não foi observado um colapso como o que ocorreu nos ensaios de saturação nas vazões mais altas para gás e líquido, mas é possível observar que as curvas se embaralham e as barras do intervalo de confiança se sobrepõem. Aparentemente o comportamento do dispositivo começa a ficar mais instável.

Pode-se presumir que o mecanismo de formação do caminho preferencial é reversível ou elástico, pois apareceu nos ensaios de saturação e praticamente não apareceu nos de extração complementares.

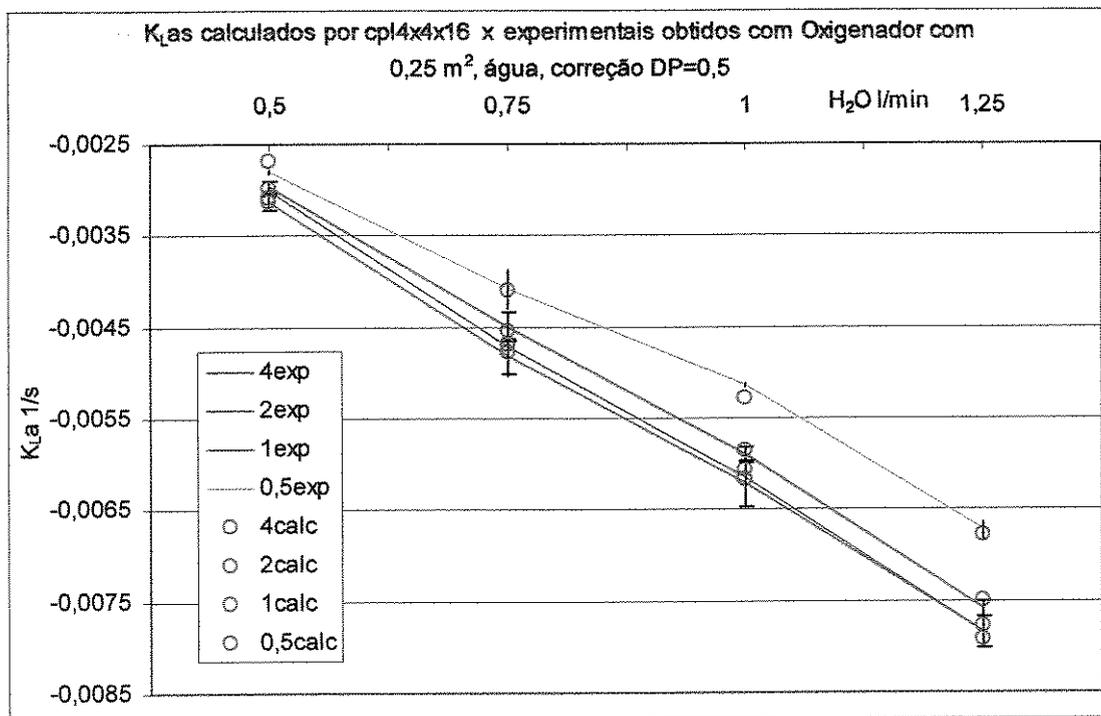


Figura 87: K<sub>L</sub>a's obtidos experimentalmente em ensaios de extração de O<sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$  com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

A influência da correção da  $p^*O_2$  devido à perda de carga na fase gasosa no valor do K<sub>L</sub>a obtido, gera alterações no oxigenador de  $0,25 \text{ m}^2$  de até 7%, conforme Figuras 164, 165, 166, 167, 174, 175, 176 e 177 no de  $0,5 \text{ m}^2$ , alterações de até 11,5%, conforme Figuras 168, 169, 178, 179, 180 e 181, no de  $1,6 \text{ m}^2$  alterações de até 13%, conforme Figura 170, 171, 182 e 183, mas na

coluna as alterações não chegam a 2%, conforme Figura 172 e 173, todas no Anexo VI. Estas são as alterações máximas supondo 100% da queda de pressão como correção para a  $p^*O_2$ , o valor tido como correto para a correção gera apenas 50% destas alterações. Nos ensaios com PFCE os padrões de alteração são similares, pois este é um efeito causado pela fase gasosa que é comum aos dois tipos de ensaio.

A análise comparativa dos resultados obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação e na extração do Oxigênio da água é mostrada nas Figuras a seguir. Esta análise preliminar para as demais unidades tanto com água como com PFCE encontra-se no Anexo V.

Superfícies de  $K_L a$  determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Água com Oxigenador com  $0.25 \text{ m}^2$

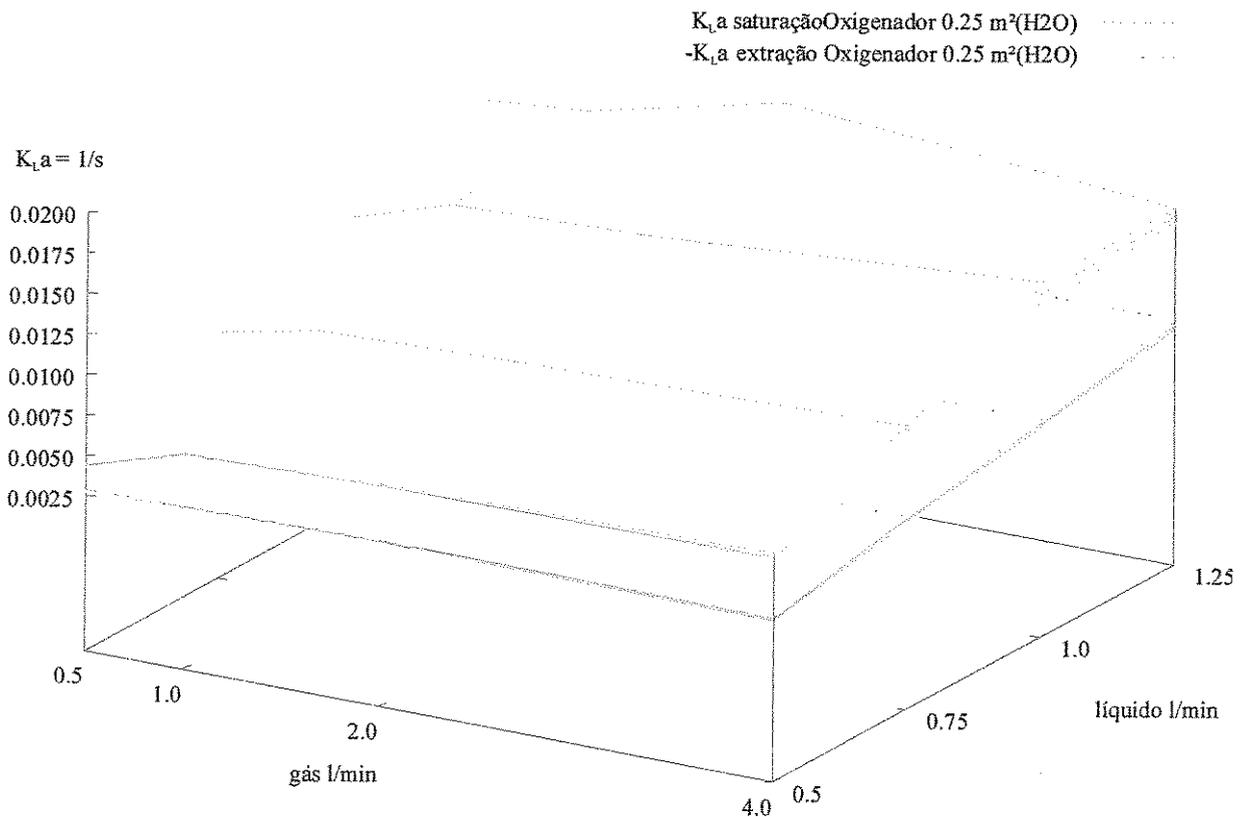


Figura 88: Mapa tridimensional dos  $K_L a$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{L,A}$ ) e na extração ( $-K_{L,A}$ ) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Os planos triplos mostrados para cada tipo de ensaio, saturação ou extração na Figura 88, são formados pelos conjuntos de pontos calculados com as três possibilidades consideradas de correções na  $p^*O_2$ , ou seja, nenhuma correção devido à perda de carga na fase gasosa, gerando o plano superior, meia correção para o plano do meio e correção com a queda de pressão inteira, o plano de baixo.

O  $K_{L,a}$  se refere ao ensaio de saturação da água com Oxigênio, o  $-K_{L,a}$  se refere ao ensaio de extração do Oxigênio da água, todos calculados utilizando a mesma faixa de seleção de pontos. Os  $-K_{L,a}$ s neste ensaio tem valor em média de 50% dos  $K_{L,a}$ s.

Em todos os ensaios os  $K_{L,a}$ s são colocados em gráficos com as três possibilidades de correção para a perda de carga para a fase gasosa, e em todos os casos a diferença entre as opções de correção é muito menor que a diferença entre os coeficientes de saturação e extração.

Superfícies de  $k_g$  na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com Oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>

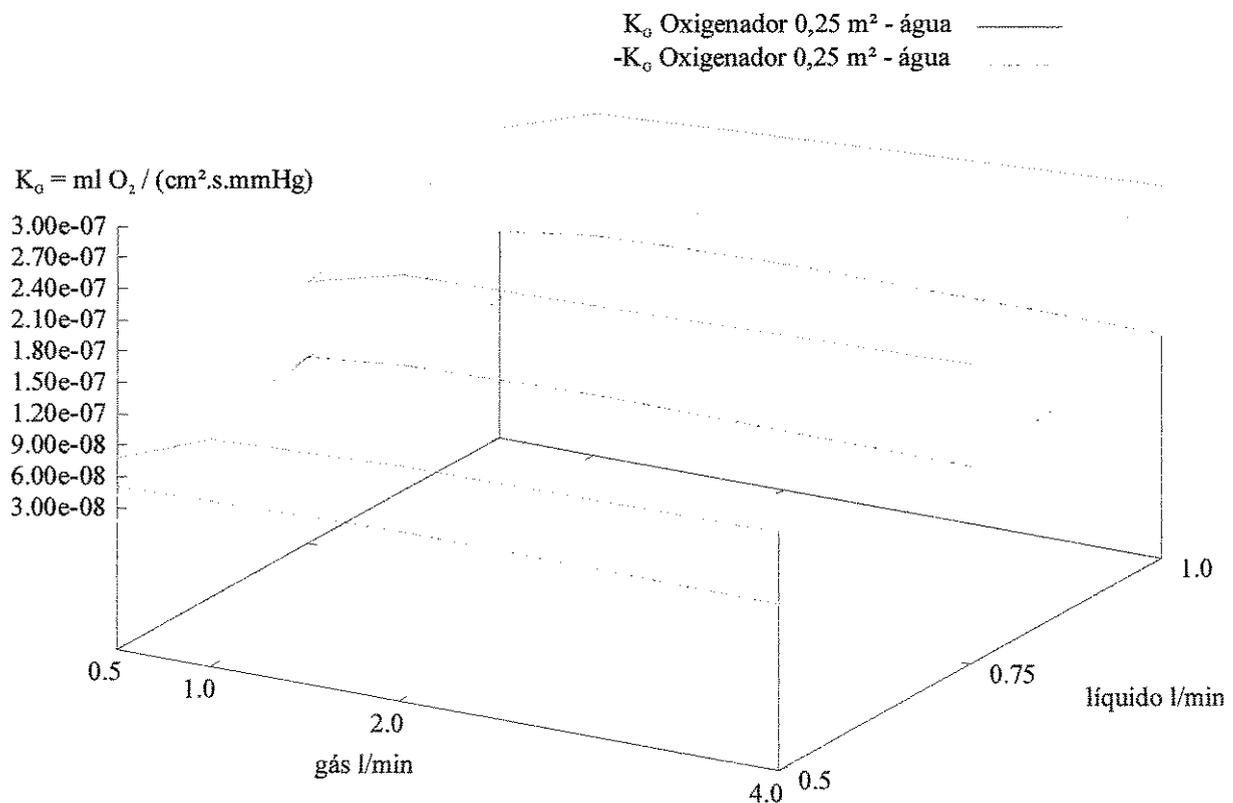


Figura 89: Mapa tridimensional dos  $K_{G,S}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.

O  $K_G$  na Figura 89 se refere ao ensaio de saturação da água com Oxigênio, o  $-K_G$  se refere ao ensaio de extração do Oxigênio da água. Os  $-K_G$ s neste ensaio tem valor em média de 50% dos  $K_G$ s. Os  $K_G$ s refletem a capacidade de troca com que uma dada área esta trabalhando, como um tipo de eficiência.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com Oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$

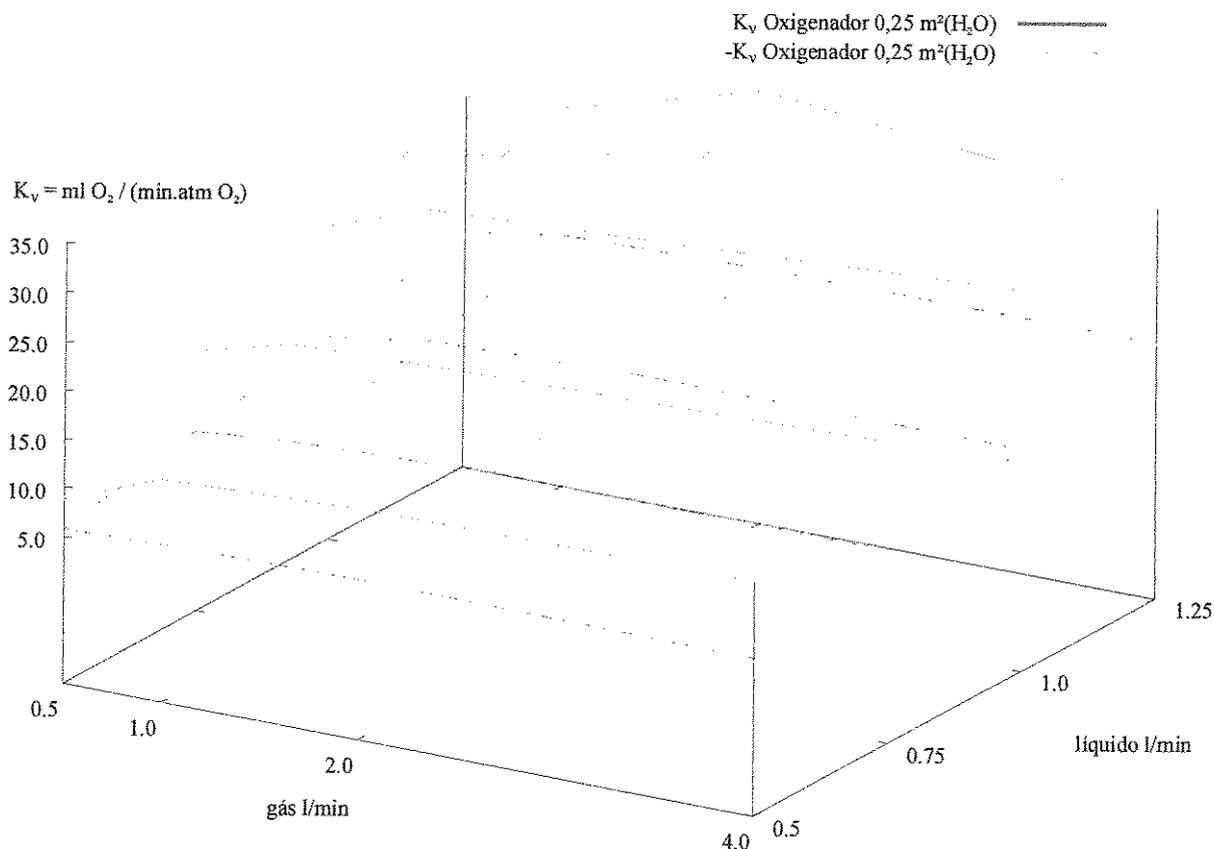


Figura 90: Mapa tridimensional dos  $K_{Vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio da água.

O  $K_V$  na Figura 90 se refere ao ensaio de saturação da água com Oxigênio, o  $-K_V$  se refere ao ensaio de extração do Oxigênio da água. Os  $-K_V$ s neste ensaio têm um valor em média de 50% dos  $K_V$ s. Os  $K_V$ s refletem a capacidade total de transferência de um dispositivo em uma dada condição.

As Figuras 91 e 92 mostram ensaios de saturação e extração de Oxigênio da água variando a temperatura utilizando o oxigenador de membrana de  $0,25\text{ m}^2$  de área de troca e água. Nestes ensaios é possível verificar a tendência às diferentes  $p\text{O}_2$  de saturação na água a diferentes temperaturas, mas devido à complexidade da análise envolvida eles não serão utilizados neste trabalho.

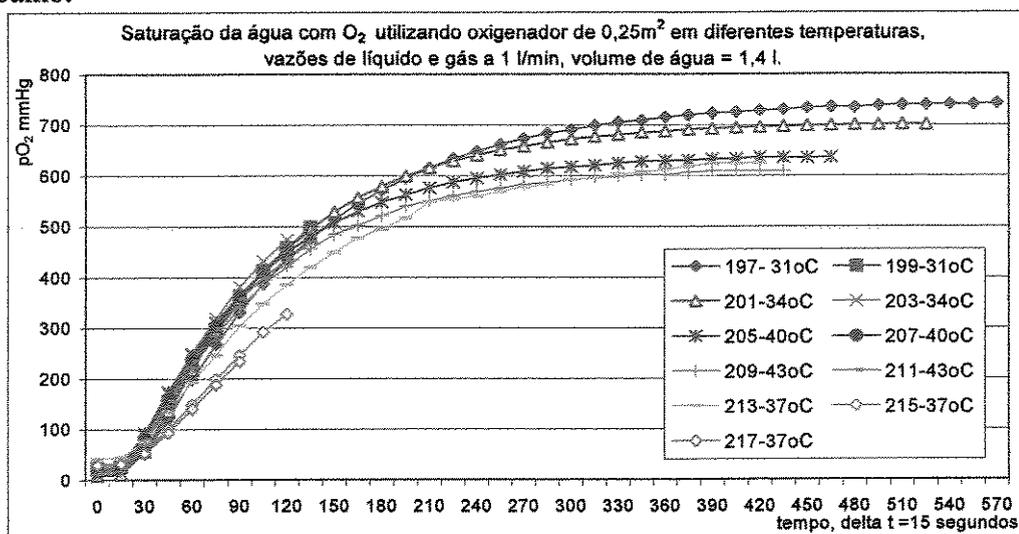


Figura 91: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de  $0,25\text{ m}^2$  variando a temperatura.

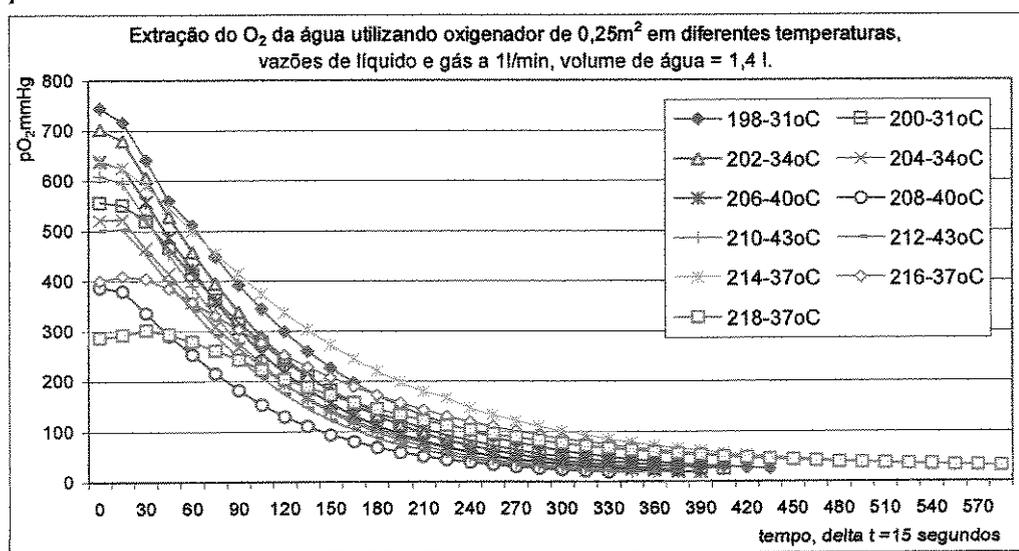


Figura 92: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de  $0,25\text{ m}^2$  variando a temperatura.

**5-2-1-b: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O.**

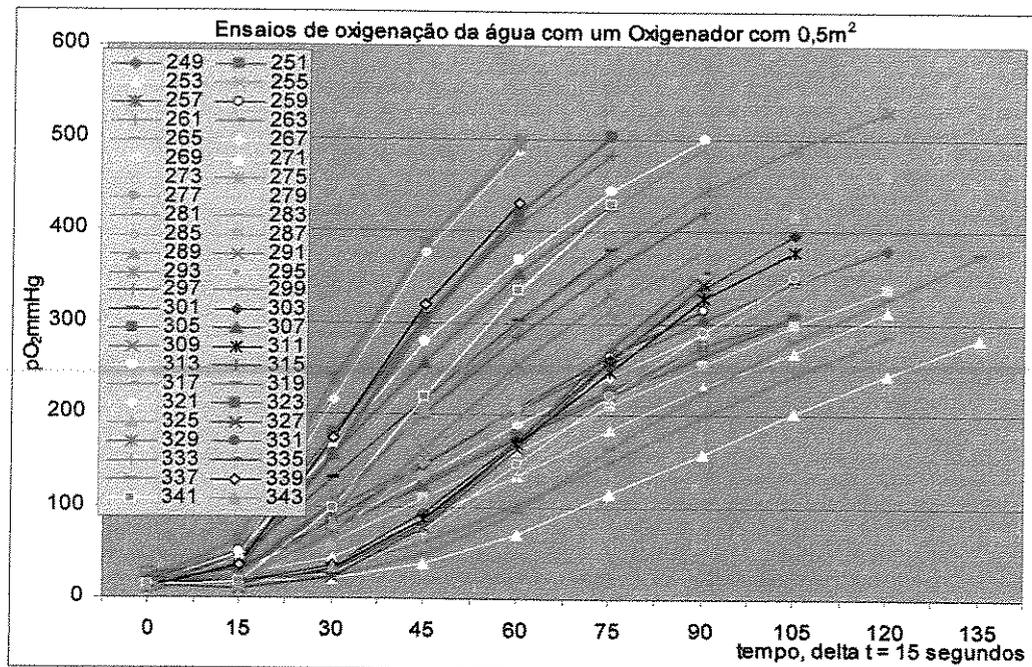


Figura 93: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup>.

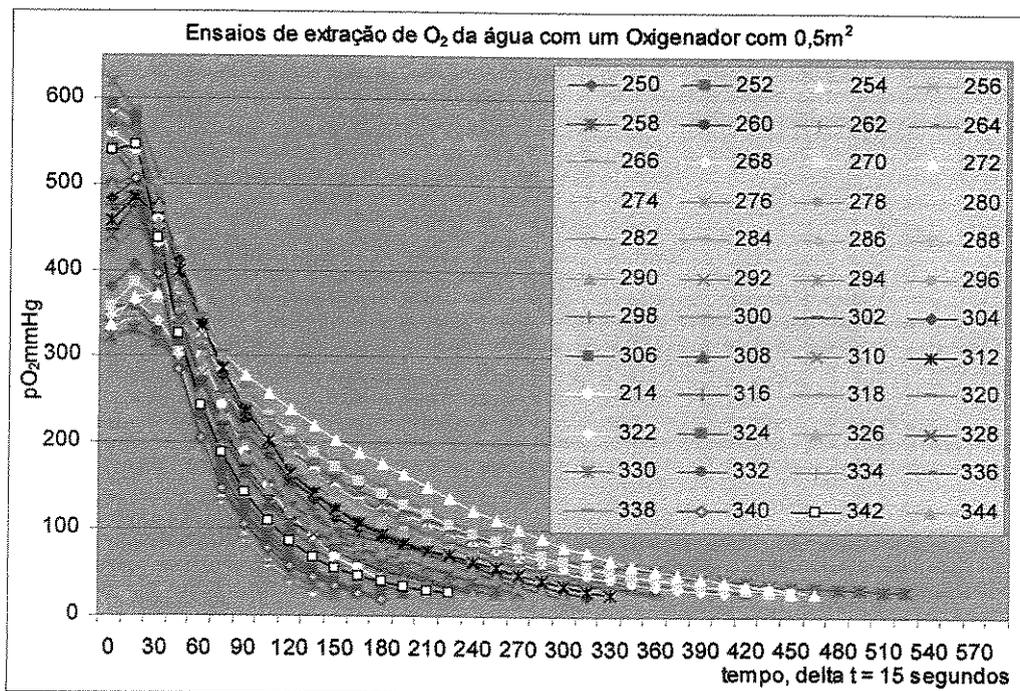


Figura 94: Ensaios de extração do Oxigênio da água com oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup>.

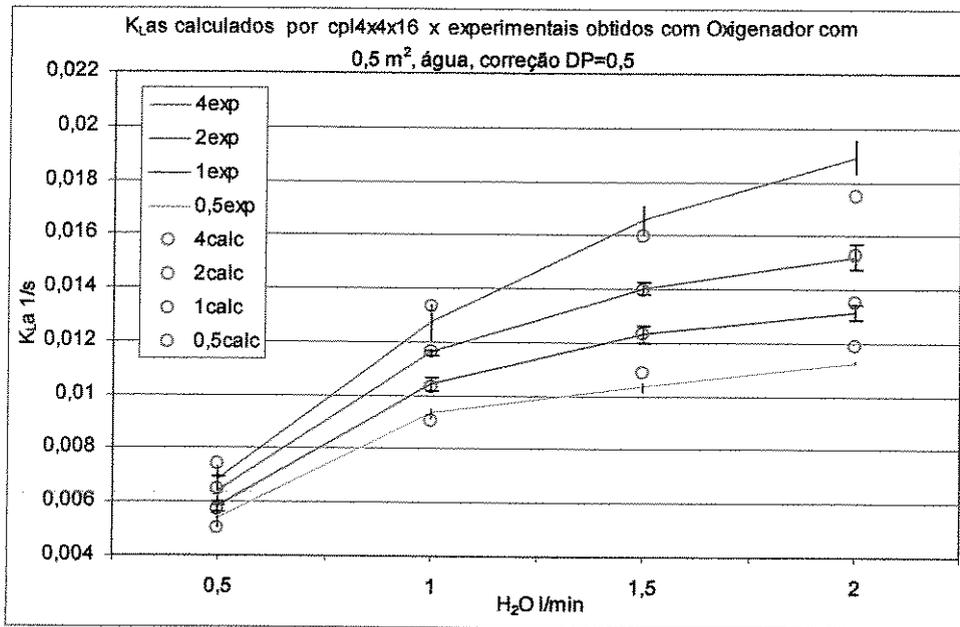


Figura 95: K<sub>La</sub>s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O<sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp16, para oxigenador com 0,5 m<sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

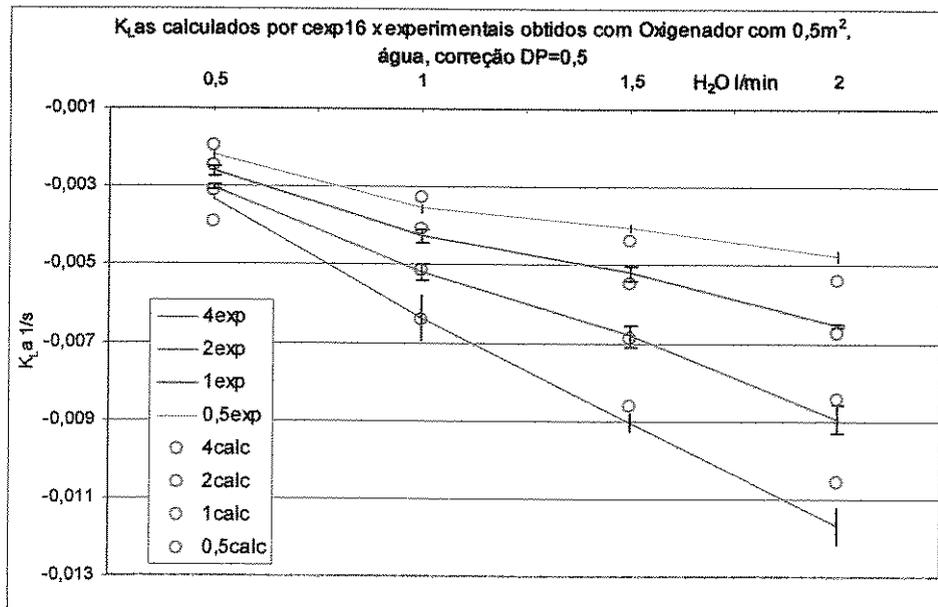


Figura 96: K<sub>La</sub>s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de O<sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,5 m<sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

Nos ensaios de extração de Oxigênio da água para o oxigenador de  $0,5 \text{ m}^2$ , os desvios causados pela correção da  $p^*O_2$  devido à perda de carga na fase gasosa são semelhantes aos dos ensaios de saturação mostrados nas Figuras 168 e 169 no Anexo VI.

**5-2-1-c: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$  de área de troca utilizando  $H_2O$ , aumentando a taxa de aquisição de dados visando ao detalhamento do processo.**

Estes ensaios foram desenhados para se verificar qual é em detalhes o efeito das vazões de gás e líquido na inicialização do experimento. Nos ensaios de saturação a quadruplicata 441, 443, 445 e 447 mostrados na Figura 97, por terem sido inicializadas em condições muito parecidas, gerou pontos tão parecidos que se sobrepõem, os  $K_{LAs}$  obtidos também são próximos. Os ensaios complementares, as extrações 442, 444, 446 e 448 mostrados na Figura 98, foram inicializadas em condições de  $pO_2$  diferentes entre si, o que levou a curvas distantes e a partir de pontos iniciais diferentes, no entanto, quando cruzam a faixa entre 100 e 300 mmHg, sua declividade é bem parecida, o que levou a  $K_{LAs}$  também próximos entre si..

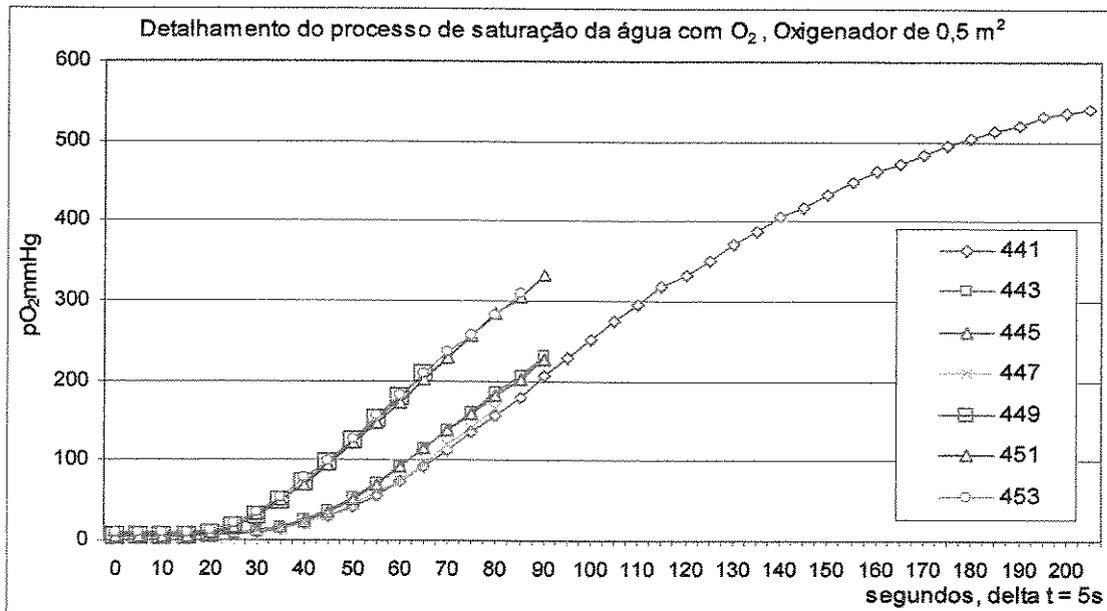


Figura 97: Ensaios de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de  $0,5 \text{ m}^2$ , taxa de aquisição aumentada para 1 a cada 5 segundos para detalhamento do ensaio.

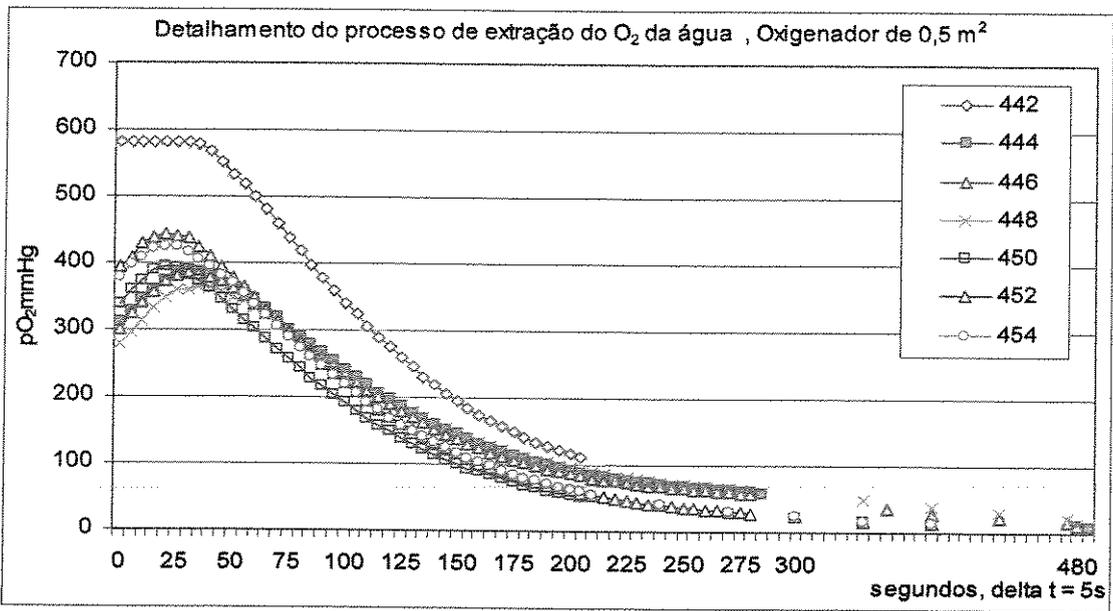


Figura 98: Ensaio de extração do Oxigênio da água com oxigenador de  $0,5 \text{ m}^2$ , taxa de aquisição aumentada para 1 a cada 5 segundos para detalhamento do ensaio.

Os  $K_L$ as obtidos nestes ensaios foram incluídos nos resultados apresentados nas Figuras 95 e 96.

**5-2-1-d: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O.**

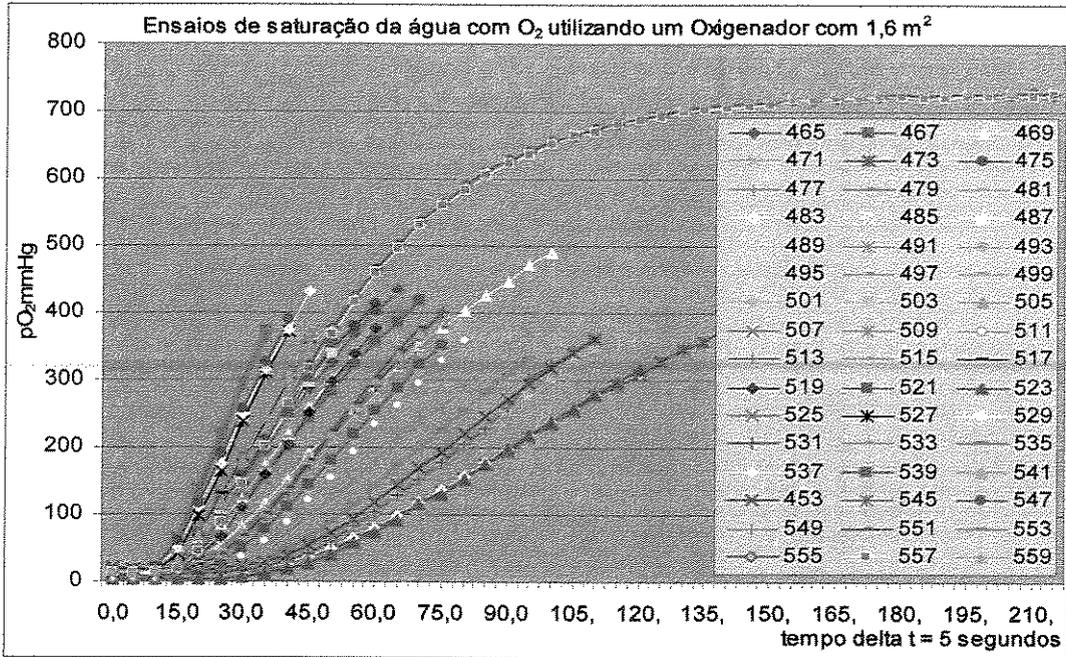


Figura 99: Ensaio de saturação da água com Oxigênio com oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>.

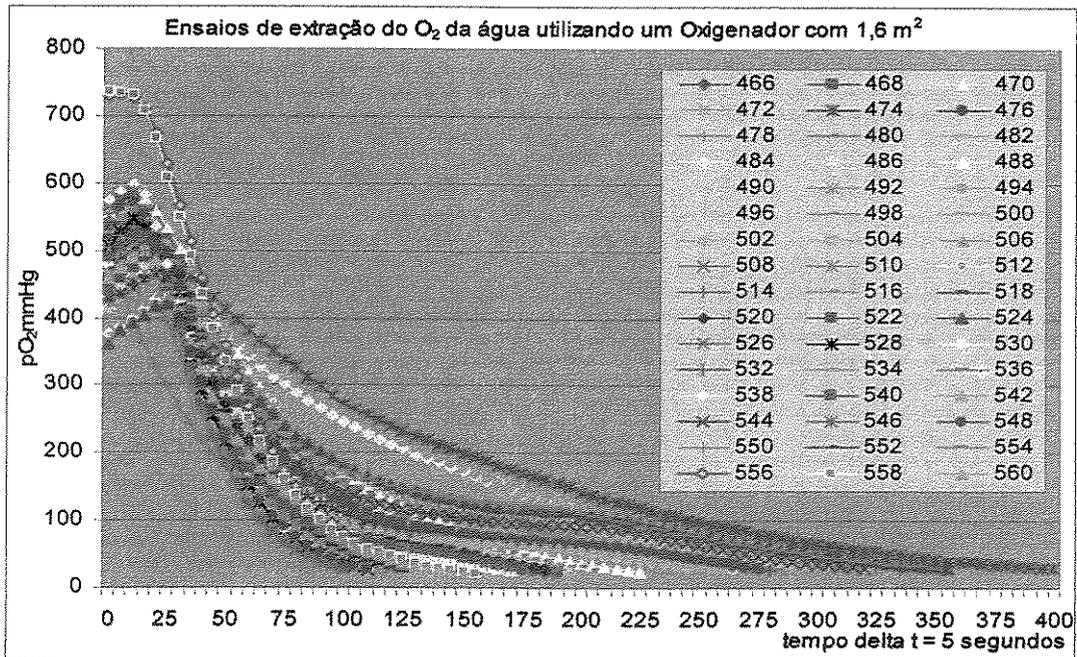


Figura 100: Ensaio de extração do Oxigênio da água com oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>.

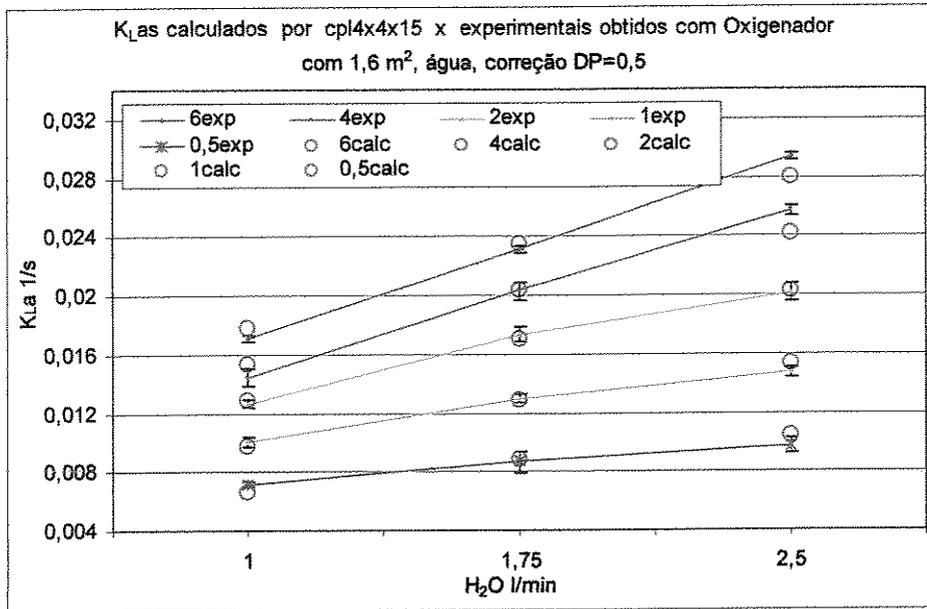


Figura 101:  $K_L a_s$  obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de O<sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 m<sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

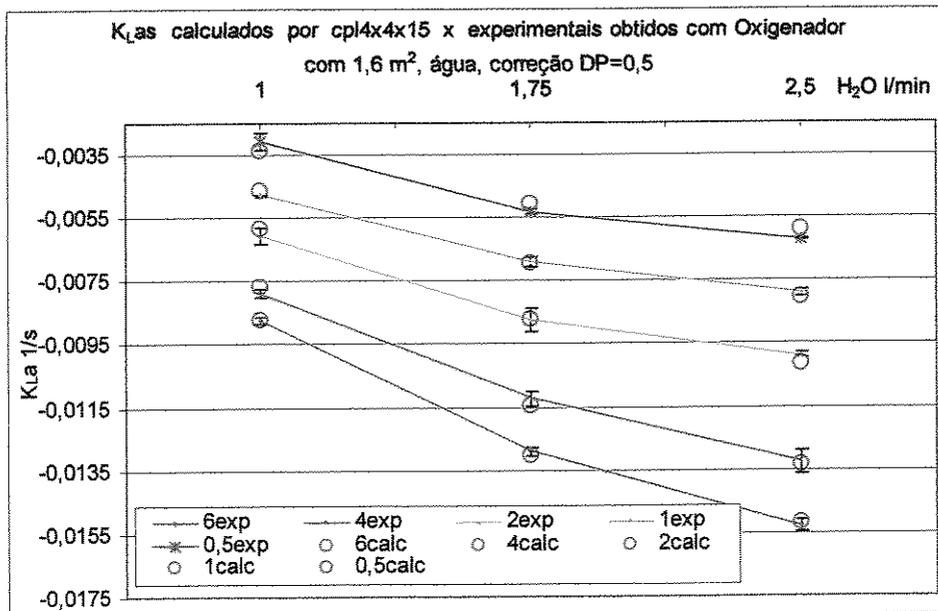


Figura 102:  $K_L a_s$  obtidos experimentalmente em ensaios de extração de O<sub>2</sub> e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com 1,6 m<sup>2</sup> com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

Nos ensaios de extração de Oxigênio da água para o oxigenador de  $1,6 \text{ m}^2$ , os desvios causados pela correção da  $p^*O_2$  devido à perda de carga na fase gasosa são semelhantes aos dos ensaios de saturação mostrados nas Figuras 170 e 171 no Anexo VI.

**5-2-1-e: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com  $1,6 \text{ m}^2$  de área de troca utilizando  $H_2O$ , aumentando o tempo do experimento até a saturação.**

Os pontos experimentais relativos a estes ensaios foram colocados nos gráficos junto com os dados dos ensaios básicos com o oxigenador de  $1,6 \text{ m}^2$ , nas Figuras 101 e 102.

5-2-1-f: Resultados dos ensaios com a coluna de recheio com 2,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando H<sub>2</sub>O.

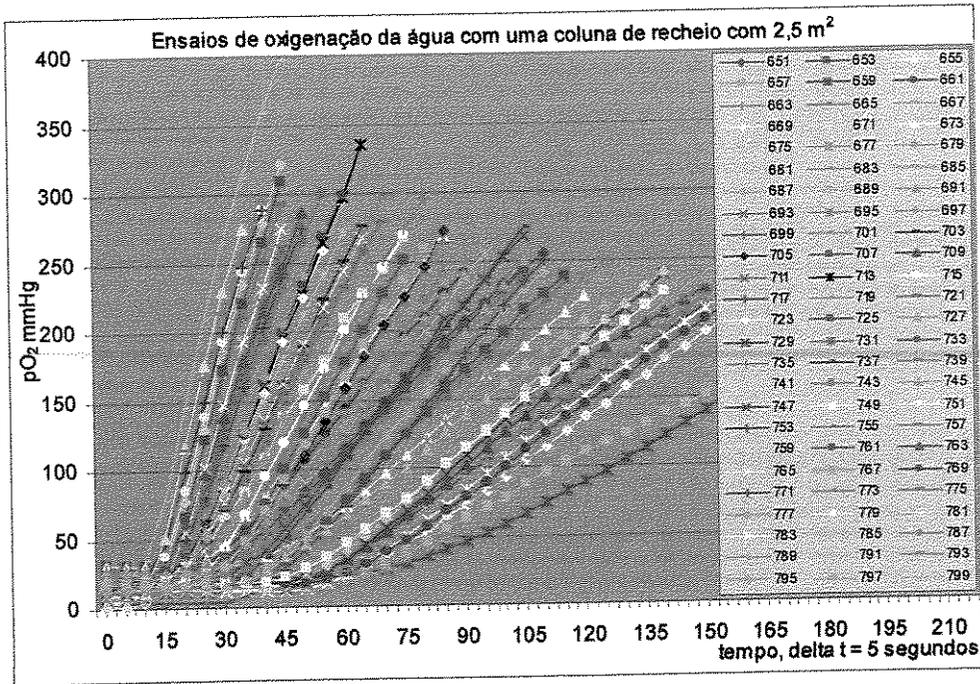


Figura 103: Ensaio de saturação da água com Oxigênio com coluna de recheio com 2,5 m<sup>2</sup>.

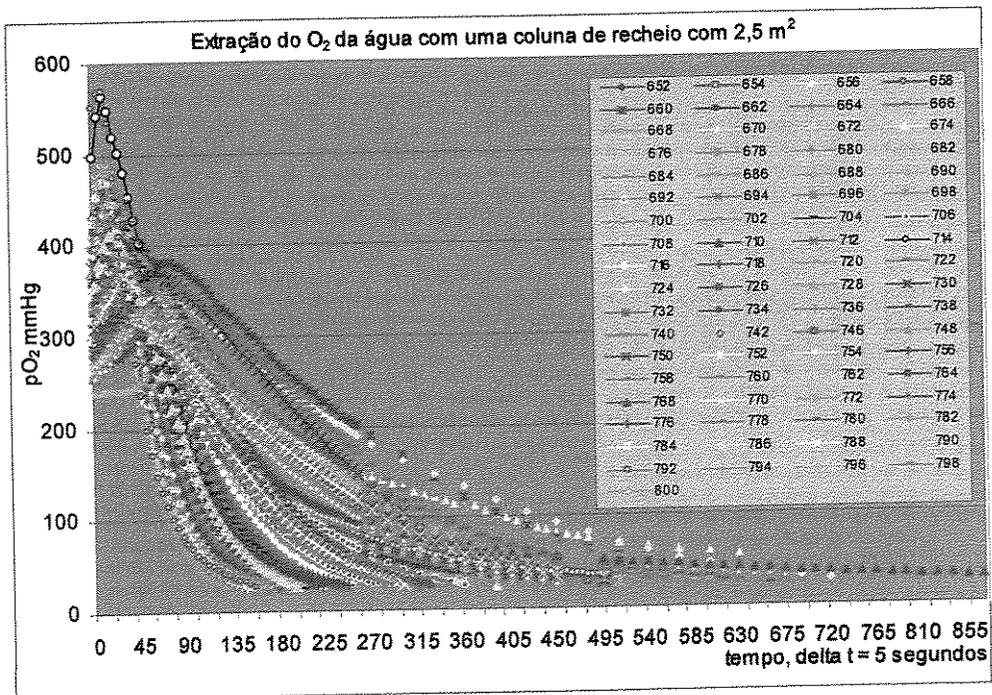


Figura 104: Ensaio de extração do Oxigênio da água com coluna de recheio com 2,5 m<sup>2</sup>.

Nos ensaios com a coluna, há um maior atraso de inicialização do experimento devido ao maior volume retido no recheio, e é possível visualizar ensaios nas Figuras 103 e 104, onde o sensor demora mais de um minuto para começar a mostrar alguma variação.

Devido ao grande volume de Oxigênio retido na coluna, há grandes períodos de saturação mesmo após iniciada a operação de extração com Nitrogênio, como pode ser visto na Figura 104.

As correlações puramente numéricas mostradas nas Figuras 105 e 106, não obtiveram o mesmo êxito em descrever as curvas dos experimentos de saturação e extração para a coluna com recheio que no caso dos oxigenadores de membrana. Desta observação pode-se “especular” que talvez um modelo mais relacionado com fenômenos do transporte se ajustasse melhor aos dados da coluna, e também, que pelo fato de nos oxigenadores as fases líquida e gasosa não terem um contato direto, um modelo puramente numérico obteve maior sucesso no ajuste a seus dados experimentais que na coluna, onde há contato direto entre as fases.

Pode ser traçado um paralelo por analogia entre os procedimentos da mecânica computacional e esta “ginástica” realizada com modelos matemáticos e dados experimentais.

Quando se faz um modelo em elementos finitos e ajusta-o aos dados de uma análise modal de uma estrutura, é como ajustar uma Lei, tipo a de Henry ou do Balanço de Massa. Depois, na análise de detecção de falhas, a “Lei de elementos finitos” é utilizada para, por comparação à análise modal de uma estrutura incógnita, saber onde há um problema. Assim neste trabalho um modelo matemático simples foi utilizado para identificar qual parte dos dados experimentais descreviam o fenômeno de interesse para o estudo, e depois para checar a qualidade.

Devido ao contato direto entre as fases líquida e gasosa, é possível notar uma maior influência da vazão de gás no coeficiente de transporte de massa, assim como um efeito casado onde o coeficiente só sobe com a vazão da fase líquida se a vazão da fase gasosa também subir. Estas duas características são resultado do contato direto entre as fases.

A correção da pressão parcial devido à queda de pressão na fase gasosa para a coluna de recheio não apresentou grande efeito, ou melhor, apresentou um efeito muito pequeno, devido à baixa queda de pressão sofrida pelo gás ao atravessar o recheio. A máxima alteração não chegou a 2% do valor determinado para o  $K_{La}$  sendo que, o efeito da correção sobre a saturação é muito semelhante ao sobre a extração, conforme pode ser visto nas Figuras 172 e 173 no Anexo VI.

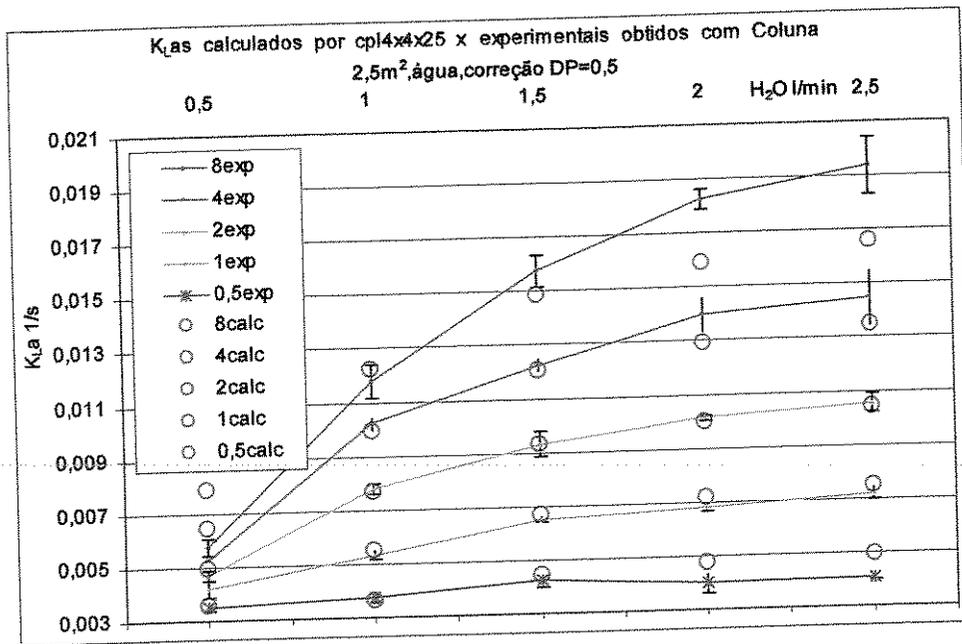


Figura 105:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp25, para coluna de recheio com  $2,5 \text{ m}^2$  com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

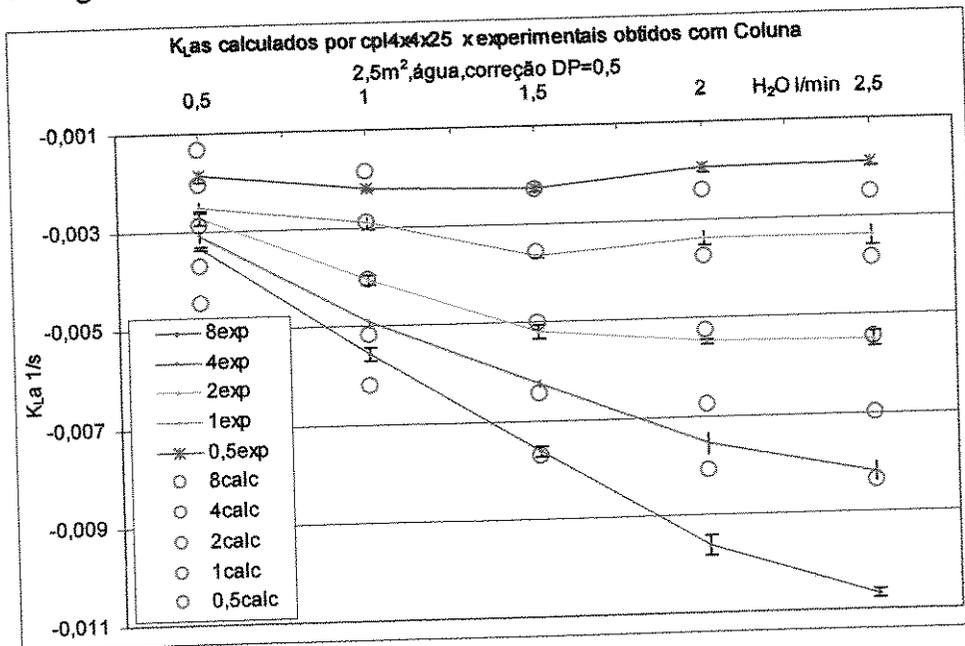


Figura 106:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para coluna de recheio com  $2,5 \text{ m}^2$  com água. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

### 5-2-1-g: Comparação entre os resultados obtidos para os oxigenadores com água.

Superfícies de  $K_L a$  determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da água com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> e uma coluna com 2,5m<sup>2</sup>

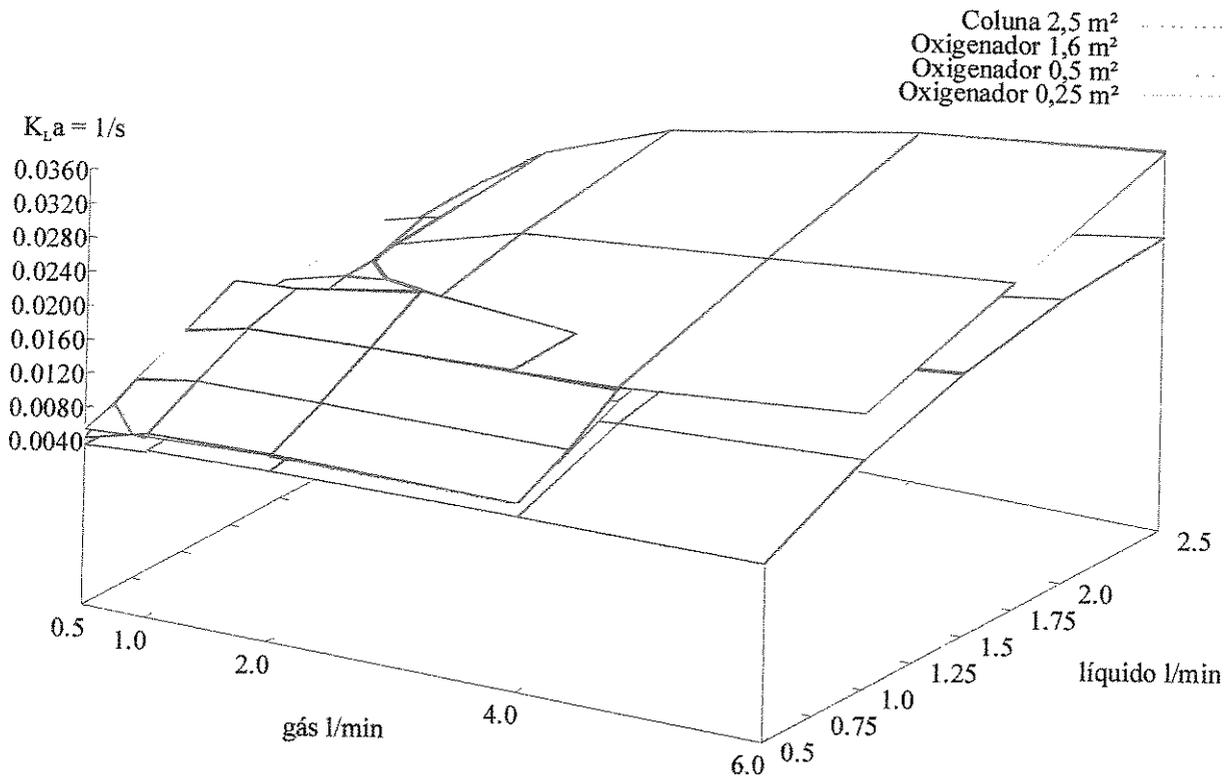


Figura 107: Mapa tridimensional dos  $K_L a$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 m<sup>2</sup> e para a coluna com 2,5 m<sup>2</sup>, na saturação da água com Oxigênio.

O  $K_L a$  funciona como uma espécie de constante de tempo do experimento e ao se sobrepor os resultados de todos os dispositivos estudados com água, é possível visualizar as faixas de teste para cada um. Pode ser visto que o intervalo escolhido para a coluna, se sobrepõe ao de todos os outros dispositivos.

Pode ser observado na Figura 107 que a performance de um dispositivo para troca de massa, seja de membrana ou de recheio, é dependente das vazões das fases aplicadas. O oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup> no máximo de suas vazões apresenta um  $K_L a$  maior que o de 0,5, o de 1,6 e a coluna de 2,5 m<sup>2</sup>, na mesma condição.

Conforme se aproximam as condições ideais de cada dispositivo de membrana, eles apresentam o maior  $K_L a$ .

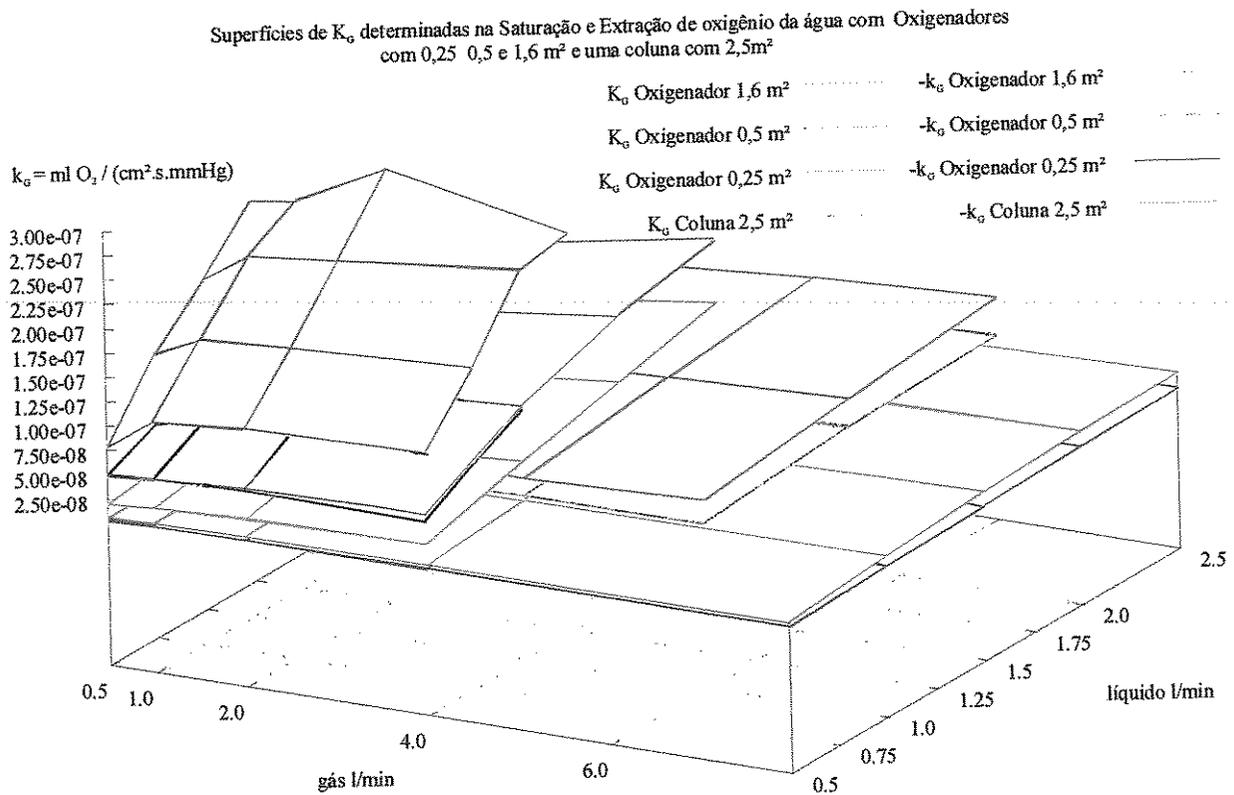


Figura 108: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 m<sup>2</sup> e para a coluna com 2,5 m<sup>2</sup>, na saturação e na extração do Oxigênio da água.

O  $K_G$  representa a capacidade de troca de cada unidade de área do dispositivo, no gráfico da Figura 108 é possível verificar a maior eficiência em relação a área para o projeto do oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>, bem como a pior para a coluna de recheio.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação de Oxigênio na Água com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> e uma Coluna com 2,5m<sup>2</sup>

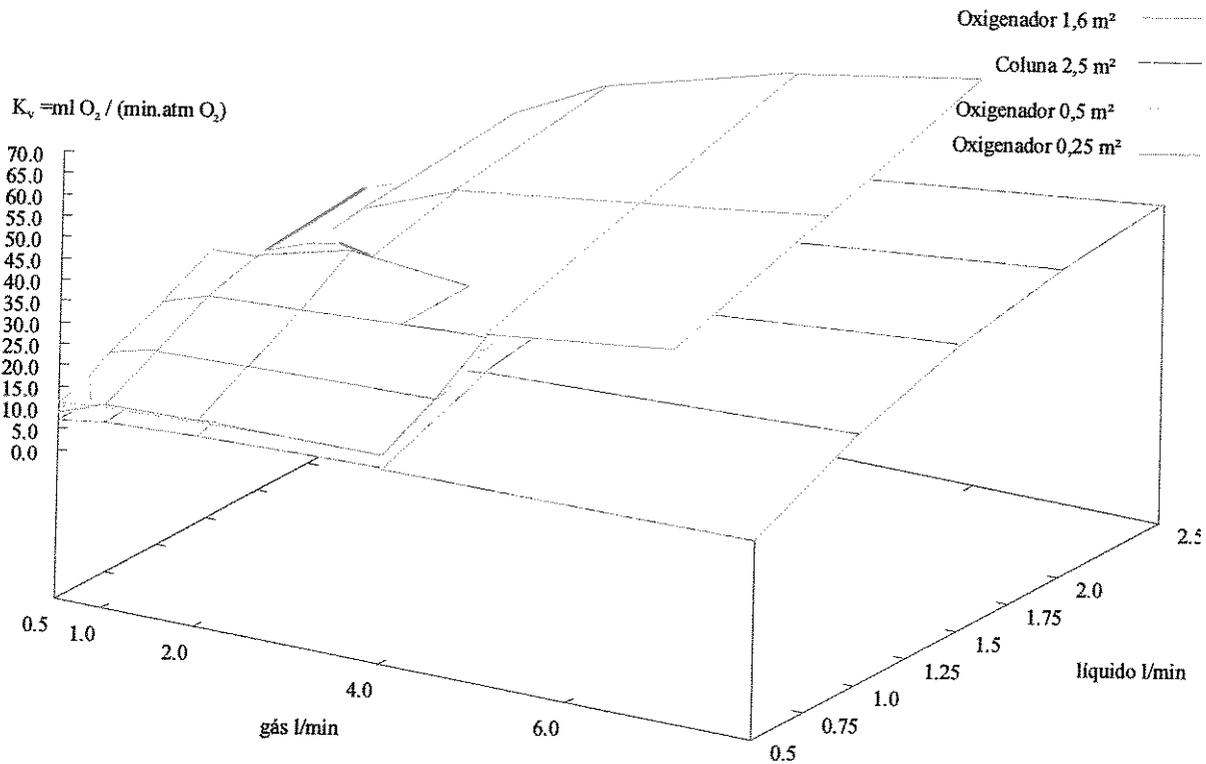


Figura 109: Mapa tridimensional dos  $K_v$ s obtidos para os oxigenadores de membrana com áreas de 0,25 0,5 1,6 m<sup>2</sup> e para a coluna com 2,5 m<sup>2</sup>, na saturação da água com Oxigênio.

O  $K_v$  representa a capacidade total de troca de massa para um dispositivo. Na Figura 109 são mostrados os resultados dos oxigenadores e da coluna estudados com água, para serem comparados em igualdade de condições. Chama a atenção o fato de o oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup> em situação de vazão em excesso conseguir transferir mais Oxigênio que o oxigenador 6,4 vezes maior que ele com 1,6 m<sup>2</sup> em situação de vazão baixa.

**5-2-2: Resultados dos ensaios com Emulsão de Perfluorcarbono PFCE, diluído a 3,7% w/v, volume padronizado em 1,4 l.**

**5-2-2-a: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 0,25m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.**

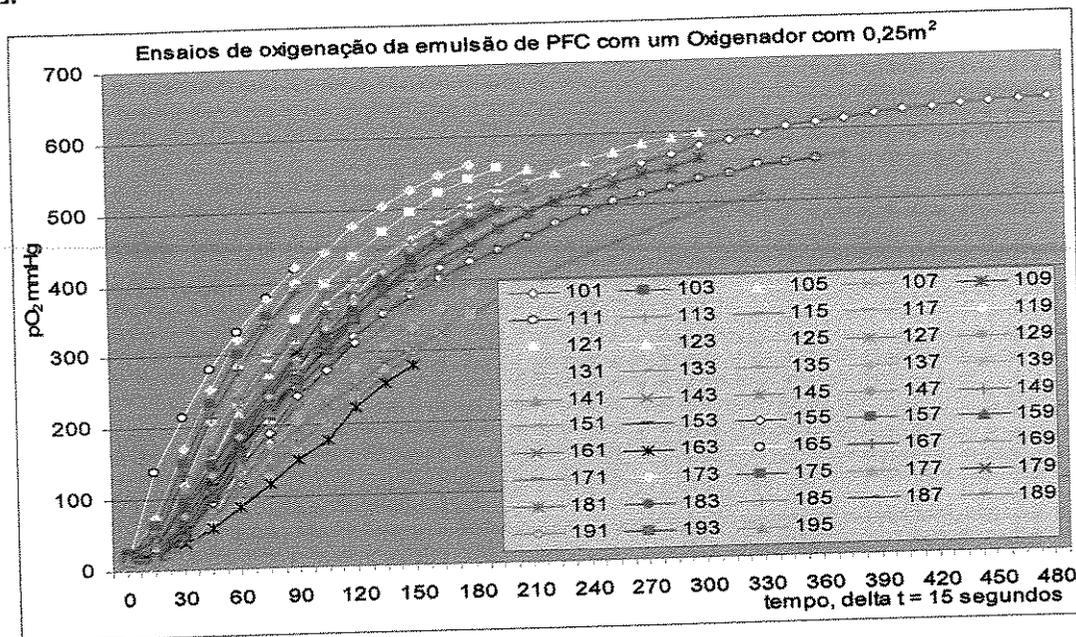


Figura 110: Ensaio de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>.

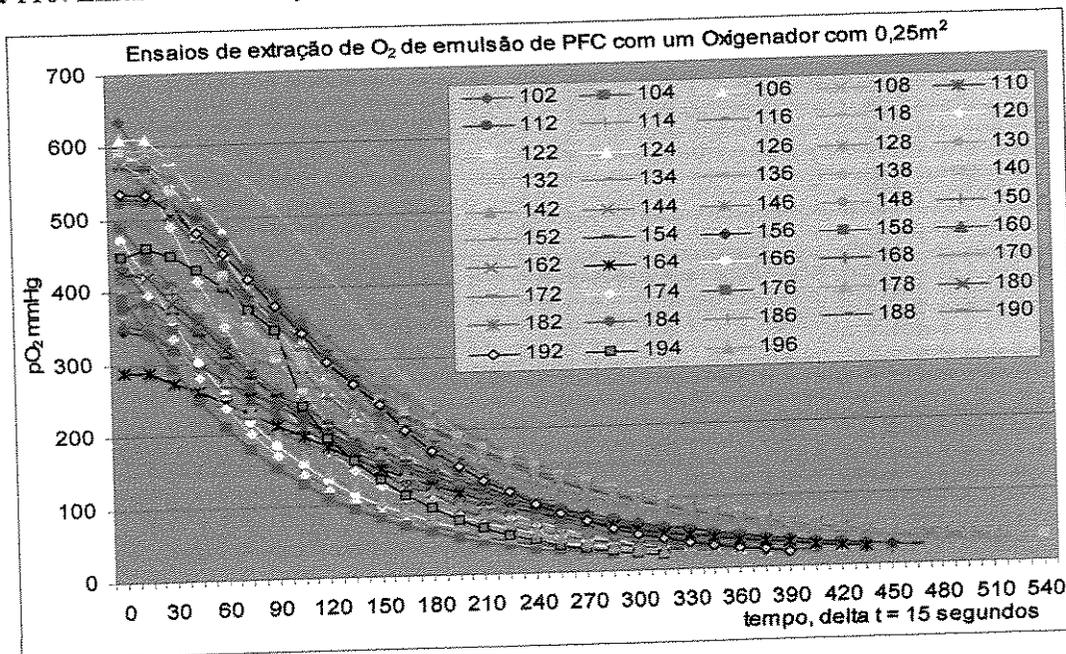


Figura 111: Ensaio de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>.

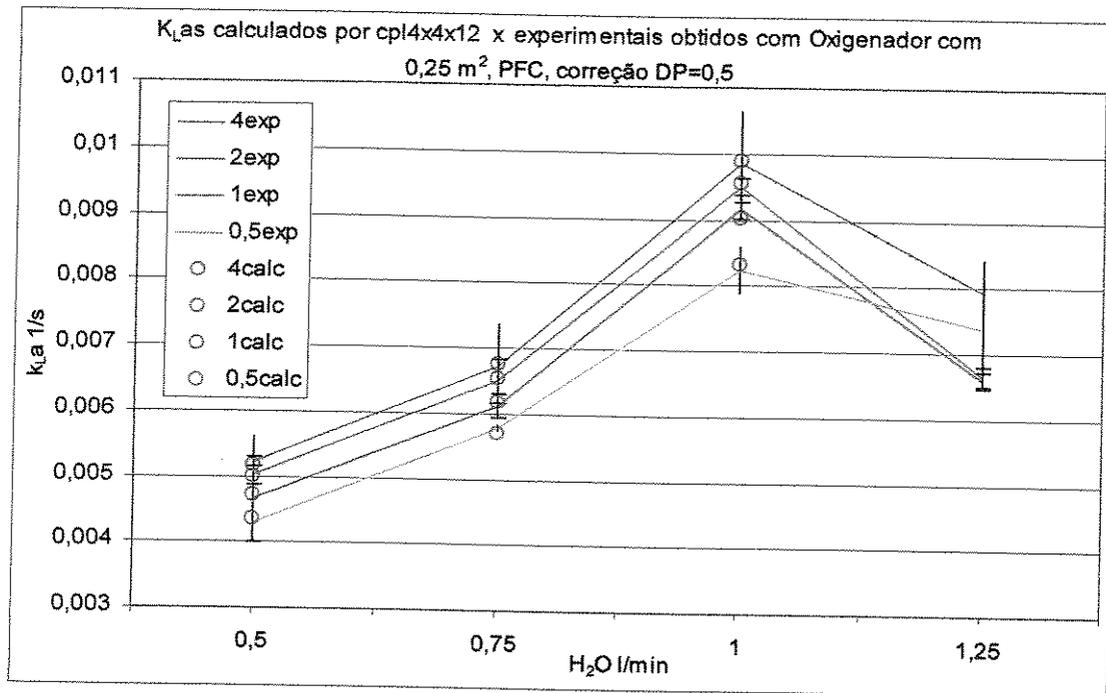


Figura 112:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$  com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

A correlação empírica novamente por causa da anomalia ocorrida na vazão de líquido em  $1,25 \text{ l/min.}$ , foi ajustada levando em conta apenas os 12 pontos obtidos nas condições de vazão mais baixa, conforme mostrado na Figura 112.

Há uma queda abrupta no  $K_{La}$  com vazão de líquido ajustada em  $1,25 \text{ l/min}$  mas desta vez em todas as vazões de gás. Esta queda ocorreu de forma reprodutível nos três ensaios da triplicata, como nos ensaios com água, mas os intervalos de confiança não ficaram tão estreitos. O problema ocorreu tanto nos ensaios de saturação como nos de extração de Oxigênio.

Este modelo de oxigenador é especificado para uma vazão de líquido de  $0,8 \text{ l/min}$ , portanto quando submetido à vazão máxima do ensaio,  $1,25 \text{ l/min}$ , ele está sendo operado super forçado em mais de 60%. Tendo em vista que o escoamento é do tipo laminar, o fator de Fanning,  $f_f$ , que aparece na Eq.(38) pode ser expresso como  $f_f = 16/Re$ , onde  $Re$  é o Número de Reynolds, o qual depende da viscosidade do fluido. Quanto mais viscoso, maior será a perda de carga e a força

sobre o duto de escoamento. Não estava disponível a possibilidade da utilização de um viscosímetro para avaliar a viscosidade da PFCE diluída, mas segundo o fabricante<sup>17</sup> a emulsão é mais viscosa que a água destilada, o que justifica uma maior perda de carga nos ensaios com PFCE do que nos com água, isso explica os colapsos mais acentuados observados nos ensaios com PFCE, mostrados nas Figuras 112 e 113, do que nos com água. A possibilidade de que tenha ocorrido a formação de um caminho preferencial, devido a um pequeno colapso mecânico na estrutura do enrolamento de fibras do oxigenador, fica assim reforçada.

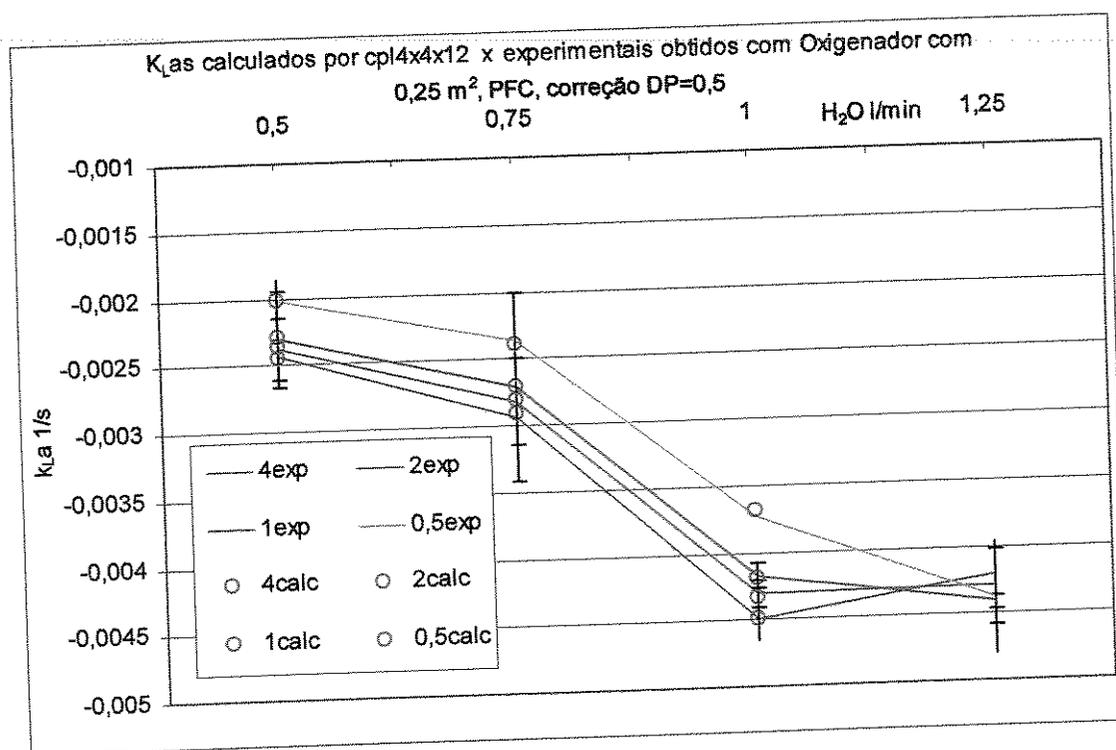


Figura 113:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup> com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

A queda na transferência total de Oxigênio do dispositivo na situação crítica, quando estudado com PFCE é nitidamente maior que quando utilizada a água. Isso comprova que a pequena viscosidade a mais da emulsão influenciou na formação do caminho preferencial ou do desvio.

5-2-2-b: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 0,5m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.

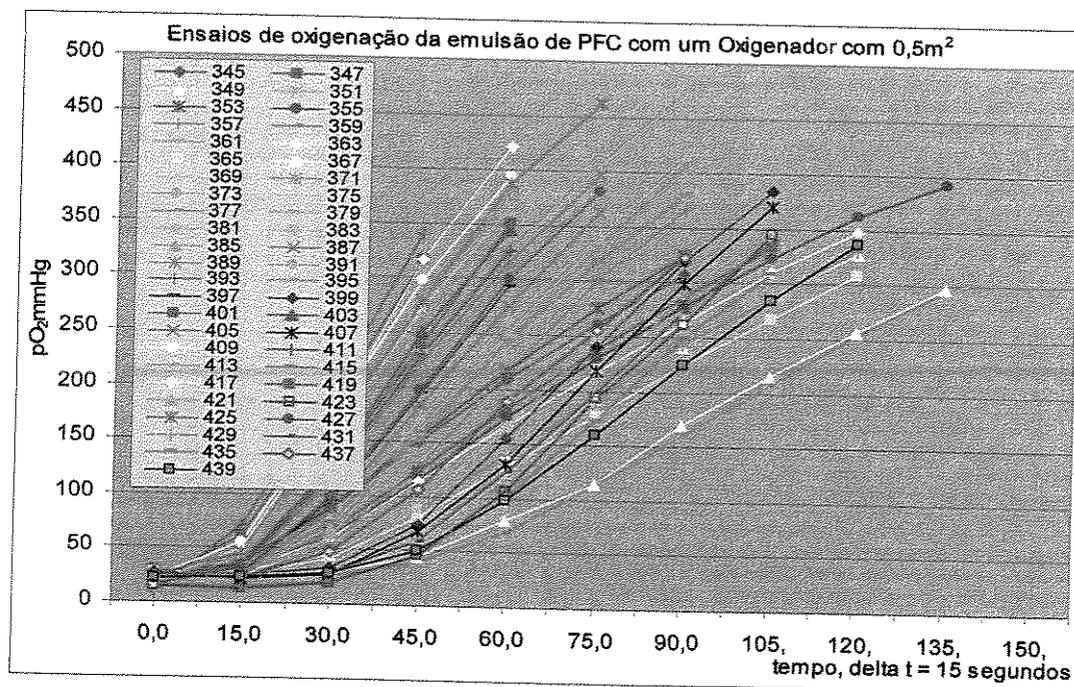


Figura 114: Ensaios de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup>.

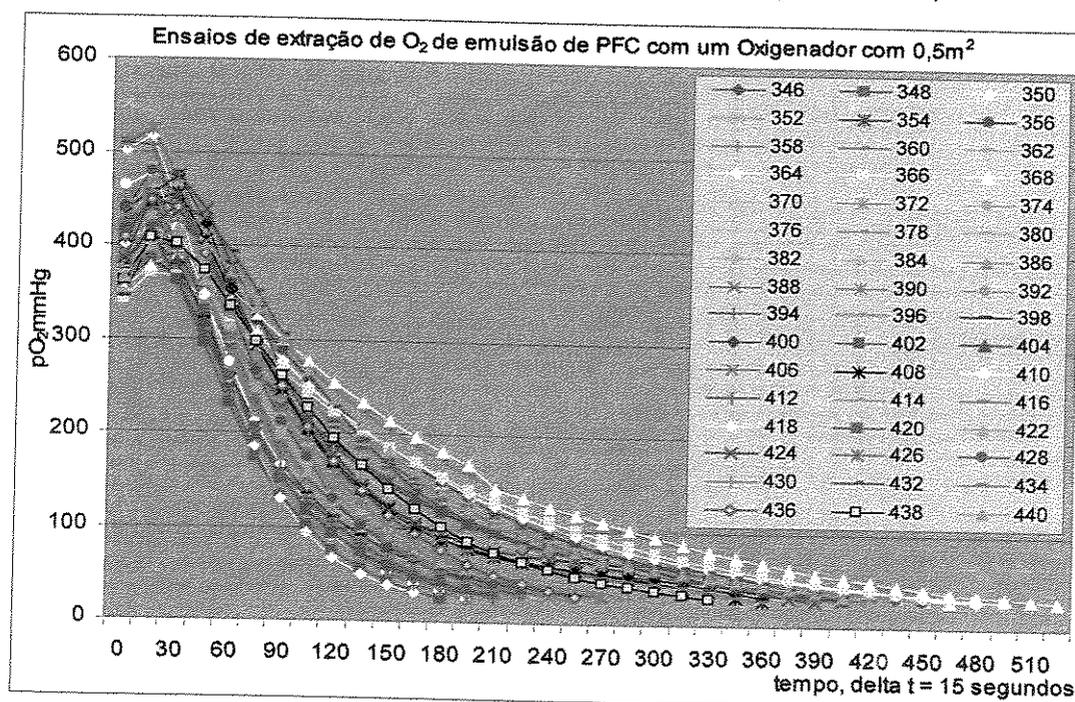


Figura 115: Ensaios de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup>.

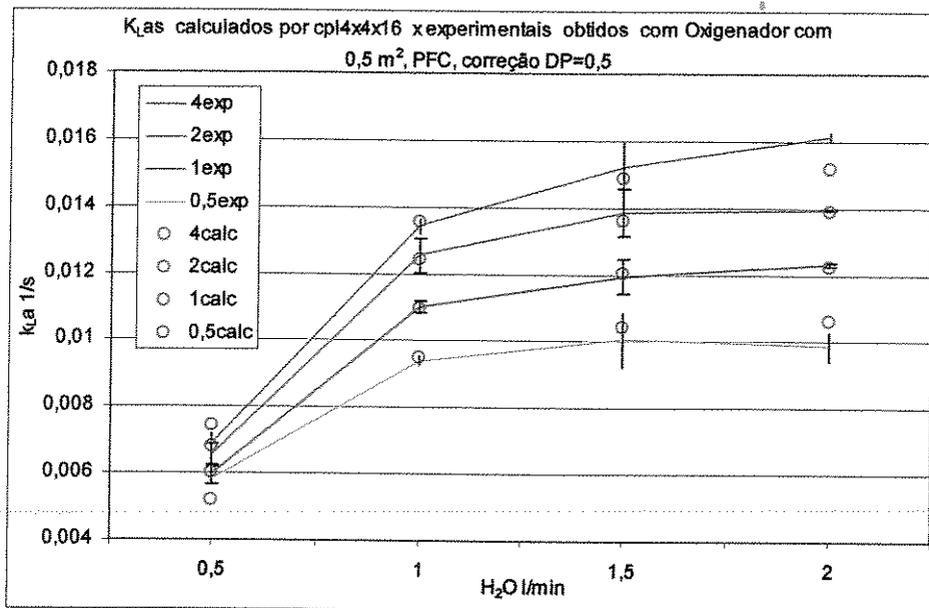


Figura 116:  $K_{L,a}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$  com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

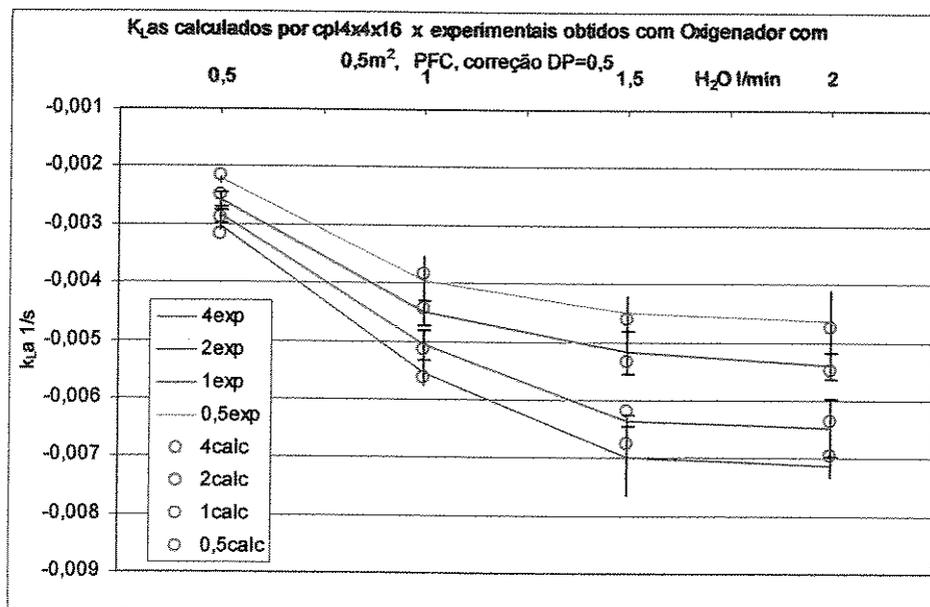


Figura 117:  $K_{L,a}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp12, para oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$  com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

5-2-2-c: Resultados dos ensaios com o Oxigenador com 1,6m<sup>2</sup> de área de troca utilizando PFCE.

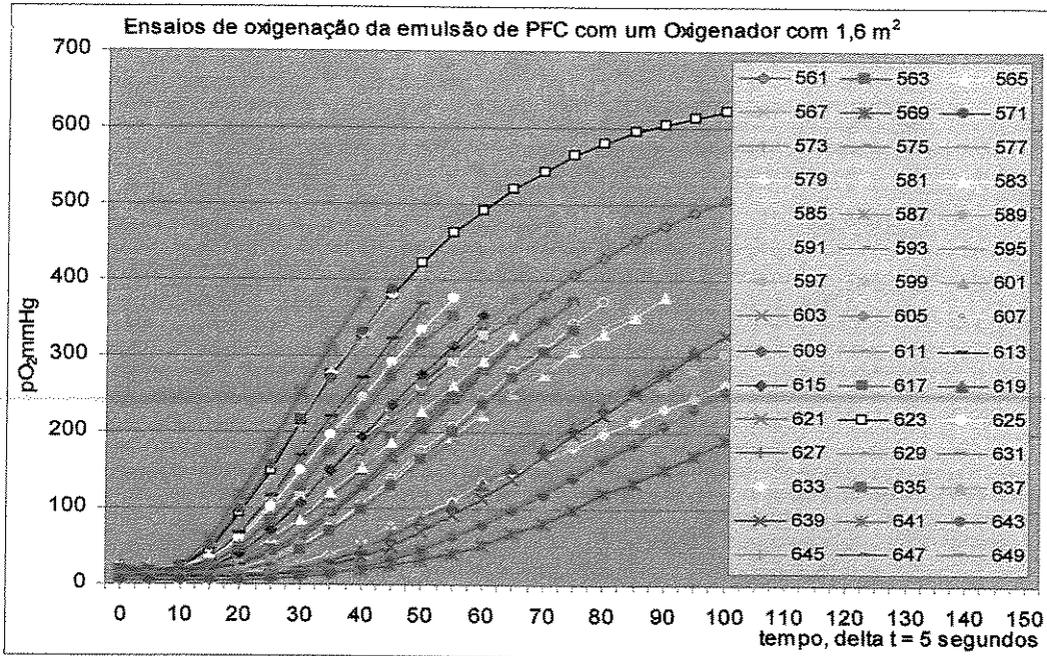


Figura 118: Ensaio de saturação da PFCE com Oxigênio com oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>.

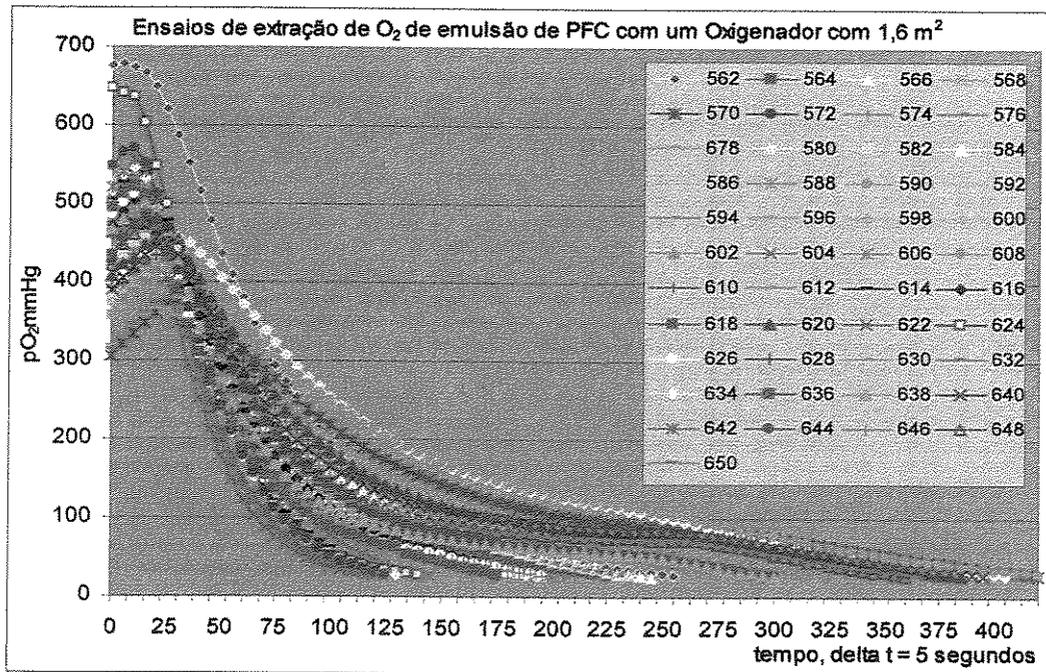


Figura 119: Ensaio de extração do Oxigênio da PFCE com oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>.

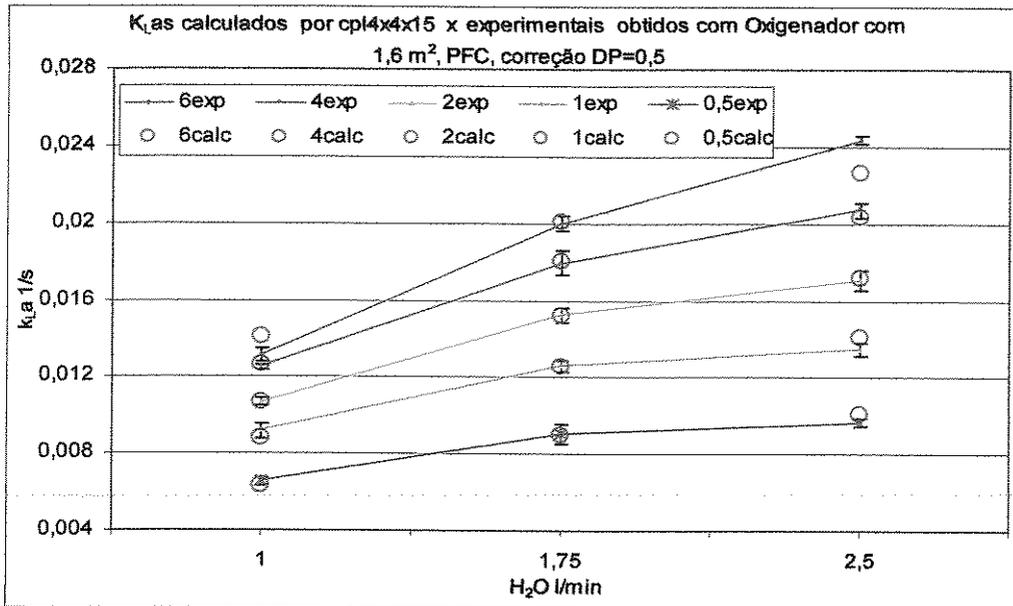


Figura 120:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de saturação de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com  $1,6\text{ m}^2$  com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

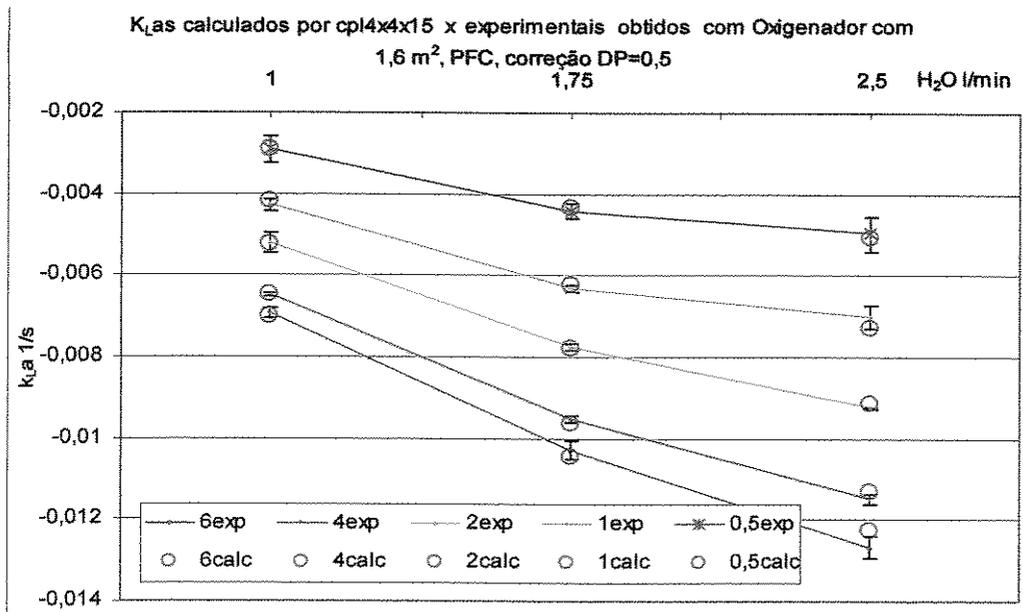


Figura 121:  $K_{La}$ s obtidos experimentalmente em ensaios de extração de  $O_2$  e nos círculos os calculados com a correlação empírica ajustada tipo cexp15, para oxigenador com  $1,6\text{ m}^2$  com PFCE. Na legenda a vazão de gás é em l/minuto.

### 5-2-2-d: Comparação entre os resultados obtidos para os oxigenadores com PFCE.

Superfícies de  $K_{L,a}$  determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

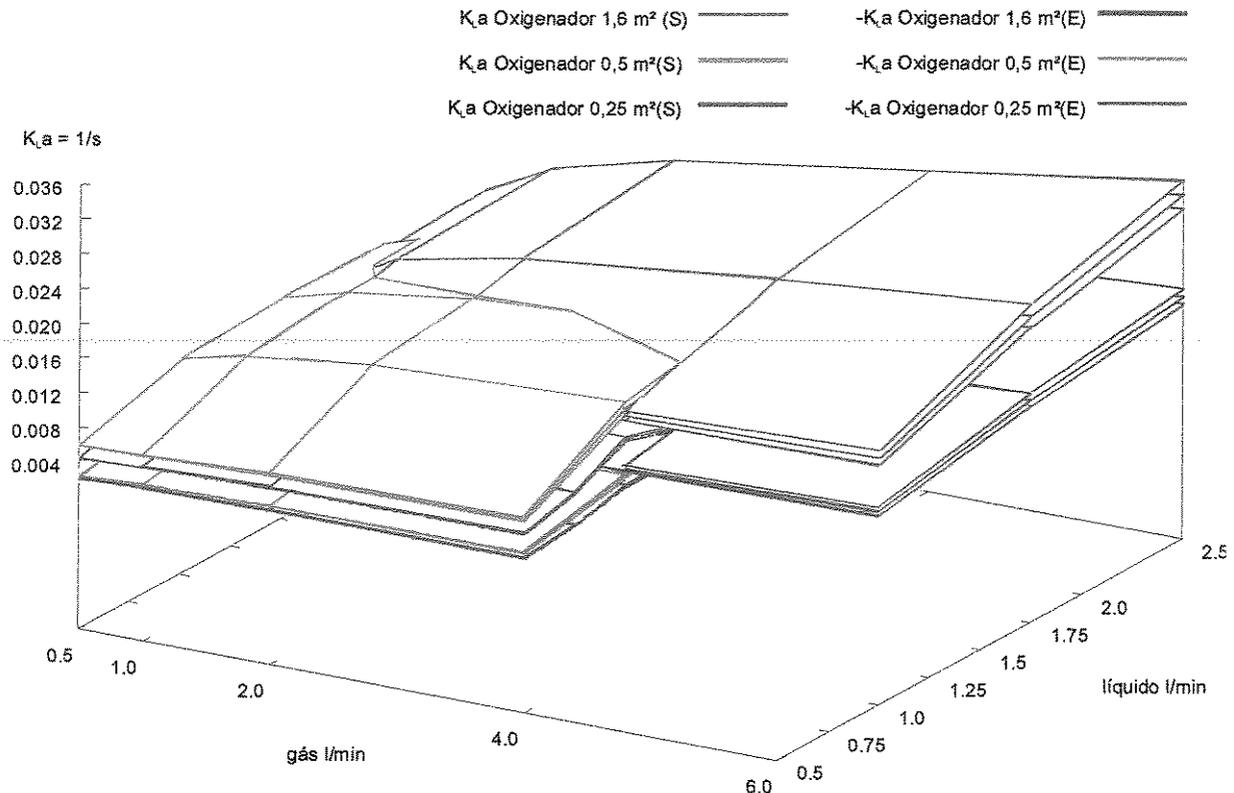


Figura 122: Mapa tridimensional dos  $K_{L,a}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L,a}$ ) e na extração ( $-K_{L,a}$ ) do Oxigênio da PFCE. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Tirando a média de todos os  $K_{L,a}$ s obtidos em ensaios com oxigenadores com água e com perfluorcarbono, a razão entre os  $K_{L,a}$ s de extração /saturação tende muito próximo para todos os ensaios a 0,49. A mesma razão para todos os ensaios com a coluna tende ao valor de 0,51, independente da fase líquida ou das condições de vazões utilizadas.

Conforme demonstrado no item simulações numéricas, os ensaios de extração possuem uma dinâmica de inicialização mais lenta que os de saturação, assim há a necessidade de uma outra faixa de seleção de dados. Outro fator que possivelmente colabora com esta diferença de valores, no entanto, com menor intensidade é o fato conhecido e citado na referência de que

sensores apresentam comportamento distinto em relação ao sentido do fluxo de Oxigênio, se a  $pO_2$  esta subindo a leitura acompanha a variação mais rapidamente do que se esta descendo.

Superfícies de  $K_G$  determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

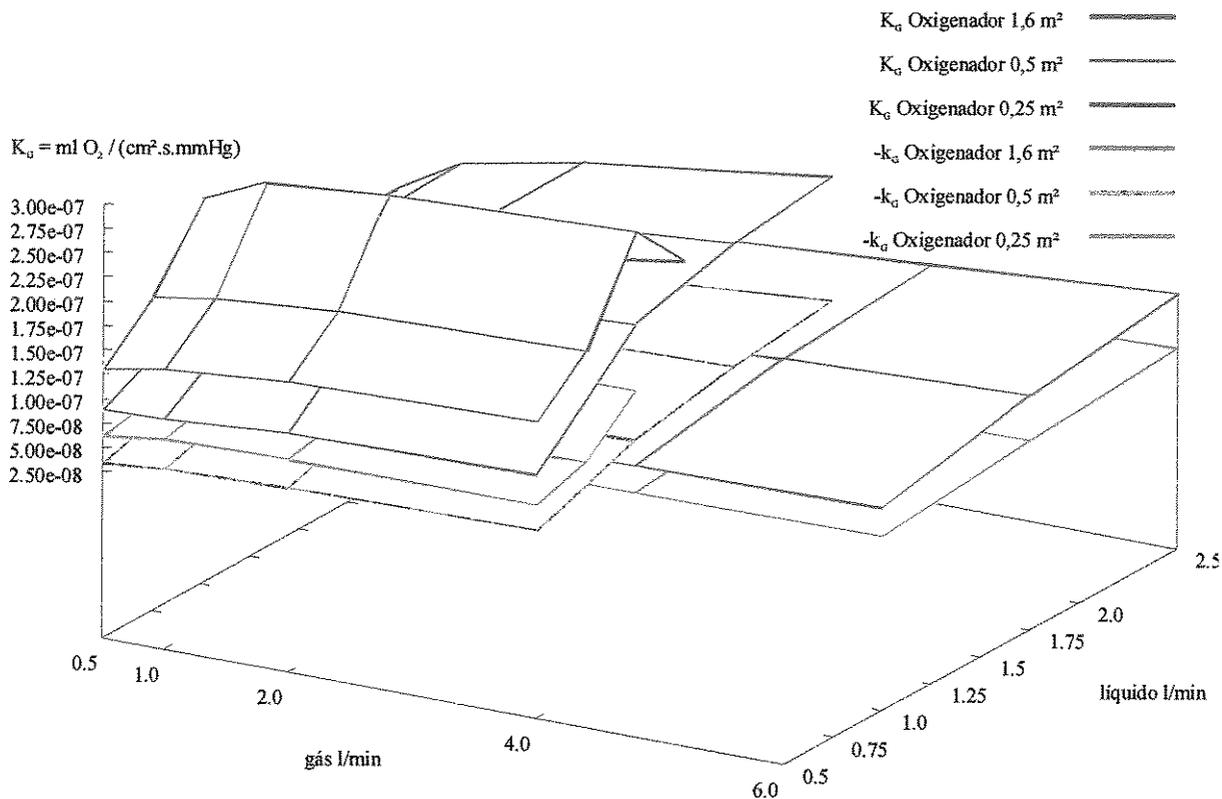


Figura 123: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.

O  $K_G$  representa a capacidade de troca de cada unidade de área do dispositivo, no gráfico da Figura 123 é possível verificar a maior eficiência em relação a área para o projeto do oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>, bem como a menor para o oxigenador de 1,6m<sup>2</sup>. A diferença se deve ao fato de o menor oxigenador estar submetido a uma vazão de líquido proporcionalmente em relação ao valor recomendado maior que o oxigenador maior, isso implica em um número de Reynolds maior e conseqüentemente uma menor resistência à transferência de massa.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

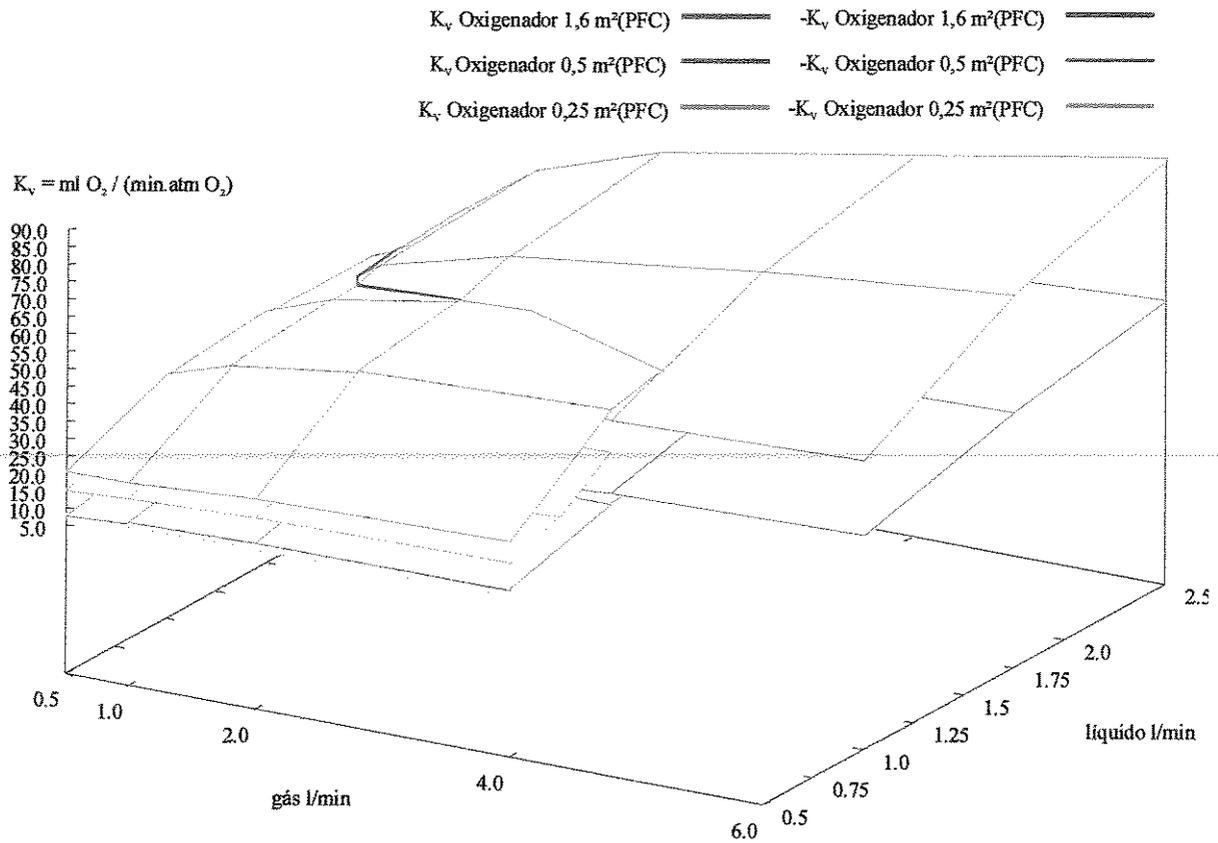


Figura 124: Mapa tridimensional dos  $K_{VS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_V$ ) e na extração ( $-K_V$ ) do Oxigênio da PFCE.

O  $K_V$  representa a capacidade total de troca de massa para um dispositivo. Na Figura 124 são mostrados os resultados dos oxigenadores estudados com PFCE, para serem comparados em igualdade de condições. Chama a atenção o fato de o oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup> em situação de vazão em excesso conseguir transferir mais Oxigênio que o oxigenador 3,2 vezes maior que ele com 1,6 m<sup>2</sup> em situação de vazão baixa.

### 5-3: Comparação entre os resultados obtidos com água e PFCE para os oxigenadores.

#### 5-3-a: Comparação dos $K_L$ as utilizando as duas fases líquidas.

As comparações entre os  $K_L$ as obtidos são mostradas individualmente por tipo de oxigenador no Anexo V, neste item é mostrada uma montagem com os gráficos dos três modelos.

Superfícies de  $K_L$ a determinadas na Saturação de oxigênio na Água e na Emulsão de PFC com Oxigenadores com 0,25, 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

|                                                           |       |                                              |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|-------|
| $K_L$ a Oxigenador 1,6 m <sup>2</sup> (H <sub>2</sub> O)  | ————— | $K_L$ a Oxigenador 1,6 m <sup>2</sup> (PFC)  | ————— |
| $K_L$ a Oxigenador 0,5 m <sup>2</sup> (H <sub>2</sub> O)  | ————— | $K_L$ a Oxigenador 0,5 m <sup>2</sup> (PFC)  | ————— |
| $K_L$ a Oxigenador 0,25 m <sup>2</sup> (H <sub>2</sub> O) | ————— | $K_L$ a Oxigenador 0,25 m <sup>2</sup> (PFC) | ————— |

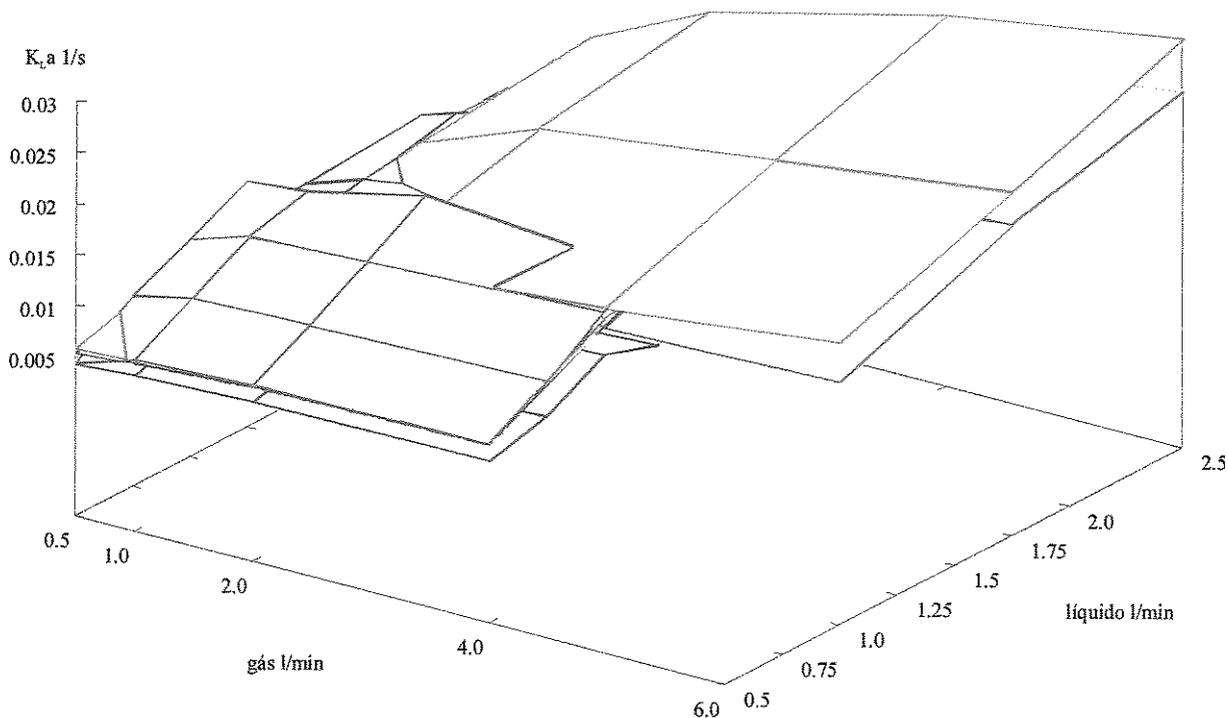


Figura 125: Mapa tridimensional dos  $K_L$ as obtidos para os oxigenadores de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Pelo fato de o  $K_L$ a ser uma constante de tempo do experimento ou seja também da montagem, os ensaios com a água obtiveram constantes de tempo mais rápidas, uma vez que está dissolve menos Oxigênio que o PFCE, e assim saturam mais rápido, como pode ser visto na Figura 125.

### 5-3-b: Comparação dos $K_G$ s utilizando as duas fases líquidas.

As comparações entre os  $K_G$ s obtidos são mostradas individualmente por tipo de oxigenador no Anexo V, neste item é mostrada uma montagem com os gráficos dos três modelos.

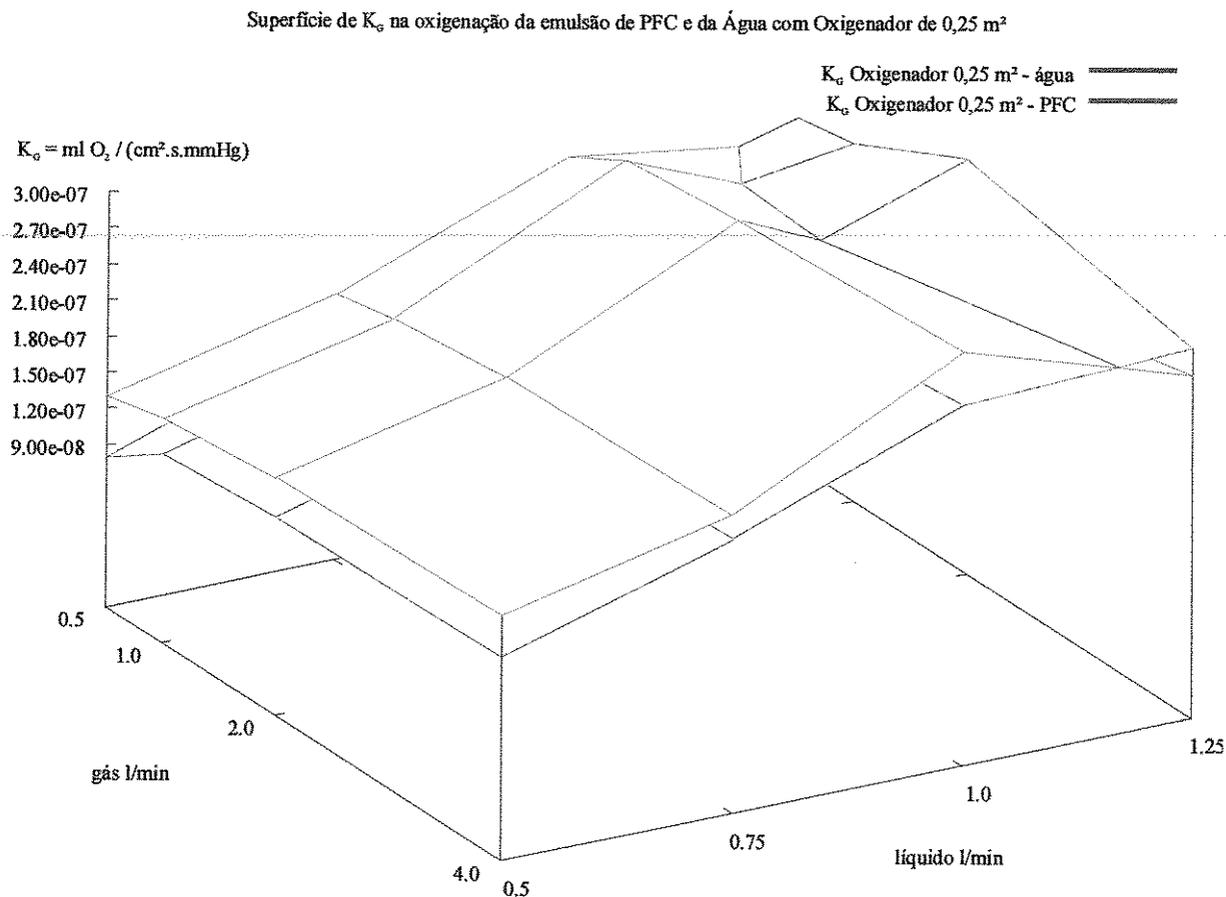


Figura 126: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

A PFCE é ligeiramente mais viscosa que a água, isso faz com que a mesma vazão gere uma força de reação do enrolamento também ligeiramente maior, e isso força um caminho preferencial também maior, como pode ser visto na Figura 126. O colapso na eficiência quando utilizada a emulsão é bastante mais acentuado.

Superfícies de  $K_G$  na Oxigenação de emulsão de PFC e de Água com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

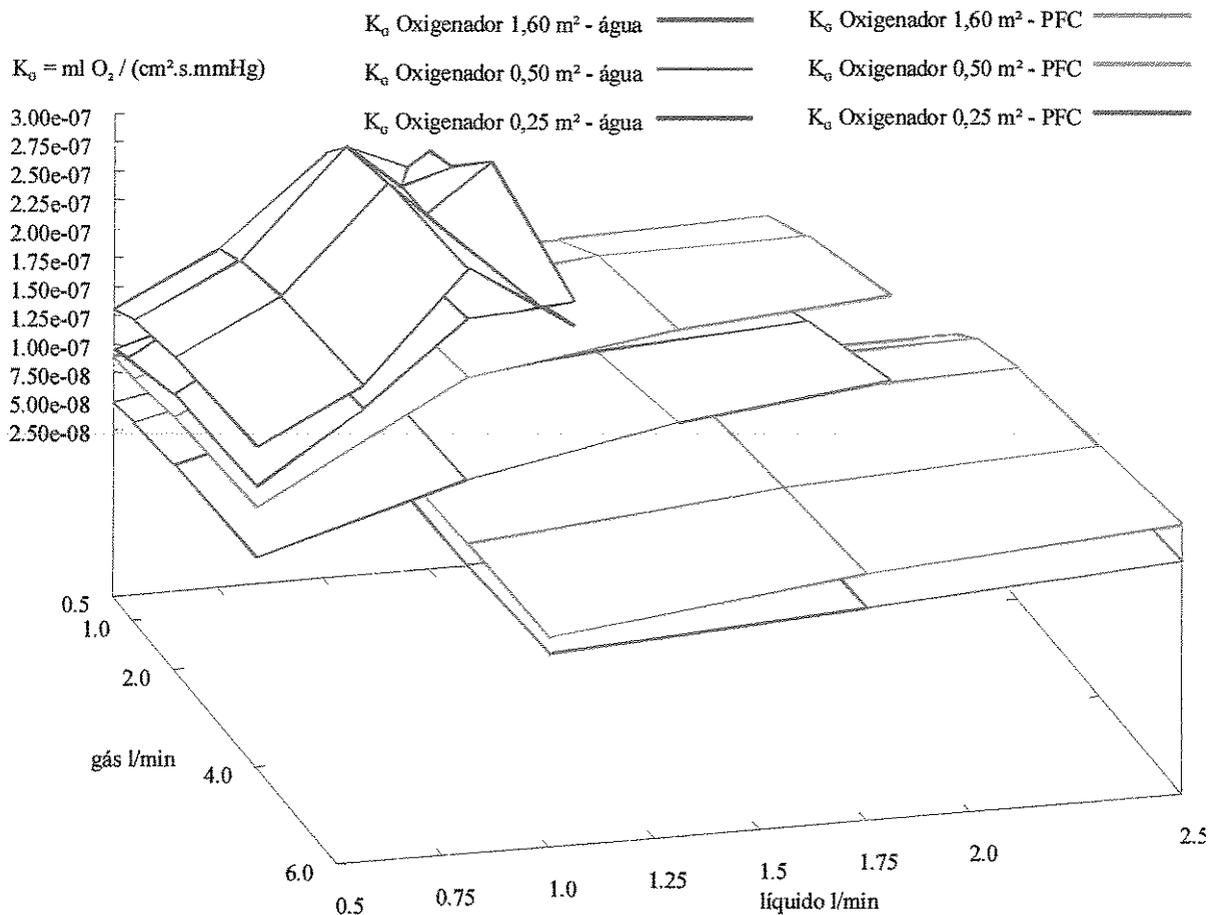


Figura 127: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Como pode ser visto na Figura 127, o  $K_G$  em condições normais de utilização dos dispositivos apresenta um valor ligeiramente favorável ao PFCE, isso pode ser interpretado como devido a uma maior solubilidade ao Oxigênio na camada limite, o que repercute como uma transferência ligeiramente maior por unidade de área.

### 5-3-c: Comparação dos $K_{Vs}$ utilizando as duas fases líquidas.

As comparações entre os  $K_{Vs}$  obtidos são mostradas individualmente por tipo de oxigenador no Anexo V, neste item é mostrada uma montagem com os gráficos dos três modelos e a coluna.

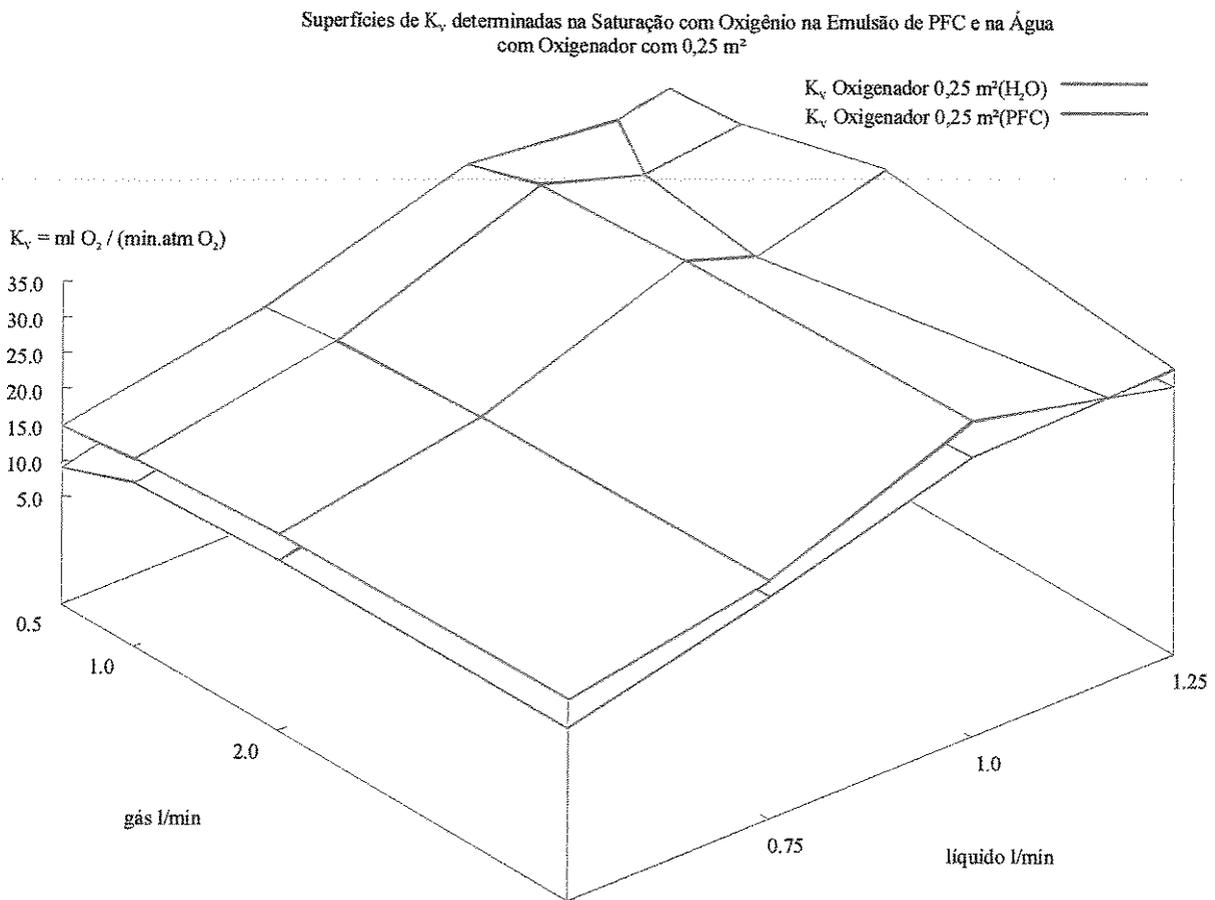


Figura 128: Mapa tridimensional dos  $K_{Vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Pelo mesmo motivo exposto na argumentação da Figura 126, pode ser observado na Figura 128 o colapso maior na transferência de massa para o oxigenador quando utilizado o PFCE.

Superfícies de  $K_v$ , determinadas na Saturação de Oxigênio da Emulsão de PFC e da Água com Oxigenadores e Coluna com 0,25 0,5 1,6 e 2,5 m<sup>2</sup>

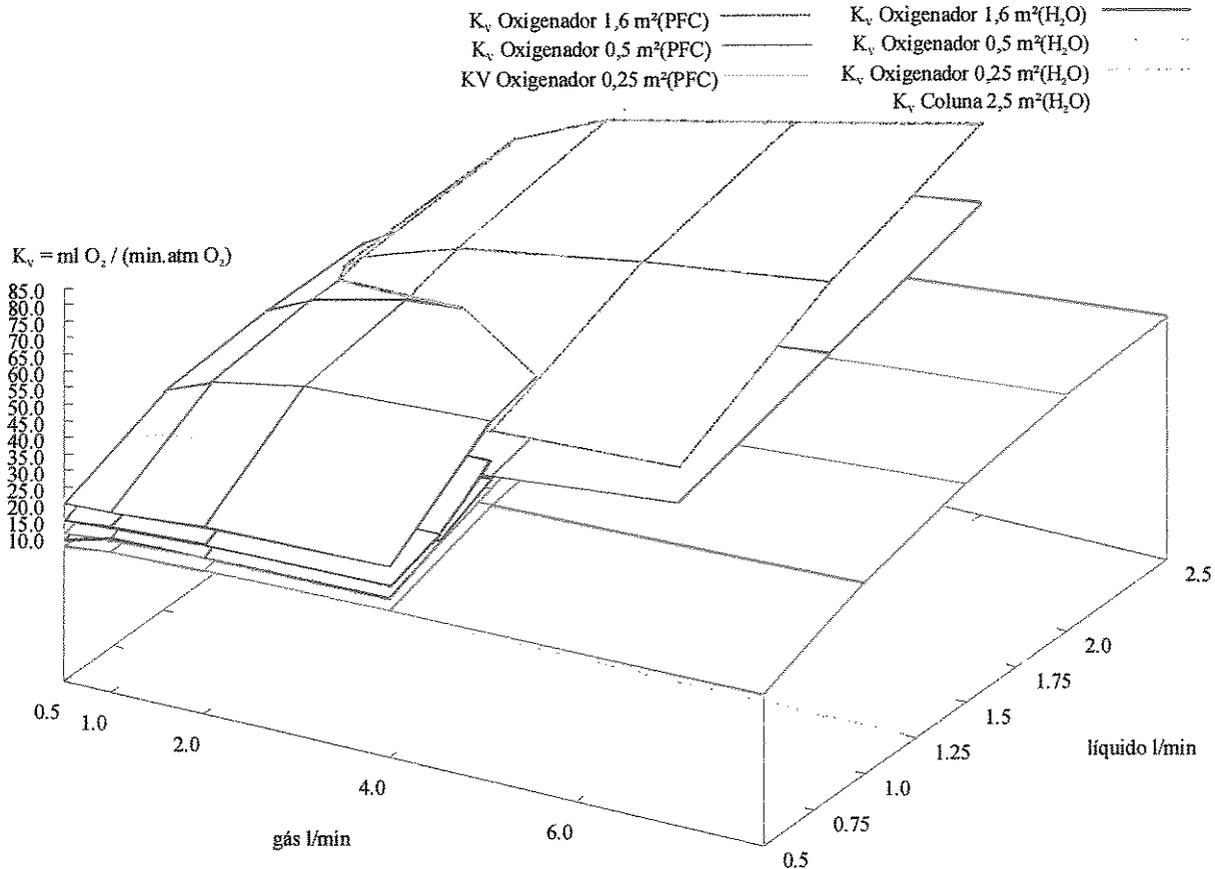


Figura 129: Mapa tridimensional dos  $K_{vS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

O gráfico da Figura 129 compara a capacidade de transferência dos diversos dispositivos estudados com água e com PFCE. A coluna de recheio com 2,5 m<sup>2</sup> de área de troca não supera nas mesmas condições de vazão nenhum dispositivo, mas aumentando as vazões ela é capaz de superar o oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>. O máximo transporte de gás foi obtido pelo oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup> com PFCE, no entanto é necessário cuidado.

#### 5-4: Comparação realizada com os resultados dos ensaios de forma normalizada:

##### 5-4-a: Comparação de $K_L$ as com escalas normalizadas.

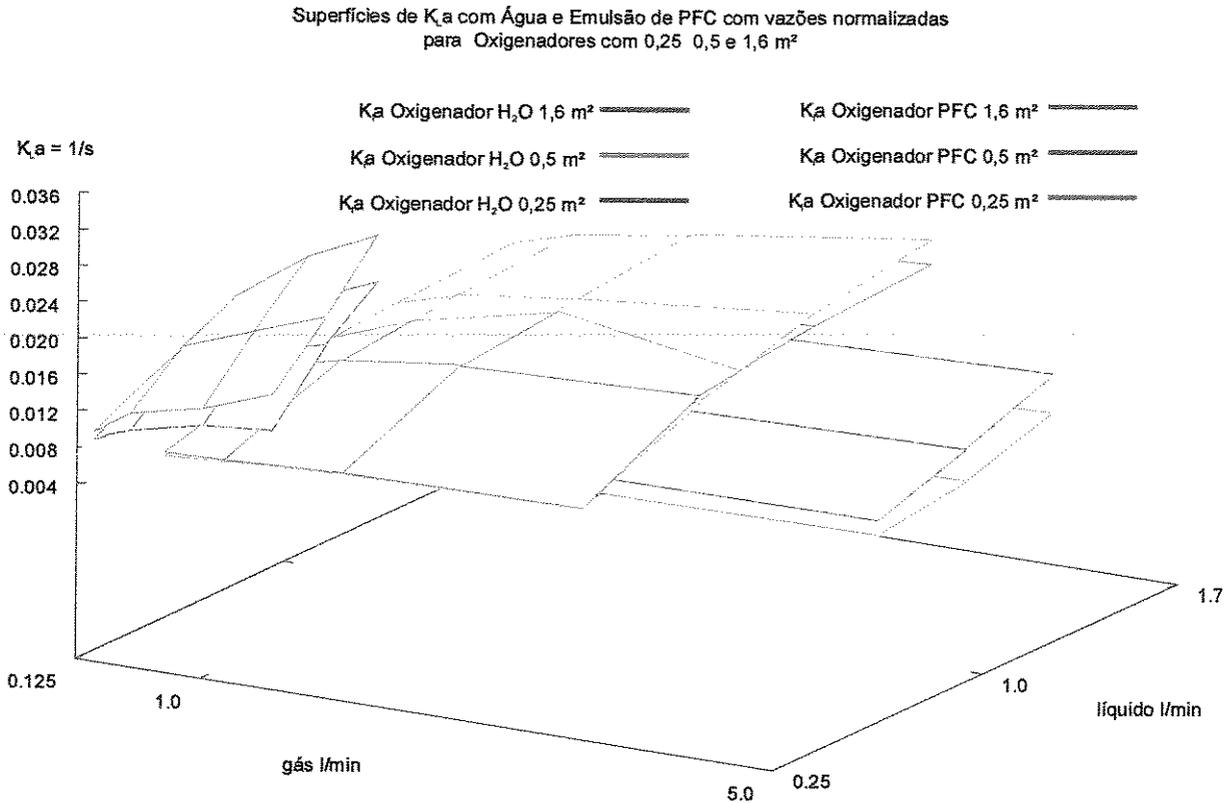


Figura 130: Mapa tridimensional dos  $K_L$ as obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.

Ao se normalizar as vazões, como é mostrado na Figura 130, as amplitudes dos intervalos se tornam relativas aos valores especificados para as vazões, por isso o oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup> que foi submetido à vazão mais alta aparece no canto das menores vazões para as duas fases.

Nesta sobreposição de figuras é possível verificar que os planos gerados pelo oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup> com água e com PFCE, se sobrepõem em vazões de líquido menores que a de trabalho especificada, não sendo a intersecção tão afetada pela vazão de gás. Isso evidencia que o filme líquido é o de maior resistência e que controla a transferência.

#### 5-4-b: Comparação de $K_G$ s com escalas normalizadas.

Superfícies de  $K_G$  com PFC e vazões normalizadas, com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

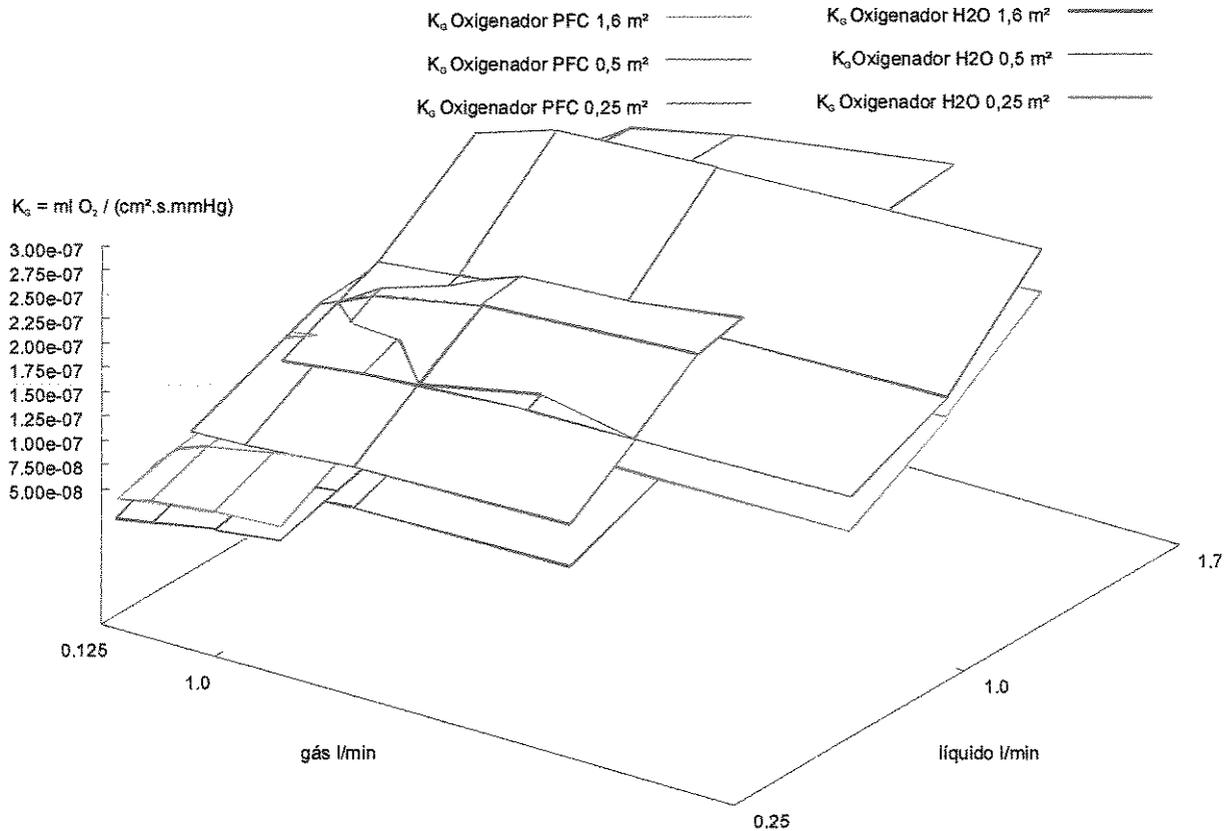


Figura 131: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.

Conforme mostrado na Figura 131, o embaralhamento dos planos de  $K_G$  quando as vazões normalizadas tendem a 1 para gás e 1 para líquido é sinal de um bom resultado tanto para o método quanto para os dispositivos, pois significa que a engenharia de desenvolvimento destes três modelos foi muito cuidadosa e gerou três modelos maximizados no aproveitamento de material e no desenho, de modo que suas eficiências são próximas, nas condições recomendadas para utilização.

Analisando os dados verifica-se que há um embaralhamento para os planos determinados com água e outro para os determinados com PFCE.

### 5-4-c: Comparação de $K_{Vs}$ com escalas normalizadas.

Superfícies de  $K_v$  com PFC e Água e vazões normalizadas, com Oxigenadores com 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup>

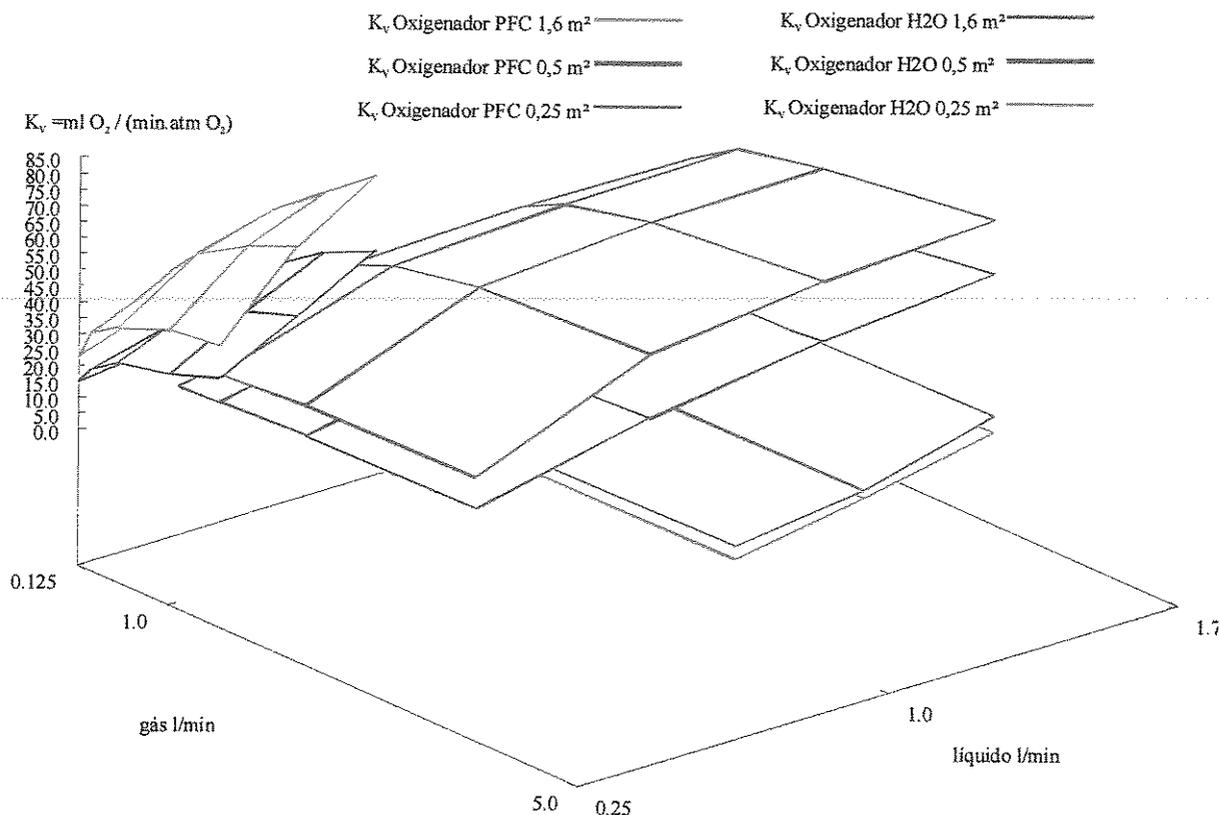


Figura 132: Mapa tridimensional dos  $K_{Vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE. Vazões de gás e líquido, normalizadas em relação às vazões recomendadas pelo fabricante.

Os planos de  $K_{Vs}$  normalizados, ao contrário dos de  $K_G$ , são bem separados como pode ser visto na Figura 132. Os  $K_V$  representam a capacidade total de transferência de um dispositivo, e neste caso o efeito do tamanho da área aparece. O plano menor acima é o do oxigenador maior, o de 1,6 m<sup>2</sup>, o intermediário e de maior área é do de 0,5 m<sup>2</sup>, e o menor é o do de 0,25 m<sup>2</sup>, sendo que os dados relativos aos ensaios com o problema de colapso não foram mostrados nesta figura, para não gerar uma poluição visual desnecessária.

### 5-5: Resultados das correlações empíricas.

Tabela 33: Constantes ajustadas para as Correlações Empíricas para cada dispositivo estudado, com água e com emulsão de perfluorcarbono. São mostradas as constantes encontradas das melhores formas para o ajuste para a correlação simples e para a cexp com 12, 16 ou 25 pontos. O número de algarismos significativos é necessário devido há sensibilidade dos modelos.

| Dispositivo /liquido | Tipo de correlação | Erro Médio | a0       | a1        | a2        | a3          |
|----------------------|--------------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|
| 0,25-H2O             | cp4x4x12           | 0,000192   | 0,017044 | -0,012588 | -0,158346 | 0,338624339 |
| 0,25-H2O             | cexp12             | 0,000359   | 0,011926 | 0,146239  | 1,079809  | *           |
| 0,25-PFCE            | cpl4x4x12          | 5,52E-05   | 0,002882 | 71663,65  | 1,39E-20  | 4,4441E+27  |
| 0,25-PFCE            | cexp12             | 0,000338   | 0,00853  | 0,083694  | 0,9199032 | *           |
| 0,5-H2O              | cpl4x4x16          | 0,000365   | 0,000309 | 2904,3    | 0,0002562 | 52,49908896 |
| 0,5-H2O              | cexp16             | 0,00073    | 0,009319 | 0,184232  | 0,629296  | *           |
| 0,5-PFCE             | cpl4x4x16          | 0,000294   | 0,000651 | 357,3298  | 0,0072403 | 6,166739542 |
| 0,5-PFCE             | cexp16             | 0,001027   | 0,009287 | 0,173215  | 0,5287836 | *           |
| 1,6-H2O              | cpl4x4x15          | 0,000529   | 1,07E-09 | 61267,97  | 78516340  | 1,06186E-08 |
| 1,6-H2O              | cexp15             | 0,000843   | 0,009212 | 0,384042  | 0,4989133 | *           |
| 1,6-PFCE             | cpl4x4x15          | 0,000356   | 3,32E-09 | 5425,771  | 392433099 | 7,65027E-09 |
| 1,6-PFCE             | cexp15             | 0,000596   | 0,008423 | 0,313185  | 0,5264636 | *           |
| Col-H2O              | cpl4x4x25          | 0,000714   | 0,000514 | 8,363106  | 0,3429655 | 1,244278983 |
| Col-H2O              | cexp25             | 0,00084    | 0,004985 | 0,434134  | 0,4704305 | *           |

Tabela 34: Continuação das constantes achadas para as Correlações Empíricas

| Oxigenador /liquido | Tipo de correlação | a4        | a5       | a6       | a7        | a8        |
|---------------------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0,25-H2O            | cp4x4x12           | -0,175678 | 0,003548 | 0,001285 | -0,001599 | 0,0002819 |
| 0,25-H2O            | cexp12             | *         | *        | *        | *         | *         |
| 0,25-PFCE           | cpl4x4x12          | 6,2E-13   | 1,010647 | 1,268144 | 0,869548  | 1,0210215 |
| 0,25-PFCE           | cexp12             | *         | *        | *        | *         | *         |
| 0,5-H2O             | cpl4x4x16          | 0,492646  | 3,68908  | 0,320036 | 1,549699  | 0,9459543 |
| 0,5-H2O             | cexp16             | *         | *        | *        | *         | *         |
| 0,5-PFCE            | cpl4x4x16          | 0,780526  | 1,33     | 1,103831 | 0,904162  | 1,0167036 |
| 0,5-PFCE            | cexp16             | *         | *        | *        | *         | *         |
| 1,6-H2O             | cpl4x4x15          | 61,86781  | 5,501888 | 0,449617 | 1,177826  | 0,9883797 |
| 1,6-H2O             | cexp15             | *         | *        | *        | *         | *         |
| 1,6-PFCE            | cpl4x4x15          | 61,86781  | 5,155711 | 0,430401 | 1,201944  | 0,9863718 |
| 1,6-PFCE            | cexp15             | *         | *        | *        | *         | *         |
| Col-H2O             | cpl4x4x25          | 0,988032  | 5,700351 | 0,465465 | 1,156946  | 0,9908343 |
| Col-H2O             | cexp25             | *         | *        | *        | *         | *         |

**5-6: Comparação entre o método de transferência de massa e o método da perda de carga para avaliar a área disponível para troca de gases.**

A comparação entre os resultados obtidos por este método indireto, baseado na perda de carga <sup>92</sup> e o método direto baseado em transporte de massa <sup>90</sup>, mostrou coerência entre os resultados, os quais foram normalizados em relação ao oxigenador de menor área de troca e mostrados na Tabela 35, sendo que a resolução do método indireto, baseado na perda de carga, devido a sua simplicidade é melhor.

No teste com fluxo de gás o alinhamento dos pontos experimentais é uma evidência de que o escoamento seja do tipo laminar, o que afasta a hipótese de que diferenças na rugosidade tenham tido ou venham a ter importante influência sobre o desempenho do teste, conferindo uma certa imunidade a esta variável.

Tabela 35: Comparação entre os resultados obtidos na avaliação da área útil para troca. O Ox-B, de menor área, foi tomado como padrão para comparação.

| Unidade | $\Delta p(\text{Ox-B})$<br>/ $\Delta p$ | Sd +-% | $K_{La} / K_{La}(\text{Ox-B})$ | Sd +-% |
|---------|-----------------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| Ox-A    | 1,032                                   | 1,24   | 1,042                          | 2,96   |
| Ox-B    | 1                                       | 0,68   | 1                              | 2,72   |
| Ox-C    | 1,073                                   | 0,48   | 1,085                          | 3,51   |

A pedido do fabricante, o número de fibras de “projeto” não será mencionado, mas supondo que o Oxigenador B, Ox-B, tenha 1000 fibras viáveis abertas ao fluxo de gás, poderíamos dizer que o Ox-A pelo teste da transferência de massa teria  $1042 \pm 31$  fibras e pelo teste do fluxo de gás teria  $1032 \pm 13$  fibras. Já o Ox-C pelo método da transferência de massa teria  $1085 \pm 38$  fibras, e pelo método do fluxo de gás teria  $1073 \pm 5$  fibras. A comparação visual dos resultados e da qualidade de ambos os métodos é mostrada na Figura 133, onde massa refere-se ao teste baseado na transferência de massa e pressão, ao teste baseado no fluxo de gás ou na queda de pressão ou perda de carga sofrida pelo gás.

Ambos os métodos são satisfatórios, no entanto, a superioridade na qualidade dos resultados obtidos, aliada a facilidade de aplicação, fazem do método do fluxo de gás, uma boa opção para a aplicação industrial.

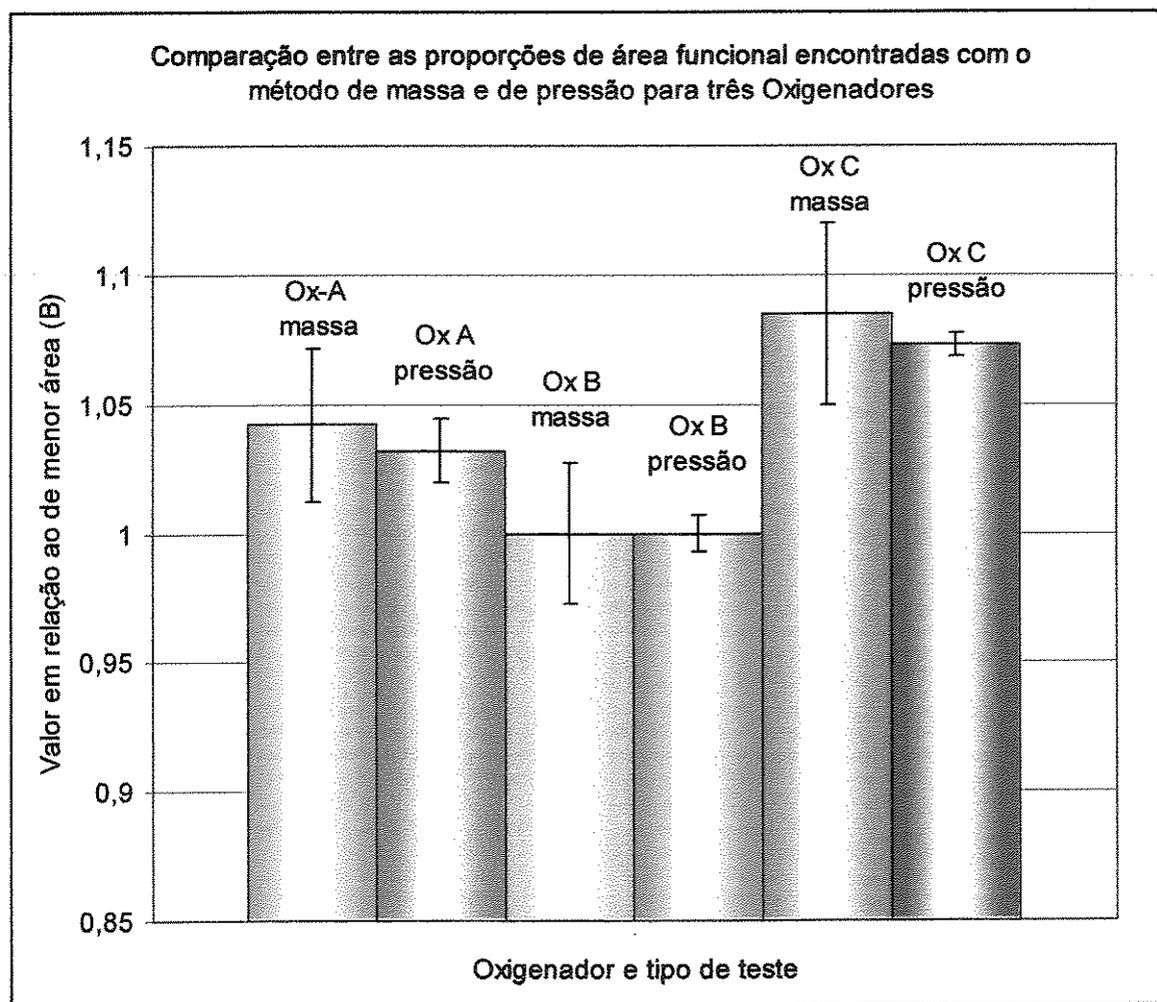


Figura 133: Comparação dos resultados e das resoluções obtidas pelos métodos da transferência de massa e da perda de carga na fase gasosa na avaliação da área efetiva de troca para três oxigenadores de membrana.

*Comentário:* Existem relatos de perfusionistas de que alguns oxigenadores de membrana depois de montados no circuito de circulação extra corpórea, quando aberto o gás, simplesmente “espumam”, ou seja, vaza gás através das membranas semi-permeáveis para o sangue, o que é altamente perigoso para o paciente.

O que pode estar acontecendo?

É possível que o oxigenador apesar de ter sido aprovado no teste de estanqueidade, não tenha área de troca suficiente. Como foi descrito neste trabalho, a área de troca é proporcional ao número de fibras viáveis, e este número por sua vez é proporcional à área de corte transversal por onde escoar o gás utilizado pelo aparelho. Uma vez que o perfusionista ajusta a vazão do gás, se não houver área de troca suficiente, não só não haverá uma troca adequada, como ao escoar por dentro de um número menor de fibras, o gás na vazão padrão ajustada precisará passar mais rápido, gerando uma queda de pressão maior, e assim superando a pressão de equilíbrio com o sangue do outro lado da parede da fibra. Resultado, o gás sai em bolhas do lado do sangue, formando espuma. Esta é mais uma justificativa para se efetuar o teste da perda de carga na fase gasosa desenvolvido neste trabalho.

## Capítulo 6

### Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

O objetivo deste trabalho foi inicialmente desenvolver um método para avaliar a área funcional de oxigenadores de membrana utilizando água e um substituto sintético para as funções de transferência de gases do sangue, no caso uma emulsão de perfluorcarbono. No entanto, instrumentos e a montagem de teste precisaram ser estudados, a própria emulsão necessitou de um método para avaliar sua funcionalidade, os oxigenadores e a coluna construída para comparação foram estudados quanto às suas capacidades de transferência de massa e um outro método foi desenvolvido para avaliar indiretamente, através de um fluxo de gás, a área de troca disponível nas membranas. Diversas conclusões foram tiradas a partir deste trabalho, por isso são apresentadas em itens.

#### **6-1: Conclusões sobre instrumentos e montagens experimentais.**

Para principiantes, em se tratando de oximetria, e devido às baixas concentrações, muita atenção deve ser dispensada aos procedimentos. Um atraso mantendo uma amostra durante alguns minutos em uma seringa pode comprometer os resultados.

O oxímetro polarográfico YSI 5300 apesar de ter uma repetibilidade de resultados bastante dependente da montagem, possui uma notável linearidade e boa resposta temporal para este tipo de estudo.

O analisador de gases ABL 5 é um instrumento de alta qualidade e independente da montagem, no entanto produz resultados crescentemente errados com pressões parciais de

Oxigênio acima de 400 mmHg. Como dificuldade adicional apresenta uma taxa de leitura muito baixa, ou seja, uma a cada 2,5 minutos. Porém é um instrumento útil e preciso para o fim para o qual foi desenvolvido: o uso hospitalar.

Os testes de interações entre o oxímetro YSI 5300 e o tipo de instalação levaram a concluir que a temperatura é o item mais importante a ser controlado, seguida pelas características da geometria da cela acumuladora.

## **6-2: Conclusões sobre teste de emulsão de perfluorcarbono.**

Os instrumentos ABL 5 e YSI 5300 não percebem o Oxigênio que está na fase emulsificada.

O procedimento apresentado mostrou um grau satisfatório de precisão e exatidão podendo os dados obtidos, por suas qualidades estatísticas, serem considerados como confiáveis. Pode ser utilizado em ensaios para avaliar a solubilidade de gases em emulsões destinadas a diversos fins.

A exatidão pode ser verificada comparando-se o valor obtido para  $H_{(H_2O)}/H_{(PFC)} = 13,9 \pm 0,3$  como sendo de 14, igualando-se ao valor fornecido pelo fabricante, que se pode considerar como boa, sendo o produto também considerado em bom estado.

A precisão pode ser avaliada pela proporção entre o intervalo de confiança para 99% de probabilidade, e o valor obtido, ou seja,  $\pm 0,3$  para 13,9 sendo satisfatório para sua utilização.

A emulsão estudada mostrou uma estabilidade melhor do que a esperada ao longo do tempo, pois já tinha seis anos, sendo que a validade é de apenas um ano.

O problema de acesso ao soluto dissolvido em fases emulsificadas, em sistemas com equilíbrio de fases, onde só uma das fases entra em contato com o sensor, é bastante comum. Portanto este método pode ser utilizado em outras aplicações.

A partir de um volume conhecido e utilizando-se este método, um componente pode ser identificado pela sua capacidade de seqüestrar o soluto de um meio, neste caso o oxigênio.

### **6-3: Conclusões sobre de área de troca disponível em oxigenadores de membrana com gás.**

O aumento da vazão de gás favorece a resolução entre os oxigenadores testados.

O teste é sensível de forma exponencial à redução no número de fibras viáveis.

A utilização de um fluxo em escoamento laminar, torna este método menos susceptível às possíveis variações na rugosidade da superfície interna da fibra.

O teste é executado sem comprometer o oxigenador, o que o torna útil para ser aplicado em todas as unidades fabricadas.

O método é eficaz para comprovar se a área de troca disponível está de acordo com as especificações do fabricante.

Foi demonstrado que o método fornece uma boa resolução no teste dos oxigenadores. Foram revelados detalhes que permitiram estabelecer diferenças de desempenho entre as unidades testadas.

Este método de avaliação da área disponível para troca, embora seja um processo indireto, se comparado ao método envolvendo transporte de massa, citado na referência, é mais preciso e rápido.

### **6-4: Conclusões sobre transferência de massa em oxigenadores de membrana.**

A determinação de uma faixa de seleção de dados para o processo de determinação do  $K_{LA}$  pode incrementar a precisão dos coeficientes determinados.

Uma pequena porcentagem de apenas 3,7 % w/v de perfluorcarbono emulsificado pode aumentar a sensibilidade do método pois leva a valores de  $K_V$  para as mesmas vazões, até aproximadamente 40% maiores do que utilizando apenas água, ou seja, a transferência de Oxigênio é aumentada em até 10,8 vezes a concentração de PFC utilizada.

Enrolamentos de membranas forçados por excesso de fluxo de fase líquida podem se deformar, permitindo a formação de caminhos preferenciais, reduzindo perigosamente a transferência de massa.

A retenção de líquido em sistemas à base de membrana é muito menor do que em sistemas a base de recheio de anéis tipo Raschig, para uma mesma capacidade de troca.

Ao colocar os valores de  $K_G$ s obtidos para vários modelos de oxigenadores na forma de planos, e os sobrepor em um gráfico, pode-se comparar a eficiência com a qual as fibras estão trabalhando em cada projeto.

Ao se normalizar as vazões das fases líquida e gasosa do gráfico descrito acima em relação as vazões recomendadas pelo fabricante, pode-se verificar se o projeto está operando com maior ou menor eficiência e em quais condições.

#### **6-4-a: Teste de área disponível para troca de massa.**

O teste dinâmico para transferência de massa fornece dados com boa resolução para a avaliação de oxigenadores de membrana e a devida certificação de sua área disponível para troca de gases.

#### **6-4-b: Coeficientes de troca de massa em oxigenadores de membrana.**

As vazões de gás e líquido podem influenciar os valores da transferência de massa em mais de cinco vezes, o que realça a importância do conhecimento e do controle das vazões.

A recirculação da fase líquida através do oxigenador, aumentando a vazão de líquido pode ser uma técnica útil para aumentar a transferência de massa, quando possível.

A transferência de massa em sistemas à base de membranas é muito mais eficiente que no sistema baseado em recheio de anéis tipo Raschig.

#### **6-5: Sugestões para próximos trabalhos.**

Testar oxigenadores de membrana com água utilizando o método estacionário, ou seja, o do balanço.

Testar qual é a transferência de massa com vazão de gás muito baixa ou tendendo a zero. Verificar se causa sucção.

Testar a coluna com emulsão de perfluorcarbono.

Verificar o efeito da variação peristáltica da vazão causada pela bomba nos coeficientes de transporte de massa.

Melhorar a resolução do teste de transferência de massa para tentar resolver o sistema de resistências das fases líquida e gasosa e na membrana, visando entender o mecanismo dentro da membrana.

## Referências Bibliográficas

Ref[1]: Association for the Advancement of Medical Instrumentation. *Standards for Blood gas Exchange Devices*. Arlington 1976, USA, 11p.

Ref[2]: Novello, Wldyr Parolari; Dispositivo para Oxigenação e remoção de Dióxido de Carbono do Sangue em Circuitos de Circulação Extra Corpórea, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1996.

Ref[3]: Novello, Wldyr Parolari; Sistema para Concentração e Lavagem de Hemácias, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1991.

Ref[4]: Biscegli, José Francisco; Desenvolvimento de um Sistema de Oxigenação Artificial Tipo Membrana Capilar, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1989.

Ref[5]: Souza, Maria Helena L., Elias, Décio O., *Fundamentos de Circulação Extra Corpórea* Volume 1, Centro Editorial Alfa Rio, 1995.

Ref[6]: Greemburg, A. Gerson, Clinical Implications of Blood Substitutes, *Artificial Organs*, 22 (1) : pp47-49, 1998.

Ref[7]: Tremper, Kevin K., Cullen, Bruce F., U. S. Clinical Studies of the Treatment of Anemia with Fluosol-DA 20%, *Artificial organs*, 8(1), pp19-24, 1984.

Ref[8]: Rudowski, Witold, Modern oxygen carriers: State of the art 1990. *Materia Medica Polona*, V 1 (73), pp3-7, 1990.

Ref[9]: Chang, T. M. S., Farmer, M., Geyer, R. P., Moss, G., Blood Substitutes Based on Modified Hemoglobin and Fluorochemicals. *Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs*, V 33 pp 819-823, 1987.

Ref [10]: Lima, Claudia de Castro, Sangue artificial, Parece, mas não é, *Super Interessante*, 191-b, 2003, pp46-49.

Ref[11]: Bunn, Franklin H. , Use of Hemoglobin as a Blood Substitute, *American Journal of Hematology*, V 42 pp 112-117, 1993.

Ref[12]: Rémy, B., Deby-Dupont, G., D'Ans , V., Ernest, P., Lamy, M., Substituts des globules rouges: émulsions de fluorocarbures et solutions d'hémoglobine, *Ann Fr Anesth. Réanim.* V 18, pp 211-224. 1999.

Ref[13]: Frietsch, T., Lenz, C., Waschke, K. F., Artificial Oxygen Carriers, *European Journal of Anaesthesiology*, V 15, pp 571-584, 1998.

Ref[14]: Goodall, James, *SR-71 BlackBird*, Squadron Signal Publications Inc., 1<sup>st</sup> Ed., ISBN 0-89747-338-8, Texas, USA, 1995.

Ref[15]: Clark Jr, Leland C., Golan, Frank, Survival of Mamals Breathing Liquids Equilibrated with Oxygen at Atmospheric Pressure, *Science* 152, pp1755-1756, 04 June 1966.

Ref[16]: Geyer, R.P., Monroe, R.C., Taylor K., Survival of rats having red cells totally replaced with emulsified fluorocarbon. *Fed. Proc.*, V27, pp 384, 1968.

Ref[17]: Green Cross Coporation, FC-43 Emulsion Technical Information Ser. No 3, september 4, 1976.

Ref[18]: Takagi, Masanosuke ; Hayashi, Katsumi, Polarographic studies on Perfluorocarbon Emulsion, Hemoglobin and Erythrocyte as Oxygen Carriers, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, V 7 , pp 291-307, 1980.

Ref[19]: Hayashi, Katsumi ; Takagi, Masanosuke, Polarographic Study on the Transportation of Oxygen by Perfluorocarbon Emulsion as Artificial Blood, *The Chemical Society of Japan*, V 53 , pp 3585 – 3589, 1980.

Ref[20]: Matiason, Bo, Adlercreutz, P., Use of Perfluorochemicals for Oxygen Supply to immobilized Cells, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, V 413 (DEC), pp 545-547, 1983.

- Ref[21]: Riess, Jean G.; Le Blanc, Maurice, Solubility and transport phenomena in perfluorochemicals relevant to blood substitution and other biomedical applications, *Pure and Applied Chemistry*, V54 (12), pp 2383-2406, 1982.
- Ref[22]: Morrison, R., Boyd, R., *Química Orgânica*, Fundação Calouste Gulbenkian, 7<sup>ed</sup>, Lisboa.
- Ref.[23]: Austin, George T., *Shreve's Chemical Process Industries*, 5<sup>ed</sup>, McGraw-Hill Company, p. 352-355, 1984.
- Ref[24]: Draffehn, Joachin, Reichelt, Helmut, Lederer, Siegfried, The distribution of oxygen in the perfluorocarbon emulsion, Aqueous phase and red blood cells during and after exchange of blood in different ways in rats, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 238, 1985.
- Ref[25]: Islamov B. I., Saxon, M. E., Vorobev, S. I., Pertsov, A., Kajdash, A., Fluorochemical emulsions and myocardial protection against an anoxia (theory and experiments), *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 237, 1985.
- Ref[26]: Ivanitskii, G. R., Obratsov, V. V., Sklifas, A. N., Sologub, G. R., Perfluorochemicals and biological membranes: interactions and related problems, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 242, 1985.
- Ref[27]: Schulze, Jurgen; Prescher, Dietrich, Nonionic surfactants from fluoroalkenes, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 243, 1985.
- Ref[28]: Arlen, Christian, Le Blanc, Maurice, Riess, Jean G., Progress in preparation of perfluorocarbon-based intravascular oxygen carriers, materials and methods, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 246, 1985.
- Ref[29]: Meinert, Hasso, Gross, Udo, Rüdiger, Stephan, Kolditz, Lothar, Aspects of chemical and physical properties of perfluorochemicals and their emulsions, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 230, 1985.
- Ref[30]: Maevsky, E. I., Biological and physicochemical demands to perfluorochemicals (pfc) used as component of biocompatible emulsions, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 231, 1985.
- Ref[31]: Rüdinger, Stephan, Meinert, Hasso, Electrochemical fluorination as a route to perfluorocarbons useful for blood substitution, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 232, 1985.
- Ref[32]: Kupfer, Michael, Gast, Klaus, Zirwer, Dietrich, Meinert, Hasso, Determination of particle size in perfluorocarbon emulsions, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 233, 1985.
- Ref[33]: Hidelbrand, J.H., *The Solubility of Nonelectrolites*, Reinhold, New York, 1950.

Ref[34]: Yokoyama, Kazumasa; Suyama, Tadakazu; Okamoto, Hiroyuki; Watanabe, Masahiro; Ohyanagi, Harumasa; Saitoh, Yoichi, A Perfluorochemical emulsion as oxygen carrier, *Artificial Organs*, V8 (1), pp34-40, 1984.

Ref[35]: Riess, Jean G., Reassessment of the criteria for the selection of perfluorochemicals for the second generation blood substitutes: Analysis of structure/property relationships, *Artificial Organs*, V8 (1), pp 44-56, 1984.

Ref[36]: Kupfer, Michael; Gast, Klaus; Zirwer, Dietrich; Meinert, Hasso, Determination of particle size in perfluorocarbon emulsions, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 233, 1985.

Ref[37]: Meinert, Hasso, Gross, Udo, new surfactants for preparing perfluorocarbonemulsions, *Journal of fluorine Chemistry*, V29 (1-2), pp 236, 1985.

Ref[38]: Riess, Jean G., Orientations actuelles en matière de transporteurs d'Oxygène in vivo les émulsions de fluorcarbures, *Journal de Chimie Physique*, V 84 (9), pp1119-1127, 1987.

Ref[39]: King, Alistair T., Mulligan, Bernard J., Lowe, Kenneth C., Perfluorochemicals and Cell Culture, *Biotechnology*, V7, pp1037-1042, 1989.

Ref[40]: Mattiason, Bo; Adlercreutz, B., Perfluorochemicals in Biotechnology, *Trends in Biotechnology*, V 5 pp 250-254, 1987.

Ref[41]: Lowe, K. C., perfluorocarbons as Oxygen-Transport Fluids, *Comp. Biochem. Physiology*, V 87 A (4), pp 825-838, 1987.

Ref[42]: Polack, Gerald L., Holm, Garry T., Kennan Richard P., Solubility of gases in blood plasma, in a perfluorocarbon blood substitutes, and mixtures, *Faseb Journal*, V6 (1), 2000.

Ref[43]: Riess, Jean G., Fluorocarbon-based Oxygen Carriers: new orientations, *Artificial Organs*, V 15 (5), pp 408-413, 1991.

Ref[44]: Mattiason, Bo; Adlercreutz, Patrick, Perfluorochemicals in Biotechnology, *Trends in Biotechnology*, V5 , pp250-254, september 1987.

Ref[45]: Keipert, P.E., Perflubron Emulsion (Oxygent): A Temporary Intravenous Oxygen Carrier, *Anesthes. Intensiv. Notfallmed Schmerzther*, V 36, sup 2, pp s104-s106, 2001.

Ref[46]: Milus, Alain, Greiner, Jacques; Riess, Jean G., Improvement in emulsification ease, particle size reduction and stabilization of concentrated fluorocarbon emulsions by small amounts of (D-glucosyl)[2-(perfluoroalkyl)ethyl]phosphates as surfactants, *Colloids and Surfaces*, V 63, pp 281-289, 1992.

- Ref[47]: Riess, Jean G., Kraft, Marie Pierre, Fluoronated materials for in vivo oxygen transport ( blood substitutes ), diagnosis and drug delivery, *Biomaterials*, V19, pp 1529-1539, 1998.
- Ref[48]: Riess, Jean G., Fluorous micro and nanophases with a biomedical perspective, *Tetrahedron*, V58 pp 4113-4131, 2002.
- Ref[49]: Scott, Mitchell G.; Kucik, Dennis F.; Goodnough, Lawrence T.; Monk, Terri G. , Blood substitutes: evolution and future applications., *Clin. Chem.* 43 (9), pp1724-1731, 1997.
- Ref[50]: Shah-Niraj; Mehra-Anurag, Modeling of oxygen uptake in perfluorocarbon emulsions: Some comparisons with uptake by blood. *ASAIO-Journal*. V 42 n 3 May-Jun, pp 181-189, 1996.
- Ref[51]: Patel,-S; Mehra,-A, Modeling of oxygen transport in blood-perfluorocarbon emulsion mixtures: Part I: oxygen uptake in tubular vessels. *ASAIO-J*. May-Jun; 44(3): pp144-56, 1998.
- Ref[52]: Audran,-M; Krafft,-M-P; de-Ceaurriz,-J; Mathurin,-J-C; Sicart,-M-T; Marion, -B; Fabre,-F; Bressolle,-F, Assay method for the perfluorooctyl bromide (perflubron) in rat blood by gas chromatography-mass spectrometry , *J-Chromatogr.-B.-Biomed-Appl.*, V 734 (2), pp267-276, 1999.
- Ref[53]: Ma, Zhongmin; Monk, Terri G.; Goodnough, Lawrence T.; McClellan, Adrain; Gawryl, Maria; Clark, Terri; Moreira, Paulo; Keipert, Peter E.; Scott, Mitchell G., Effect of hemoglobin- and Perflubron-based oxygen carriers on common clinical laboratory tests. *Clin. Chem.*, V 43 (9), pp1732-1737 , 1997.
- Ref[54]: Matsuda, Noriaki; Sakai, Kiyotaka, Yamamoto, Ken-ichiro, Iwasaki, Hideki, Effects of hollow fiber packing fraction on blood flow pattern and gas transfer rate of na intravascular oxygenator (IVOX), *Journal of Membrane Science*, V179, pp 231-241, 2000.
- Ref[55]: Zwischemberger, Joseph B., Tao, Weike, Bidani, Akhil, Intravascular membrane oxygenator and carbon dioxide removal devices: A review of performance and improvments, *ASAIO Journal*, V45, pp 41-46, 1999.
- Ref[56]: Von Segesser L.K.; Schaffner A.; Stocker R.; Lachat M.; Speich R.; Baumann P.C.; Turina M. , Extended (29 days) use of Intravascular gas Exchanger, *LANCET*, Vol 339, (8808), pp 1536-1536 , 1992.
- Ref[57]: Isoliani, G. D.; Chilaia, S. M.; Guskov, I. A.; Chkhaidze, Z. A.; Dvaladaze, G. A.; Khodeli, N. G.; Khmelevskoi, L. E.; Long-term circulatory and respiratory support using two artificial ventricles and a fluorocarbon oxygenator, *Artificial Organs*, V 11 (1), pp 31-38, 1987.
- Ref[58]: Turri, F; Della-Volpe, A.; Leirner, A. A., Clinical comparison of blood oxygenators: a retrospective study, *Artificial Organs*, V 19 (3), pp 263-266, 1995.

Ref[59]: Ferguson, Edgard R.; Clymer, Janice J.; Spruell, Rusell D.; Holman, Willian L.; Perfluorocarbon oxygen transport, a comparative study of four oxygenator designs, *ASAIO Journal*, V 40, pp M649-M653, 1994.

Ref[60]: Baba Yuso, Taenaka, Yoshiyuki, Akagi, Haruhiko, A volume controled liquid ventilator with pressure limit mode: Imperative expiratori control, *Artificial Organs*, V 20 (9), pp 1053-1056, 1996.

Ref[61]: Lund, Laura W., Hattler, Brack G., Federspiel, William J., Is condensation the cause of plasma leakage in microporous fiber membrane oxygenator?, *Journal of membrane Science*, V 147, pp87-93, 1998.

Ref[62]: Novello, Waldyr Paroleri, Braile, Domingo Marcolino, AVALIAÇÃO DA TENDÊNCIA AO VAZAMENTO DE PLASMA EM MEMBRANASUTILIZADAS EM CIRCULAÇÃO EXTRA COPÓREA, 15 COBEM Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Lindóia, 22-26 Novembro 1999.

Ref[63]: Von Segesser, Ludwig K., Tkebuchava, T.; Marty, B.; Leskosfk, B.; Tevaearai, H.; Intravascular gas transfer, membrane surface and sweeping gas flows are of prime importance, *ASAIO Journal*, V 43, M457-M459, 1997.

Ref[64]: Federspiel, William J., Hattler, Brack G., Sweep gas flowrate and CO<sub>2</sub> exchange in artificial lungs, *Artificial Organs*, V 20 (9), pp 1050-1052, 1996.

Ref[65]: Banford, C. H.; Al-Lamee, K. G.; Studies in ploymer surface modification and grafting for biomedical uses. 2. Application to arterial blood filters and oxygenators, *Polymer*, V 37 (22), pp 4885-4889, 1996.

Ref[66]: Ueyama, Keishi; Niimi, Yoshinari; Nosé, Yukihiko, How to test oxygenators for extracorporeal membrane oxygenation: Is the association for the advancement of medical instrumentation`s protocol enough?, *Artificial Organs*, V20 (7), pp 741-742, 1996.

Ref[67]: Matsuda, Noriaki; Sakai, Kiyotaka, Blood flow and oxygen transfer rate of an outside blood flow membrane oxygenator, *Journal of Membrane Science*, V170, pp 153-158, 2000.

Ref[68]: Tanishita, Kazuo; Panol, George; Richardson, Peter; Galleti, Pierre M.; Gas transport in the intracorporeal oxygenator with woven tubes, *Artificial Organs*, V 18 (11), pp 797-800, 1994.

Ref[69]: Lund, Laura, Federspiel, William J; Hattler, Brack G; Gas permeability of hollow fiber membranes in a gas-liquid system, *Journal of membrane Science*, V 117, pp 217-219, 1996.

Ref[70]: Doran, Pauline M., *Bioprocess Engeneering Principles*, pg190-217, Academic Press, 1995.

- Ref[71]: Kimua, Tetsuhiro; Kurosawa, Hiroshi; Goto Hiroshi; Kora, Shinishi; Ogata, Yoshitaka; Amano, Yoshifumi; Oxygen carrying capacity and oxygen supply rate of artificial oxygen carrier, neo red cell (NRC) , *Art. Cell, Blood Subs., and Immob. Biotech.*, V 26, I 5&6, pp455-464, 1998.
- Ref[72]: Katoh, Shigeo; Yoshida, Fumitake, Rates of absorption of oxygen into blood under turbulent conditions, *The Chemical Engineering Journal*, V 3, pp 276-285, 1972.
- Ref[73]: Katoh, Shigeo; Yoshida, Fumitake, Rate of blood oxygenation in a flat plate membrane oxygenator, *The Chemical Engineering Journal*, V 6, pp 51-58, 1973.
- Ref[74]: Katoh, Shigeo; Yoshida, Fumitake, Carbon dioxide transfer in a membrane blood oxygenator, *Annals of Biomedical Engineering*, V 6, pp 48-59, 1978.
- Ref[75]: Matsuda, N., Nakamura, M., Sakai, K., Kuwana, K., Tahara, K., Theoretical and experimental evaluation for blood pressure drop and oxygen transfer rate in outside blood flow membrane oxygenator, *Journal of chemical Engineering of Japan*, V 32 (6), pp752-759, 1999.
- Ref[76]: Dierickx PW; De Wachter DS; De Somer F; Van Nooten G; Verdonck PR. Mass transfer characteristics of artificial lungs , *ASAIO JOURNAL*, Vol 47, Iss 6, pp 628-633 2001.
- Ref[77]: Wickramasinghe, S. R.; Garcia, J. D.; Han, Binbing, Mass and momentum transfer in hollow fiber blood oxygenators, *Journal of Membrane Science*, 5352, pp1-10, 2002 (article in press).
- Ref.[78]: Smith, J.M., Van Ness, H.C., *Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química*, 3ed, Editora Guanabara Dois, 1980.
- Ref[79]: Cremasco, Marco Aurélio, *Fundamentos de Transferência de Massa*, Editora da Unicamp, 2ª Edição, 1998.
- Ref[80]: Treybal, Robert E.; *Mass Transfer Operations*, McGraw Hill, 3ª Ed., 1981.
- Ref[81]: McCabe, Warren L.; Smith, Julian C.; Harriot, Peter; *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw Hill, 4ª Ed., 1985.
- Ref[82]: Welty, James R., Wicks, Charles E., Willson, Robert E., *Fundamentals of Momentum, heat, and mass transfer*, Jhon Willey & Sons Inc., 2ª Ed., 1976.
- Ref[83]: Moutinho, Augusto M. C., Fronteira e Silva, Maria Eugenia S., Isidoro da Cunha, Maria Áurea C. M., *Tecnologia de Vácuo*, Cap. 6 e 7, Editora Universidade Nova Lisboa, 1980.
- Ref[84]: Van't Riet, Klaus, Review of measuring methods and Results in Nonviscous Gas-Liquid Mass Transfer in Stirred Vessels, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, V18, N 3, pg.357, 1979.

Ref[85]: Lee, Y. H. and Tsao, G.T., Dissolved Oxygen Electrodes, *Adv. Biochem. Eng.* V13, 35-86, 1979.

Ref[86]: Foust, A. S.; Wenzel, L. A.; Clump, C. W.; Maus, L.; Andersen, L. B., *Princípios das Operações Unitárias*, Editora Guanabara Dois, 1982.

Ref[87]: Barros Neto, Benício de; Scarmino, Ieda Spacino; Bruns, Roy Edward, *Planejamento e Otimização de Experimentos*, Editora da Unicamp, 2ª Edição, 1995.

Ref[88]: Bacan, N.; Andrade, J. C.; Godinho, O. E. S.; Barone, J. S., *Química Analítica Quantitativa Elementar*, Capítulo 1, 2ª Edição, Editora da Unicamp.

Ref[89]: Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P., Santana M. H. A., Determinação da Solubilidade para o Oxigênio em Emulsão de Perfluorocarbono, *Proceedings of the III COLAOB 2004*.

Ref[90]: Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P., Santana M. H. A. A comparative analysis of the mass transfer coefficients of three models of membrane blood oxygenators using water and a perfluorocarbon emulsion, *Asaio journal*, v 44 no 2, pg 211, *Asaio bioengineering abstracts*. march/april 2003.

Ref[91]: Schmutzler L. M. F. (1), de Arruda A. C. F.(1), Novello W. P. (1), Santana M. H. A., Mass transfer coefficient maps for three models of membrane blood oxygenator using perfluorocarbon emulsion, *Proceedings Summer Bioengineering Conference SBC 2003 - Miami Fl USA.*, pg 19, A16, 2003.

Ref[92]: Schmutzler L. M. F, de Arruda A. C. F., Novello W. P., Método de Avaliação da Área de Troca em Oxigenadores de Membrana, *Proceedings of the III COLAOB 2004*.

## Anexo I

### Sites úteis na Internet:

Site[1]: Alliance Pharmaceutilcal, produtos: Oxygent<sup>®</sup>, Liquivent<sup>®</sup>, site [www.allp.com](http://www.allp.com)

Site[2]: Sanguine Corporation, produto: PherO<sub>2</sub><sup>®</sup>, site [www.sanguine-corp.com](http://www.sanguine-corp.com)

Site[3]: Perftoran, produto: Perftoram<sup>®</sup>, site [www.perftoran.ru](http://www.perftoran.ru) , [perftoran@perftoran.ru](mailto:perftoran@perftoran.ru)

Site[4]: S.B.I., produtos: Oxicyte<sup>®</sup>, roduto: Fluorovent<sup>®</sup>, site [www.sybd.com](http://www.sybd.com)

Site[5]: Biopure Cororation, produto: Hemopure, site [www.biopure.com](http://www.biopure.com)

Site[6]: Hemosol Cororation, produto: Hemolink, site [www.hemosol.com](http://www.hemosol.com)

Site[7]: Pefusion line, portal para perfusionistas, site [www.perfline.com](http://www.perfline.com)

Site[8]: Indústrias Braile, produto: Oxigenadores de membrana, site [www.braile.com.br](http://www.braile.com.br)

Site[9]: Membranas Oxyhan para oxigenadores, site [www.membrana.com](http://www.membrana.com)

Site[10]: Edwards Corporation, produto: Oxigenadores de Membrana, site [www.edwards.com](http://www.edwards.com)

Site[11]: Intravascular Oxygenators, Pitsburg School of Medicine, site [www.bae.ncsu.edu](http://www.bae.ncsu.edu)

## Anexo II

### Trabalhos apresentados pelo Autor desta Tese em Congressos durante o período de doutorado:

Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P., Santana M. H. A, Determinação da Solubilidade para o Oxigênio em Emulsão de Perfluorocarbono, *III COLAOB 2004* - Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, S.P. Br. 2004.

Schmutzler L. M. F.(1), de Arruda A. C. F.(1), Novello W. P., : Método de Avaliação da Área de Troca em Oxigenadores de Membrana, *III COLAOB 2004* - Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, S.P. Br. 2004.

Schmutzler L. M. F., Joekes,I., Bio-Reator Contínuo com Células Imobilizadas em Leito Fixo Poroso, *III COLAOB 2004* - Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, S.P. Br. 2004. (trabalho relacionado ao Mestrado do autor)

Schmutzler L. M. F., Joekes,I., Monitoração da Taxa Metabólica a Partir de Perfis Térmicos, *III COLAOB 2004* - Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, S.P. Br. 2004. (trabalho relacionado ao Mestrado do autor)

Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P. , Santana M. H. A, A comparative analysis of the mass transfer coefficients of three models of membrane blood oxygenators using water and a perfluorocarbon emulsion, *ASAIO ISAO 2003* - Washington D.C. USA. 2003.

Schmutzler L. M. F.(1), de Arruda A. C. F.(1), Novello W. P. (1), Santana M. H. A. Mass transfer coefficient maps for three models of membrane blood oxygenator using perfluorocarbon emulsion., *Summer Bioengineering Conference SBC 2003* - Miami Fl. USA 2003.

Schmutzler L. M. F. Análise comparativa de trabalhos de cristalização realizados em laboratório e em ambiente de microgravidade. *Sociedade Brasileira de Crescimento de Cristais, SBCC 2000* Viçosa-MG Br. 2000.

Intercambio Técnico NASA em 2003, NASA Langley Research Center, Va. USA.

Aprovação de dois trabalhos no COBEM 2003 em S.P. Br.(não apresentados)

Aprovação de trabalho no IV CONGRESO LATINOAMERICANO DE TECNOLOGÍA ETRACORPÓREA 2001, Merida Mexico.(não apresentado)

### Anexo III:

#### Trabalhos publicados pelo Autor desta Tese durante o período de doutorado.

Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P., Santana M. H. A, Determinação da Solubilidade para o Oxigênio em Emulsão de Perfluorocarbono, *Proceedings of the III COLAOB* 2004.

Schmutzler L. M. F, de Arruda A. C. F., Novello W. P., Método de Avaliação da Área de Troca em Oxigenadores de Membrana, *Proceedings of the III COLAOB* 2004.

Schmutzler L. M. F., Joekes, I., Bio-Reator Contínuo com Células Imobilizadas em Leito Fixo Poroso, *Proceedings of the III COLAOB* 2004. (trabalho relacionado ao Mestrado do autor)

Schmutzler L. M. F., Joekes, I., Monitoração da Taxa Metabólica a Partir de Perfis Térmicos, *Proceedings of the III COLAOB* 2004. (trabalho relacionado ao Mestrado do autor)

Schmutzler L. M. F., de Arruda A. C. F., Novello W. P., Santana M. H. A. A comparative analysis of the mass transfer coefficients of three models of membrane blood oxygenators using water and a perfluorocarbon emulsion, *Asaio journal*, v 44 no 2, pg 211, *Asaio bioengineering abstracts*. march/april 2003.

Schmutzler L. M. F. (1), de Arruda A. C. F.(1), Novello W. P. (1), Santana M. H. A, Mass transfer coefficient maps for three models of membrane blood oxygenator using perfluorocarbon emulsion, *Proceedings Summer Bioengineering Conference SBC 2003* - Miami Fl USA., pg 19, A16, 2003.

Schmutzler L. M. F, de Arruda A. C. F., Novello W. P. Santana M. H. A, A Comparative Analysis of the Mass Transfer Coefficients of Three Models of Membrane Blood Oxigenators

Using Water and a Perfluorocarbon Emulsion, *Artificial Organs*, **(em processo de submissão na data em que este trabalho foi escrito, Julho de 2004 )**

Na data em que este texto foi escrito, final de Julho de 2004, uma patente relacionada ao processo de avaliação da área efetiva para troca de gases, fruto deste trabalho, estava em fase de elaboração pela Universidade.

#### Anexo IV:

### Relatório de busca de Patentes – Âmbito Global

Espacenet via biblioteca BAE

| Termos procurados                | Aparições |
|----------------------------------|-----------|
| Oxygenator                       | 881       |
| Oxygenator and membrane          | 98        |
| Oxygenator and membrane and test | 0         |
| Oxygenator and test              | 0         |

<http://www.ep.espacenet.com>

| Termos procurados                   | Aparições |
|-------------------------------------|-----------|
| Oxygenator                          | 881       |
| Oxygenator and membrane             | 226       |
| Oxygenator and membrane and test    | 1         |
| Oxygenator and membrane and testing | 3         |

<http://www.uspto.gov>

| Termos procurados                   | Aparições |
|-------------------------------------|-----------|
| Oxygenator                          | 136       |
| Oxygenator and membrane             | 30        |
| Oxygenator and membrane and test    | 0         |
| Oxygenator and membrane and testing | 0         |
| Membrane and test                   | 21        |
| Membrane and testing                | 25        |

<http://www.patents1.ic.gc.ca>

| Termos procurados                   | Aparições |
|-------------------------------------|-----------|
| Oxygenator                          | 51        |
| Oxygenator and membrane             | 14        |
| Oxygenator and membrane and test    | 0         |
| Oxygenator and membrane and testing | 0         |

<http://www.inpi.gov>

| Termos procurados         | Aparições |
|---------------------------|-----------|
| Oxygenador                | 0         |
| Oxygenador membrana       | 0         |
| Oxygenador membrana teste | 0         |

Dos testes achados nenhum visa avaliar a área de troca de algum dispositivo.

Um é sobre um processo baseado na condução de uma corrente elétrica.

Um é baseado em pressão e vácuo para determinar se a membrana esta vazando.

**Conclusão:** Não achei patente para avaliar a área de troca em oxigenadores de membrana.

## Anexo V:

### Gráficos em 3D dos coeficientes de troca de massa apresentados separadamente para os diversos dispositivos e para as duas fases líquidas utilizadas.

São apresentados neste anexo os gráficos tipo 3D comparando os coeficientes obtidos em ensaios de saturação e de extração utilizando a mesma faixa, de 100 a 300 mmHg para todos os dispositivos e com as duas fases líquidas, água e PFCE. Também são apresentados os gráficos comparativos entre coeficientes obtidos com água e PFCE para cada dispositivo.

#### Oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup> avaliado com água, K<sub>La</sub>, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>La</sub> determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Água com Oxigenador com 0.25 m<sup>2</sup>

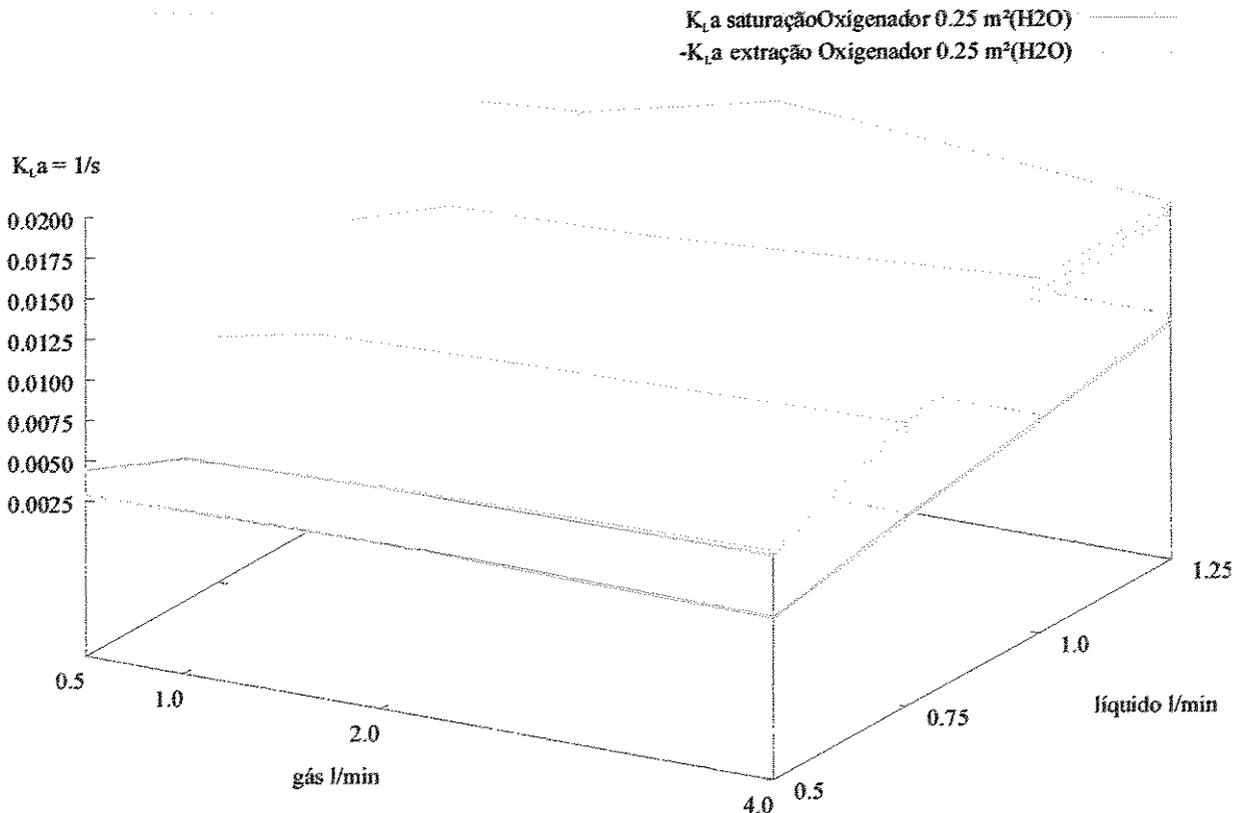


Figura 134: Mapa tridimensional dos K<sub>La</sub>s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação (K<sub>La</sub>) e na extração (-K<sub>La</sub>) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $k_c$  na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com Oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>

$K_G$  Oxigenador 0,25 m<sup>2</sup> - água ———  
 $-K_G$  Oxigenador 0,25 m<sup>2</sup> - água ·····

$K_G = \text{ml O}_2 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mmHg})$

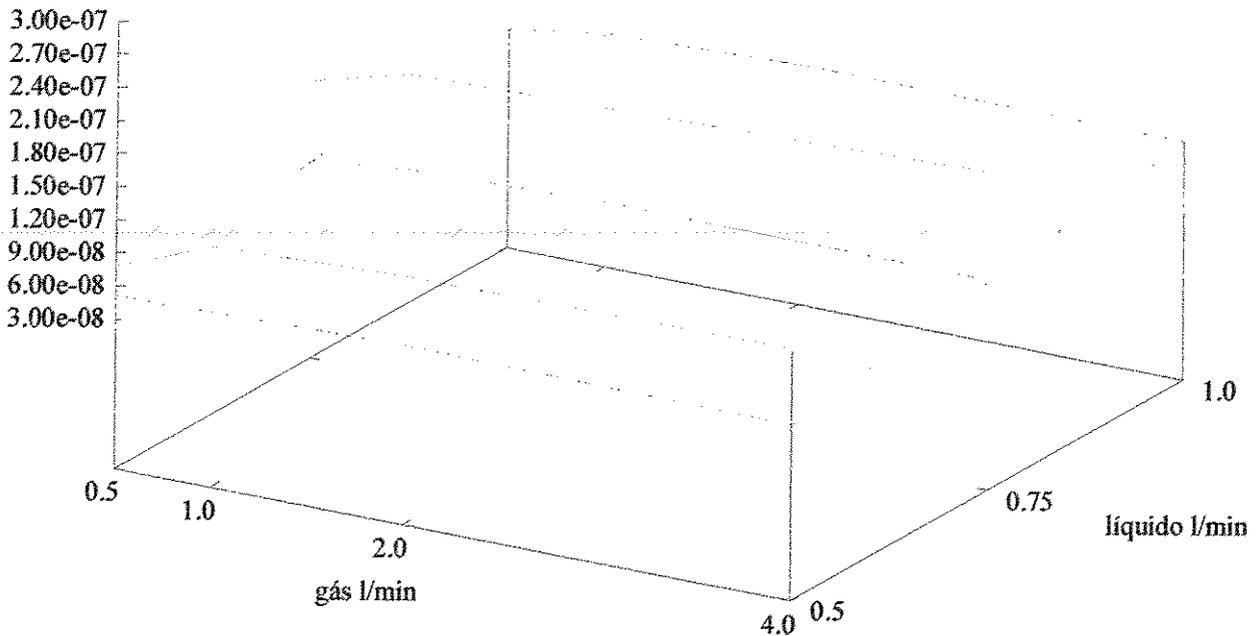


Figura 135: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com Oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$

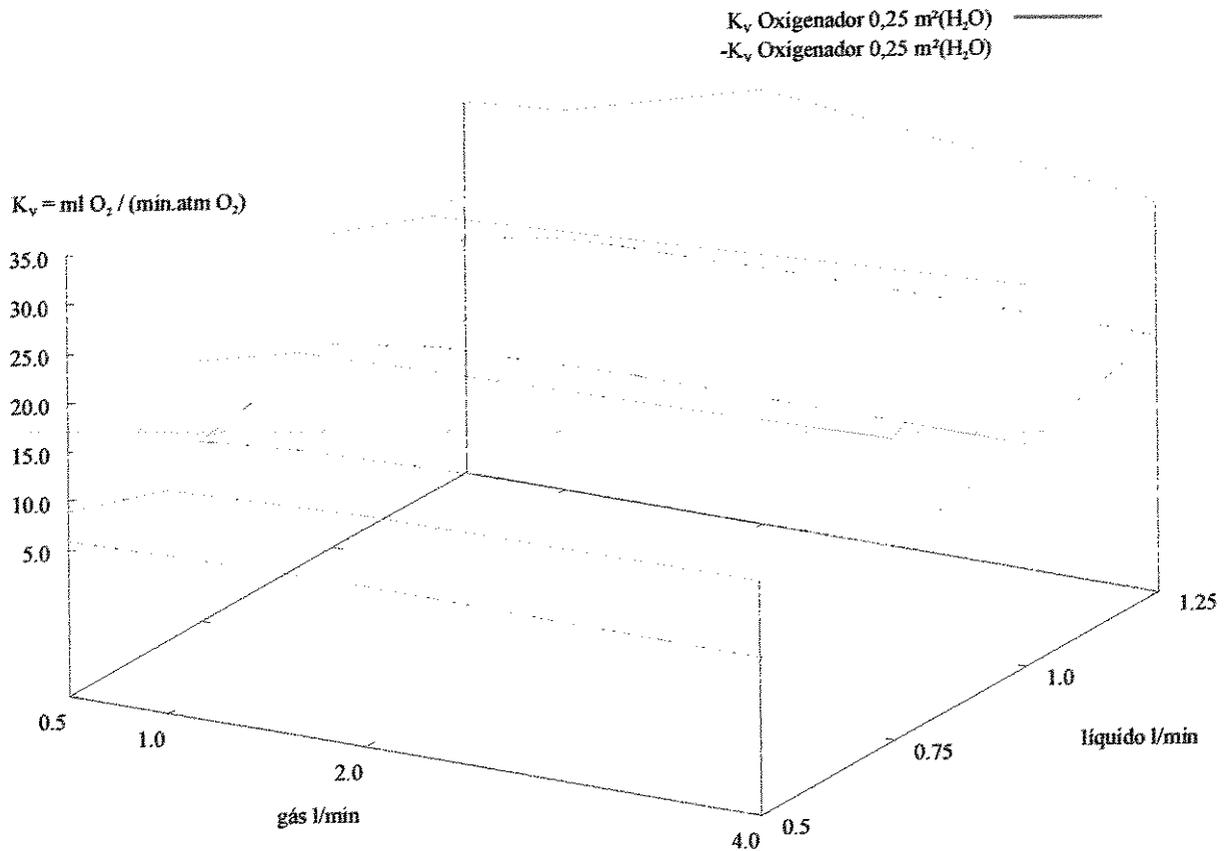


Figura 136: Mapa tridimensional dos  $K_{VS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{VS}$ ) e na extração ( $-K_{VS}$ ) do Oxigênio da água.

## Oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup> avaliado com água, K<sub>L</sub>a, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Água com Oxigenador com 0.5 m<sup>2</sup>

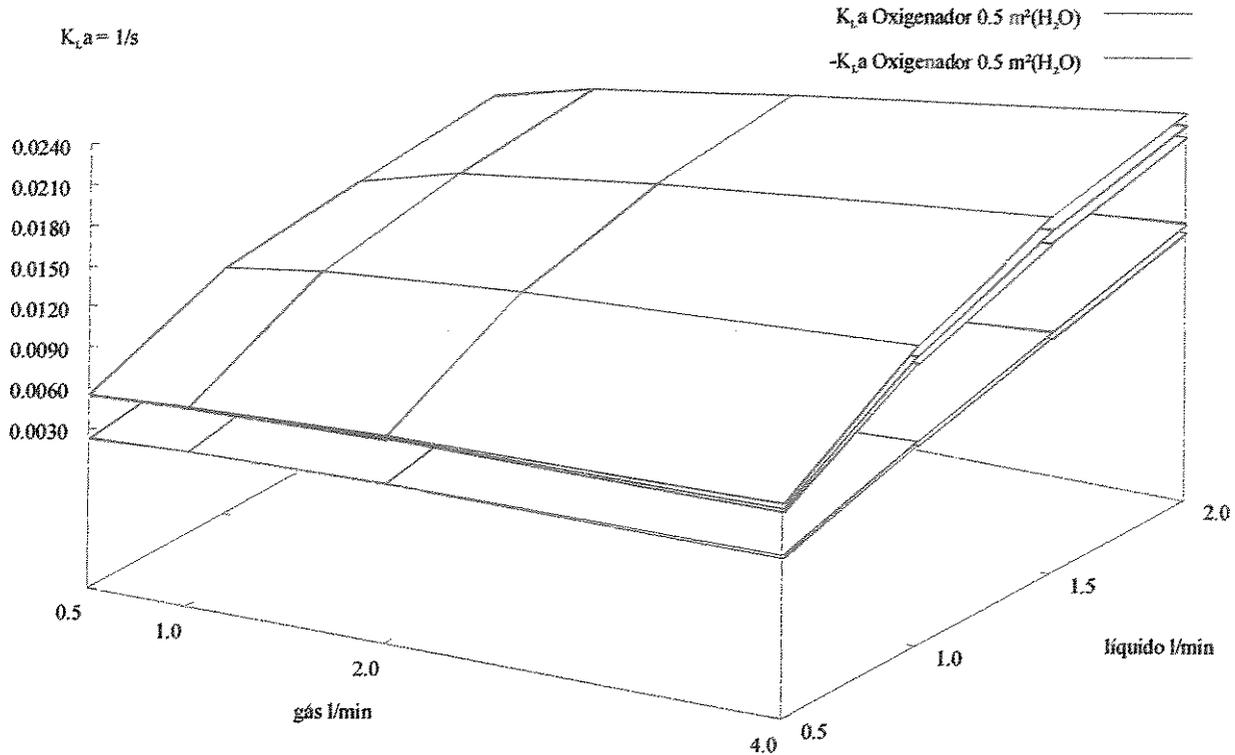


Figura 137: Mapa tridimensional dos K<sub>L</sub>a obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,5 m<sup>2</sup> na saturação (K<sub>L</sub>a) e na extração (-K<sub>L</sub>a) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $K_G$  na Extração e na Oxigenação da água com Oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$

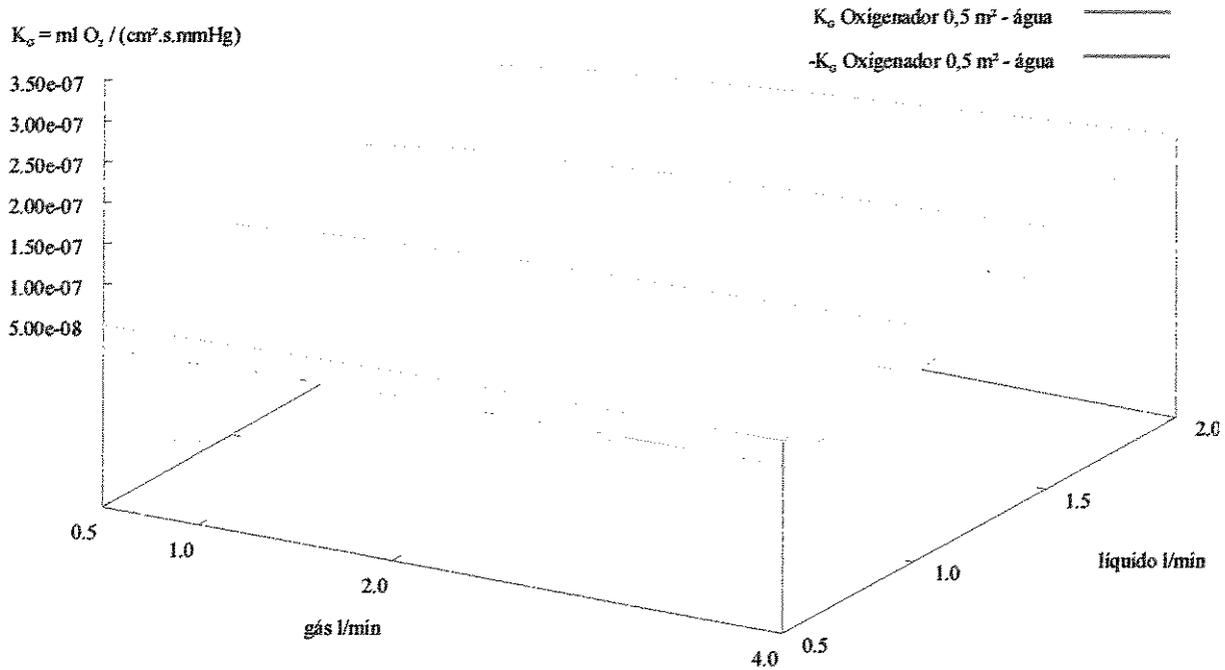


Figura 138: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio na Água com Oxigenadores com  $0,5 \text{ m}^2$

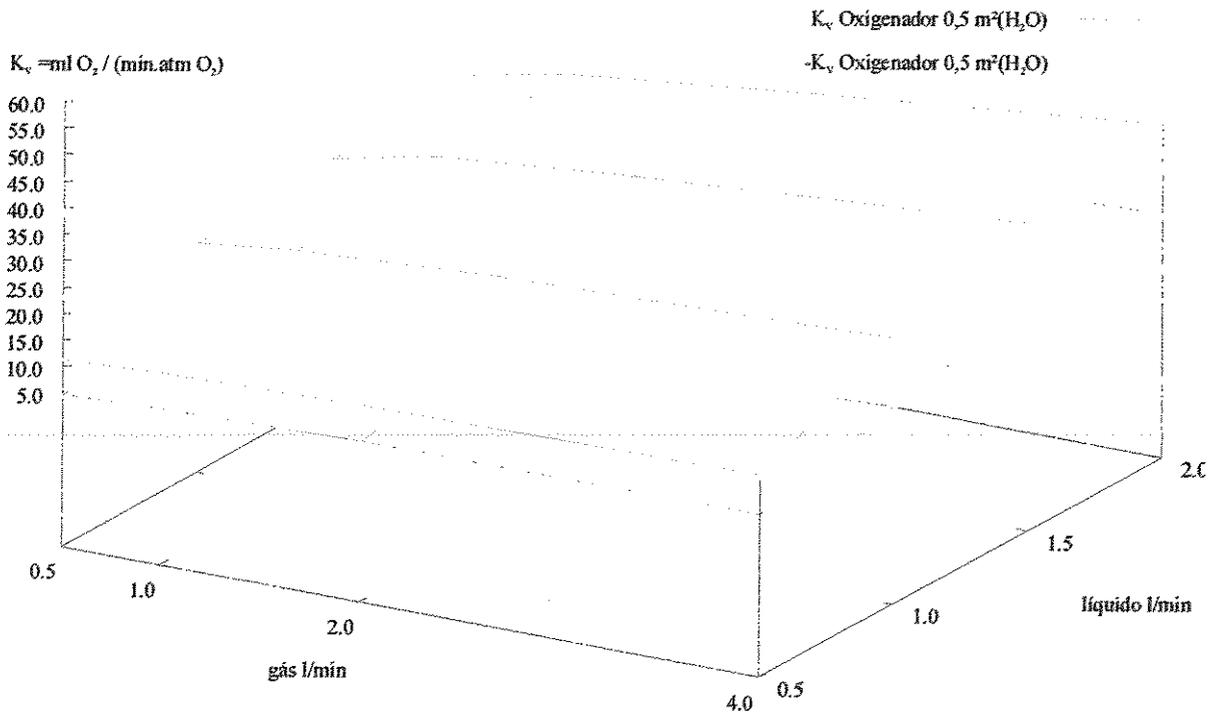


Figura 139: Mapa tridimensional dos  $K_{vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{vs}$ ) e na extração ( $-K_{vs}$ ) do Oxigênio da água.

## Oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup> avaliado com água, K<sub>L</sub>a, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Água com Oxigenador com 1,6 m<sup>2</sup>

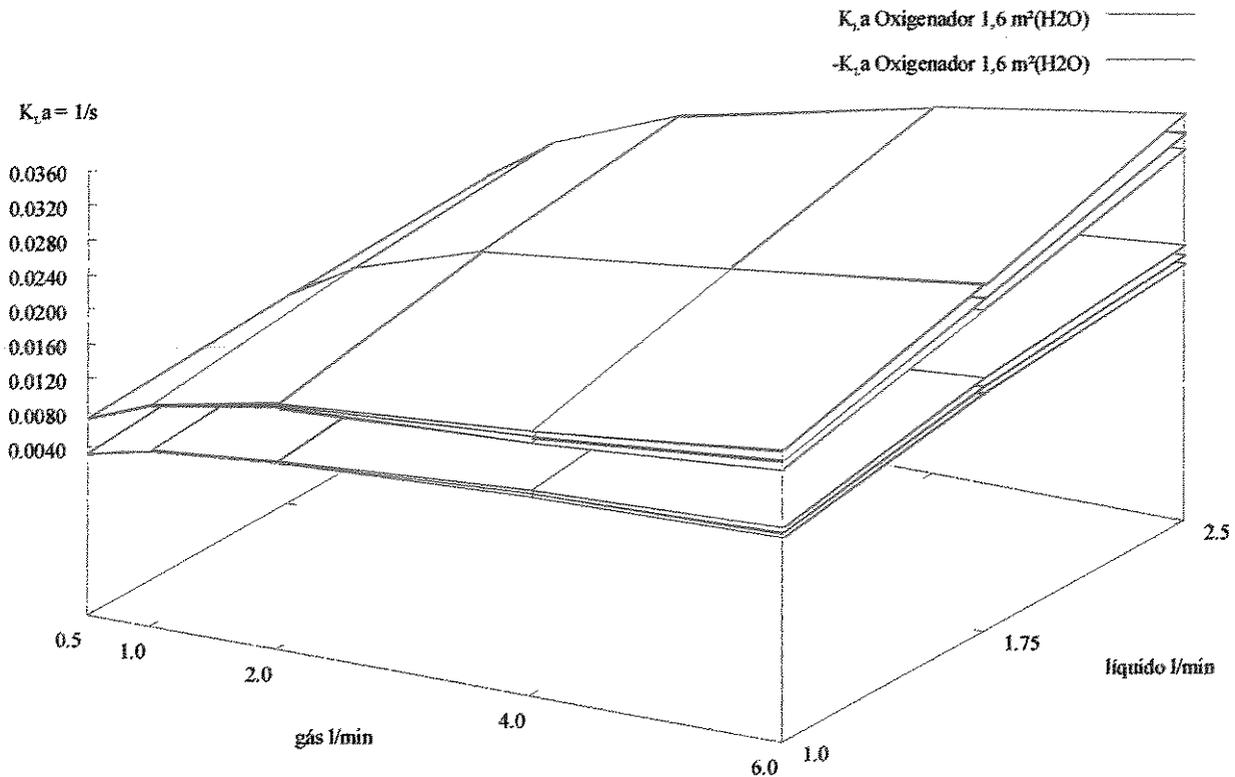


Figura 140: Mapa tridimensional dos  $K_{L}a$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L}a$ ) e na extração ( $-K_{L}a$ ) do Oxigênio da água. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $K_G$  na Saturação e na Extração do Oxigênio da Água com Oxigenador de  $1,6 \text{ m}^2$

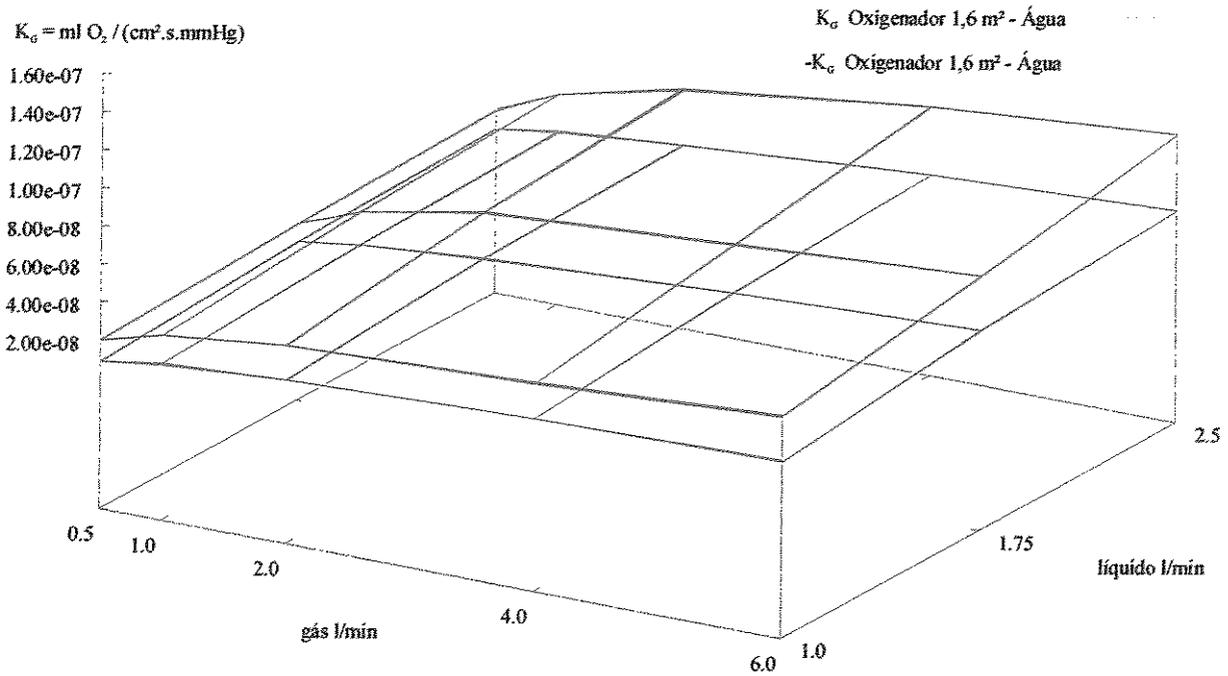


Figura 141: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $1,6 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.

Superfícies de  $K_v$ , determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com Oxigenador com  $1,6 \text{ m}^2$

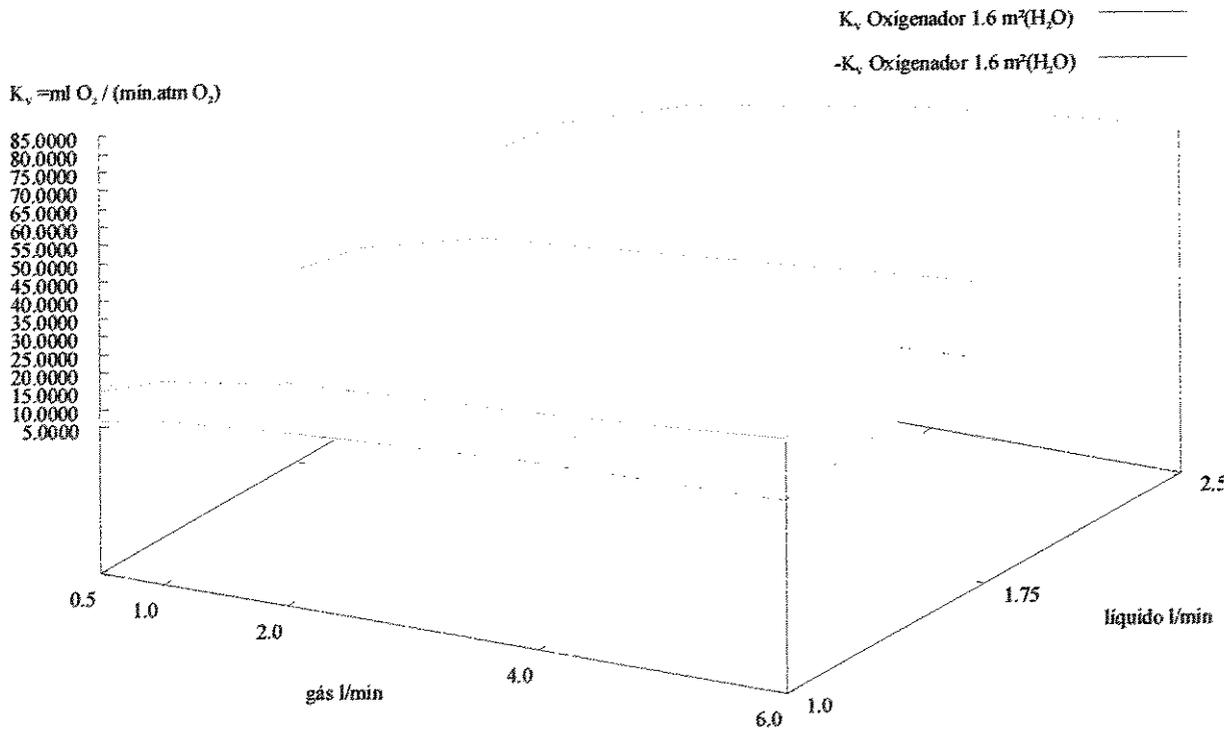


Figura 142: Mapa tridimensional dos  $K_{VS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $1,6 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{VS}$ ) e na extração ( $-K_{VS}$ ) do Oxigênio da água.

## Coluna de recheio com 2,5 m<sup>2</sup> avaliada com água, K<sub>L</sub>a, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração do Oxigênio da Água com uma Coluna com 2,5m<sup>2</sup>

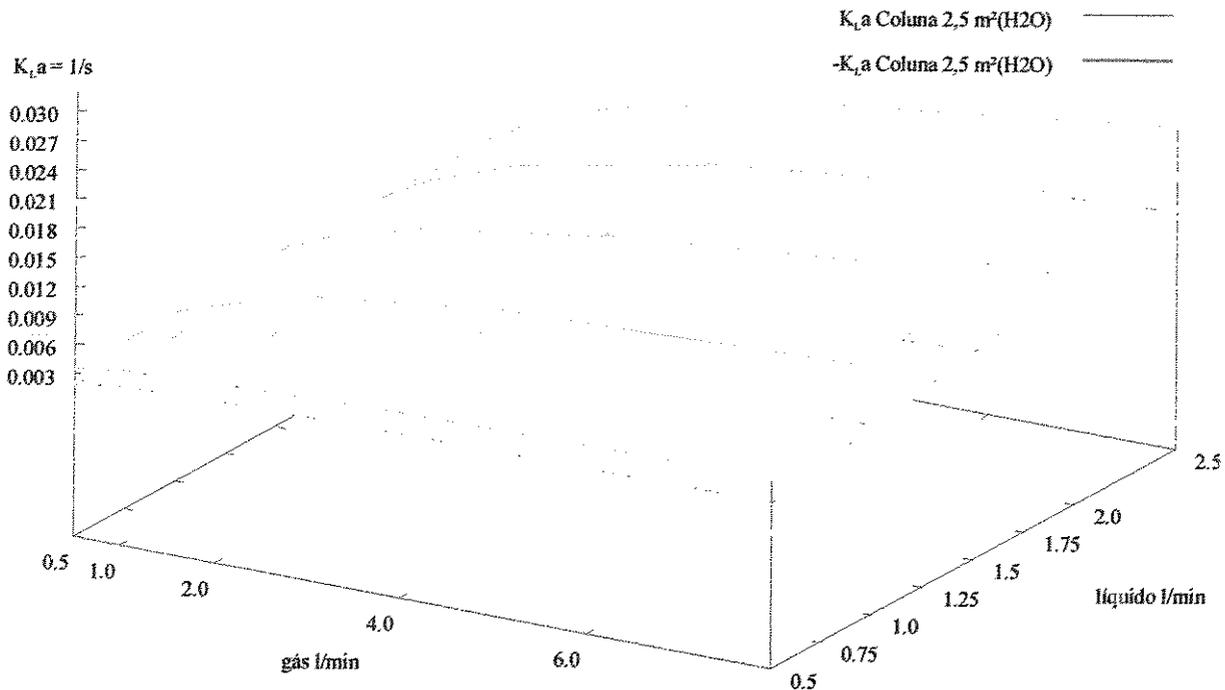


Figura 143: Mapa tridimensional dos  $K_L a$ s obtidos para a coluna de recheio com área de 2,5 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_L a$ ) e na extração ( $-K_L a$ ) do Oxigênio da água. As camadas deveriam mostrar a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no coeficiente obtido, mas como esta correção na coluna é muito baixa não é possível visualizar a diferença.

Superfícies de  $K_G$  determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da água com uma coluna com  $2,5\text{m}^2$

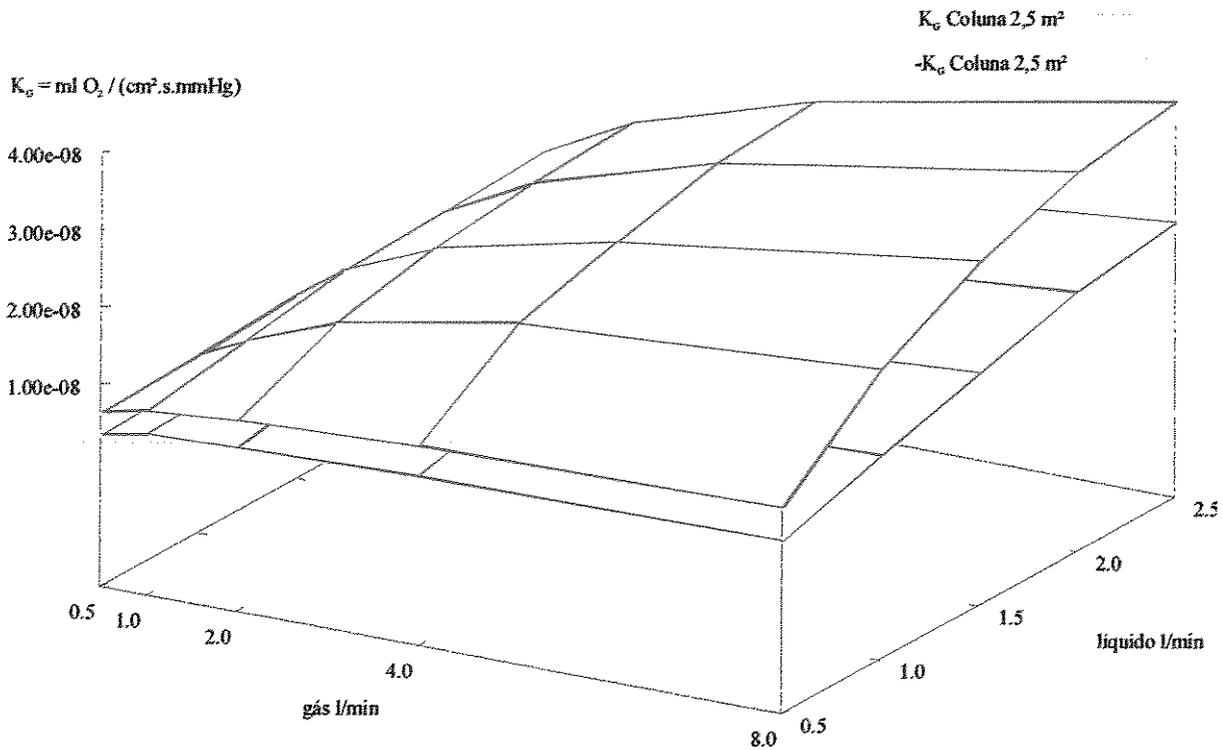


Figura 144: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para coluna de recheio com área de  $2,5 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da água.

Superfícies de  $K_v$ , determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Água com uma Coluna com  $2,5\text{m}^2$

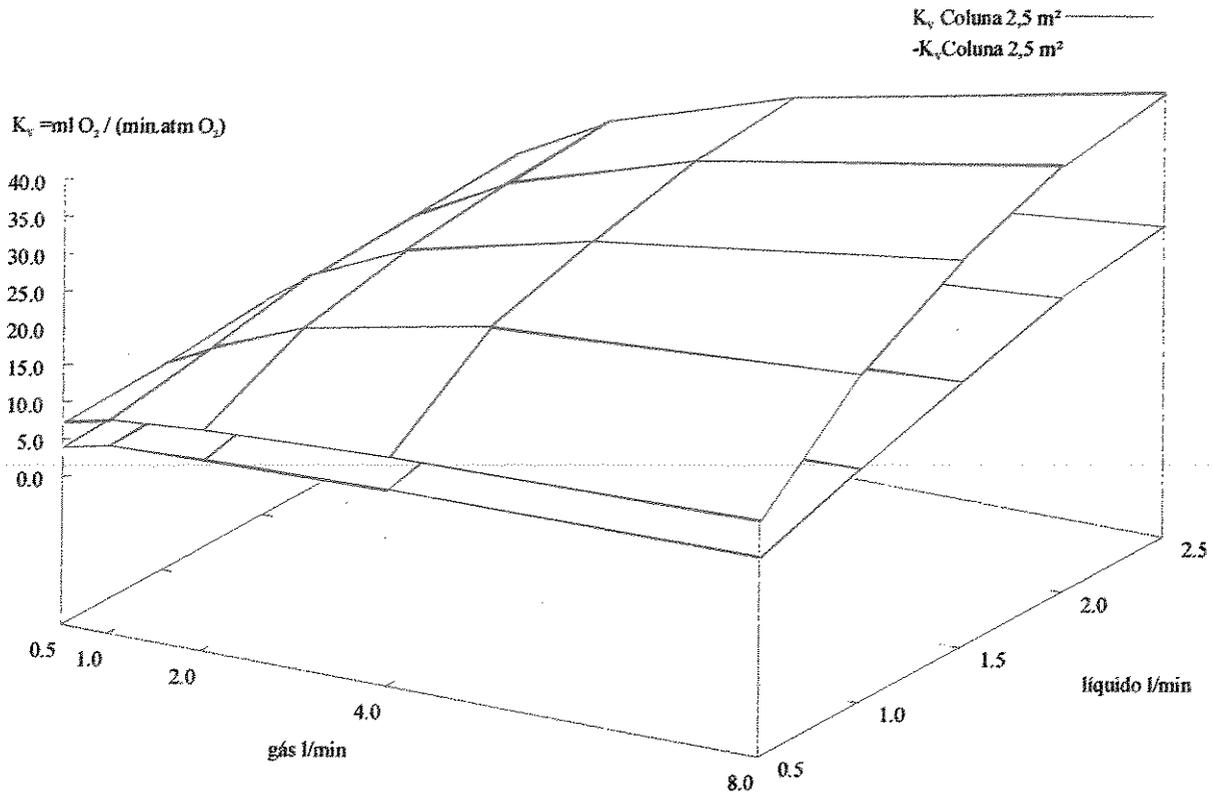


Figura 145: Mapa tridimensional dos  $K_{Vs}$  obtidos para a coluna de recheio com área de  $2,5\text{m}^2$  na saturação ( $K_{Vs}$ ) e na extração ( $-K_{Vs}$ ) do Oxigênio da água.

## Oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup> avaliado com PFCE, K<sub>L</sub>a, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenador com 0,25 m<sup>2</sup>

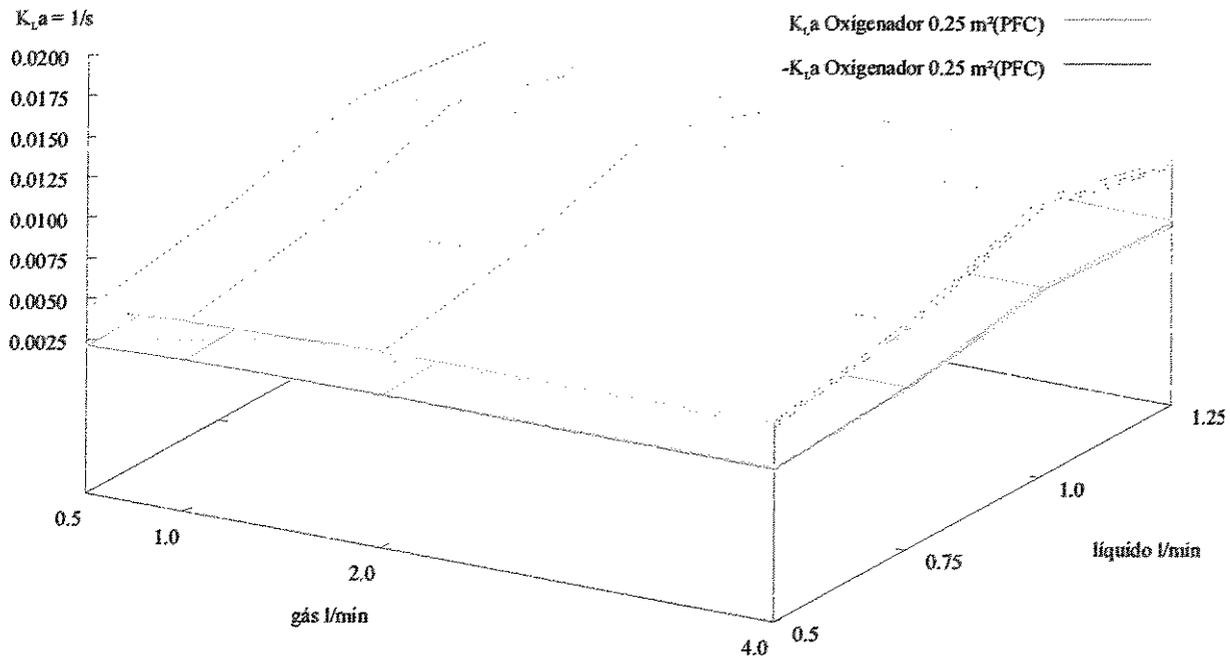


Figura 146: Mapa tridimensional dos  $K_La$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_La$ ) e na extração ( $-K_La$ ) do Oxigênio da PFCE. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $K_G$  na Extração e Saturação de emulsão de PFC  
com Oxigenador de  $0,25 \text{ m}^2$

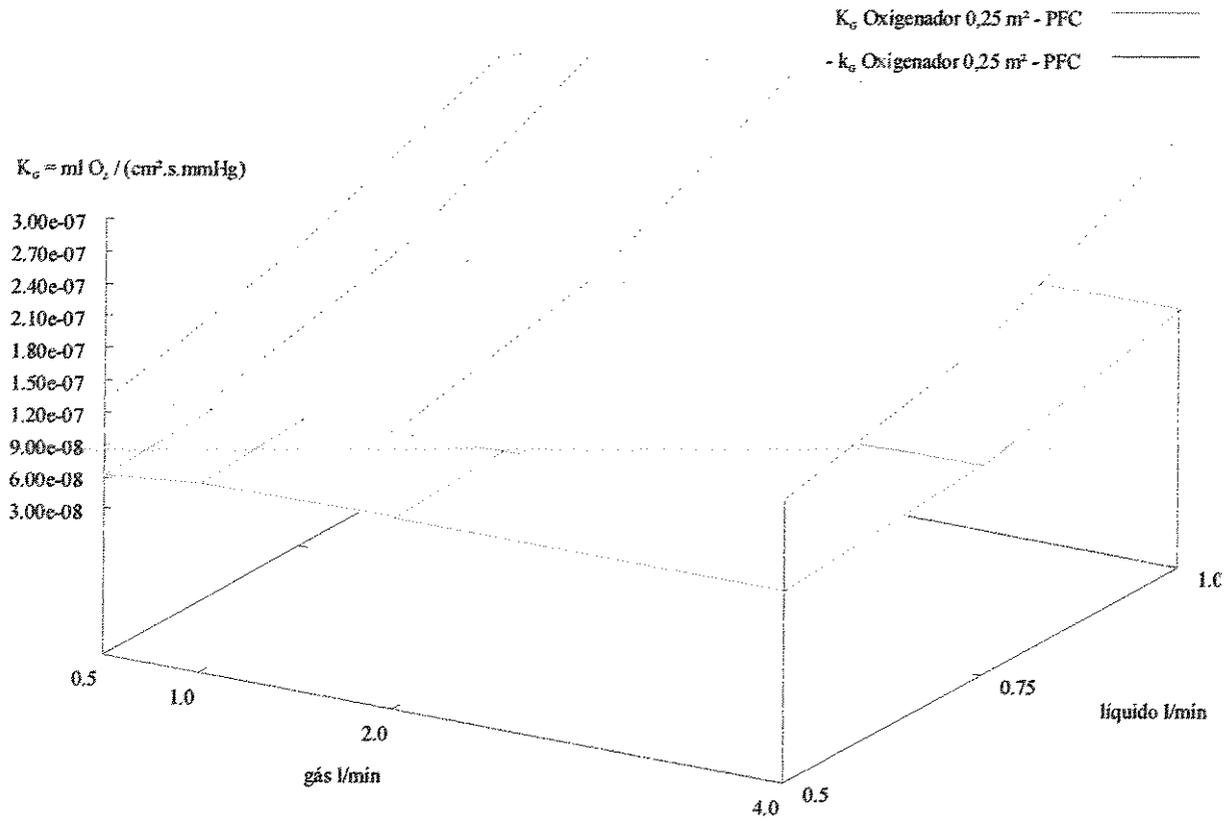


Figura 147: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenador com  $0,25 \text{ m}^2$

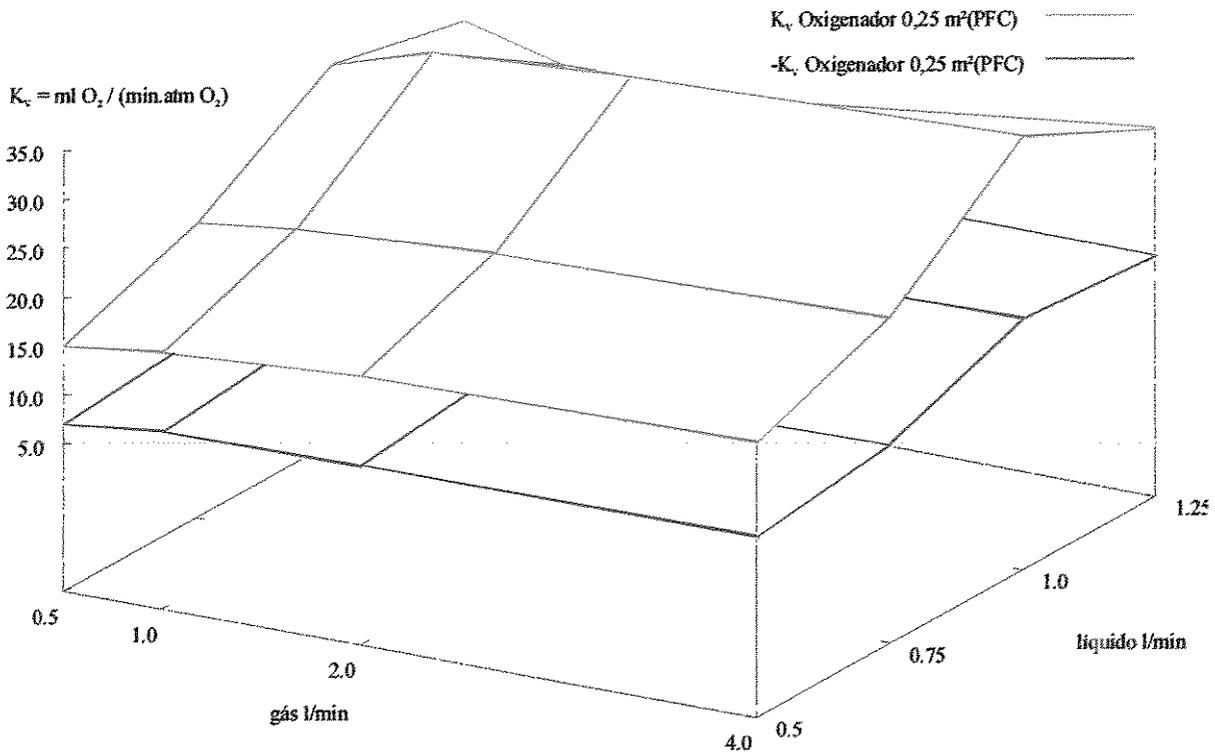


Figura 148: Mapa tridimensional dos  $K_{vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,25 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{vs}$ ) e na extração ( $-K_{vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.

## Oxigenador de 0,5 m<sup>2</sup> avaliado com PFCE, K<sub>L</sub>a, K<sub>G</sub>, e K<sub>v</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenador com 0.5 m<sup>2</sup>

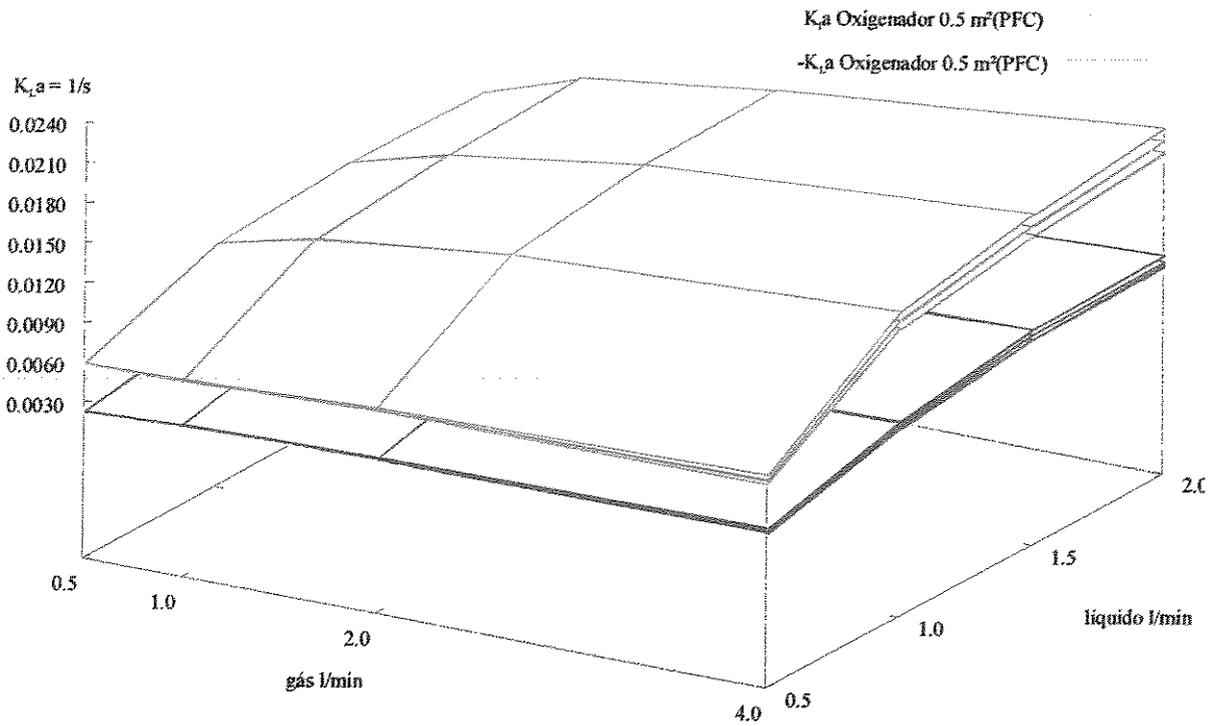


Figura 149: Mapa tridimensional dos  $K_{L,a}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,5 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{L,a}$ ) e na extração ( $-K_{L,a}$ ) do Oxigênio da PFCE. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $K_G$  na Extração e na Oxigenação de emulsão de PFC  
com Oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$

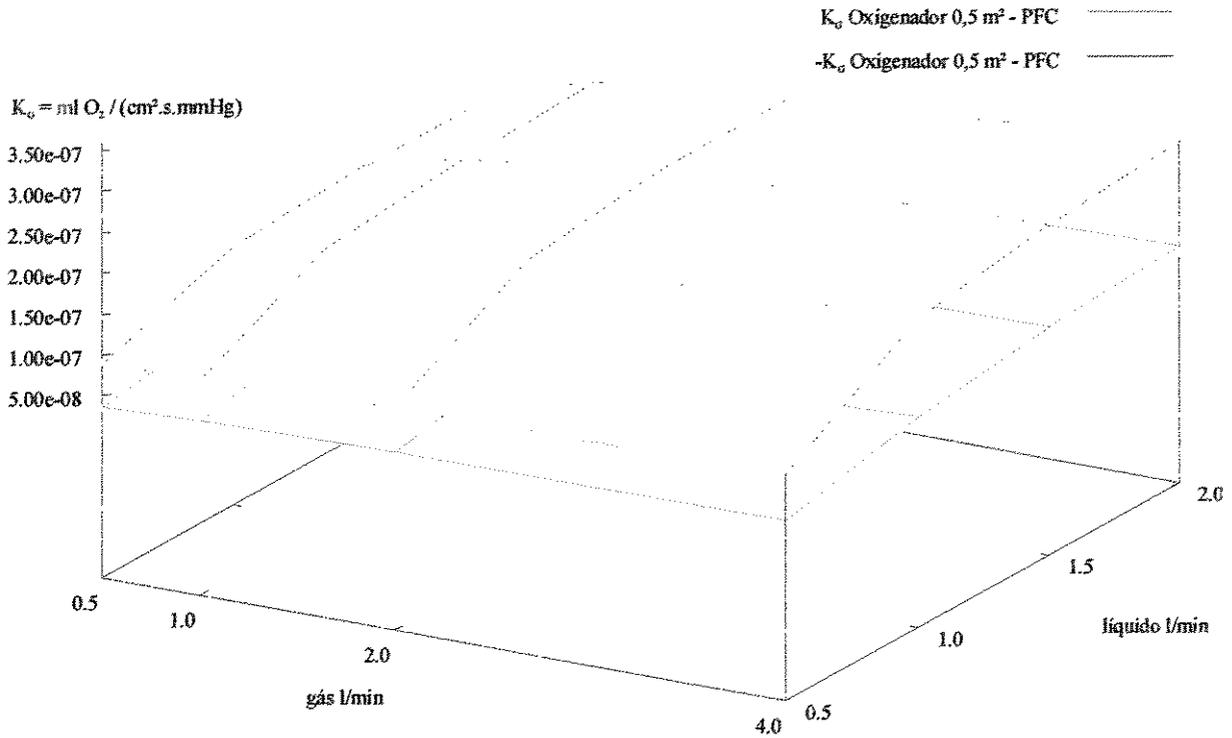


Figura 150: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação e Extração de Oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenadores com  $0,5 \text{ m}^2$

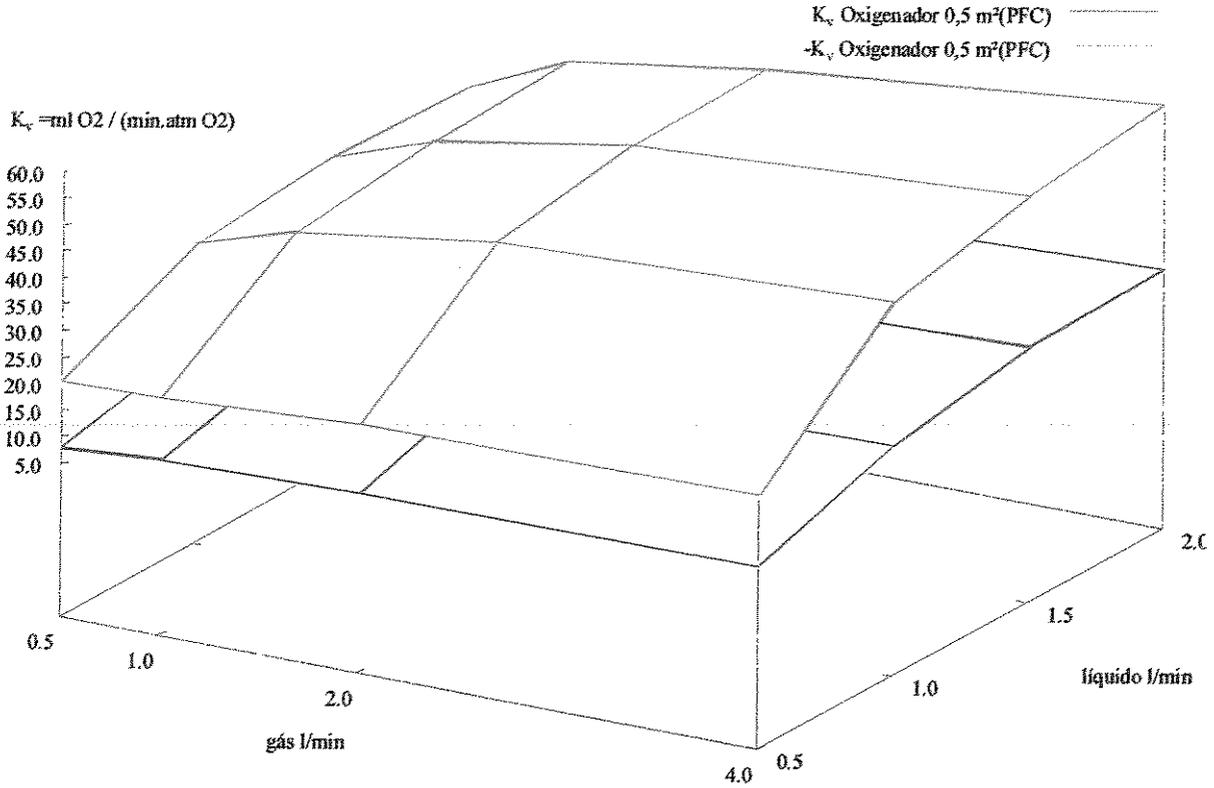


Figura 151: Mapa tridimensional dos  $K_{vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação ( $K_{vs}$ ) e na extração ( $-K_{vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.

## Oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup> avaliado com PFCE, K<sub>LA</sub>, K<sub>G</sub>, e K<sub>V</sub>.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Emulsão de PFC com Oxigenador com 1,6 m<sup>2</sup>

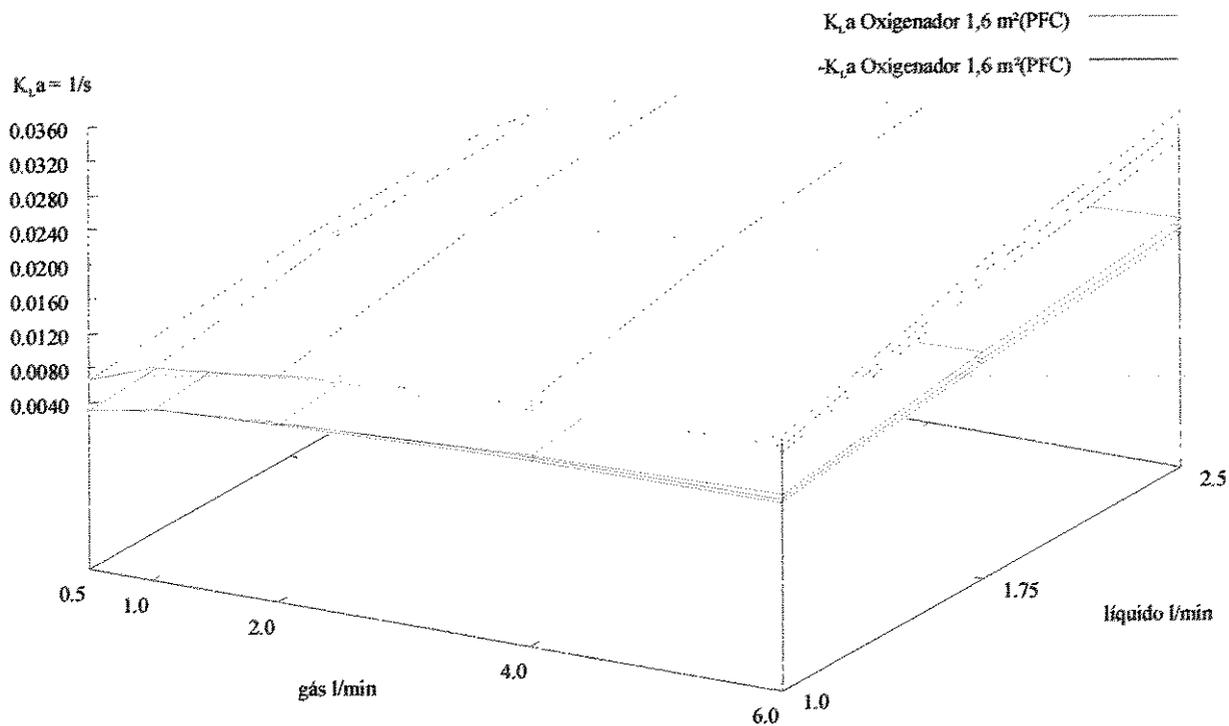


Figura 152: Mapa tridimensional dos  $K_{LA}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{LA}$ ) e na extração ( $-K_{LA}$ ) do Oxigênio da PFCE. As camadas mostram a influência da correção da queda de pressão na fase gasosa.

Superfícies de  $K_G$  na Saturação e na Extração do Oxigênio da emulsão de PFC com Oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>

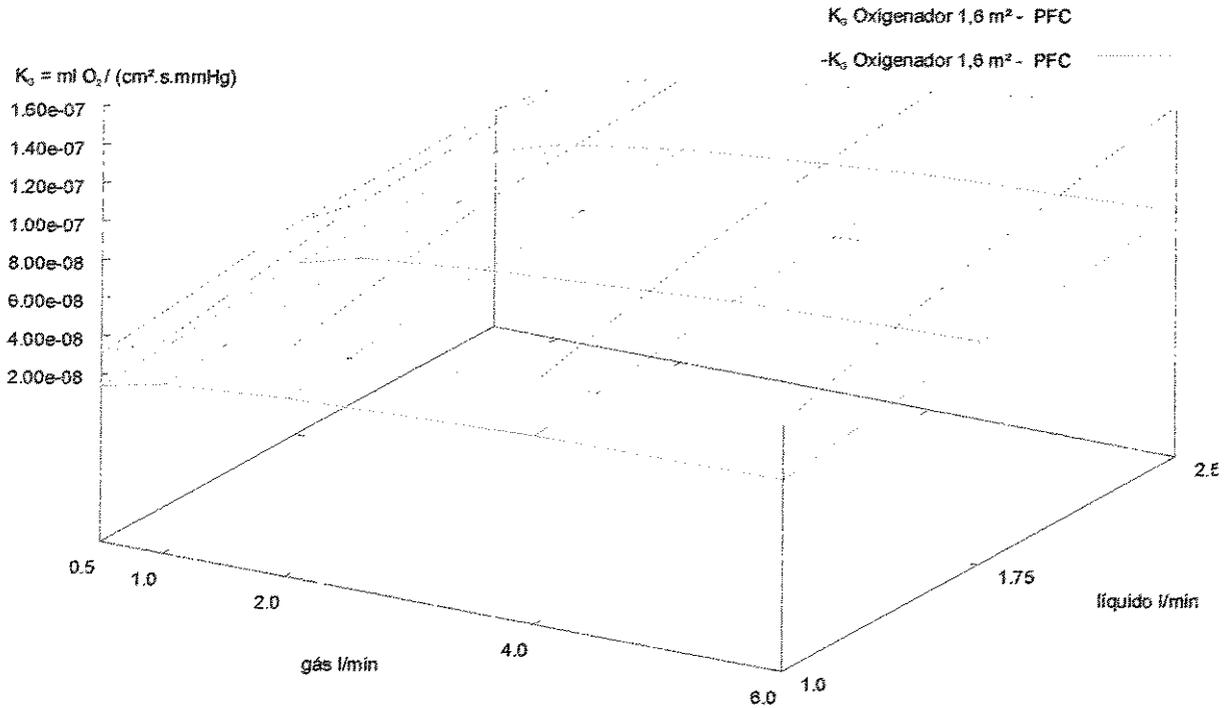


Figura 153: Mapa tridimensional dos  $K_{GS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_G$ ) e na extração ( $-K_G$ ) do Oxigênio da PFCE.

Superfícies de  $K_v$ , determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Emulsão de PFC com um Oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>

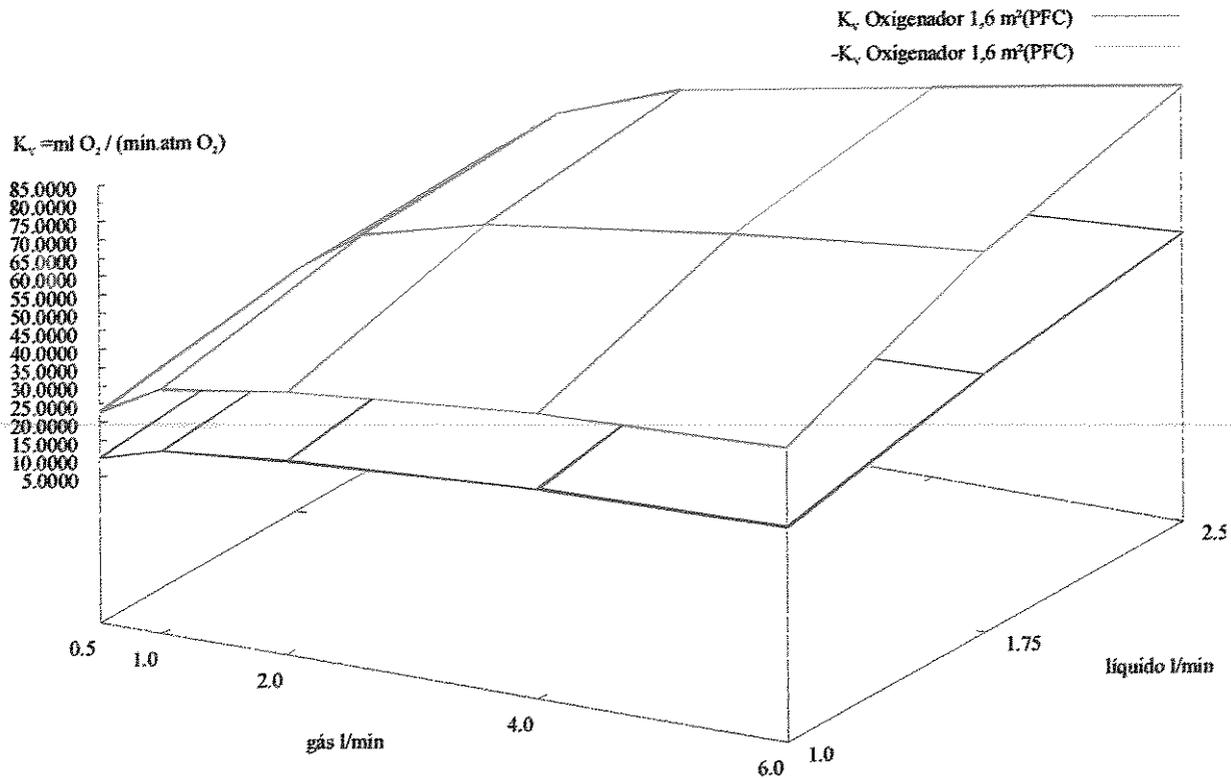


Figura 154: Mapa tridimensional dos  $K_{vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação ( $K_{vs}$ ) e na extração ( $-K_{vs}$ ) do Oxigênio do PFCE.

### Comparação - Oxigenador de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> avaliado com água e com PFCE, K<sub>L</sub>a.

Superfícies de K<sub>L</sub>a determinadas na Saturação e Extração de oxigênio da Água e da Emulsão de PFC com Oxigenador com 0.25 m<sup>2</sup>

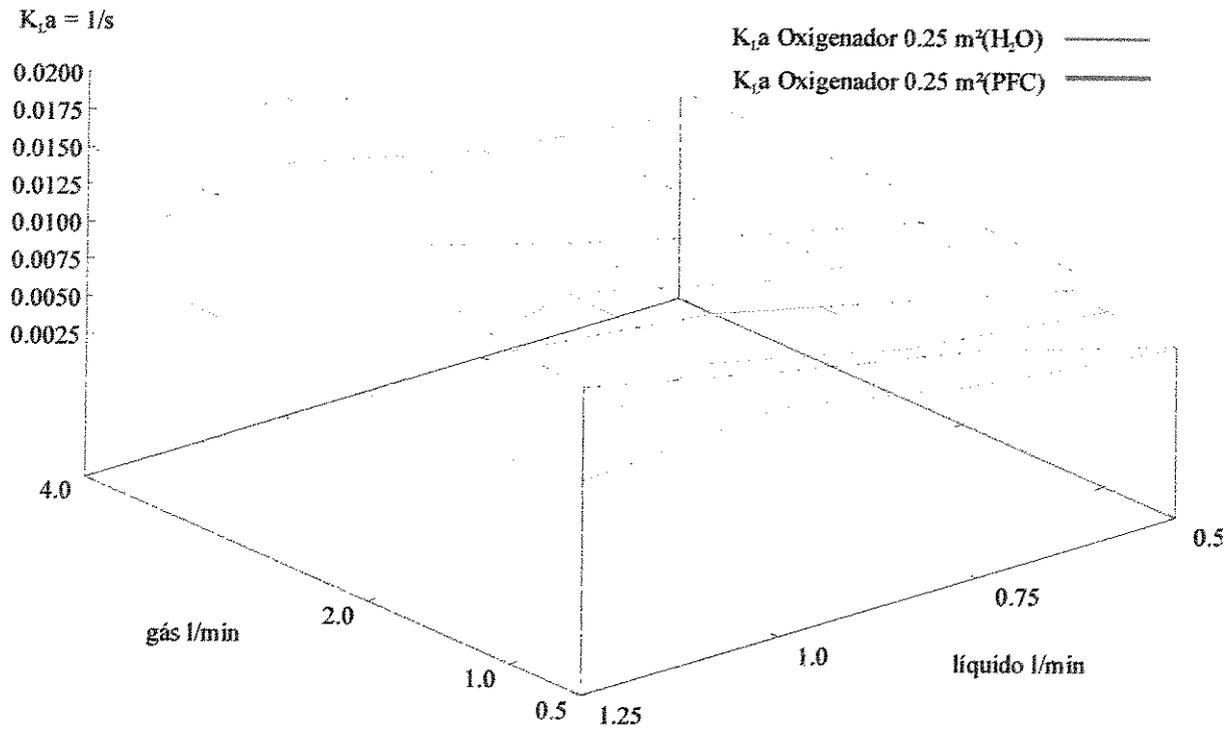


Figura 155: Mapa tridimensional dos  $K_{L,a}$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_L a$  determinadas na Saturação de oxigênio na Água e na Emulsão de PFC com Oxigenador com  $0.5 \text{ m}^2$

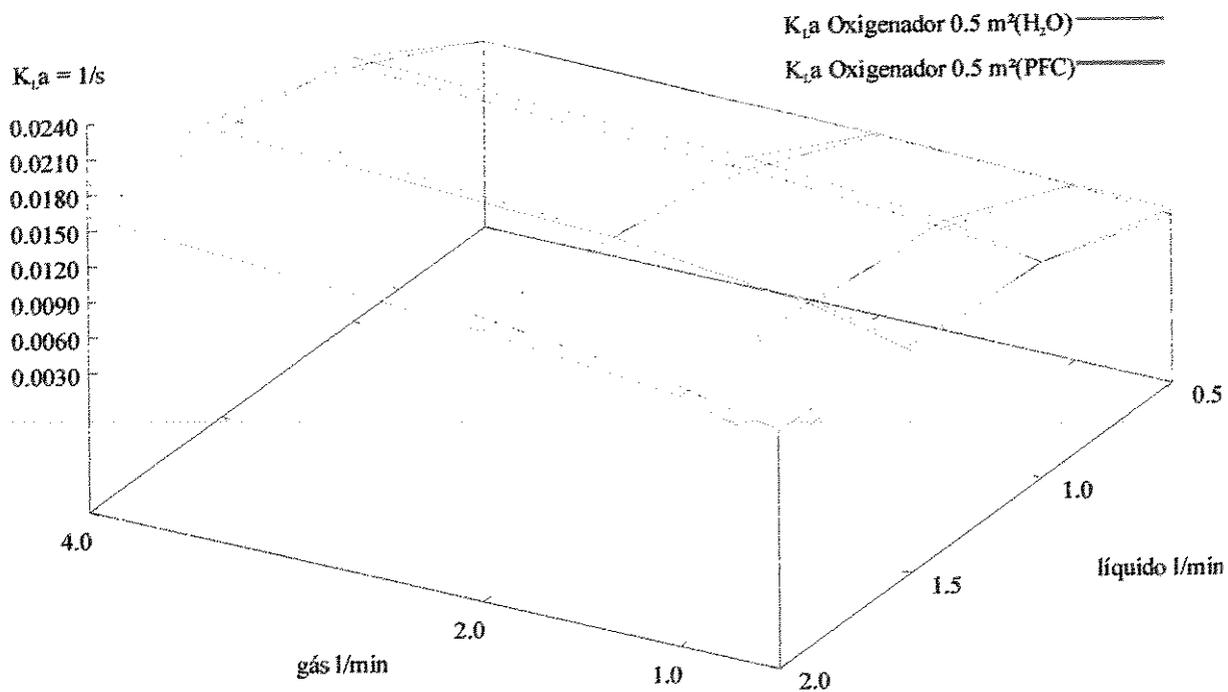


Figura 156: Mapa tridimensional dos  $K_L a$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_L a$  determinadas na Saturação de oxigênio na Água e na Emulsão de PFC com Oxigenador com  $1,6 \text{ m}^2$

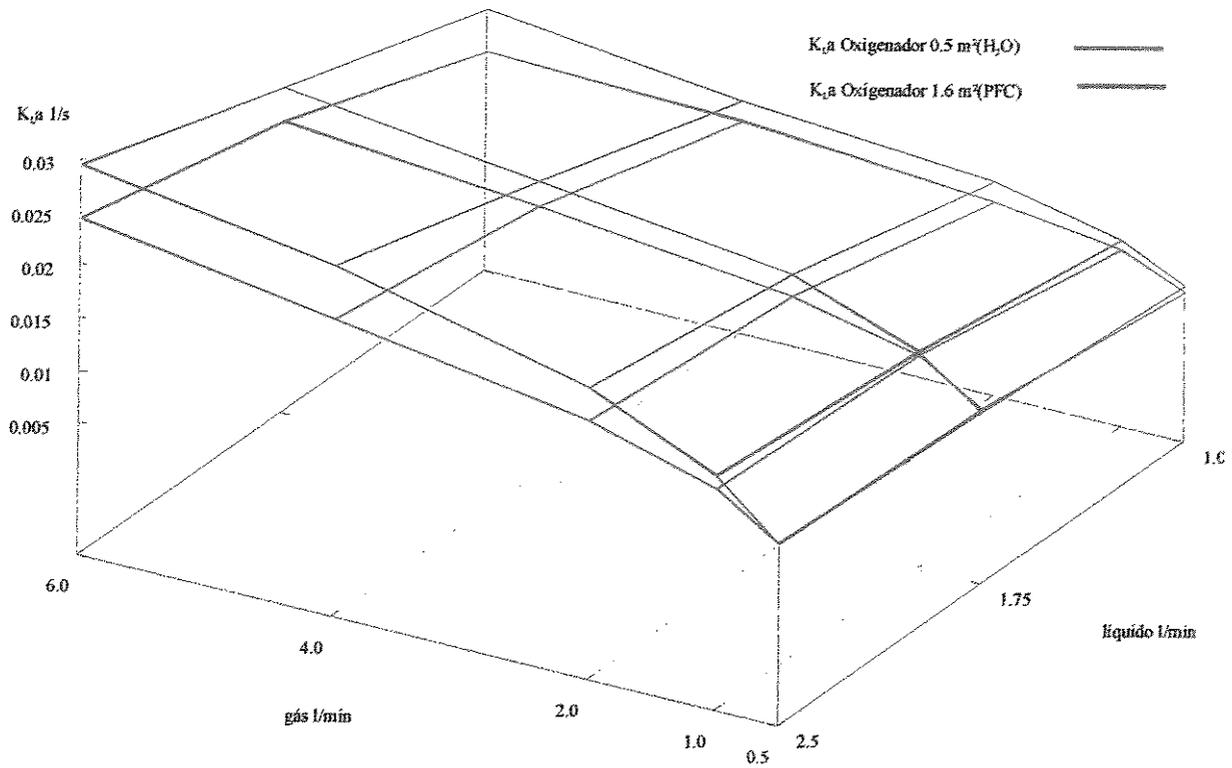


Figura 157: Mapa tridimensional dos  $K_L a$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $1,6 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

**Comparação - Oxigenador de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> avaliado com água e com PFCE, K<sub>G</sub>.**

Superfície de K<sub>G</sub> na oxigenação da emulsão de PFC e da Água com Oxigenador de 0,25 m<sup>2</sup>

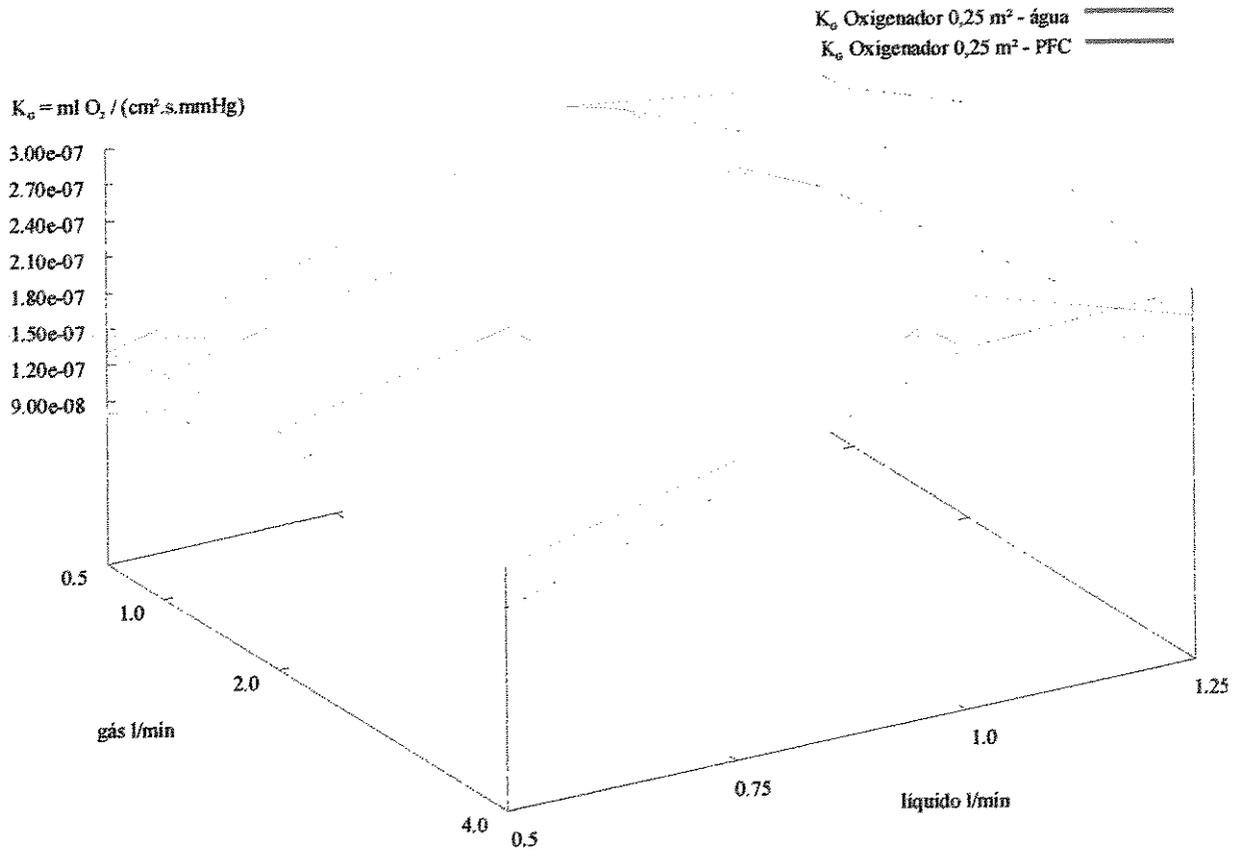


Figura 158: Mapa tridimensional dos K<sub>G</sub>s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_G$  na Oxigenação de emulsão de PFC e de água com Oxigenador com  $0,5 \text{ m}^2$

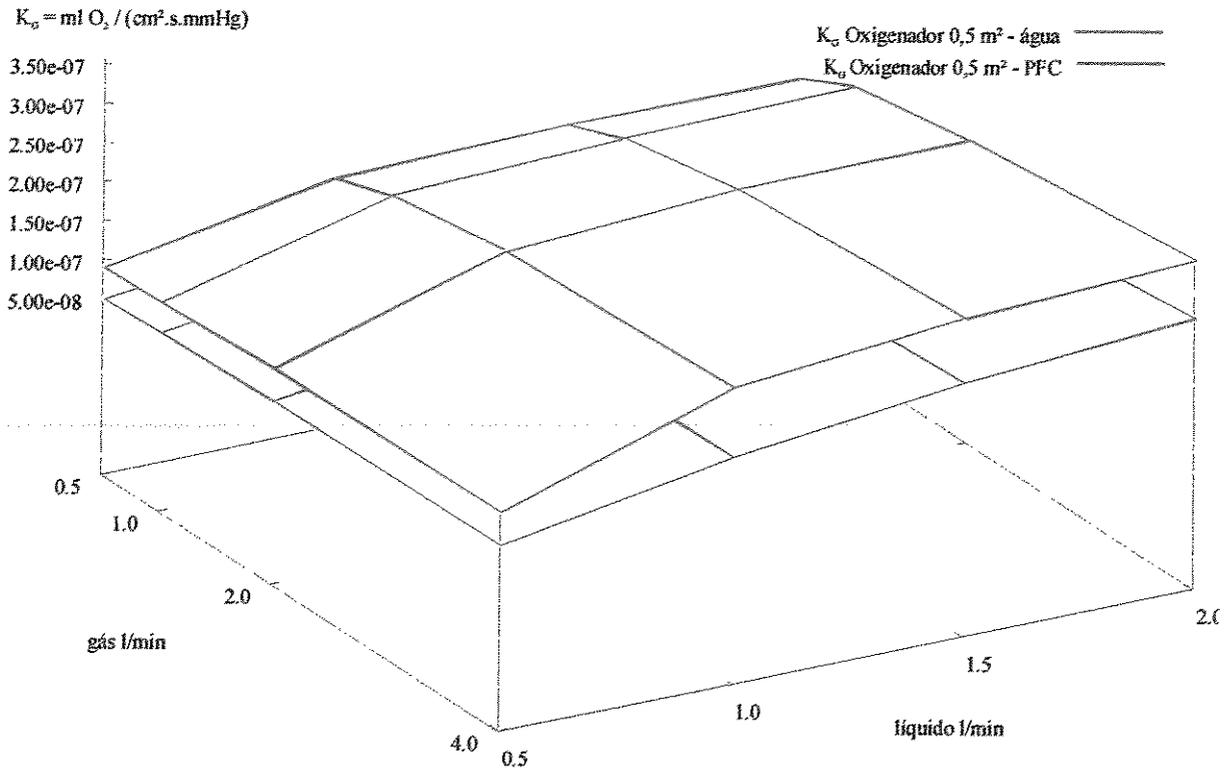


Figura 159: Mapa tridimensional dos  $K_G$ s obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_G$  na Oxigenação de emulsão de PFC e de água com Oxigenador de 1,6 m<sup>2</sup>

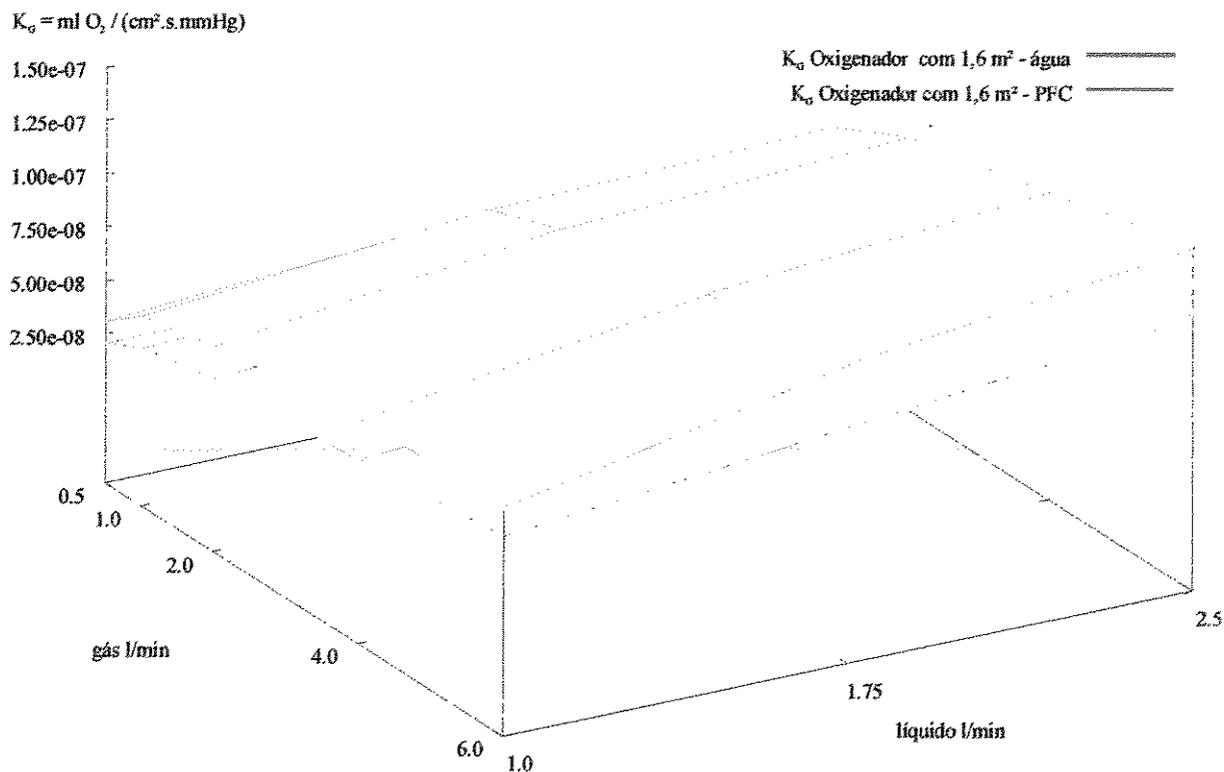


Figura 160: Mapa tridimensional dos  $K_{GS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de 1,6 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

## Comparação - Oxigenador de 0,25 0,5 e 1,6 m<sup>2</sup> avaliado com água e com PFCE, K<sub>v</sub>.

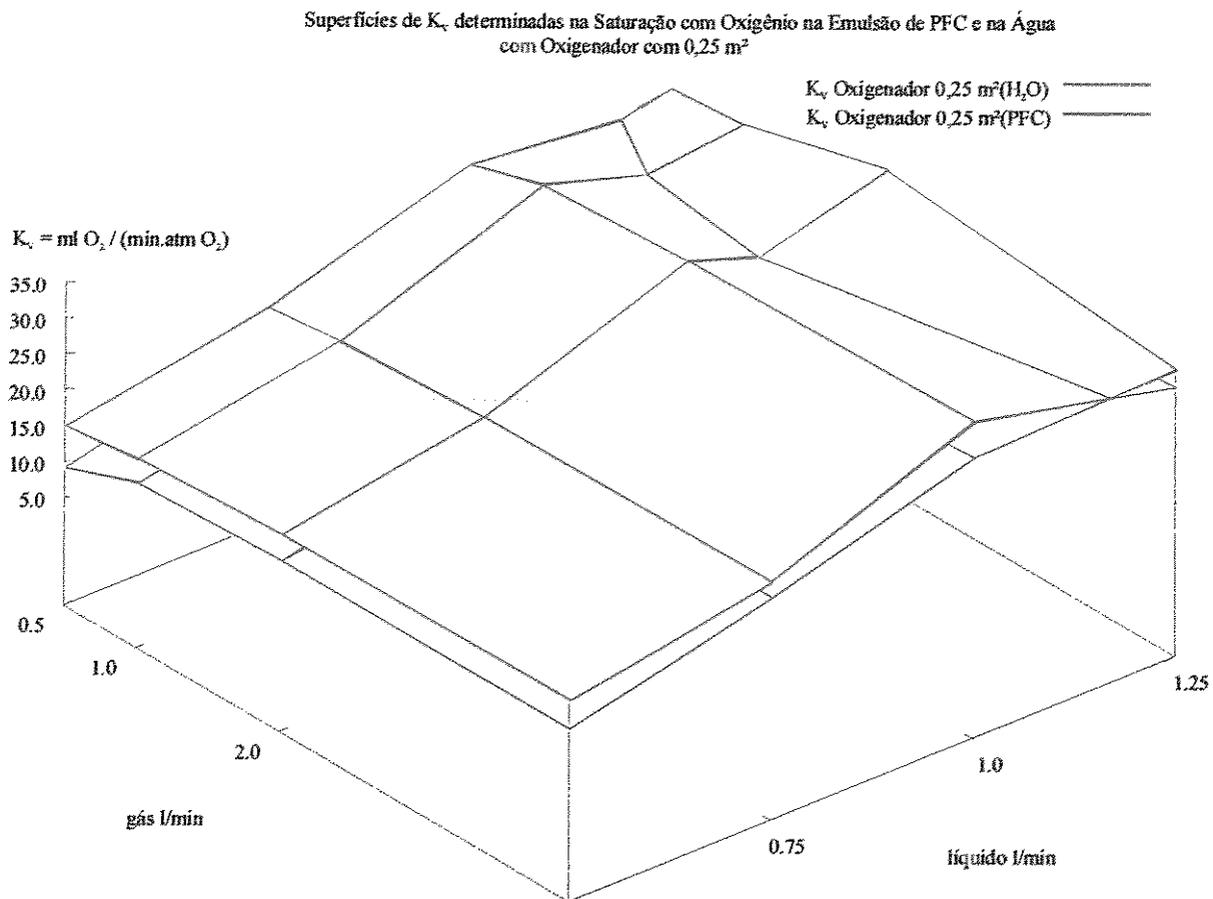


Figura 161: Mapa tridimensional dos K<sub>v</sub>s obtidos para o oxigenador de membrana com área de 0,25 m<sup>2</sup> na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação de Oxigênio da Emulsão de PFC e da Água com Oxigenadores com  $0,5 \text{ m}^2$

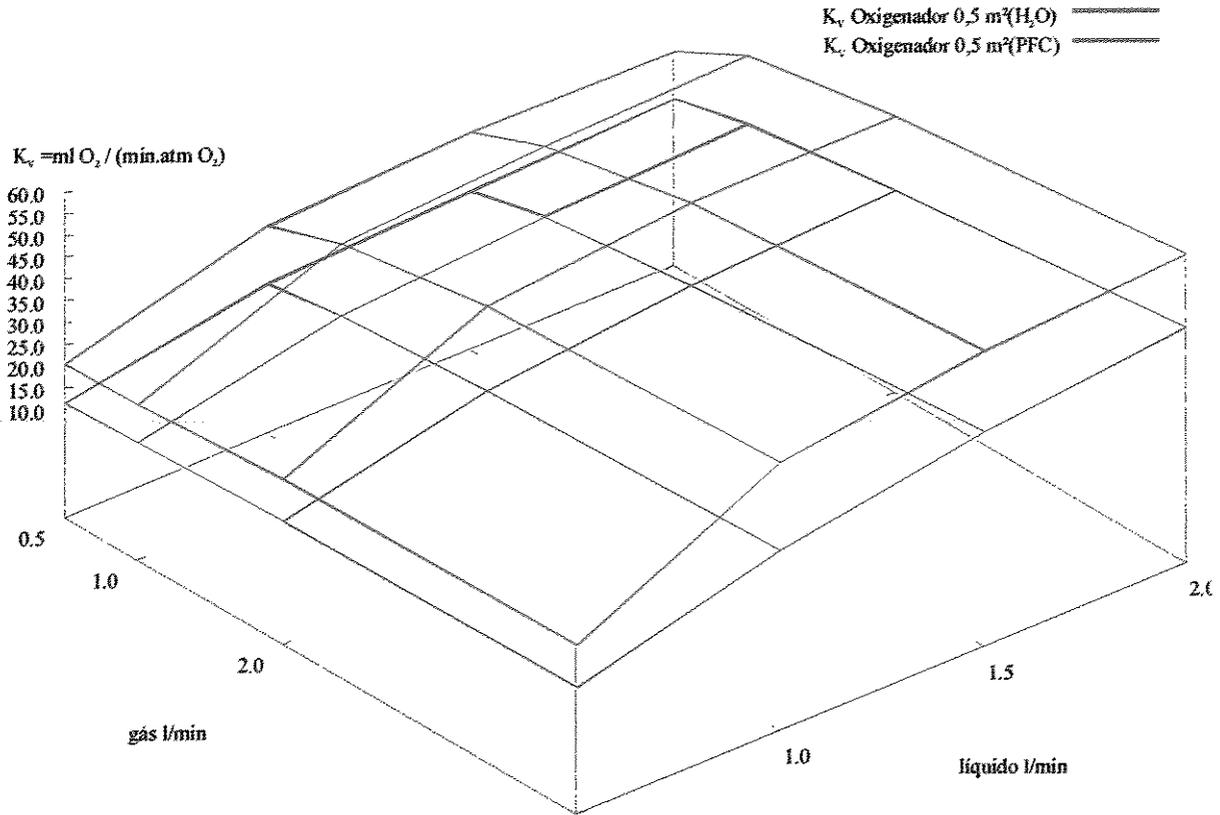


Figura 162: Mapa tridimensional dos  $K_{vs}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $0,5 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

Superfícies de  $K_v$  determinadas na Saturação de Oxigênio da Emulsão de PFC e da Água com Oxigenador com  $1,6 \text{ m}^2$

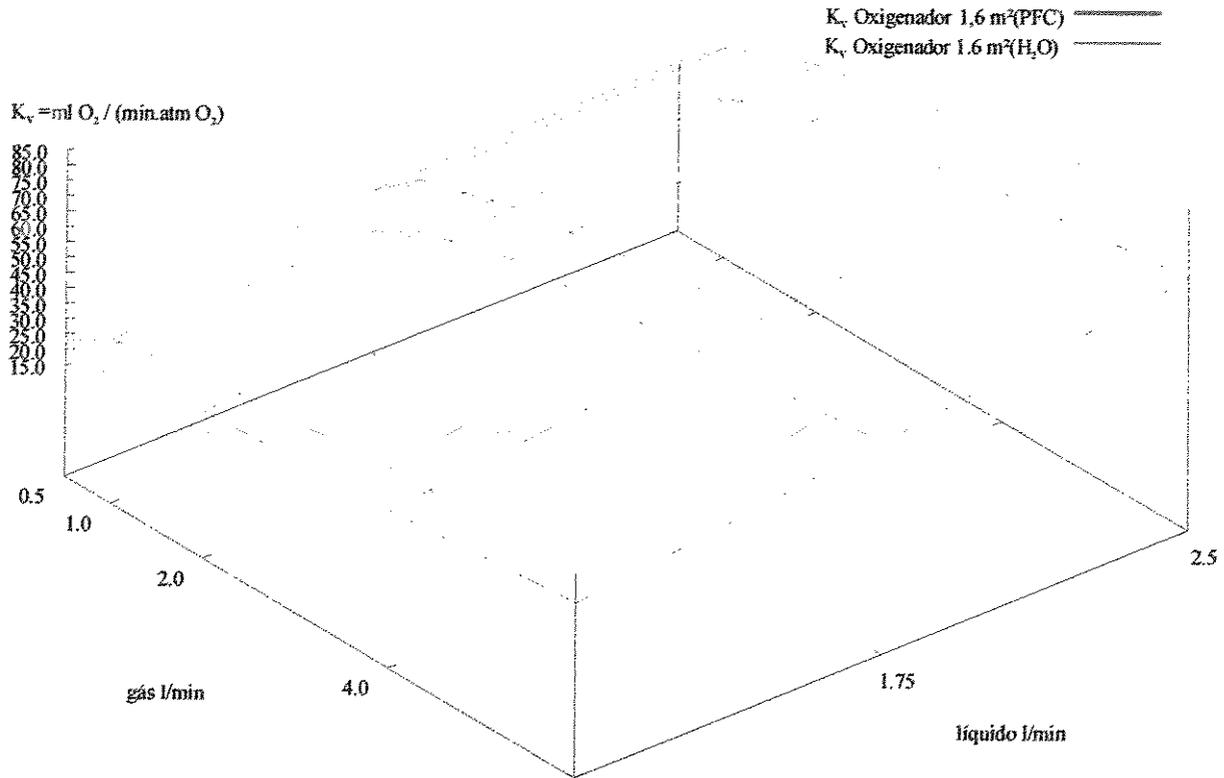


Figura 163: Mapa tridimensional dos  $K_{vS}$  obtidos para o oxigenador de membrana com área de  $1,6 \text{ m}^2$  na saturação do Oxigênio na água e na PFCE.

### Anexo VI:

Gráficos apresentando separadamente para os diversos dispositivos estudados o efeito da queda de pressão na fase gasosa sobre os valores dos  $K_{L,a}$  obtidos.

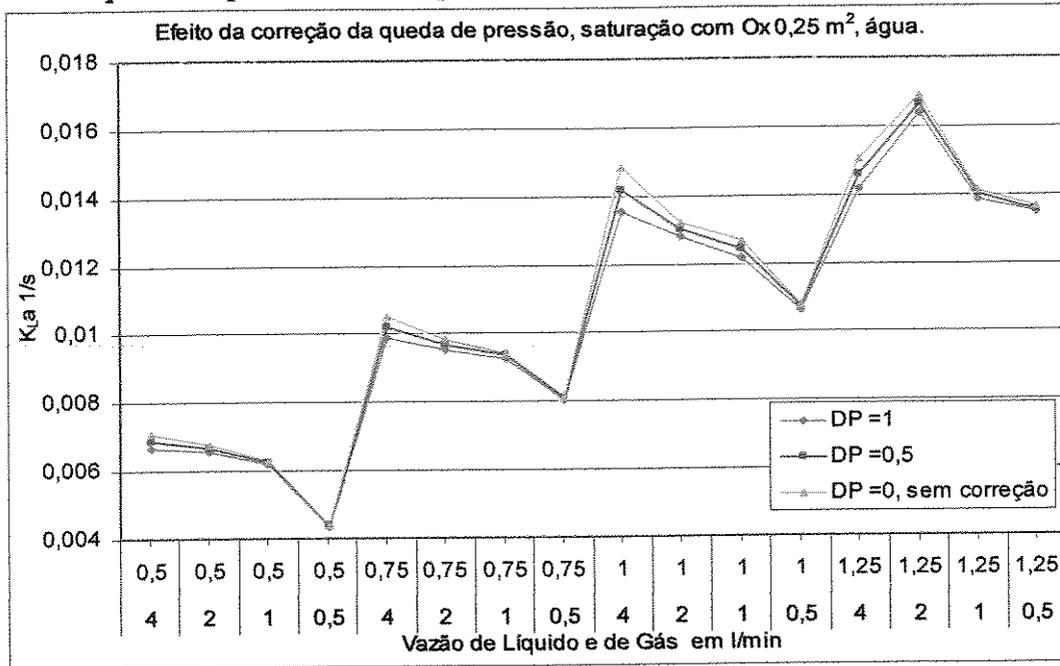


Figura 164: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{L,a}$ .

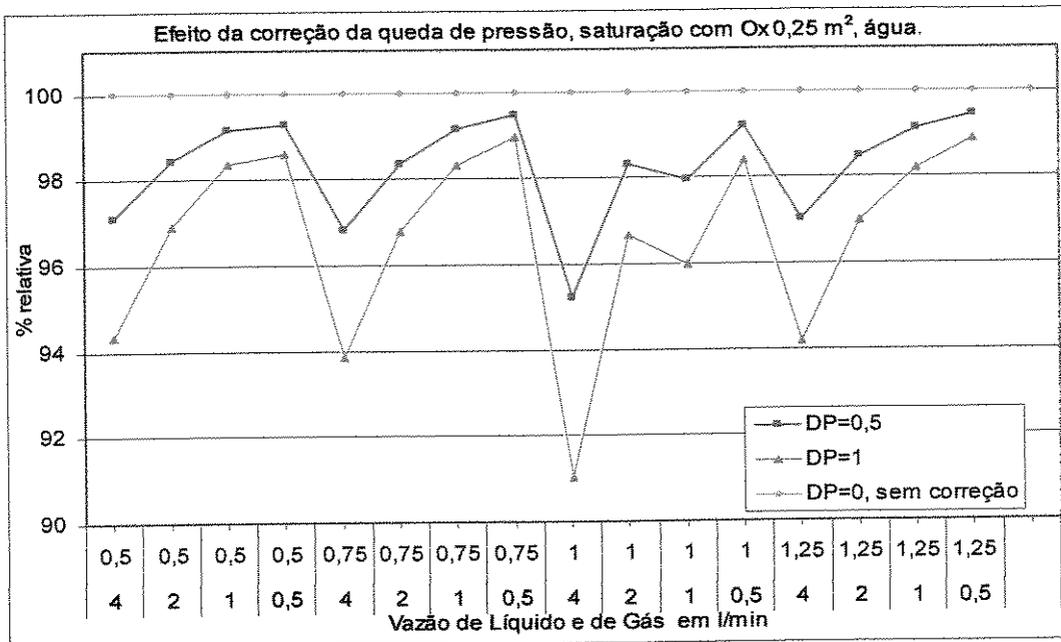


Figura 165: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{L,a}$

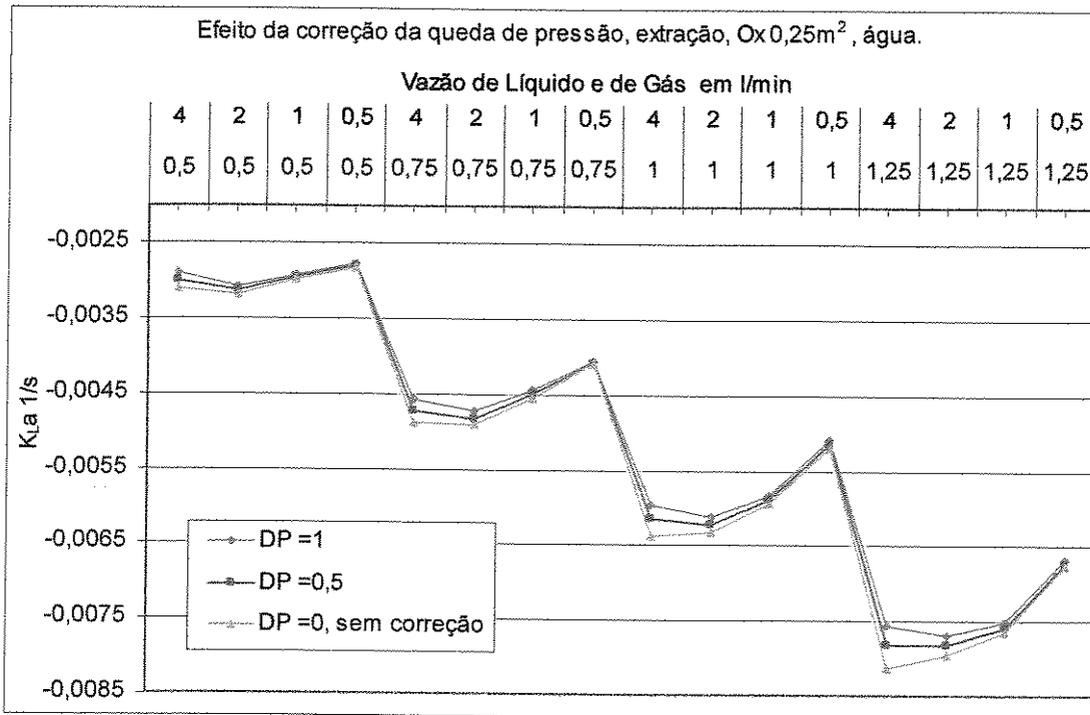


Figura 166: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

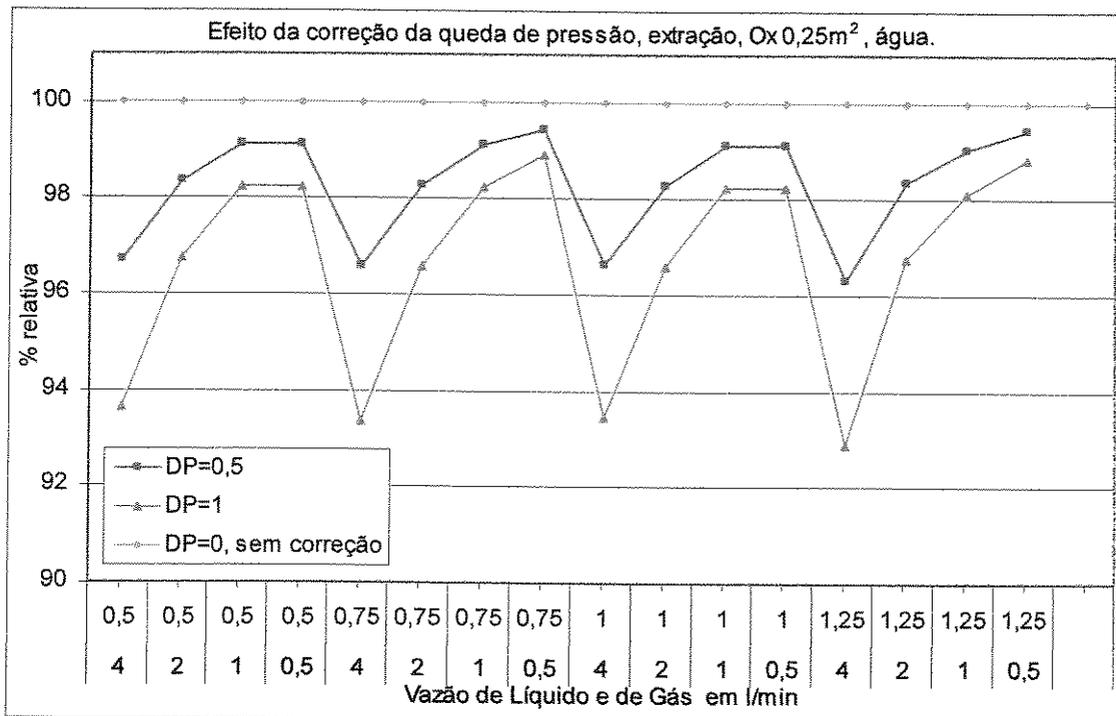


Figura 167: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

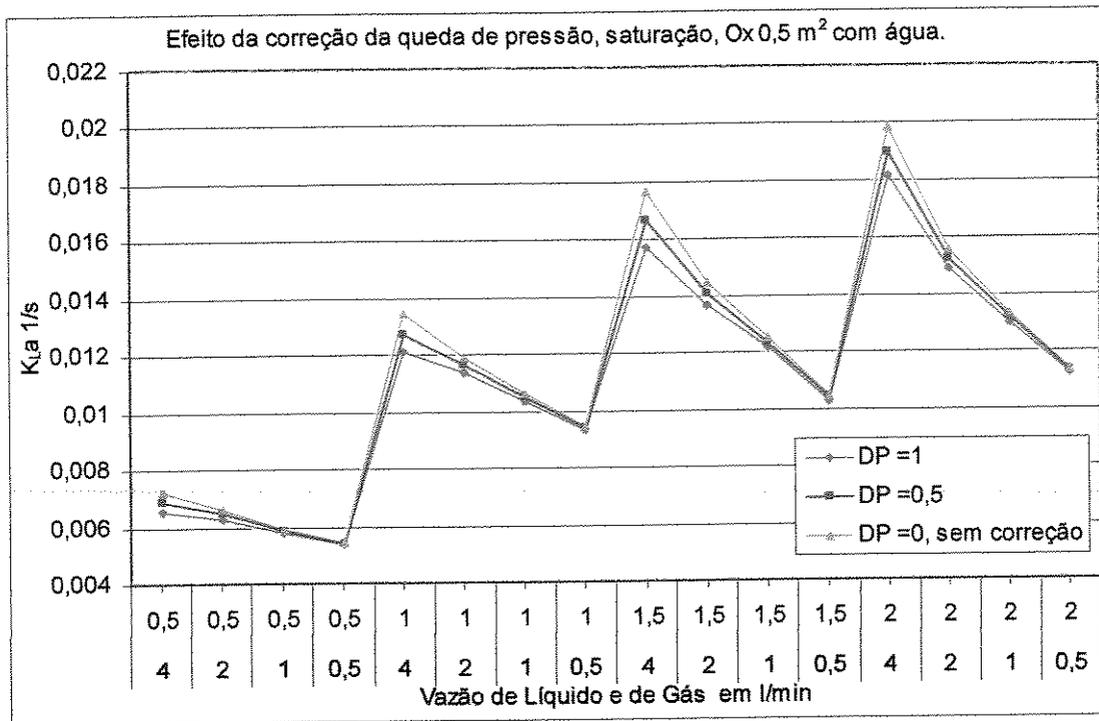


Figura 168: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do K<sub>L</sub>a.

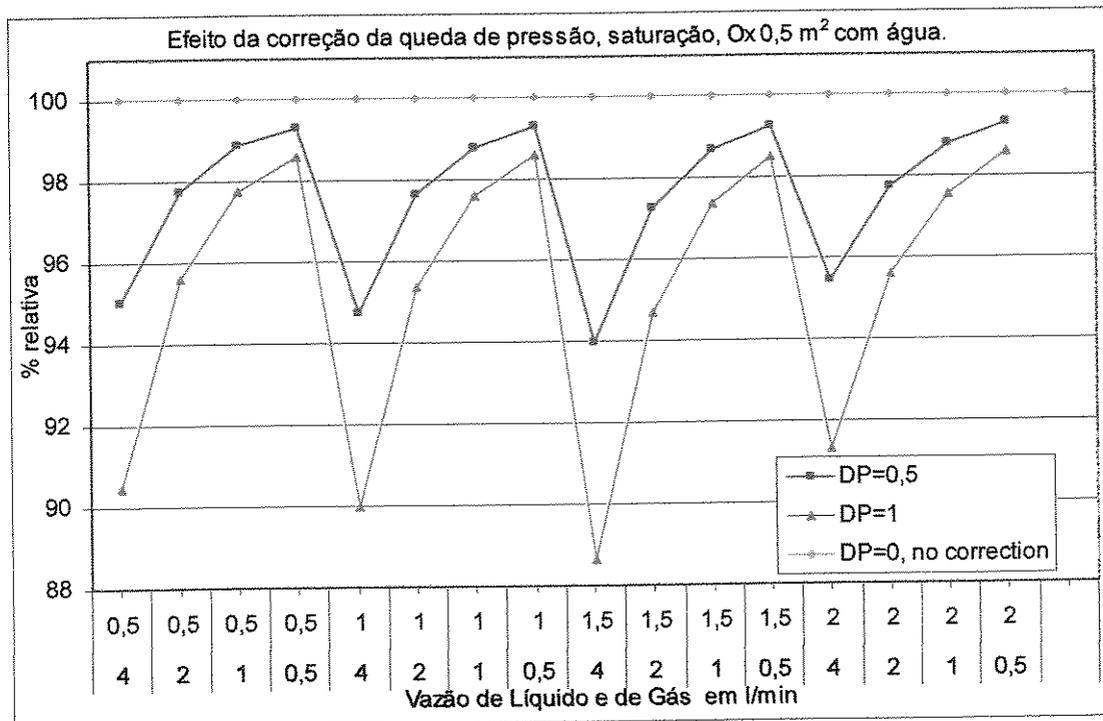


Figura 169: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do K<sub>L</sub>a.

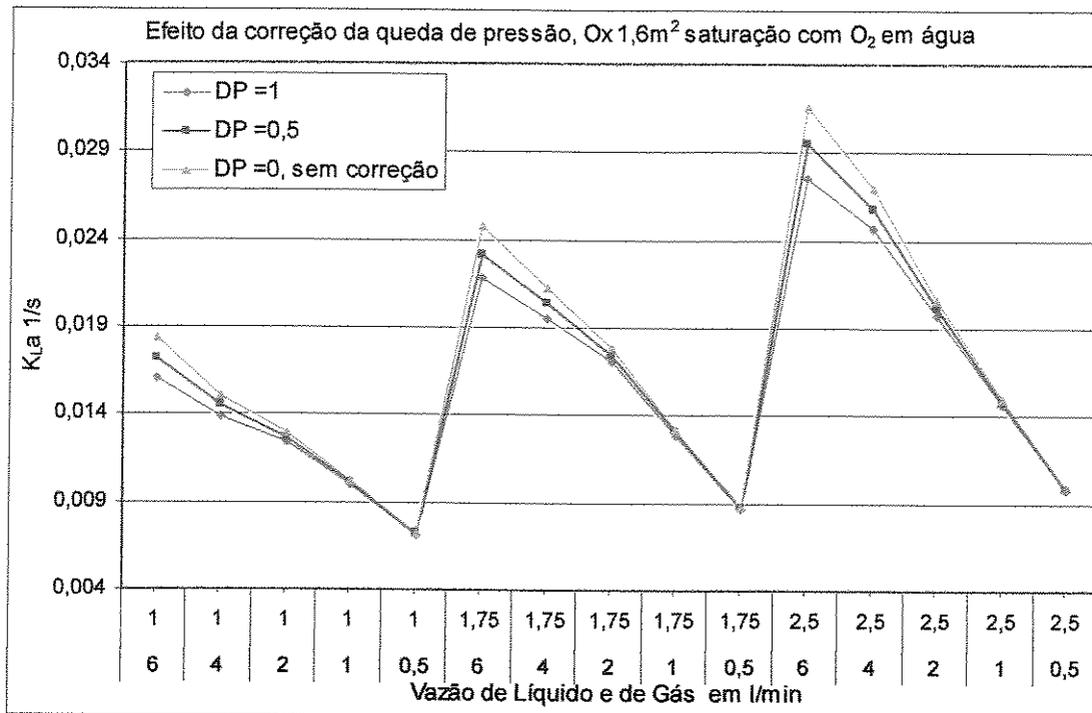


Figura 170: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{L,a}$ .

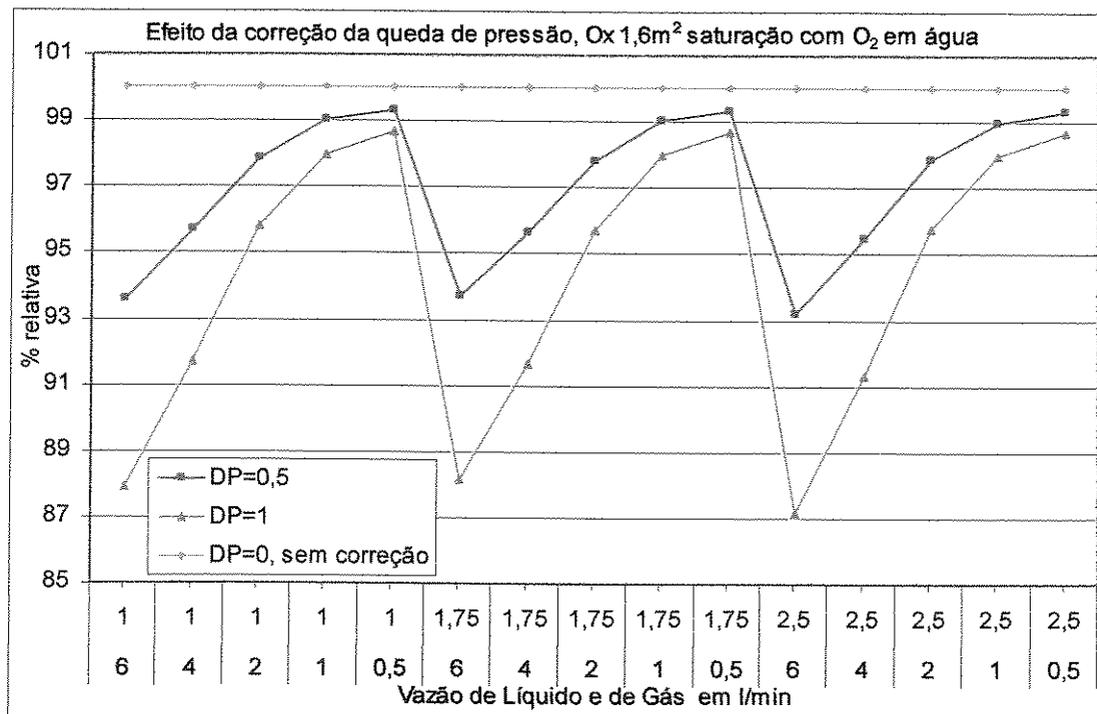


Figura 171: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{L,a}$ .

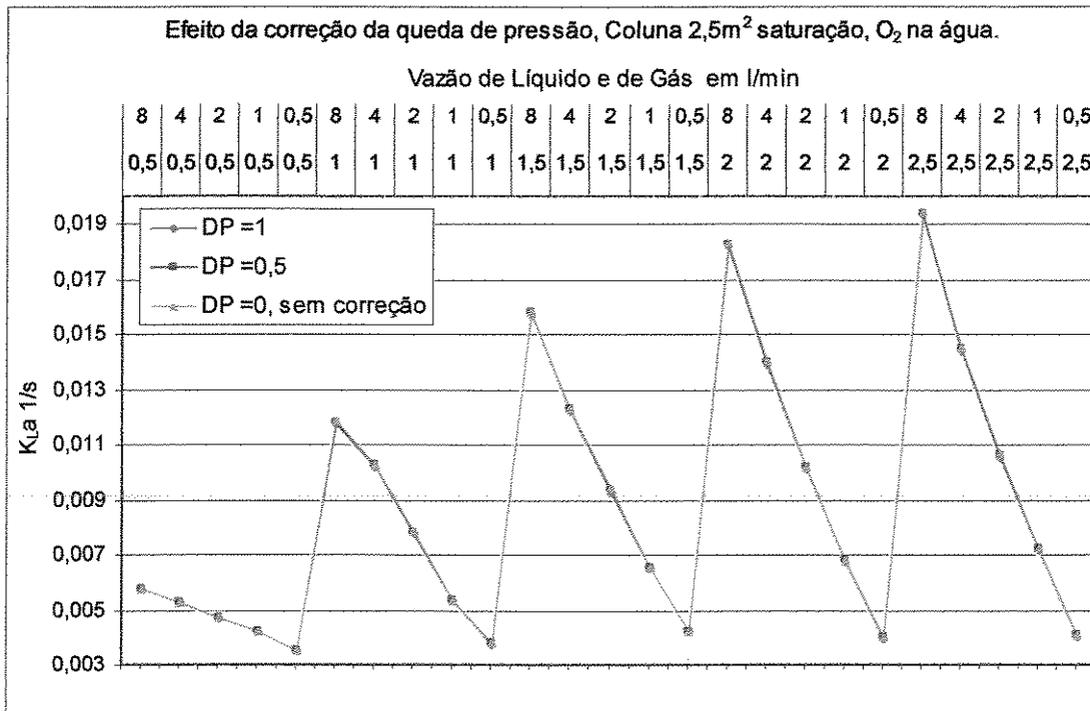


Figura 172: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

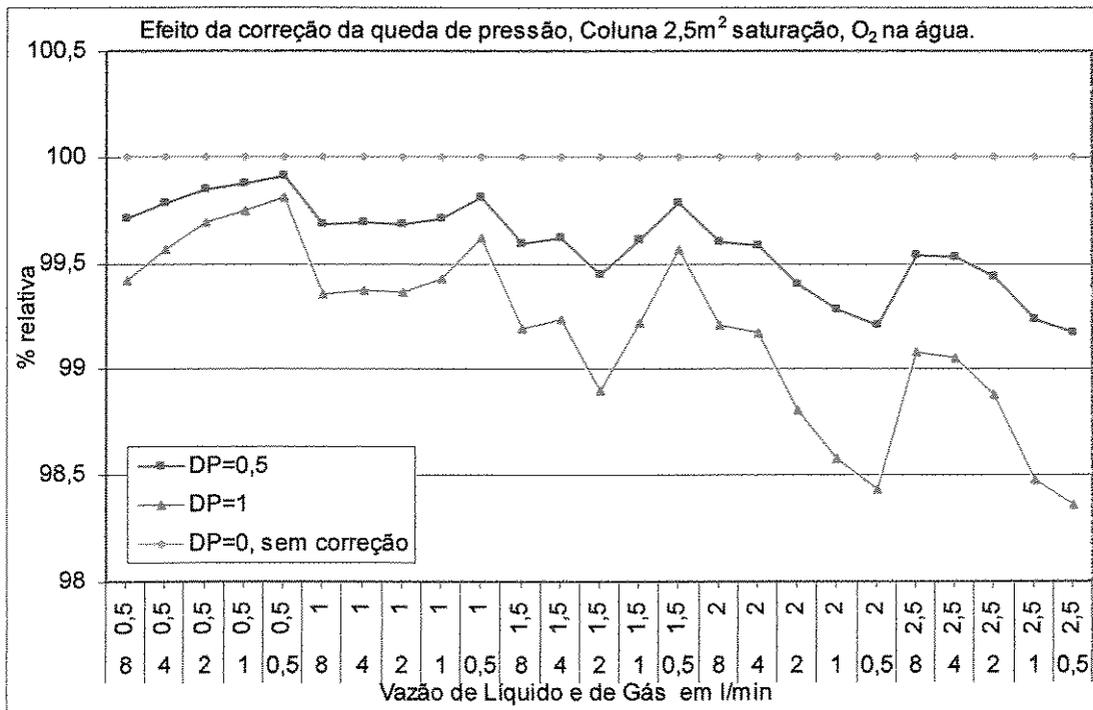


Figura 173: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

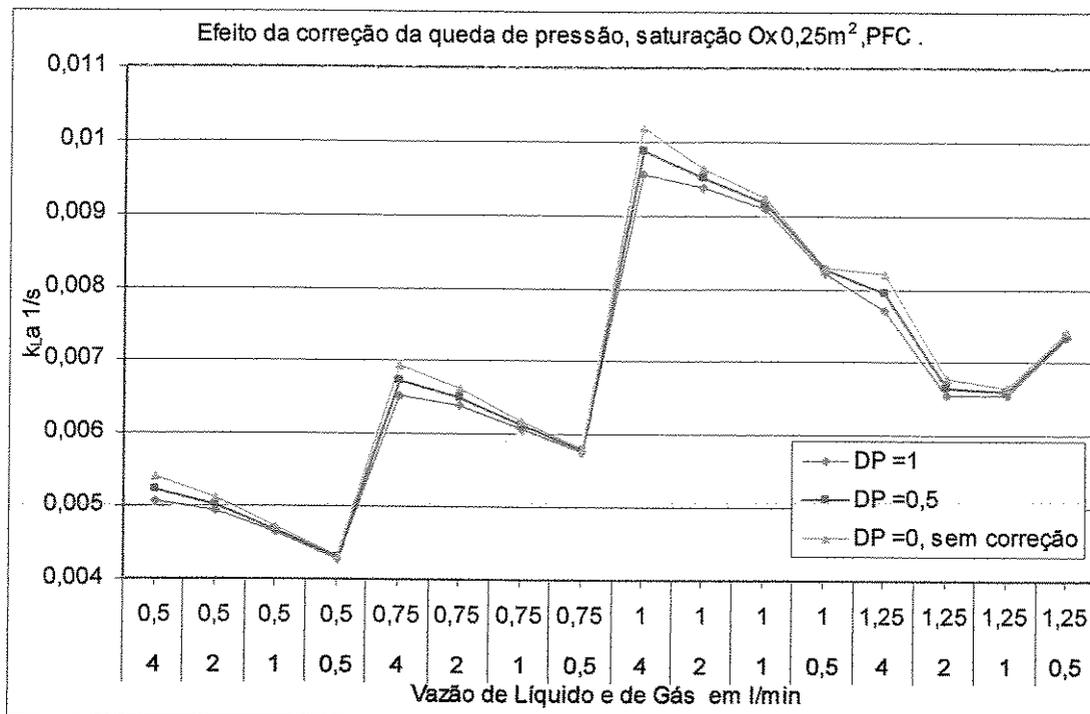


Figura 174: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{L,a}$ .

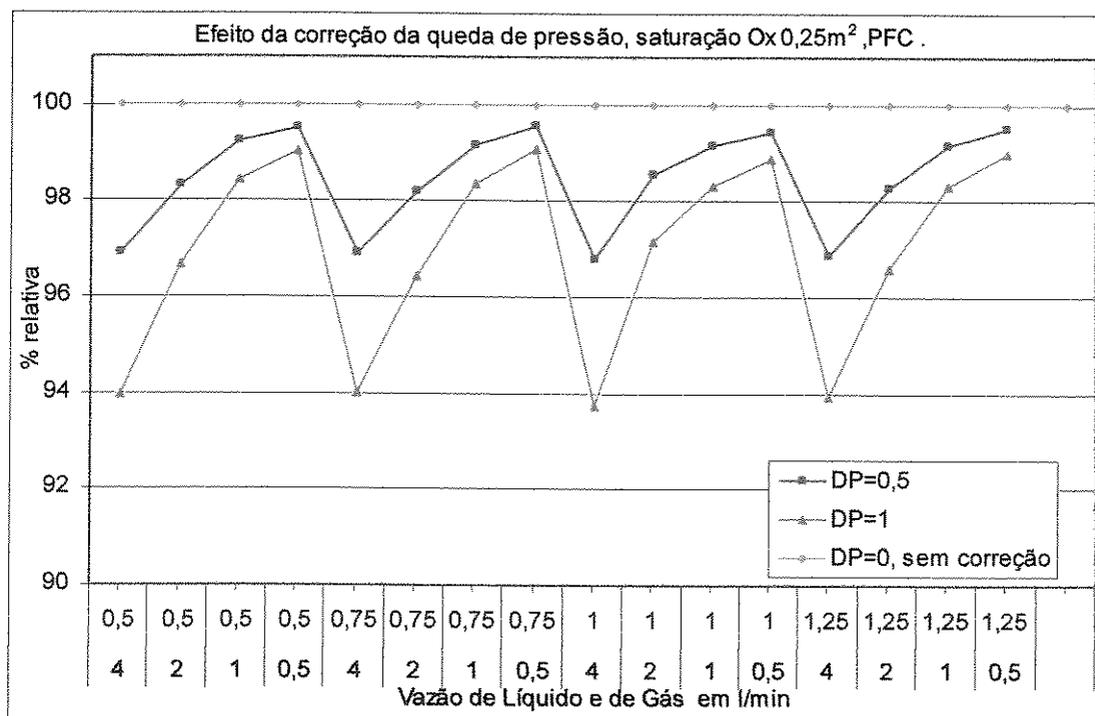


Figura 175: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{L,a}$ .

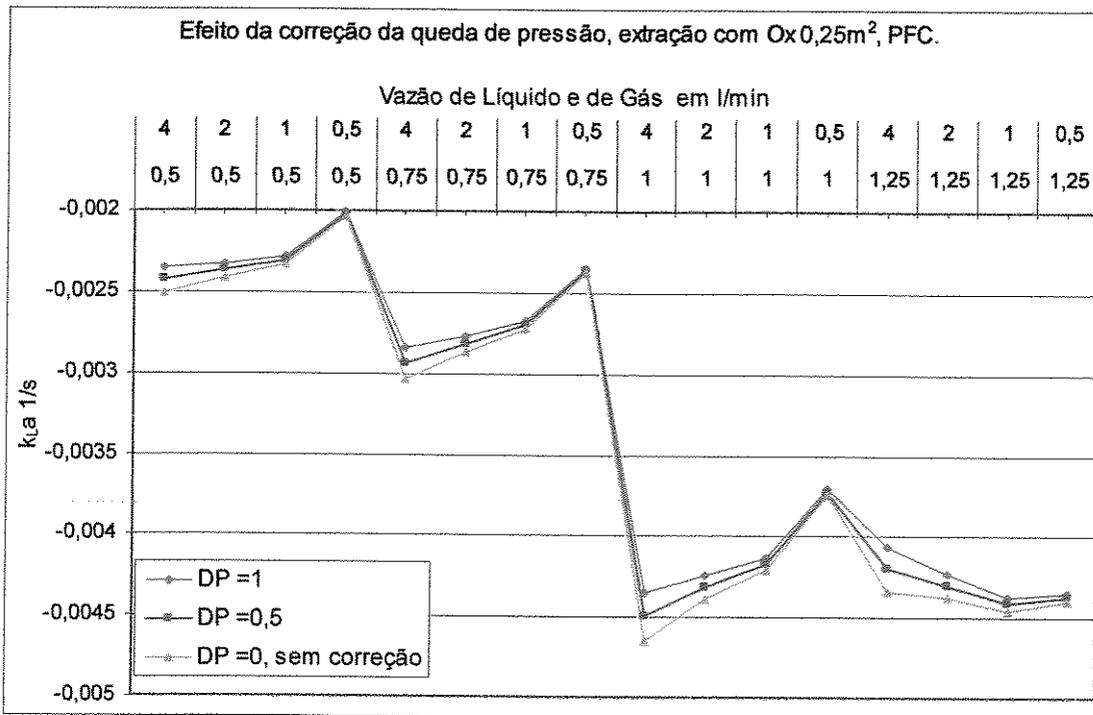


Figura 176: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{L,a}$ .

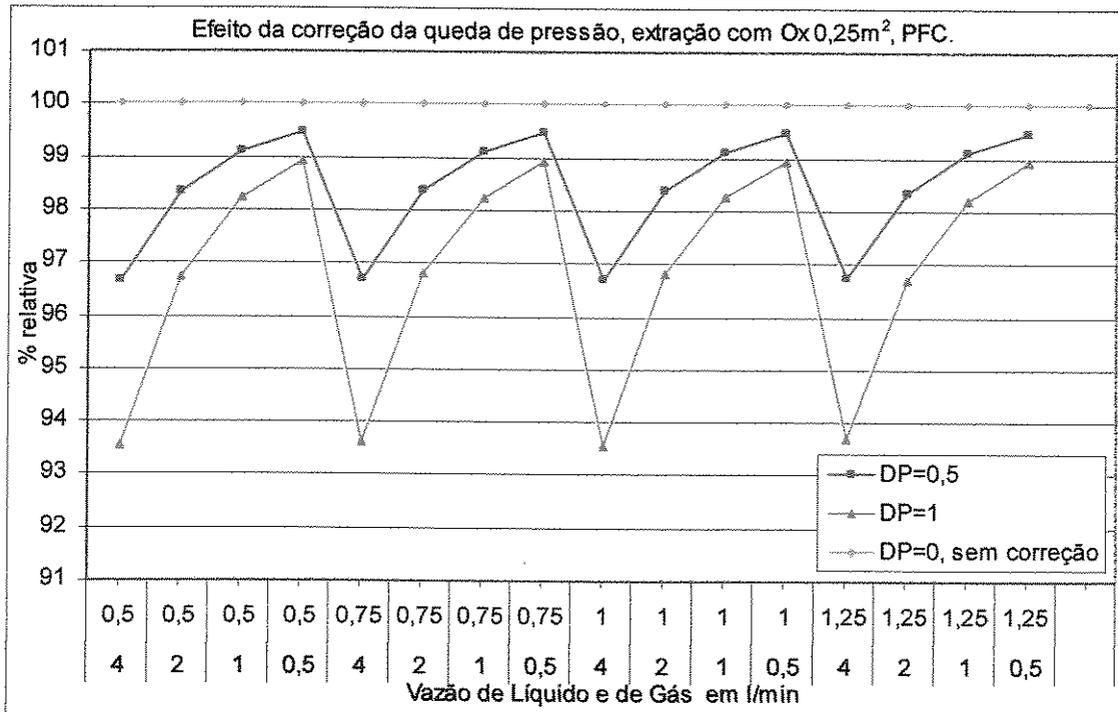


Figura 177: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{L,a}$

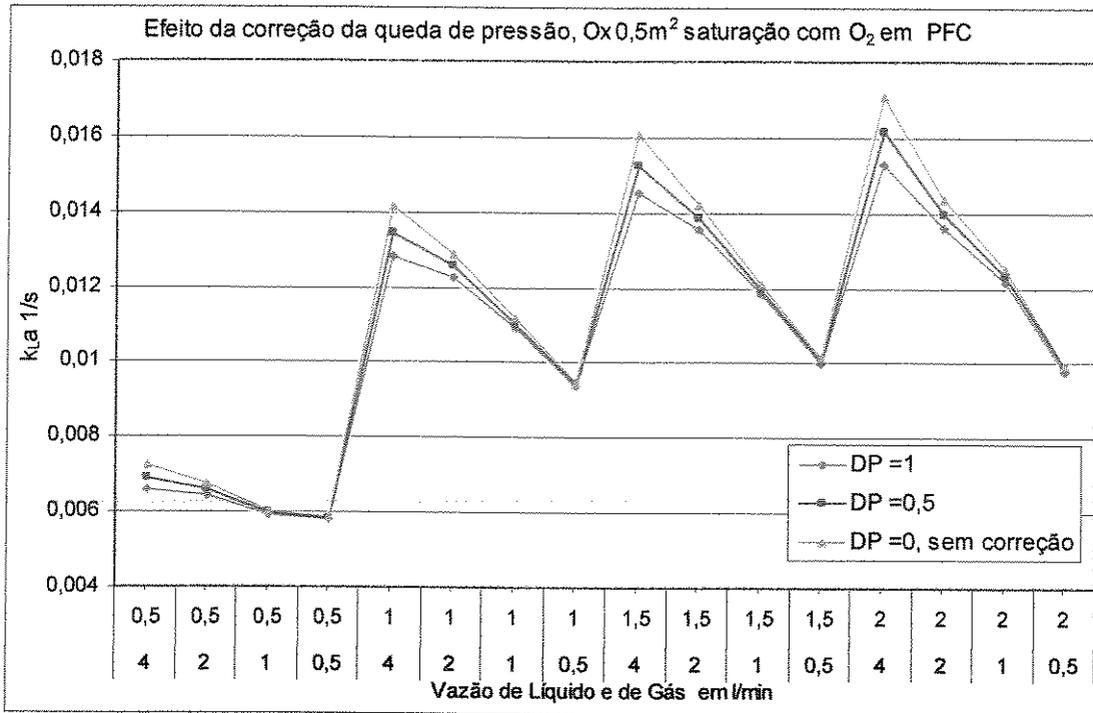


Figura 178: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{L,a}$ .

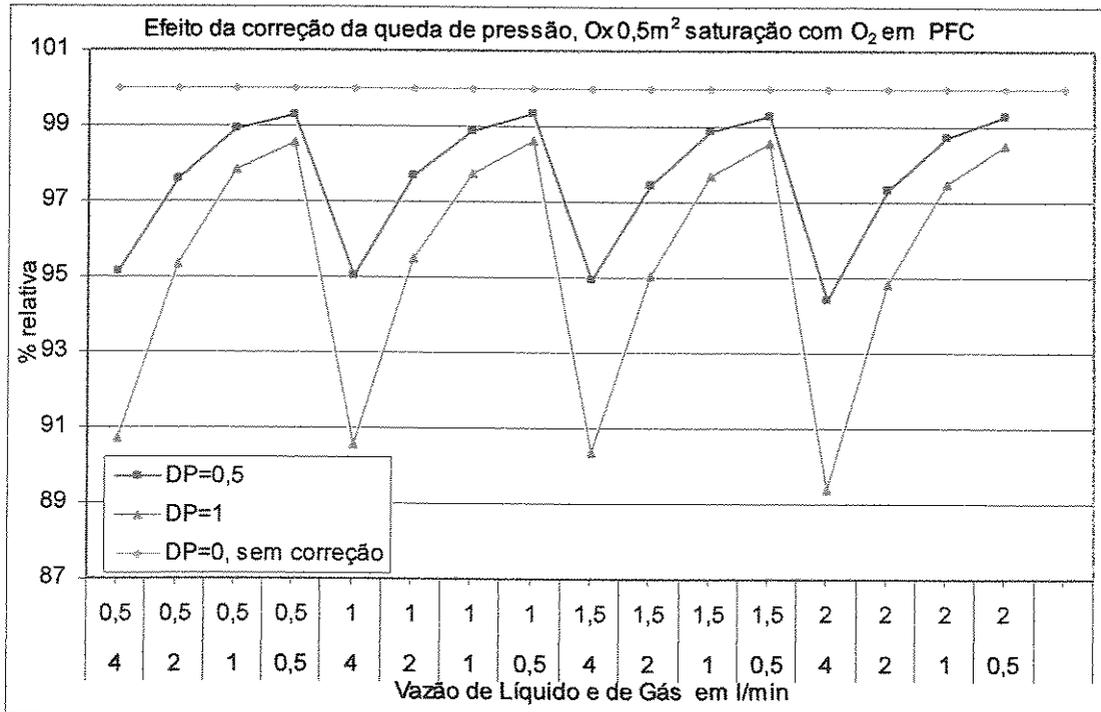


Figura 179: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{L,a}$ .

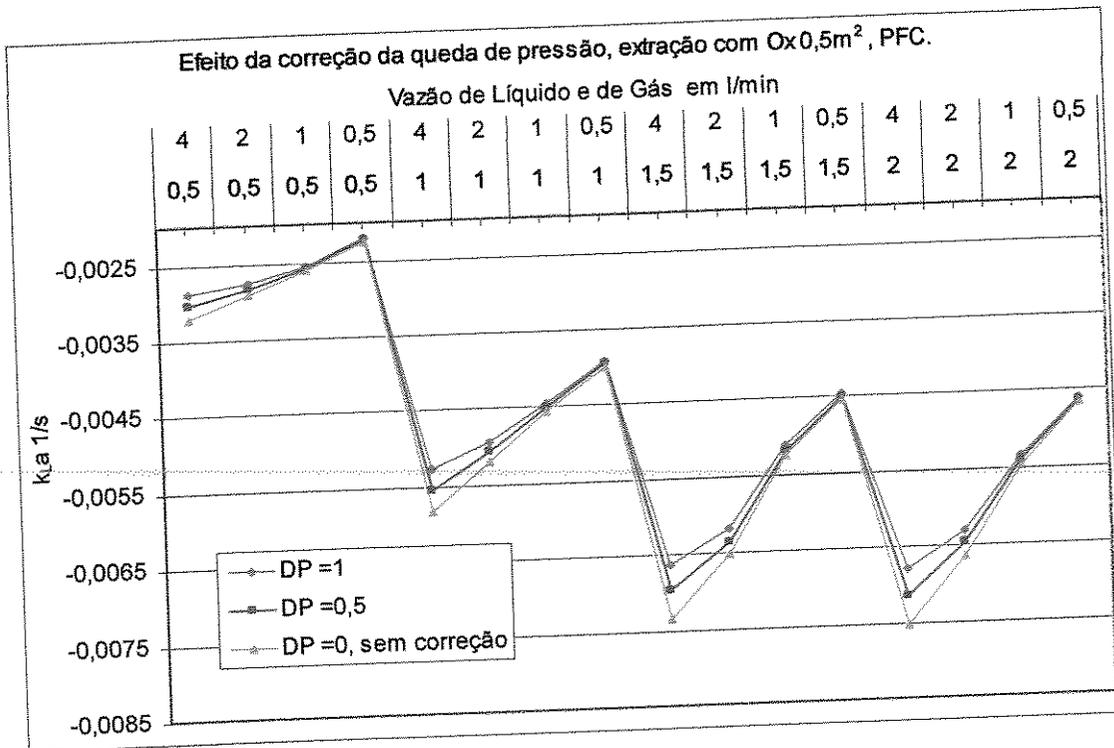


Figura 180: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

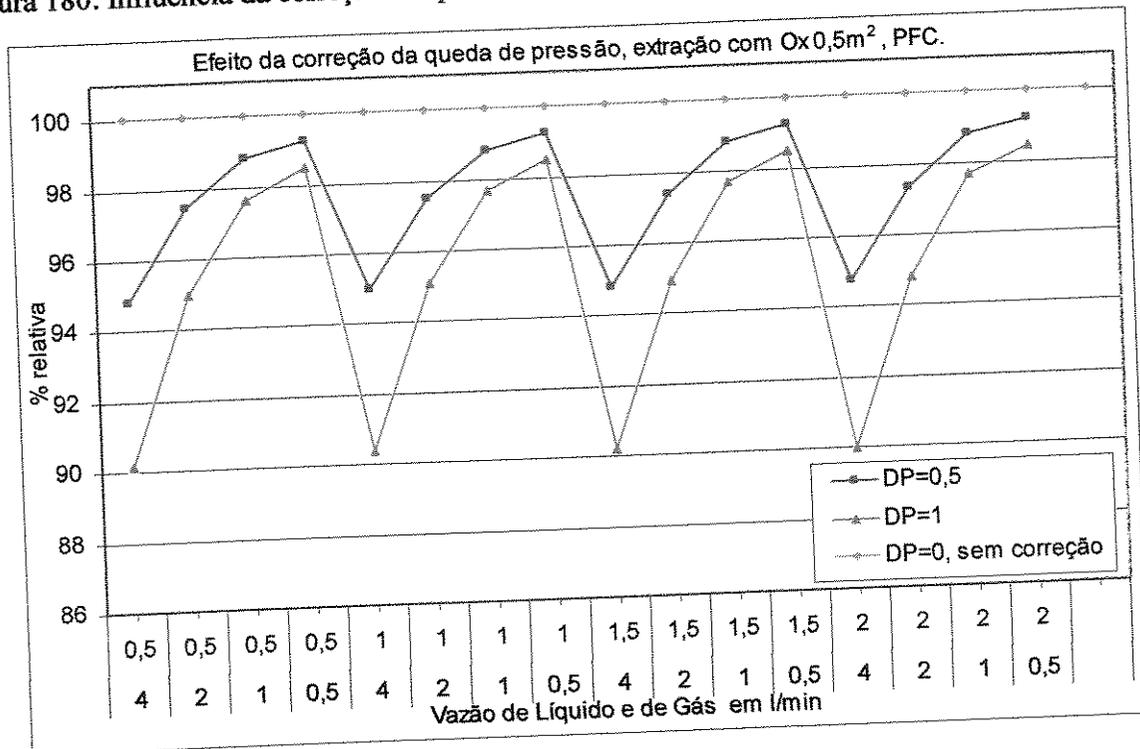


Figura 181: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

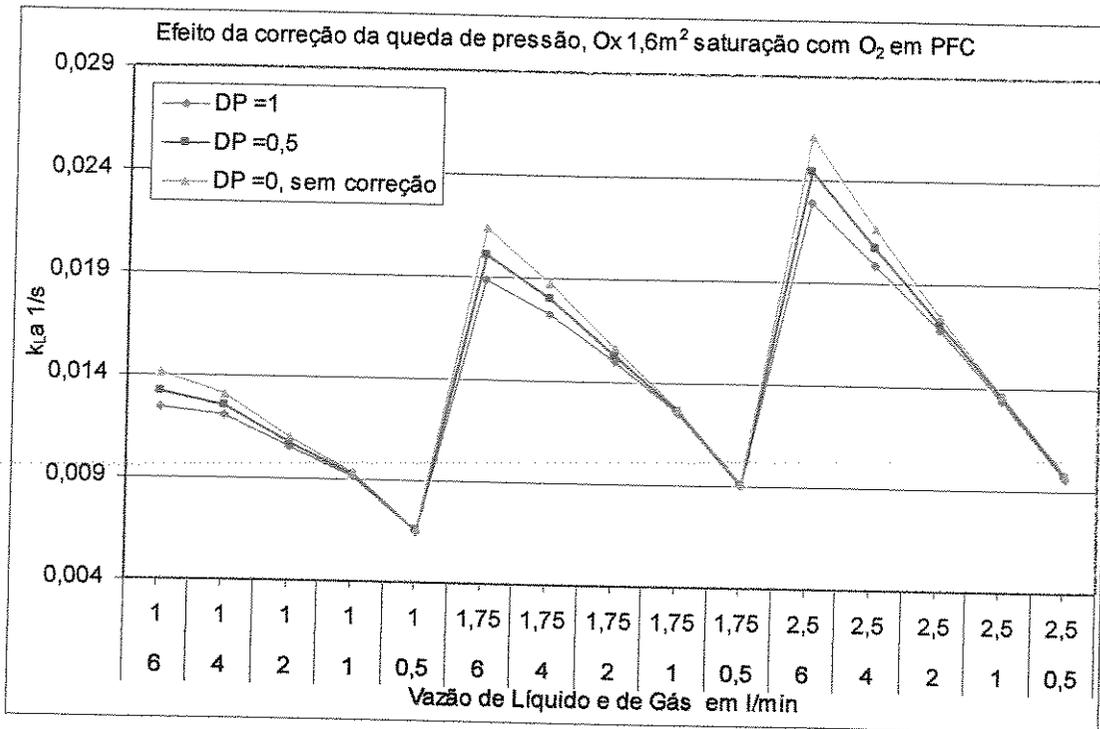


Figura 182: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

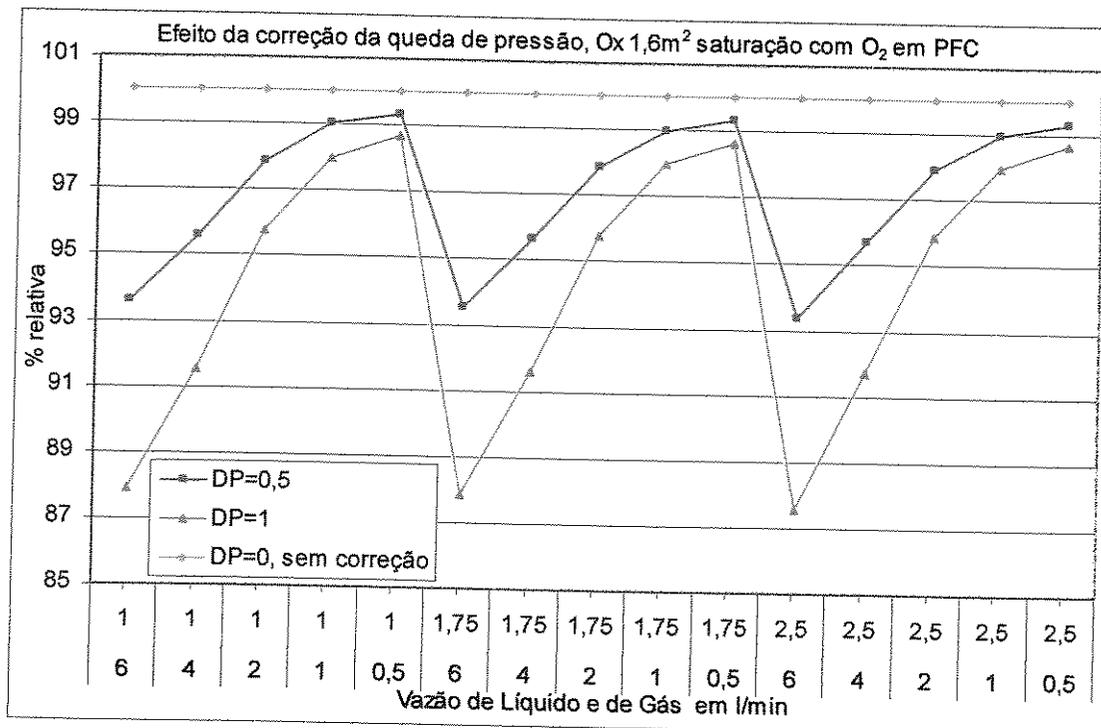


Figura 183: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

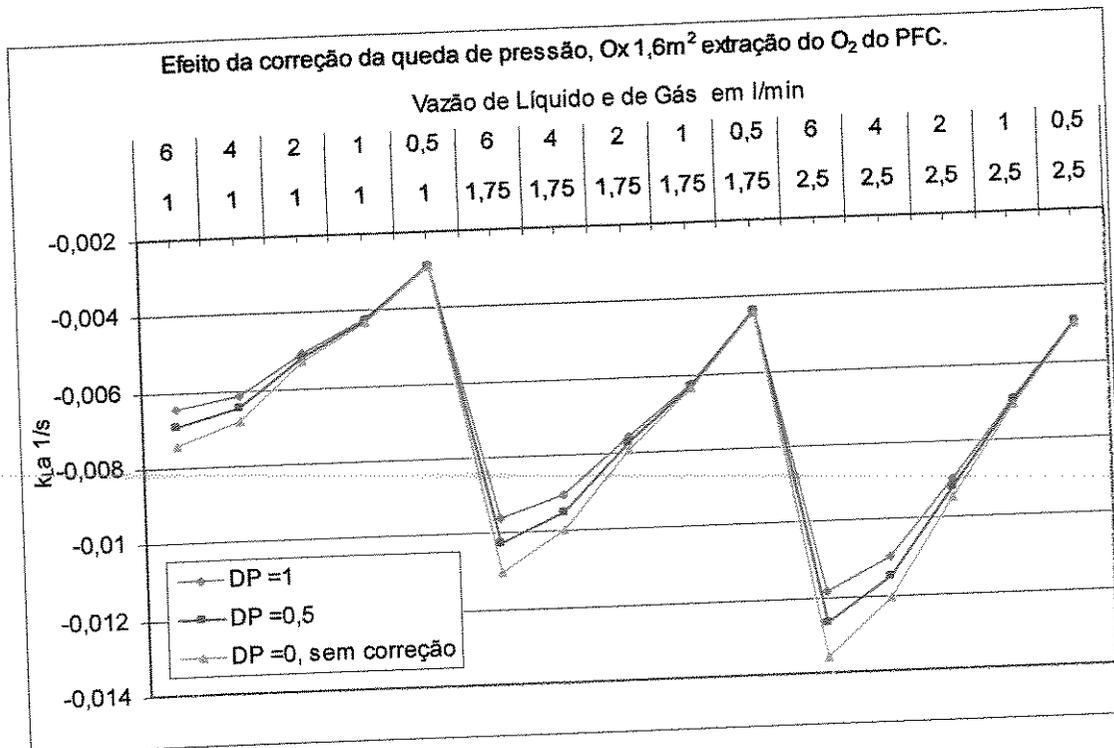


Figura 184: Influência da correção da queda de pressão na fase gasosa no valor do  $K_{La}$ .

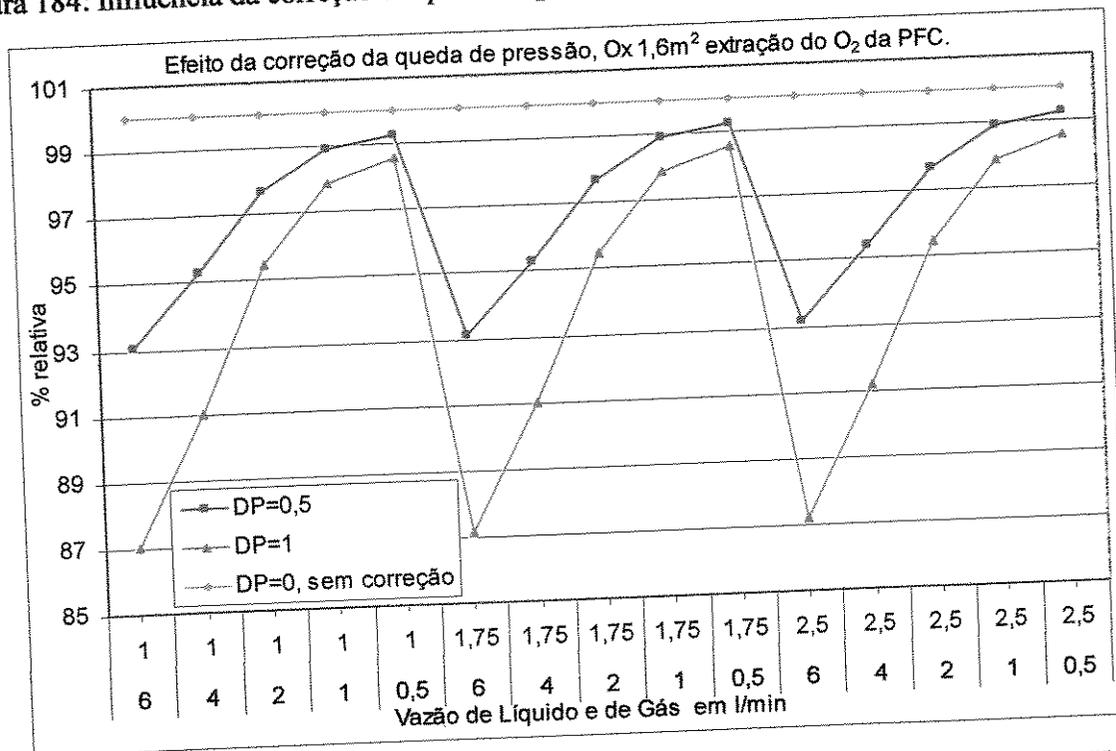


Figura 185: Efeito relativo da correção da queda de pressão na fase gasosa nos valores do  $K_{La}$ .

## Anexo VII:

Gráficos comparativos entre as correlações numéricas para os diversos dispositivos estudados.

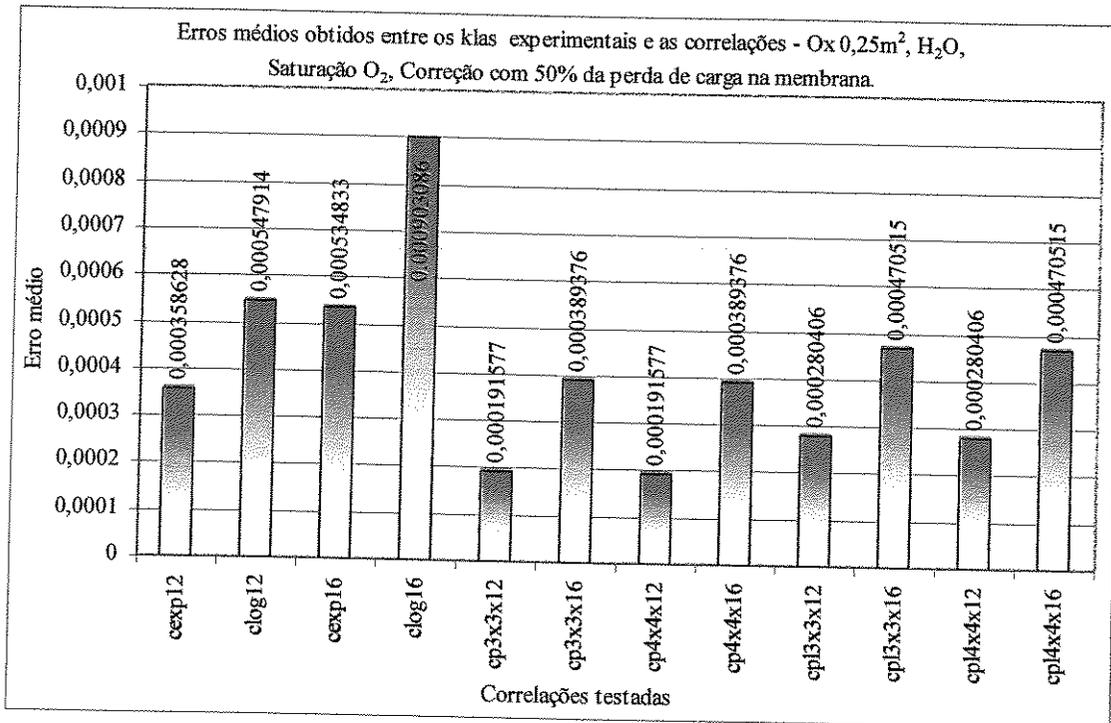


Figura 186: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> com água.

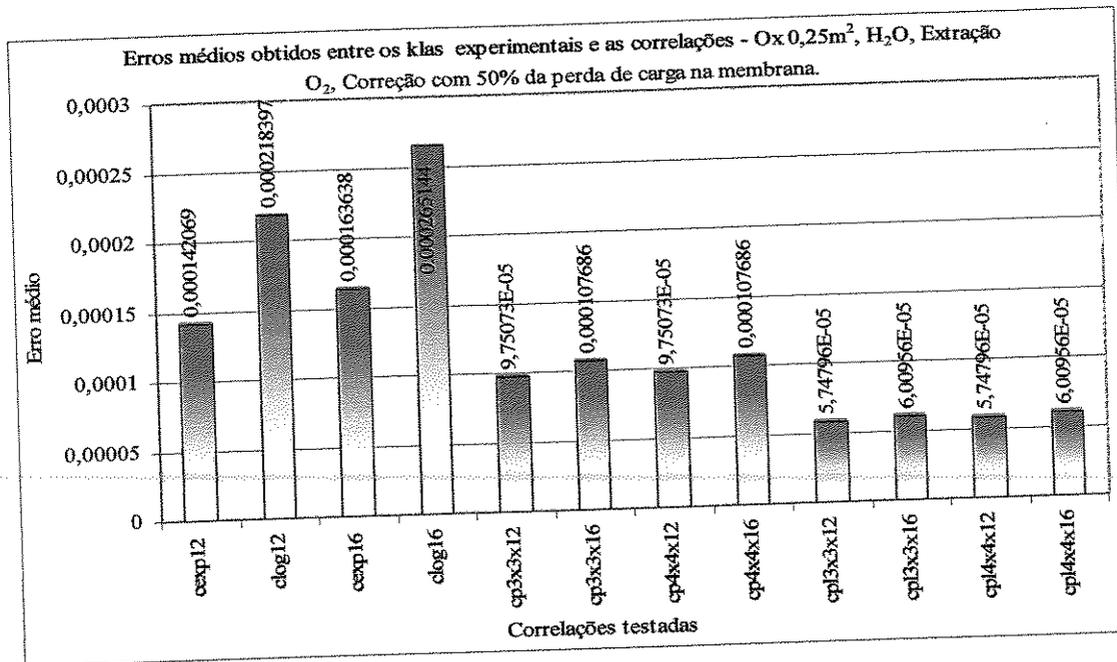


Figura 187: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de extração de O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> com água.

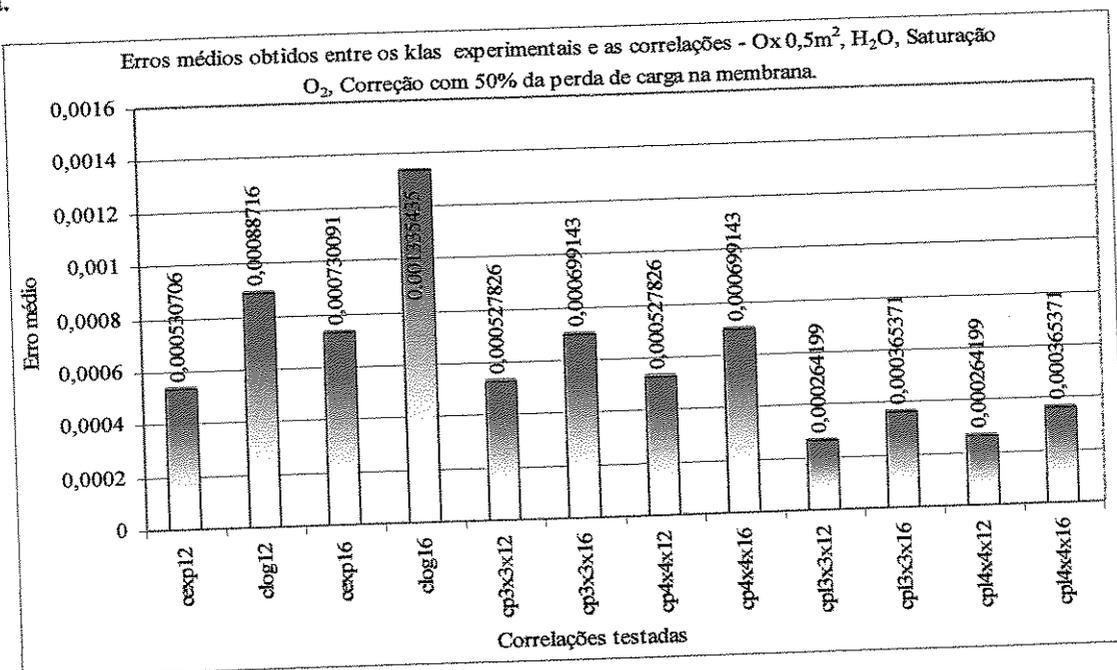


Figura 188: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,5 m<sup>2</sup> com água.

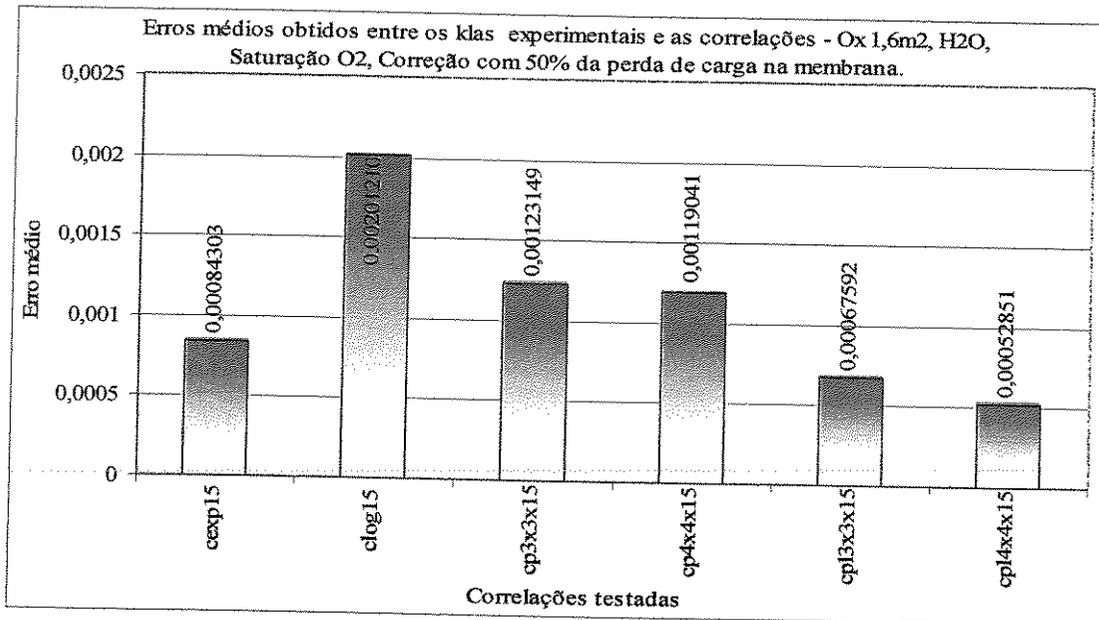


Figura 189: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para 6 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 1,6 m<sup>2</sup> com água.

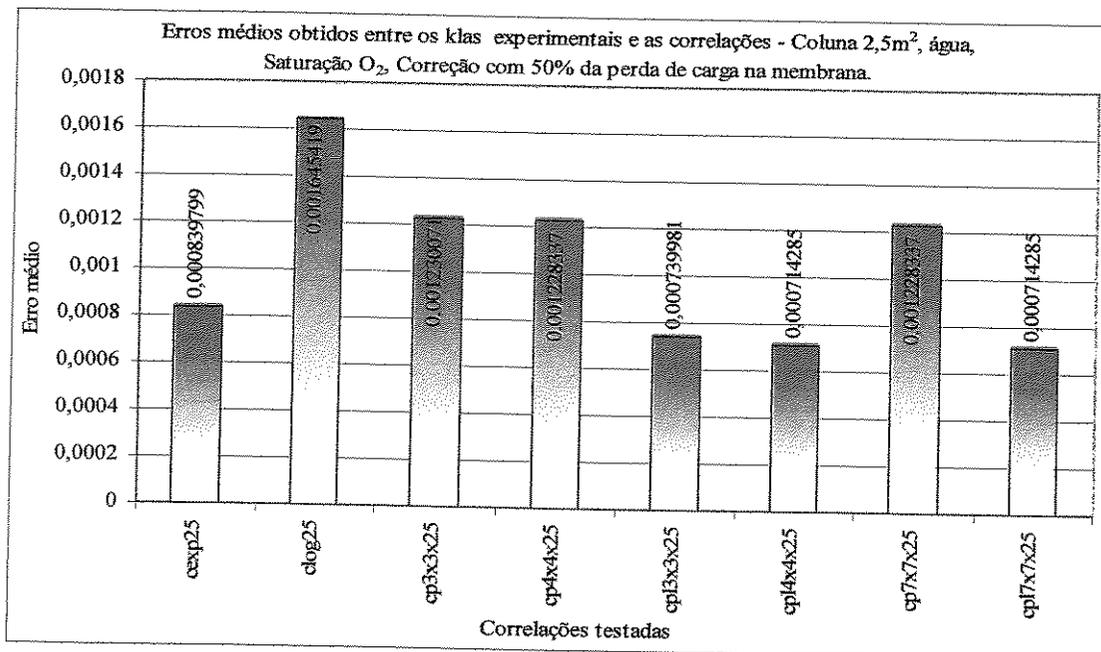


Figura 190: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 8 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com coluna de recheio com 2,5 m<sup>2</sup> com água.

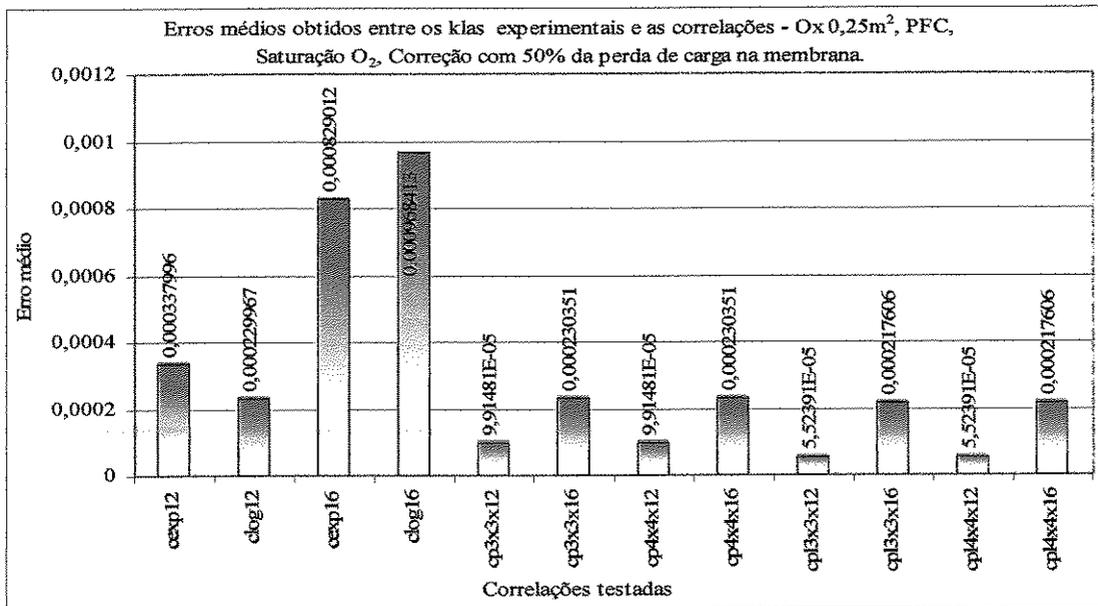


Figura 191: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,25 m<sup>2</sup> com PFCE.

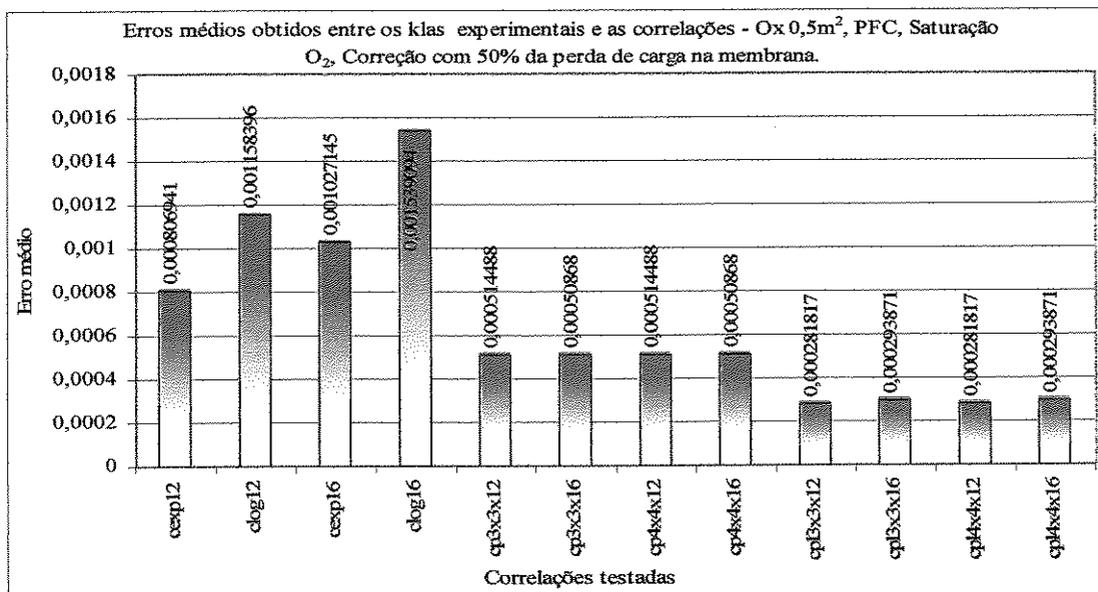


Figura 192: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador de membrana com 0,5 m<sup>2</sup> com PFCE.

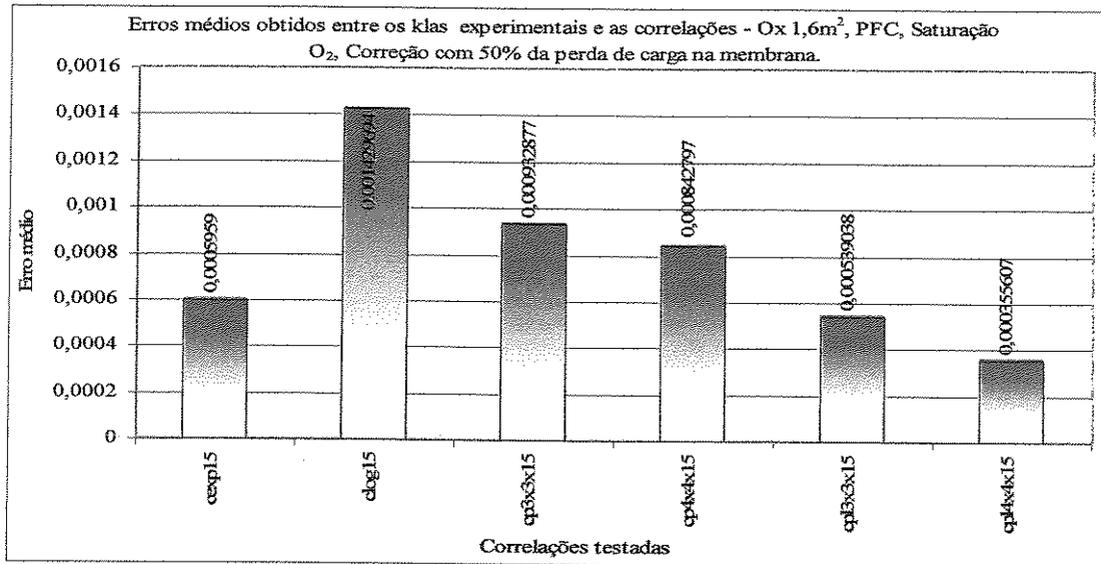


Figura 193: Quadro comparativo da qualidade dos ajustes obtidos para as 12 formas de correlação utilizadas para os ensaios de saturação com O<sub>2</sub> com oxigenador com 1,6 m<sup>2</sup> com PFCE.