

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS

ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**FATOR DE POLARIZAÇÃO E COEFICIENTE
DE PERMEABILIDADE EM UM SISTEMA DE
OSMOSE REVERSA ACIONADO POR
GERADOR FOTOVOLTAICO.**

GUSTAVO LIMA SILVA

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

MARÇO, 2012.

GUSTAVO LIMA SILVA

**FATOR DE POLARIZAÇÃO E COEFICIENTE
DE PERMEABILIDADE EM UM SISTEMA DE
OSMOSE REVERSA ACIONADO POR
GERADOR FOTOVOLTAICO.**

Dissertação submetida ao programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fontes renováveis de energia.

ORIENTADORA: DRA. OLGA DE CASTRO VILELA

CO-ORIENTADOR: DR. NAUM FRAIDENRAICH

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

MARÇO, 2012.

Catalogação na fonte

Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4 664

- | | |
|-------|--|
| S586f | <p>Silva, Gustavo Lima.</p> <p>Fator de polarização e coeficiente de permeabilidade em um sistema de osmose reversa acionado por gerador fotovoltaico / Gustavo Lima Silva. - Recife: O Autor, 2012.</p> <p>xvii, 69 folhas, il., gráfs., tabs., figs.</p> <p>Orientadora: Profª. Dra: Olga de Castro Vilela
Co-orientador: Dr. Naum Fraidenraich
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2012.</p> <p>Inclui Referências Bibliográficas.</p> <p>1. Engenharia Nuclear. 2. Osmose reversa. 3. Fator de polarização. 4. Coeficiente de permeabilidade. 5. energia solar. 6. gerador fotovoltaico. 7. Dessalinização. I. Vilela, Olga de Castro (orientadora). II. Título.</p> <p>621.48 CDD (22. ed.)</p> <p>UFPE
BCTG/2012-176</p> |
|-------|--|

FATOR DE POLARIZAÇÃO E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM UM SISTEMA DE OSMOSE REVERSA ACIONADO POR GERADOR FOTOVOLTAICO

Gustavo Lima Silva

APROVADO EM: 08.03.2012

ORIENTADORA: Prof.^a Dra. Olga de castro vilela

CO-ORIENTADOR: Prof.^o Dr. Naum Fraidenraich

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.^o Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho – DEQ/UFPE

Prof.^o Carlos Costa Dantas – DEN/UFPE

Prof.^a Dra. Elielza Moura de Souza Barbosa – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/UFPE-CRCN-NE/CNEN

Aos meus pais, Irenilda e José Antônio (In Memoriam), pelo exemplo de vida, incentivo e bravura.

À minha amada Esposa e Companheira, Wanessa, pelo seu amor e apoio. E aos meus filhos Sarah, Samuel e Esther.

Dedico.

“Como professor devo saber que sem a curiosidade que me move, que me inquieta, que me insere na busca, não aprendo nem ensino.”

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, a Professora Olga de Castro Vilela e ao Professor Naum Fraidenraich, por todas as contribuições, orientações, pela dedicação e estímulo às pesquisas.

Ao CNPq e ao CAPES pelo incentivo concedido através das bolsas, ao Departamento de Energia Nuclear e ao Professor Elmo Silvano de Araújo, pelo apoio e oportunidade concedida.

Aos Professores Carlos Dantas, Elielza Barbosa, Mauricio Motta Sobrinho pelas convenientes ajudas e contribuições.

A minha amada esposa Wanessa, que me incentivou e apoiou, a quem sou grato e feliz por estar ao seu lado.

Aos todos os obreiros da JOCUM-Aracaju (Brasil) e da JOCUM-Gabu (Guine Bissau), pelo apoio, em Especial a Missionária Anneliesse Silva e aos Missionários Wesley e Rose, pela compreensão e incentivo sempre demonstrados, que direta e indiretamente também colaboraram conosco.

Aos Amigos Rinaldo, Marcelo, Eric e Guilherme pela contribuição técnica para a realização desta dissertação. E a Magali e Nilvania por todo o apoio na secretaria do PROTEN.

Aos meus colegas e amigos de sala de aula pelo apoio: Breno, Gustavo, Carlos, Helmut, Gilmaro e Milton.

À Deus, quem tem me sustentado e fortalecido para a vencer as jornadas da vida.

A todos os meus amigos e familiares que sempre têm me honrado no apoio dessa jornada, fica o meu Muito Obrigado.

FATOR DE POLARIZAÇÃO E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM SISTEMAS DE OSMOSE REVERSA ACIONADOS POR GERADOR FOTOVOLTAICO.

Autor: Gustavo Lima Silva

ORIENTADORA: DRA. OLGA DE CASTRO VILELA

CO-ORIENTADOR: DR. NAUM FRAIDENRAICH

RESUMO

Neste trabalho analisa-se o comportamento dos parâmetros fator de polarização e coeficiente de permeabilidade de um sistema de osmose reversa (OR) acionado por uma fonte de alimentação variável como, por exemplo, um gerador fotovoltaico. No processo de OR as condições de entrada determinam o fluxo de água permeada. Em sistemas ligados à rede elétrica convencional, as condições iniciais são fixas. Porém em sistemas de OR alimentados por geradores FV sem baterias, além da variação das condições internas, são introduzidas variações na vazão e pressão de entrada e, conseqüentemente, na vazão e salinidade do permeado. As variações de vazão e pressão produzidas pela fonte resultam em variações dos parâmetros que regem o processo: a) O coeficiente de permeabilidade (K_{per}) que expressa a maior ou menor capacidade que a membrana tem de permitir que as moléculas, neste caso de água, se difundem através dela e b) O fator de polarização (f_p), que produz uma diminuição do fluxo do permeado devido à acumulação de íons na parede da membrana. Na maioria dos trabalhos que permitem simular o comportamento de sistemas de OR esses parâmetros são considerados constantes. Neste trabalho foram realizados experimentos em um sistema de OR configurado para operar com um gerador FV. Entretanto, no intuito de manter o controle sobre as condições operacionais dos ensaios, um conversor de frequência ligado à rede elétrica foi empregado para simular o comportamento do gerador fotovoltaico. Dois procedimentos foram utilizados para a determinação dos parâmetros f_p e K_{per} . No primeiro, equações disponíveis na literatura para o cálculo desses parâmetros, a partir da vazão de permeado, foram utilizadas para estimar os parâmetros (f_p e K_{per}). Um modelo de desempenho do sistema de OR desenvolvido no Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco (FAE-DEN-UFPE) foi utilizado para estimar a vazão de permeado. Nesse caso, apenas condições de entrada do sistema (vazão, pressão, salinidade) são necessárias. No segundo procedimento, os parâmetros (f_p e K_{per}) foram obtidos pelo método denominado de “extração de parâmetros”. Uma comparação entre a vazão de

permeado calculada (por meio do mesmo modelo do sistema OR citado anteriormente) e a experimental, que permanece invariável, permite estimar os valores de f_p e K_{per} que minimizam os desvios entre os valores calculados e os valores experimentais. Uma análise dos resultados obtidos para os parâmetros, f_p e K_{per} , por meio de ambos os procedimentos, para o sistema operando em condições variáveis mostrou que a pressão transmembrânica é a variável que permite uma melhor representação do comportamento desses parâmetros. Duas expressões provenientes do ajuste das curvas de f_p e K_{per} em função da pressão transmembrânica foram propostas para o sistema de OR estudado. A validade da utilização das expressões foi verificada com um segundo conjunto de dados experimentais. Para verificar os benefícios da utilização de parâmetros variáveis na determinação do comportamento do sistema foram realizados cálculos da vazão do permeado obtida com os dois procedimentos propostos e comparados com o caso em que K_{per} e f_p são considerados constantes para todas as pressões. Os resultados mostram que os desvios entre os valores da vazão de permeado estimados e experimentais diminuem drasticamente quando as variações de K_{per} e f_p são introduzidas. Desvios médios de até 23% foram observados para elevados valores de salinidade quando K_{per} e f_p são considerados fixos e desvios médios menores que 2% quando utilizados os parâmetros variáveis.

Palavras-Chave: Osmose reversa, fator de polarização, coeficiente de permeabilidade, energia solar, gerador fotovoltaico, dessalinização.

POLARIZATION FACTOR AND COEFFICIENT OF PERMEABILITY IN A REVERSE OSMOSIS SYSTEM DRIVEN BY PHOTOVOLTAIC GENERATOR

Autor: Gustavo Lima Silva

ORIENTADORA: DRA. OLGA DE CASTRO VILELA

CO-ORIENTADOR: DR. NAUM FRAIDENRAICH

ABSTRACT

In this work is analyzed the behavior of parameters, the polarization factor and permeability coefficient of a system of reverse osmosis (RO) driven by a variable power supply, for example, a photovoltaic generator. In the process of RO, the entry conditions determine the flow of water permeate. In systems connected to conventional power grid, initial conditions are fixed. However, in systems RO fed by generators PV without batteries, and beyond of variances of internal conditions, are introduced variations in flow and pressure inlet and consequently on the flow and salinity of permeate. The variations of flow and pressure produced by the source, result in variations of the parameters governing the process: a) The permeability coefficient (K_{per}) expressing the larger or smaller capacity than the membrane has to allow the molecules of water, in this case, diffuse through it and b) the polarization factor (f_p) which produces a decrease in permeate flow due to accumulation of ions in the membrane wall. In most studies that simulate the behavior of RO systems and these parameters are considered constant. In this work experiments were performed in an RO system configured to operate with a PV generator. However, in order to maintain control over the operating conditions of the tests, a frequency converter connected to the grid was used to simulate the behavior of the PV generator. Two procedures were used to determine the parameters f_p and K_{per} . In the first, published equations for calculating these parameters from the permeate flow rate were used to estimate in an iterative fashion, the same (f_p and K_{per}). A performance model of the RO system developed at the Research Group on Alternative Energy Sources of Universidad Federal of Pernambuco (FAE-DEN-UFPE) was used to estimate the permeate flow, which compares with the value initially assigned. In this case, only the system input conditions (flow rate, pressure and salinity) are required. In the second procedure, the parameters were obtained by the method called "parameter extraction." It is used for iterative

calculation of flow permeate the experimental result, which remains unchanged, and the value calculated using the same model system mentioned above RO. The values of the parameters f_p and K_{per} are modified at each step of the iteration. The permeate flow rate, obtained experimentally, acts as a reference. An analysis of the results obtained for the parameters (f_p and K_{per}) through both procedures, the system operating under varying conditions showed that the transmembrane pressure is the variable that provides a better representation of the behavior. Thus, we propose two expressions from the set of curves f_p and K_{per} according to the transmembrane pressure. The terms have been validated with a second set of experimental data. To verify the benefits of using variable parameter in determining system performance calculations were performed of the permeate flow rate obtained with both procedures proposed and compared with the case where f_p and K_{per} are considered constant for all pressures. The results show that the deviations between the values of permeate flow estimated and experimental decrease dramatically when variations are introduced f_p and K_{per} . However, average deviations of up to 23% were observed for high values of salinity when f_p and K_{per} are considered fixed and average deviations smaller than 2% when using the variable parameters

Key-words: Reverse osmosis, polarization factor, permeability coefficient, solar, photovoltaic generator, desalination.

LISTA DE FIGURAS

1. Esquema básico de funcionamento de uma membrana filtrante.	6
2. Representação esquemática das correntes de fluxos em uma membrana filtrante.	6
3. Fluxo na região próxima da membrana e o processo de polarização	8
4. Secção esquemática de uma membrana de OR em espiral.	9
5. Polarização da concentração; Perfis de concentração em estado estacionário na fase fluida.	18
6. Comparação entre K_{per} constante e variável com a pressão.	24
7. Diagrama do sistema de osmose reversa utilizado.	27
8. Bancada experimental de Osmose Reversa. (1) Entrada de água nas membranas (2) Saída do concentrado.	28
9. Instalações da bancada de OR. (a) reservatório para o preparo da solução de água salobra; (b) sistema de OR com o quadro de leitura automática dos níveis de salinidade e vazão; (c) sistema de aquisição de dados.	29
10. Layout das posições da válvula VA. 0° totalmente aberta (posição PSa), 90° totalmente fechada (posição PSd) e Qc vazão do concentrado.	30
11. Sensor de pressão.	31
12. Sensor de condutividade	32
13. Sensor de vazão.	33
14. Vazão do permeado (Q_p) em função da Pressão aplicada (P)	51
15. Resultados obtidos: Fator de polarização (f_p) em função da pressão transmembrânica sem a interação do f_p (ΔP_0), obtidos pelos Métodos (i) e (ii).	52
16. Resultados obtidos: Coeficiente de permeabilidade (K_{per}) em função da pressão transmembrânica (ΔP), obtidos pelos Métodos (i) e (ii).	53
17. Curva de tendência da relação entre f_p e ΔP_0 .	55
18. Curva de tendência da relação entre K_{per} e ΔP .	56
19. Resultados obtidos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para os dados da amostra B com 2000mg/L.	57
20. Resultados obtidos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para os dados da amostra B com 4000mg/L.	58
21. Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 2000mg/L.	60
22. Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 4000mg/L.	61
23. Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 6000mg/L.	62
Fluxograma 1. Procedimento para a obtenção dos parâmetros a partir de modelos encontrados na literatura.	41
Fluxograma 2. Método de obtenção dos parâmetros a partir dos dados experimentais	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de equações empíricas de parâmetros da membrana.	22
Tabela 2 – Dados de ensaios a 2000 mg/ℓ fornecidos pelo fabricante para a membrana de OR.	34
Tabela 3 – Taxa ou fator de recuperação máximo da Membrana- RE2540-TE	34
Tabela 4 – Características principais do conjunto de dados da amostra A.	37
Tabela 5 – Características principais do conjunto de dados da amostra B.	37
Tabela 6 – Dados dos ensaios para as concentrações de alimentação à entrada (C_f) iguais a 2.000, 4.000 e 6.000 mg/L.	50
Tabela 7 – Desvios médios do Q_p obtidos pelos métodos em relação ao Q_p experimental.	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

K_{per}	Coeficiente de permeabilidade da membrana
PC	Polarização de concentração
f_p	Fator de polarização
FV	Fotovoltaico
OR	Osmose reversa
Q_f	Fluxo da água de alimentação
Q_p	Fluxo da água do permeado
Q_c	Fluxo da água do concentrado
I_{col}	Irradiância coletada pelo gerador FV
CC-CC	Corrente Contínua – Corrente Contínua
k	Constante de Boltzmann
a	Fator de forma do tamanho das partículas do soluto em relação ao tamanho das do solvente
OR-FV	Unidade de osmose reversa alimentada por gerador fotovoltaico
x	Coordenada de fluxo axial, posição ao longo da membrana
y	Coordenada transversal da membrana
J_s	Velocidades do fluxo do soluto de entrada
J	Velocidade do fluxo do solvente de entrada
J_v	Velocidade do fluxo de permeado
$J_b(x)$	Velocidade do fluxo no centro do canal da membrana
$(J_v)_{sal}$	Velocidade do fluxo de permeado com sal
$(J_v)_{sem\ sal}$	Velocidade do fluxo de permeado sem sal
J_{vmax}	Velocidade do fluxo no centro do canal
δ	Espessura da camada limite na membrana
k_m	Coeficiente de transferência de massa
C	Concentração de sais
C_f	Concentração da água de alimentação
C_m	Concentração na superfície da membrana
C_b	Concentração no canal de escoamento axial
C_p	Concentração do permeado

C_c	Concentração do concentrado
$C(y)$	Concentração no canal em uma posição transversal
ℓ	Comprimento total da membrana ou do conjunto de membranas
h	Altura do canal de escoamento interno da membrana
w	Largura da membrana
P	Pressão aplicada
π_b	Pressão osmótica no canal de alimentação
π_p	Pressão osmótica no permeado
π_{med}	Pressão osmótica média ao longo da membrana
i	Coefficiente de Van't Hoff
R	Constante universal dos gases
T	Temperatura absoluta da amostra
D	Coefficiente de difusão
μ	Viscosidade dinâmica do meio
r_p	Raio da partícula a ser permeada
ρ	Densidade
Re	Número de Reynolds
Sc	Número de Schmidt
ΔP	Pressão transmembrânica
ΔS	Área da membrana

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
EPÍGRAFE	v
AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Estrutura da dissertação	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 Descrição do Processo de Osmose Reversa (OR)	6
2.2. Modelos de simulação de sistemas de OR	11
2.3. Fatores que limitam a operação da membrana	15
2.3.1. Polarização de concentração	17
2.3.2. Coeficiente de Permeabilidade	23
2.4. Descrição do Modelo de Fraidenraich et al. (2009)	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	27

3.1. Descrição do Sistema Experimental	27
3.1.1 Sistema de medição e aquisição de dados	30
3.1.2 Sensores de pressão	31
3.1.3 Sensores de condutividade	32
3.1.4 Sensor de vazão	33
3.1.5 Características das membranas	33
3.2 Metodologia dos Ensaios experimentais	35
3.2.1 Dados obtidos nos ensaios experimentais	37
3.3 Estimativa dos parâmetros f_p e K_{per}	38
3.3.1. Cálculo dos valores médios do f_p e K_{per} para todo o sistema de membranas	39
3.3.1.1. Obtenção de f_p e K_{per} utilizando modelos disponíveis na literatura - Teoria do filme e modelo de Psoch & Schiewer (2008)	40
3.3.1.2. Obtenção dos valores médios dos parâmetros f_p e K_{per} a partir dos dados experimentais.	44
3.3.1.2.1. Metodologia de obtenção das correlações empíricas para f_p e K_{per}	47
3.3.1.2.2. Metodologia de verificação das correlações obtidas	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Produção do permeado e características de operação do sistema de osmose reversa (OR)	50
4.2 Comportamento dos valores médios de f_p e K_{per}	52
4.2.1. Correlações obtidas para f_p e K_{per}	55
4.2.1.1. Verificação das correlações obtidas	57
4.3 Comparação entre os cálculos considerando f_p e K_{per} variáveis e com	59

os parâmetros fixos com a pressão.

5. CONCLUSÃO	64
5.1 Considerações Finais	65
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes recursos para a humanidade, a disponibilidade de água apropriada para consumo, vem progressivamente permeando um futuro de escassez. A preocupação com os recursos naturais tem sido debatida mundialmente em grandes eventos como o ECO-RIO'92, o de KYOTO'97 e, mais recentemente, o de COPENHAGUE'09.

Cerca de 97% da água no planeta Terra é salgada. Dos 3% de água doce, apenas 0,08% está em regiões acessíveis ao ser humano (SOCIOAMBIENTAL, 2009). Na região Nordeste do Brasil, por exemplo, é possível encontrar no subsolo um vasto estoque de água, em sua maioria salobra, que poderia tornar-se apropriada para o consumo através de um tratamento.

A falta de água potável pode prejudicar e limitar desde o desenvolvimento mundial, até a qualidade e a possibilidade de vida no planeta (BISET, 2002). Em virtude dessas perspectivas há uma busca por novos métodos de tratamento de água, que utilizem fontes renováveis de energia para a produção de água potável.

O tratamento de água tem por objetivo reduzir, ou até mesmo eliminar, a concentração de elementos impróprios para o consumo até o ponto em que não apresentem riscos para a saúde pública, como por exemplo: poluentes, certos tipos de sais e seus excessos e alguns minerais.

A quantidade de sais dissolvidos na água para o consumo humano, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), deve ser inferior a 500 mg/L. A água do mar tem concentração média entre 30.000 e 40.000 mg/L. As águas salobras encontradas em muitos poços na região semiárida do Nordeste do Brasil apresentam concentração entre 1.000 e 10.000 mg/L (LIMA, 2006).

A dessalinização é um processo de tratamento para a remover sais dissolvidos na água para obter água com características para consumo humano. Existem vários processos de dessalinização, como o envolvendo mudanças de fase e processos de filtração por membrana. Dentre esses processos, o de separação por membranas através da osmose reversa (OR) tem sido o mais usual (PORTAL, 2010).

O processo de OR tem evoluído muito ao longo dos anos e hoje domina o setor de dessalinização, sendo utilizado tanto para prover água para consumo humano, como para procedimentos hospitalares, além de diversos processos em setores industriais (MAURICCI, 2002).

De uma forma simples, a dessalinização de água em um sistema de OR ocorre quando um fluxo da água com alta concentração é impulsionado contra a membrana com uma pressão maior que a pressão osmótica. Ocorrendo, assim, o processo inverso ao da osmose¹, havendo a passagem pela membrana de solvente (água) e o soluto (sal) é retido por ela. Produzindo assim uma água com baixa concentração de sais.

Na passagem através da membrana, a água de alimentação produz duas correntes distintas de fluxo. Uma das correntes que atravessa a membrana no intuito de remover os contaminantes indesejados é chamada de permeado. A outra corrente contém a maior parte dos contaminantes inicialmente presentes no fluxo de alimentação e é denominada concentrado ou rejeito (MULDER, 1991).

O fluxo do permeado (Q_p) varia com a área da membrana e é diretamente proporcional à pressão aplicada. A maior ou menor capacidade que a membrana tem de permitir que as moléculas transitem através dela pode ser traduzida como o coeficiente de permeabilidade (K_{per}).

O K_{per} é uma característica da membrana e sofre influência da pressão. Entre outros fatores, estabelecer melhores condições de operação da membrana, como faixa de pressão e vazão de alimentação, são importantes para que se tenha uma permeabilidade adequada e que não seja ela um fator limitante do processo.

No processo de osmose reversa, na medida em que o fluxo de água é permeado, a concentração de sais interna na membrana cresce, aumentando a pressão osmótica. Com isso há um acúmulo de sais na superfície da membrana que produz um fenômeno chamado polarização da concentração (PC), que é medido, em alguns modelos da literatura (ALVES, 2006), pelo fator de polarização (f_p). O efeito direto da polarização da concentração é a redução do fluxo do permeado devido à acumulação de íons na parede da membrana.

¹ Osmose: movimento da água entre meios com concentrações diferentes, com a passagem de soluto da concentração maior para concentração menor. É um processo físico-químico importante na sobrevivência das células e foi observada pela primeira vez em 1748, pelo padre francês Jean Antoine Nollet. (MULDER, 1991).

Em um sistema de OR as condições de entrada, assim como as características da membrana, determinam o fluxo de água permeada, desta forma torna-se necessário conhecer as características da membrana e os parâmetros que definem o comportamento operacional do processo, como o fator de polarização e o coeficiente de permeabilidade. O desenvolvimento e a evolução do sistema podem ser determinados por tais condições iniciais. Em um sistema ligado à rede elétrica convencional, as condições iniciais são fixas. Em sistemas de OR alimentados por geradores FV sem baterias, além das variações das condições internas, são introduzidas variações na vazão e pressão de entrada e, conseqüentemente, na vazão e salinidade do permeado. As variações de vazão e pressão produzidas pela fonte resultam em variações dos parâmetros K_{per} e f_p .

Na maioria dos trabalhos que permitem simular o comportamento de sistemas de OR o fator de polarização e o coeficiente de permeabilidade são considerados constantes. No presente trabalho avalia-se o comportamento desses parâmetros perante condições operacionais impostas por uma fonte de alimentação variável – gerador fotovoltaico. Procedimentos teóricos, utilizando modelos disponíveis na literatura (RIFFEL, 2005; PENG et al, 2006; Lyster & COHEN, 2007), e procedimentos experimentais são propostos para a obtenção desses parâmetros. No intuito de manter o controle sobre as condições operacionais dos ensaios, um conversor de frequência ligado à rede elétrica foi empregado para simular o comportamento do gerador fotovoltaico.

1.3. Objetivos

Analisar o comportamento do coeficiente de permeabilidade (K_{per}) e do fator de polarização (f_p) em um sistema de OR perante as variações de pressão e vazão geradas por uma fonte variável, como por exemplo, um gerador fotovoltaico. E comparar com o caso em que K_{per} e f_p são considerados constantes.

1.4. Estrutura da dissertação

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos, o primeiro, contendo a introdução que descreve de uma forma geral o trabalho e a importância dos estudos que foram realizados, como também os objetivos propostos para o trabalho.

O segundo contém a revisão bibliográfica, com uma descrição das tecnologias de osmose reversa como também modelos para obtenção do fluxo do permeado em sistemas de osmose reversa alimentados por geradores fotovoltaicos. São definidos e descritos os parâmetros fator de polarização (f_p) e coeficiente de permeabilidade (K_{per}) e os modelos disponíveis para a obtenção desses parâmetros.

O Terceiro capítulo aborda o material e os métodos adotados, com a descrição do sistema experimental, detalhamento dos componentes e equipamentos utilizados na bancada de ensaios, a metodologia utilizada nos ensaios e os modelos e procedimentos de cálculo utilizados. Em seguida, é descrita a metodologia empregada para os cálculos e análises dos parâmetros f_p e K_{per} .

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões, demonstrando os comportamentos dos parâmetros f_p e K_{per} . Os resultados obtidos no cálculo do fluxo do permeado (Q_p) utilizando os parâmetros f_p e K_{per} variáveis (procedimentos propostos) são comparados aos obtidos quando esses parâmetros são considerados fixos (procedimento convencional).

O Quinto e último traz as conclusões e, de uma forma geral, as contribuições desse trabalho para os estudos de sistemas de OR e sugestões para trabalhos futuros.

3. REVISÃO DE LITERATURA

2.2 Descrição do Processo de Osmose Reversa (OR)

A Osmose Reversa consiste, basicamente, no bombeamento da água com alta concentração de sais contra membranas seletivas, sendo necessária uma pressão maior que a pressão osmótica para reverter o processo natural de osmose. A membrana retém a maior parte dos sais assim como os vírus e bactérias presentes na água de alimentação, como mostrado na Figura 1. A partir do fluxo de alimentação o processo produz dois fluxos distintos, um denominado permeado, que é o produto desejado do sistema e outro, com a maior parte dos contaminantes, denominado concentrado ou rejeito (Figura 2).

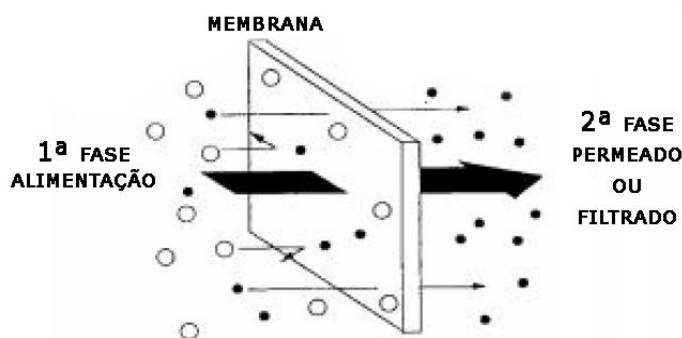


Figura 1 – Esquema básico de funcionamento de uma membrana filtrante.
Fonte: Schneider & Tsutiya (2001).

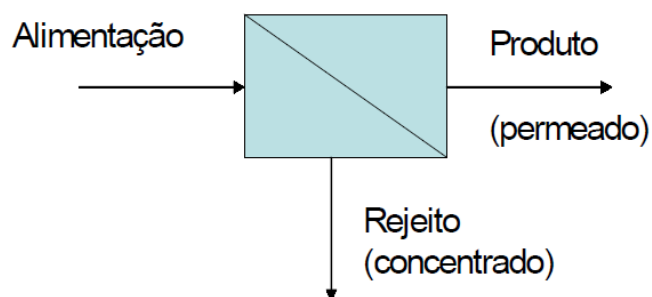


Figura 2 – Representação esquemática das correntes de fluxos em uma membrana filtrante. Fonte: Adaptado de Alves (2006).

O fluxo do permeado obtido ao longo da membrana varia com a área da mesma e é diretamente proporcional à diferença entre a pressão aplicada e a pressão osmótica local (pressão transmembrânica). O coeficiente de proporcionalidade é dado pela chamada “constante” de permeabilidade, aqui referida como coeficiente de permeabilidade da membrana (K_{per}). De acordo com Alexiadis *et al.* (2007) o coeficiente de permeabilidade varia com a pressão no interior da membrana devido à sua maior ou menor compactação, que é um processo mecânico que diminui o volume da membrana comprimindo os poros e, portanto, reduzindo o fluxo do permeado.

No processo de separação por OR, o escoamento do fluxo de entrada é tangencial à membrana de forma que a solução flui paralelamente à sua superfície como mostra a Figura 3. Na medida em que a água é permeada, o fluxo da água no interior da membrana torna-se cada vez mais concentrado, com um aumento considerável na pressão osmótica (tangencial). Adicionalmente, devido à seletividade, ocorre acumulação de soluto nas proximidades da membrana, formando uma camada onde a concentração de íons aumenta no sentido transversal (sentido do fluxo do permeado) e atinge um valor máximo na sua superfície (CHERMISINOFF *apud* ALVES, 2006)².

O aumento da concentração na superfície da membrana traduz-se em um aumento da pressão osmótica e, conseqüente, diminuição da diferença entre a pressão local e a pressão osmótica. Como resultado, o fluxo do permeado diminui. Este fenômeno é conhecido como **Polarização da Concentração (PC)**. O parâmetro **fator de polarização (f_p)** é normalmente utilizado para mensurar a PC.

² CHERMISINOFF, N.P. **Liquid Filtration**, 2ª edição, EUA. Butterworth-Heinemann. 1998.

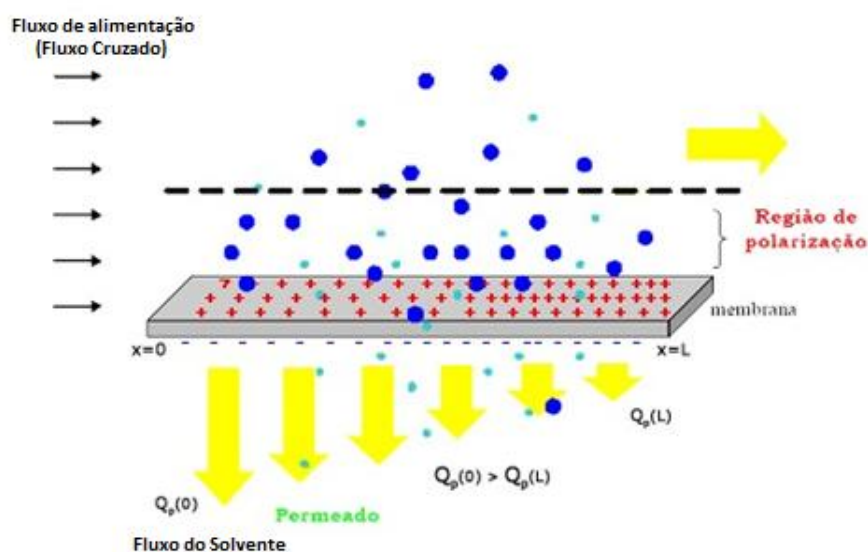


Figura 3 – Fluxo na região próxima da membrana e o processo de polarização

Fonte: Adaptado de Alves (2006).

Para o cálculo da vazão e da concentração do permeado em um sistema de OR é necessário conhecer as características da membrana.

Uma membrana de osmose reversa consiste, basicamente, de um filme que separa duas soluções de diferentes concentrações de sólidos dissolvidos (Figura 4). No entanto, para iniciar o transporte do líquido, como já descrito, é necessária uma pressão aplicada superior à pressão osmótica, gerada naturalmente pela diferença de concentração entre as soluções. O processo não requer nenhuma transformação química ou biológica, dependendo somente do tamanho dos poros e de sua estrutura física (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001). A Figura 4 mostra a secção de uma membrana em espiral.

Na operação das membranas, a seletividade dos componentes é proporcionada pelas características da membrana e pela pressão, que normalmente é gerada por uma motobomba e controlada por uma válvula instalada na saída do concentrado. A pressão de alimentação, de uma forma geral, pode determinar a concentração da água produzida, tendo um controle sobre a sua qualidade (CARVALHO *et al.*, 2005).

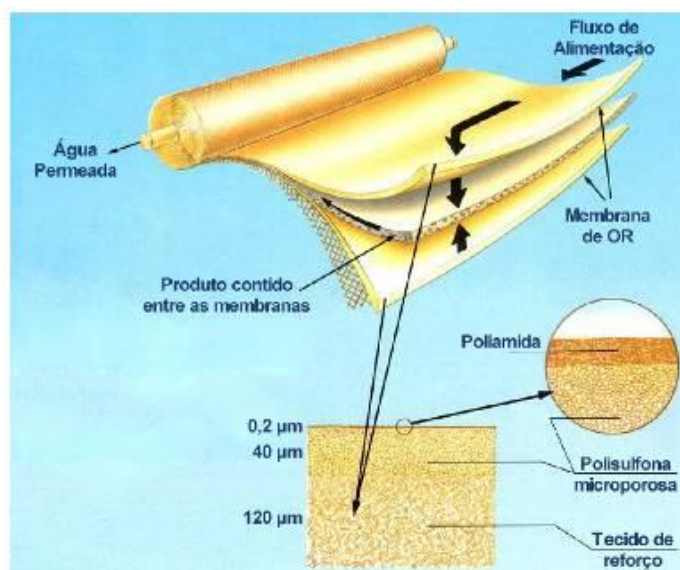


Figura 4 - Secção esquemática de uma membrana de OR em espiral.

Fonte: Adaptado de DOW (2009).

O conjunto de membranas integra um elemento básico que congrega todas as estruturas necessárias para viabilizar a operação da membrana como unidade de separação, que é denominado módulo. Os módulos contêm os seguintes elementos: membranas, estruturas de suporte, canais para a alimentação e separação do permeado e concentrado.

Os módulos são projetados com os objetivos de limitar o acúmulo de material retido pela membrana através da otimização da circulação do fluido a ser tratado, de maximizar a superfície da membrana por volume de módulo e de evitar a contaminação do permeado com o material do concentrado (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001), sendo os módulos, componentes base do sistema de dessalinização por OR.

Um sistema de Osmose Reversa pode de uma forma simples, ser visualizado como os módulos de membranas e um sistema de bombeamento, cuja carga hidráulica está definida pelas membranas, pelas tubulações e pela válvula de controle de pressão. Sendo a válvula de saída do concentrado a principal responsável pelas perdas de carga hidráulica do sistema.

O sistema de bombeamento é projetado para pressurizar o fluxo de água salina e, naturalmente, atender à demanda da carga hidráulica, mantendo, ao longo da membrana, uma pressão sempre maior que a pressão osmótica. Esses sistemas podem ser convencionais, quando abastecidos pela rede elétrica convencional, ou supridos por uma fonte alternativa de energia, como a Fotovoltaica.

Os sistemas de dessalinização com gerador fotovoltaico podem operar com ou sem baterias. As baterias permitem que o equipamento mantenha a vazão e a pressão constantes, respeitando assim os limites físicos da membrana utilizada. Entretanto, são componentes poluentes e de baixo tempo de vida útil, principalmente quando comparados ao tempo de vida útil da membrana. Os sistemas sem baterias têm sido cada vez mais aplicados em sistemas de osmose reversa.

A análise de um dispositivo de osmose reversa alimentado por geradores fotovoltaicos sem baterias pode ser realizada de forma separada, considerando-se dois sistemas: O sistema de osmose reversa (conjunto de membranas, tubulações e válvulas) e o sistema de bombeamento fotovoltaico (gerador fotovoltaico, conversor de frequência e conjunto motobomba). A vazão e pressão à entrada do conjunto de membranas são determinadas pela saída do sistema FV de bombeamento e pela perda de carga do sistema de OR. Modelos disponíveis na literatura permitem relacionar a vazão (Q) à saída do sistema de bombeamento (entrada do sistema de OR) com a irradiância coletada pelo gerador FV (I_{col}). A relação (Q vs. I_{col}) conhecida como curva característica de um sistema de bombeamento FV é normalmente parametrizada pela pressão aplicada pela bomba ou, no caso dos sistemas de OR, pela pressão definida pelas perdas de carga do sistema. Dessa forma, é possível associar para cada valor de irradiância um valor de vazão e pressão da água de alimentação do sistema de OR (VILELA & FRAIDENRAICH, 2001).

A utilização das curvas características do sistema de bombeamento, curva de carga do sistema de OR (pressão (P) vs. vazão (Q)) em conjunto com um modelo de cálculo da vazão do permeado permite prever as variações do fluxo do permeado em função das variações da irradiância solar.

Conforme comentado anteriormente, em sistemas de OR alimentados por fontes variáveis de energia, são introduzidas variações na vazão e pressão de entrada e, conseqüentemente, na vazão e concentração do permeado, resultando na variação dos parâmetros fator de polarização e coeficiente de permeabilidade.

2.3 Modelos de simulação de sistemas de OR

A literatura sobre modelos que permitem simular o comportamento de sistemas de osmose reversa (OR) é vasta, contudo, trabalhos que apresentam procedimentos de simulação, considerando as variações nos parâmetros de entrada, são mais restritos.

A tendência entre os trabalhos mais recentes sobre simulação de sistemas de OR é a de apresentar modelos complexos com soluções numéricas para simular detalhadamente o comportamento do fluxo e as características locais de concentração em cada região dentro das membranas (THOMSON & INFELD, 2002; MARRIOTT & SHRENSSEN, 2003; AVLONITIS et al., 2007).

Há vários artigos e trabalhos científicos sobre processo de dessalinização por sistemas de OR acionados por geradores variáveis de energia, como os fotovoltaicos e eólicos (CARVALHO, 2005; RIFFEL, 2005; LIMA, 2006; FRAIDENRAICH, 2009). A combinação entre a tecnologia fotovoltaica e a osmose reversa, tem se mostrado bastante viável para a produção de água de boa qualidade em localidades remotas que carecem de energia elétrica e ao mesmo tempo dispõem de um abundante recurso solar (LIMA, 2006).

Riffel (2005) desenvolveu um sistema de osmose reversa com a utilização de tecnologia fotovoltaica sem a utilização de bancos de baterias. A ausência do banco de baterias proporciona uma redução dos custos e da necessidade de uma maior manutenção do sistema. Por outro lado, conforme comentado anteriormente, altera sobremaneira a operação da unidade, tornando-a subordinada às condições instantâneas da radiação solar. Dois sistemas foram matematicamente modelados e validados experimentalmente. Um sistema com o conjunto motobomba acoplado diretamente aos módulos fotovoltaicos (FV) e outro sistema com um conversor CC-CC abaixador (Buck) de tensão com seguidor de máxima potência na interface entre o arranjo fotovoltaico e o conjunto de motobomba. As simulações realizadas mostraram uma ampla vantagem de produção do segundo sistema, devido, principalmente, ao seu melhor rendimento.

Lima (2006) estudou as condições operacionais de um sistema de osmose reversa utilizando uma bancada experimental com 3 membranas em série (1 metro cada módulo), com capacidade de produção de 250 L/h (bancada experimental do Grupo FAE – Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco). Os

ensaios foram realizados com água salobra com concentração entre 1000 mg/L e 5.000 mg/L. Para analisar o comportamento do sistema foram testadas três formas de operação: a) sistema conectado diretamente à rede de energia elétrica convencional; b) utilizando um conversor de frequência como interface entre a rede elétrica e a motobomba; e c) com o uso de um gerador fotovoltaico com 16 módulos em série (55 Wp cada), com o conversor de frequência na interface entre gerador e motobomba. No primeiro caso, foram obtidos resultados do comportamento do sistema de OR operando com frequência fixa (60 Hz); No segundo caso, foi possível operar o sistema em diferentes frequências de rotação do motor de forma controlada; E, no terceiro caso, foram obtidas informações sobre a operação do sistema sob a influência das variações da irradiância solar.

Diversos modelos são apresentados na literatura para o cálculo das vazões do permeado e das concentrações obtidas em sistemas de OR. Os modelos se diferenciam principalmente pelas considerações feitas e pelos meios matemáticos utilizados para obter os resultados.

Carvalho et al. (2005) trabalharam com um modelo de difusão para descrever o transporte de material através de um dispositivo de OR operando com um sistema fotovoltaico. A modelagem teórica fornece o fluxo específico de água, o fluxo específico de sal e a pressão osmótica, utilizando parâmetros empíricos extraídos a partir de dados experimentais. As influências da temperatura e da pressão são inseridas no modelo “através” de Equações obtidas empiricamente, conforme Rautenbach & Albrecht *apud* Carvalho et al. (2005)³.

Riffel (2005) utilizou o modelo proposto por Carvalho et al. (2005) para descrever o comportamento de sistemas de dessalinização por osmose reversa que usam geradores fotovoltaicos. Com o resultado das simulações, são propostas aproximações polinomiais para descrever as correlações entre a potência da motobomba, o fluxo do permeado e a irradiância solar incidente.

Mais recentemente, Fraidenraich et al. (2009) publicaram um procedimento analítico para a obtenção da vazão de água do permeado em sistemas de OR (desenvolvido no Grupo FAE). O modelo reproduz com boa precisão os resultados experimentais obtidos com um sistema de OR alimentado por geradores fotovoltaicos. Foram adotados valores médios de coeficiente de permeabilidade e fator de polarização para cada nível de salinidade e para uma

³ RAUTENBACH, R.; ALBRECHT, R. **Membrantrennverfahren**; Otto Salle Verlag. 1981.

ampla faixa de pressões utilizada nos experimentos. O modelo foi validado para água salobra com níveis de salinidade de 2000 mg/L e 5000 mg/L. Estudos posteriores realizados no Grupo FAE mostraram que sistemas operando com maiores concentrações podem, todavia, atingir regiões de grandes variações do fator de polarização (f_p) e do coeficiente de permeabilidade (K_{per}). Nesses casos, a aproximação desses fatores para valores constantes pode comprometer a estimativa realizada.

Diversos modelos utilizam o fator de polarização (f_p) e o coeficiente de permeabilidade (K_{per}), que são parâmetros intrínsecos ao sistema OR de dessalinização, atribuindo para os mesmos, valores médios e constantes. São escassos os trabalhos mostrando resultados que consideram as variações desses parâmetros (KIM & HOEK, 2005; ALEXIADIS et al., 2007; PSOCH & SCHIEWER, 2008)

No modelo de Carvalho et al. (2005), a influência da polarização de concentração (PC), atuando como um redutor do fluxo na membrana, é inserido através da teoria do filme (MICHAELS; BLATT et al.; POTTER *apud* KIM & HOEK, 2005⁴). O coeficiente de transferência De massa k_m , que é um parâmetro utilizado na teoria do filme, é obtido empiricamente. Outrossim, verificou-se que o coeficiente de permeabilidade da membrana foi considerado constante no modelo.

Fraidenraich et al. (2009), utilizaram em seu modelo valores médios de f_p e K_{per} como parâmetros de entrada. Para concentrações de água salobra de 2000 mg/L e de 5000 mg/L, o valor utilizado para o f_p foi de 1,15 para ambos níveis de salinidade. Para o K_{per} foram utilizados valores de $8,8 \times 10^{-12}$ e $9,0 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, para as concentrações de 2000 mg/L e 5000 mg/L, respectivamente. Os parâmetros, propostos pelos autores, são obtidos pelas características intrínsecas da membrana e por meio de estimativas confirmadas por observações experimentais.

Em sistemas de osmose reversa ligados a geradores fotovoltaicos (OR-FV), que operam em condições fixas de pressão e vazão de entrada (i.e. sistemas com baterias),

⁴ MICHAELS, A. S., **New separation technique for the CPI**, Chem. Eng. Prog., 64 p. 31. 1968
 BLATT, W.F.; DRAVID, A., MICHAELS, A.S.; NELSON, W. **Solute polarization and cake formation in membrane ultrafiltration: Causes, consequences, and control techniques**, in J.E. Flinn, ed., Membrane Sci. and Tech.: Ind., Biological, and Waste Treatment Proc., Plenum Press, Columbus, Ohio, p. 47. 1970.
 PORTER, M.C. **Concentration polarization with membrane ultrafiltration**, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop., 11, p. 234. 1972.

normalmente a utilização de um valor médio de K_{per} e f_p produz resultados coerentes no cálculo da vazão de água permeada. Em sistemas sem baterias, operando com baixas concentrações, as variações de K_{per} e f_p podem não ser significativas. Nesse caso, um valor médio assumido para esses parâmetros também pode produzir resultados compatíveis para o cálculo da vazão do permeado. Já para altos níveis de salinidade, operando em faixas muito variáveis de pressão e vazão de entrada, esses parâmetros podem ter variações significativas (ALEXIADIS et al., 2007; ZHOU et al., 2006).

Em suma, os sistemas de OR-FV estão sujeitos a fortes variações na pressão e na vazão de alimentação, causando alterações temporais e espaciais nos parâmetros f_p e K_{per} . Ressalta-se, portanto, a importância da análise desses parâmetros e de suas variações.

2.3. Fatores que limitam a operação da membrana

Ao longo da operação de um sistema de osmose reversa, a interface de membrana sofre alterações que limitam a passagem de solvente através da mesma. A observação mais clara desse fenômeno é a redução do fluxo permeado com o tempo, redução que pode ser atribuída a um conjunto de fatores provocados pelos componentes presentes na solução processada. Essa tendência é um fator importante a ser considerado no desempenho dos sistemas de membrana ao longo de sua vida útil e, conseqüentemente, no seu custo de operação (PENG, 2004). O conjunto dessas alterações é denominado incrustação “*fouling*” (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

O fenômeno de incrustação pode ocorrer a qualquer momento em processos com membranas, basta que o produto iônico dos sais solúveis na corrente de concentrado exceda o produto de solubilidade de equilíbrio (FRISCHKORN & ROCHA NETO, 2009). Para Alves (2006), de forma geral, os principais mecanismos de formação de incrustações são adsorção de soluto, precipitação de soluto e formação da camada gel.

A adsorção pode ser definida como uma interação físico-química entre a membrana e o soluto. Ocorre na interface entre solução e superfície da membrana e pode incluir também o interior dos poros da membrana. Neste último caso as modificações no comportamento da membrana são muito severas, tanto no que se refere ao fluxo do permeado como à capacidade seletiva da membrana (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A precipitação de solutos pode ser causada pela polarização de concentração ou outros fatores ligados a esse fenômeno, como os processos de cristalização na superfície da membrana. Um tipo de incrustação, também conhecida como “*scaling*”, pode ser enquadrado no mecanismo de formação por precipitação, que ocorre devido ao acúmulo de material **inorgânico** na superfície ou nos poros das membranas.

A formação de camada gel é considerada como uma precipitação de solutos **orgânicos** na superfície da membrana. Esse processo, geralmente, também ocorre quando a concentração de um determinado soluto excede o limite de solubilidade na região da superfície da membrana (ALVES, 2006).

Outros fatores que influenciam a formação de incrustações, segundo Jarusutthirak et al. (2002), são os seguintes: a) Características da membrana (tamanho dos poros e sua

permeabilidade); b) Características do fluxo da água de alimentação (vazão e concentração) e c) Condições hidrodinâmicas do sistema (número de Reynolds).

Nóbrega *apud* Alves (2006)⁵, afirma que mesmo se cercando de todos os cuidados tidos como necessários tais como: a) Escolha do material e morfologia mais adequada para confecção da membrana; b) A equação dos parâmetros hidrodinâmicos do processo, não é possível extinguir o fenômeno de polarização de concentração e, por conseguinte, sempre será observada uma queda de fluxo do permeado no início da operação do sistema.

⁵ NÓBREGA, R. **Membranas: Uma Tecnologia Alternativa para o Tratamento de Efluentes**, FEEMA, Rio de Janeiro. 1998.

2.3.1 Polarização de concentração

A polarização de concentração (PC) é um fenômeno inerente aos diversos processos de filtração. Ela está vinculada, ao mesmo tempo, às alterações observáveis na operação de membranas, denominadas de maneira genérica incrustação (KIM & HOEK, 2005). Sua manifestação depende das características fluidodinâmicas do escoamento tangencial e axial. O escoamento turbulento é utilizado para provocar uma redução da zona de polarização arrastando uma parte significativa dos solutos acumulados, aumentando assim a vazão do permeado (MULDER, 1991).

Um modelo simples permite esclarecer a origem e significado da polarização de concentração (modelo de filme). O balanço de massa do soluto, em um elemento diferencial da camada limite hidrodinâmica, pode ser descrito por: a) O fluxo convectivo da solução na direção da membrana ($C(y) \cdot J$); b) O fluxo convectivo de soluto na região do permeado ($C_p J_v$) e c) O fluxo difusivo de retorno da membrana, todos os fluxos são ilustrado na Figura 5. Considerando que esta relação independe da coordenada (x) de fluxo axial, o balanço de massa pode ser escrito em função da coordenada transversal (y) da seguinte forma (Equação 1),

$$J_s = C_p J = C(y)J - D \frac{dC(y)}{dy} \quad (1)$$

onde J_s é a velocidade do fluxo de soluto (m/s), (J) é a velocidade do fluxo de solvente (m/s) (C_p) a concentração de sal no permeado (mg/L); $C(y)$ é a concentração da solução no interior da camada limite, a uma distancia y da superfície da membrana e D é o coeficiente de difusão do soluto em água (m²/s). A solução da Equação diferencial, para uma espessura δ (m) da camada limite, é expressa na Equação 2.

$$\frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} = \exp\left(\frac{J_v}{k_m}\right) = f_p \quad (2)$$

onde J_v é a velocidade do fluxo do permeado (m/s) e o parâmetro k_m é o coeficiente de transferência de massa igual a D/δ . C_m é a concentração na superfície da membrana e C_b a concentração no canal de escoamento da membrana.

O fator de polarização (f_p), definido pela relação C_m/C_b , expressa o aumento da concentração na superfície da membrana. A pressão osmótica “vista” pelo fluido a ser dessalinizado aumenta proporcionalmente a C_m , ou $(f_p \cdot C_b)$, reduzindo assim a transferência de massa através da membrana (Figura 5). Em baixos níveis de salinidade o fator de polarização apresenta pouca variação, podendo até mesmo, ser considerado constante. Já para médias e altas concentrações as variações de f_p devem ser devidamente consideradas.

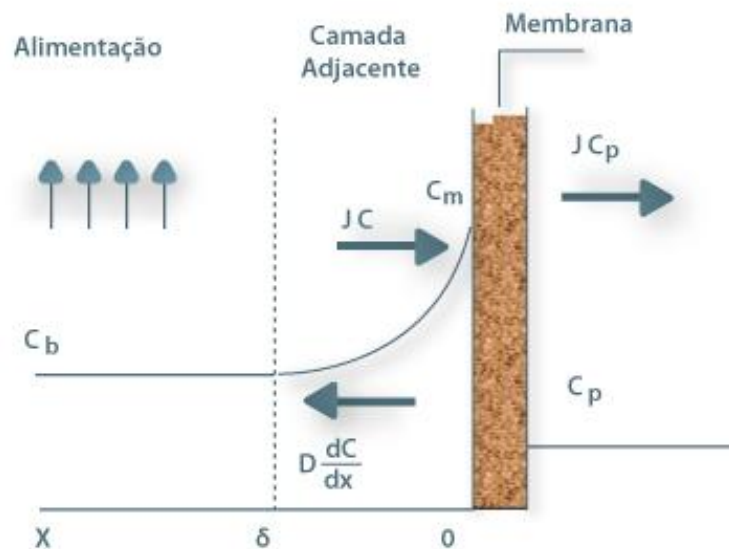


Figura 5 – Polarização da concentração; Perfis de concentração em estado estacionário na fase fluida. Fonte: Portal (2010).

Kim & Hoek (2005) propuseram um modelo numérico para o cálculo da polarização de concentração a partir de uma descrição local do fluxo permeado e do rejeito de soluto em sistemas de osmose reversa. Os autores também compararam seus resultados com os derivados de dois modelos: a) Teoria de filme e b) Modelo analítico de soluto retido (SONG & YU, 1999). Os resultados confirmaram a influência do fluxo do permeado na polarização de concentração.

Os parâmetros utilizados para a obtenção dos valores do fator de polarização são amplamente discutidos em artigos da literatura (SUTZKOVER et al., 2000; HOEK et al., 2002). Hoek et al. (2002), propõem uma Equação para obtenção do coeficiente de transferência de massa em função da posição ao longo da membrana (Equação 3). O valor médio de k_m é dado pela Equação 4.

$$k_m = 1,62 \cdot \left(\frac{J_b(x) D^2}{2hL} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\bar{k}_m = 0,807 \cdot \left(\frac{3Q_f D^2}{2h^2 w L} \right)^{1/3} \quad (4)$$

onde, o $J_b(x)$ é a velocidade no centro do canal da membrana, Q_f é o fluxo da água de alimentação, o D é o coeficiente de difusão, L é o seu comprimento da membrana, h é a meia altura do canal de alimentação e w é a largura da membrana.

Sutskover et al. (2000) descrevem uma técnica simples de medição do coeficiente de transferência de massa. A técnica está baseada na medida da diminuição do fluxo permeado induzido pela adição de uma solução salina a uma solução inicialmente sem sal. A diminuição do fluxo do permeado está determinada pela pressão transmembrânica, que diminui substancialmente quando se passa da solução sem sal à solução salina, podendo assim, calcular assim o coeficiente de transferência de massa (k_m). A técnica proposta foi verificada por ensaios experimentais em um sistema de OR tubular sob condições de fluxo turbulento como o número de Reynolds na faixa de 2.600 à 10.000. A expressão derivada por Sutskover et al. (2000) é a seguinte (Equação 5)

$$k_m = \frac{(J_v)_{sal}}{\ln \left\{ \frac{P}{\pi_b - \pi_p} \cdot \left[1 - \frac{(J_v)_{sal}}{(J_v)_{sem.sal}} \right] \right\}} \quad (5)$$

onde, $(J_v)_{sal}$ e $(J_v)_{sem.sal}$ são as velocidades do fluxo do permeado com sal e sem sal. A pressão aplicada (P) é a mesma em ambos os casos e π_b e π_p são a pressão osmótica no canal de alimentação e no permeado, respectivamente.

A relação entre a pressão osmótica e a concentração de sais é obtida pela Equação de Van't Hoff (Equação 6), onde (i) é o coeficiente de Van't Hoff, R a constante universal dos gases, C a concentração e T a temperatura absoluta.

$$\pi = i.R.C.T \quad (6)$$

Segundo Brito et al. (2004), pode-se considerar que a camada limite (δ) tem uma espessura máxima constante ao longo da membrana. Para as condições ensaiadas no seu trabalho (fluxo laminar, membrana espiral) o valor obtido para (δ) foi de $8,6 \times 10^{-6}$ (m). Valores da mesma ordem de grandeza são apresentados por CHONG et al. (2007). KIM & HOEK (2005) propõem uma expressão para estimar a espessura δ em função da posição ao longo da membrana (Equação 7). Para fluxo laminar plenamente desenvolvido em um canal retangular, a espessura da camada de filme é dada por,

$$\frac{\delta(x)}{x} = 1,475 \left(\frac{h}{x} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{D}{J_{v_{\max}} \cdot h} \right)^{1/3} \quad (7)$$

onde $J_{v_{\max}}$ é a velocidade do fluxo de alimentação no centro do canal de alimentação da membrana e o h é a altura do canal de alimentação da membrana.

O coeficiente de difusão (D) é um parâmetro característico do soluto e do meio em que ele se dissolve (solvente). O cálculo de (D) é baseado na Equação de Stokes-Einstein para a difusividade de partículas (GREEN, 1982). A relação é fornecida para sal em água por vários autores (SONG & ELIMELECH, 1995; SOUZA & LAVERDE JR., 2002). A Equação 8 (SOUZA & LAVERDE JR., 2002) fornece a dependência de D, à diluição infinita em solução, com a temperatura da solução (T), a viscosidade dinâmica do meio (μ) e o raio da partícula a ser permeada (r_p), onde o raio médio da partícula da água é aproximadamente de $9,554 \times 10^{-10}$ m (LIDE, 2005). Onde k é a constante de Boltzmann e a é um fator de forma do tamanho das partículas do soluto em relação ao tamanho das do solvente. O fator a igual à 6 é usado quando a partícula for muito menor que as moléculas do solvente. Caso contrário, esse fator é substituído por um número menor.

$$D = \frac{kT}{a.\pi.\mu.r_p} \quad (8)$$

Jamal et al. (2004) desenvolveram um modelo de simulação para um sistema de OR, propondo Equações para o cálculo da PC para fluxos laminares (Equação 9) e turbulentos (Equação 10). No modelo foram usadas Equações de difusão e de conservação de massa. A concentração do permeado (C_p) foi desprezada, considerando-se que $C_p \ll C_f < C_m$, onde C_f é a concentração da água de alimentação e o C_m é a concentração na superfície da membrana.

O coeficiente de transferência de massa é obtido a partir de Equações empíricas, onde o número de Reynolds (Re) estabelece o regime de escoamento do fluido (Equação 11). Onde Sc é o número de Schmidt, que é usado para caracterizar fluxos de fluidos nos quais existem simultaneamente processos de difusão de momento e massa (Equação 12), o ρ é a densidade (kg.m^{-3}).

$$PC = \frac{C_m}{C_f} = \exp \left\{ \left[0,21.(J_v.h/D)^{0,75} \right] / \left(Re^{0,36} . Sc^{0,19} \right) \right] \left(L/h \right)^{0,42} \right\} \quad (9)$$

$$PC = \frac{C_m}{C_f} = \exp \left\{ \left[6,8.(J_v.h/D)^{0,81} \right] / \left(Re^{0,74} . Sc^{0,15} \right) \right] \left(L/h \right)^{0,32} \right\} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho.J_v.d}{\mu} \quad (11)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho.D} \quad (12)$$

Lyster & Cohen (2007) apresentam Equações empíricas para a determinação dos parâmetros, coeficiente de difusão (D), viscosidade dinâmica (μ), densidade (ρ) e pressão osmótica (π) do fluido em função dos valores de concentração (Tabela 1).

Tabela 1 – Tabela de Equações empíricas de parâmetros da membrana.

MODELO DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA SOLUÇÕES DE NaCl EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO (C) EM mg/L. (Adaptado, Lyster & Cohen, 2007)				
				Faixa de concentração:
Difusividade (D) ($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)	(a) $D(C) = (A_D + B_D \cdot C) / (1 + C_D \cdot C + D_D \cdot C^2)$ (b) $D(C) = A_D + B_D \cdot C + C_D \cdot C^2 + D_D \cdot C^3$			$C < 7730 \text{ mg/L}$ $7730 < C < 35100$
Viscosidade (μ) ($\times 10^3 \text{ Kg/m.s}$)	$\mu(C) = A_\mu + B_\mu \cdot C$			$C < 7730 \text{ mg/L}$
Densidade (ρ) ($\times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$)	$\rho(C) = A_\rho + B_\rho \cdot C$			$C < 7730 \text{ mg/L}$
Pressão Osmótica (π) (bar)	$\pi(C) = B_\pi \cdot C + C_\pi \cdot C^2 + D_\pi \cdot C^2$			$C < 7730 \text{ mg/L}$
Equação	Parâmetros das Equações			
(D) (a)	$A_D = 1,418$	$B_D = 1,98323 \times 10^{-3}$	$C_D = 1,4545 \times 10^{-3}$	$D_D = 4,4331 \times 10^{-9}$
(D) (b)	$A_D = 1,370$	$B_D = -4,757 \times 10^{-6}$	$C_D = 9,367 \times 10^{-11}$	$D_D = -1,0096 \times 10^{-15}$
(μ)	$A_\mu = 1,004$	$B_\mu = 3,302 \times 10^{-6}$	N/A	N/A
(ρ)	$A_\rho = 0,999$	$B_\rho = 7,014 \times 10^{-7}$	N/A	N/A
(π)	N/A	$B_\pi = 7,8234 \times 10^{-4}$	$C_\pi = -5,2617 \times 10^{-10}$	$D_\pi = 1,356 \times 10^{-12}$

2.3.2 Coeficiente de Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade (K_{per}) é uma característica da membrana e sofre influência da pressão. O valor do K_{per} , geralmente, é estabelecido empiricamente a partir do fluxo de água pura, pois para muitos autores ele é independente da concentração. Em diversos artigos são encontrados valores para o K_{per} da ordem de $\approx 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Lyster & Cohen (2007) utilizam K_{per} igual a $(9,8 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1})$ para água pura e para água com concentrações de até 5000 mg/L. Valores da mesma ordem de grandeza são utilizados em Fraidtenraich et al. (2009) para um sistema que opera com níveis de salinidade entre 2000 mg/L e 5000 mg/L ($8,8 \times 10^{-12}$ e $9 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ respectivamente). Kim & Hoek (2005), obtiveram empiricamente o K_{per} e estabeleceram como constante para qualquer valor de concentração, em torno de $8,15 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$.

Alexiadis et al. (2007), ao compararem o comportamento de um sistema de membrana de OR, em um experimento em escala de bancada, com resultados de simulações realizadas com um modelo computacional de fluidodinâmica (CFD) concluíram que a permeabilidade da membrana varia com a pressão de funcionamento (Figura 6). Os autores atribuem esse comportamento à compactação da membrana. Sob efeito da pressão aplicada a membrana atinge certa compactação determinada pela diferença entre a pressão aplicada e a pressão osmótica (ΔP). De fato, verifica-se que a permeabilidade da membrana (K_{per}) é elevada para baixas pressões e decrescente à medida que a pressão aumenta, tendendo a um valor constante para altas pressões. Para o sistema ensaiado os autores propõem a utilização de um valor médio de K_{per} igual a $9,7 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$.

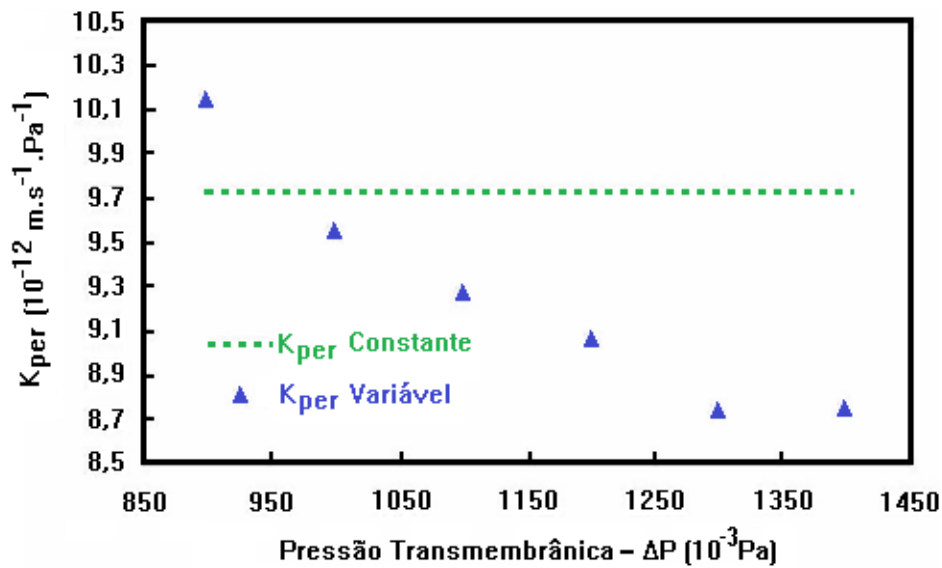


Figura 6 - Comparação entre K_{per} constante e variável com a pressão.

Fonte: Adaptado de ALEXIADIS et al., 2007.

Ao longo de uma membrana de OR pode-se afirmar que, na medida em que a água é permeada, a concentração de sais na água no interior da membrana aumenta. Mesmo considerando-se uma perda de carga pequena no percurso, a pressão transmembrânica ($\Delta P = \text{Pressão aplicada} - \text{Pressão osmótica}$) tende a reduzir, com consequente aumento em K_{per} (Figura 6).

Psoch & Schiewer (2008) realizaram uma modelagem do declínio da permeabilidade da membrana e propuseram uma Equação para obtenção do K_{per} (Equação 13), para condições estáveis de operação em um tempo curto de operação (menos de um dia). O estudo realizado modulou o declínio do K_{per} em função do tempo. A Equação 13 expressa a relação entre o fluxo do permeado (Q_p) e a pressão através da membrana. Onde ΔP é dado pela Equação 14 e ΔS é a área efetiva da membrana.

$$K_{per} = \frac{Q_p}{\Delta P \cdot \Delta S} = \frac{J_v}{\Delta P} \quad (13)$$

$$\Delta P = \left\{ P - \left[(f_p \cdot \pi_{med}) - \pi_p \right] \right\} \quad (14)$$

onde Q_p é o fluxo do permeado, P é a pressão aplicada (considerada constante ao longo da membrana), π_p é pressão osmótica no permeado e π_{med} é a pressão osmótica média.

2.4 Descrição do Modelo de Fraidenraich et al. (2009)

O modelo utilizado nessa dissertação para o cálculo do fluxo de água permeada pelo sistema de OR foi o de Fraidenraich et al. (2009). Para o desenvolvimento das Equações do trabalho foram utilizadas equações de conservação de massa e de difusão. É um modelo analítico que tem característica unidimensional e descreve a variação do fluxo de água no interior da membrana. O modelo fornece o fluxo do permeado ($Q_p(x)$) e o fluxo do concentrado ($Q(x)$), como função implícita, em uma posição qualquer (x) da membrana, por meio das equações 15 e 16.

O modelo utiliza como parâmetros de entrada valores estipulados de: fluxo de alimentação (Q_f), pressão aplicada (P), pressões osmóticas da água de alimentação (π_f) e da água do permeado (π_p), largura da membrana (w), além dos parâmetros coeficiente de permeabilidade da membrana (K_{per}) e o fator de polarização (f_p). L representa o comprimento total da membrana, tendo o x variando entre 0 e L .

$$Q_p(x) = \frac{x \cdot Q_f}{\lambda} + \Theta \ln \left(1 - \frac{Q_p(x)}{Q_f - \Theta} \right) \quad (15)$$

$$Q(x) = Q_f - \frac{x \cdot Q_f}{\lambda} - \Theta \ln \left(1 - \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f - \Theta} \right) \quad (16)$$

onde Θ tem unidade de vazão (m^3/s) e λ de comprimento (m), (Equações 17 e 18).

$$\Theta = \frac{Q_f f_p (\pi_f - \pi_p)}{P + (1 - f_p) \pi_p} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{Q_f}{k_{per} w [P + (1 - f_p) \pi_p]} \quad (18)$$

A solução obtida pelo modelo é uma ferramenta simples de análise que permite identificar as limitações que a operação do sistema de OR está sujeita, fornecendo respostas aos problemas normalmente enfrentados pelos projetistas de tais sistemas. Em particular, a partir dos resultados obtidos pelo modelo é possível dimensionar o sistema de membranas e/ou simular seu comportamento a partir de condições operacionais iniciais conhecidas. A

solução estabelecida pelo modelo é capaz de acompanhar as variações da potência de entrada, impostas pelo sistema elétrico de alimentação. Essa característica é importante quando se trabalha com sistemas fotovoltaicos, onde a alimentação elétrica da motobomba varia significativamente em tempos bastante curtos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição do Sistema Experimental

A seguir, apresenta-se uma descrição da bancada de osmose reversa utilizada nos experimentos, com detalhamento dos sensores e do sistema de aquisição de dados utilizados.

Um diagrama completo do sistema de OR utilizado é mostrado na Figura 7. Uma ilustração da bancada experimental é mostrada na Figura 8. A água é retirada de um poço através de um sistema de bombeamento independente e armazenada no tanque ou reservatório de alimentação (TQ1) com capacidade de 3000L (Figura 9a). Em TQ1 é realizada a manipulação do nível de salinidade desejado para cada ensaio. A bomba de entrada (BIN - 220 V monofásica – 1/3 CV - 0,25 kW) é responsável pela alimentação de água do sistema.

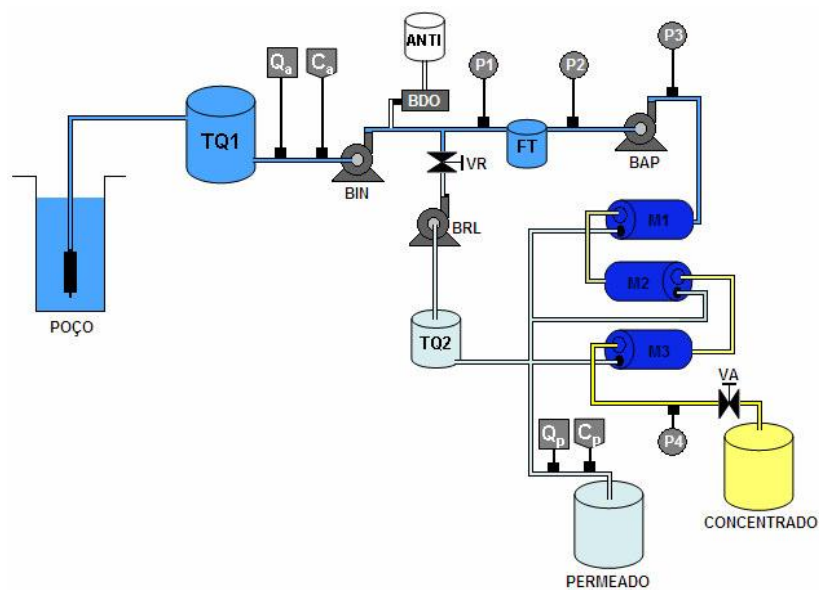


Figura 7 – Diagrama do sistema de osmose reversa utilizado.

Uma bomba dosadora (BDO - 220V – 0,11 A) adiciona, na mesma tubulação, à água de alimentação, uma pequena quantidade de solução anti-incrustante na concentração de 2ml por litro de água. Essa solução evita a incrustação nas superfícies das membranas. O fluxo de água passa por um filtro de cartucho (FT), para que os resíduos, que porventura possam entrar nas membranas, sejam filtrados. O elemento filtrante é um cartucho de celulose aglomerada e polipropileno 5 micra (vazão máxima de operação de $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e pressão diferencial máxima

de $1,8 - 2,4 \text{ kg.m}^{-2}$). Em seguida, uma bomba de alta-pressão (BAP - 220 V trifásico – 3/4 HP - 0,55 kW) impulsiona essa água de alimentação através do conjunto de membranas, composto por um arranjo de 3 unidades em série (M1, M2 e M3), como mostrado na Figura 7 e 8. A saída do permeado de cada membrana vai para o reservatório de água (PERMEADO).

Sensores de vazão, posicionados na tubulação de alimentação e na entrada do reservatório de água permeada, medem a vazão de alimentação (Q_f) e a vazão do permeado (Q_p), na Figura 8 é possível visualizar alguns dos sensores instalados no sistema. Também são realizadas medidas instantâneas de concentração de sais da água de alimentação (C_f) e do permeado (C_p) utilizando-se medidores no painel do sistema, como mostrado na Figura 9b.

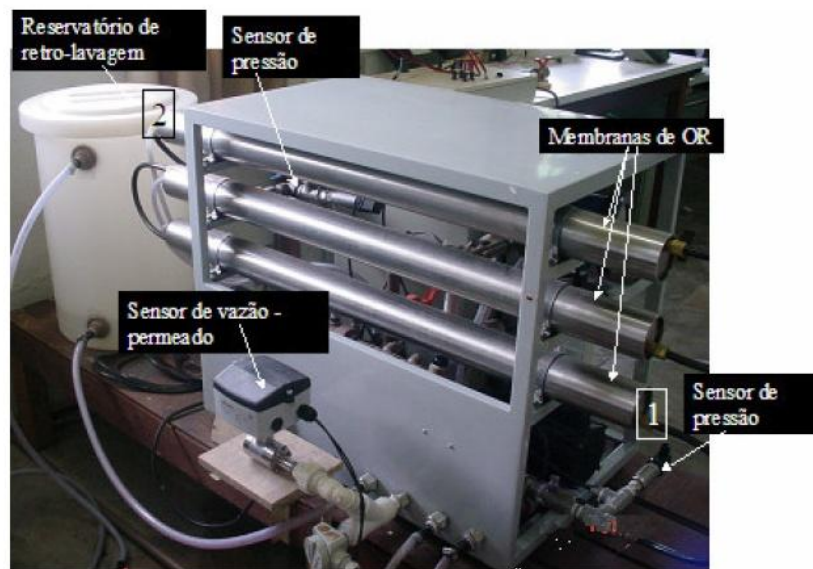


Figura 8 – Bancada experimental de Osmose Reversa. (1) Entrada de água nas membranas (2) Saída do concentrado. Fonte: LIMA, 2006.

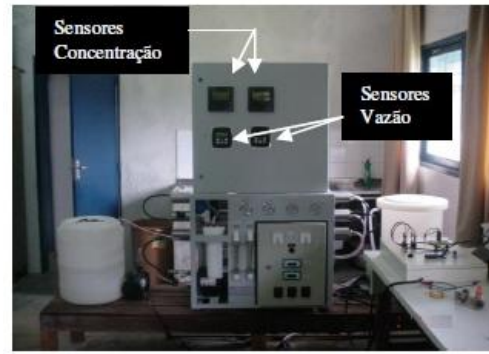
A limpeza das membranas deve ser incorporada como processo de rotina após certo tempo de operação do sistema. Para isso, é realizado o processo de retrolavagem, com uma bomba de retrolavagem (BRL - 220 V monofásica – 1/3 cv - 0,25 kW). A água utilizada para a limpeza do sistema provém do reservatório do permeado (TQ2).

Sensores de pressão P1, P2, P3 e P4 (Figura 7) encontram-se instalados antes e depois do filtro FT, na entrada do sistema de membranas e na saída do concentrado respectivamente. A saída do concentrado de cada membrana alimenta a membrana seguinte e, após passar pela última membrana, a água concentrada é armazenada no reservatório de água concentrada (CONCENTRADO). Uma válvula (VA) encontra-se posicionada na saída da água concentrada da última membrana (Figura 10). A VA pode ser manipulada entre as posições

PSa (VA 100% aberta) até PSc (VA 100% fechada), passando por uma posição intermediária denominada PSb, conforme mostra a Figura 10. Através de VA pode-se variar a carga hidráulica da unidade dessalinizadora, resultando na variação da pressão nas membranas e da vazão do concentrado e permeado.



(a)



(b)



(c)

Figura 9 - Instalações da bancada de OR. (a) reservatório para o preparo da solução de água salobra; (b) sistema de OR com o quadro de leitura automática dos níveis de salinidade e vazão; (c) sistema de aquisição de dados. (Fonte: LIMA, 2006)

Os sensores de condutividade, configurados para fornecer a concentração do fluido em mg/L, sensores de pressão (MPa), e os sensores de vazão (L/h) estão ligados a um sistema de aquisição de dados, modelo CR-23X micrologger® fabricado pela Campbell Scientific Inc. (Figura 9c). A potência elétrica de alimentação do sistema é medida através de um transdutor de potência do fabricante Yokogawa, que possui uma relação do transformador de corrente (TC) de 50/5 A e do transformador de potência (TP) de 200/200 V, com um erro de 0,5 % para a frequência de 60 Hz. No caso da alimentação fotovoltaica, a medida de potência CC é dada pelo produto entre a corrente e a tensão fornecida pelo gerador.

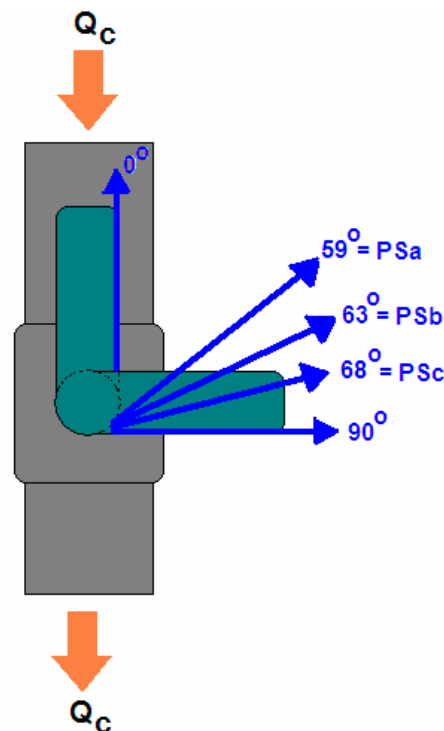


Figura 10 - Layout das posições da válvula VA. 0° totalmente aberta (posição PSa), 90° totalmente fechada (posição PSd) e Q_c vazão do concentrado (LIMA, 2006).

3.3.1 Sistema de medição e aquisição de dados

Um sistema de aquisição de dados é basicamente composto por um condicionador de sinais, um conversor analógico-digital (A/D), controles associados e um programa (software). O SAD utilizado, fabricado pela Campbell Scientific Inc. (micrologger modelo CR-23X), possui 12 entradas analógicas diferenciais (podendo ser utilizadas como 24 entradas simples) que são configuradas individualmente e 8 entradas/saídas digitais. O software específico para o sistema é o PC208W, V. 3.0, que permite um intervalo de execução entre 1/64 a 8.191 segundos (LIMA, 2006).

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que adéquam os sinais analógicos para o conversor digital (A/D). Os principais subcomponentes dos condicionadores são os amplificadores de sinais, os filtros e isoladores. Quando necessário, o condicionador de sinais permite realizar a alimentação de sensores. Os filtros reduzem os

ruídos do sinal analógico, ou seja, diminuem eventuais interferências que podem ser originadas por diversas fontes: radiofrequência, rede elétrica, aterramento, etc. Os isoladores têm a função de proteger o sistema contra eventuais descargas atmosféricas, as quais podem causar danos irreversíveis aos circuitos eletrônicos digitais (RIFFEL, 2005). O conversor A/D de 12 bits possibilita a conversão dos sinais analógicos em sinais digitais com erro inferior a 0,1%.

3.3.2 Sensores de pressão

Os sensores de pressão utilizados são do tipo piezométricos, modelo Druck PTX 1000, da General Electric Company (Figura 11). Utilizaram-se quatro sensores: dois com faixa de leitura de 0 a 3 bar (0 a 0,3 MPa) correspondentes a P1 e P2 e dois com faixa de leitura de 0 a 20 bar (0 a 2 MPa) correspondentes a P3 e P4 (ver Figura 9).



Figura 11 – Sensor de pressão.
Fonte: GE, 2010.

3.3.3 Sensores de condutividade

O sensor é utilizado para a medição da condutividade eletrolítica, também chamada de Condutância Específica, que consiste na capacidade de um fluido em conduzir corrente

elétrica em soluções eletrolíticas. Em função do tipo de solução a ser analisada, a condutividade medida (em geral, dada em microSiemens por centímetro) pode ser convertida em valores de concentração (mg/L). Uma vez que a concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) representa a concentração de todo o material dissolvido na água (habitualmente na forma de íons), é normal que o comportamento desse índice seja semelhante ao comportamento da Condutividade Elétrica.

Os sensores de condutividade utilizados na linha de OR são do modelo TC-44, instalados diretamente na tubulação, em conjunto com a célula de condutividade TX-01, ambos fabricados pela Digimed (Figura 12). Dois sensores TC-44 com célula de $K = 0,1 \text{ cm}^{-1}$ e K^{-1} foram utilizados: o primeiro para analisar a concentração da água do permeado com uma faixa de medição de 0 a 2000 mg/L e o segundo para a água de alimentação com uma faixa de medição de 0 a 40.000 mg/L com erro relativo de 0,05%.



Figura 12 – Sensor de condutividade
Fonte: DIGIMED, 2010.

3.3.4 Sensor de vazão

Foram utilizados dois sensores de vazão do tipo hidromagnético, do modelo MAG 1100 do fabricante Siemens (Figura 13), sendo um para medição de vazão da água de alimentação e outro para água do permeado. Os sensores apresentam um erro menor que 0,25%.



Figura 13 – Sensor de vazão.
Fonte: SIEMENS, 2005

3.3.5 Características das membranas

As membranas que compõem o sistema da bancada de OR são do tipo espiral de PA (Polyamide), modelo RE-2540-TE da SAEHAN CSM. As mesmas são inseridas em vasos de pressão em forma tubular que asseguram o suporte e a proteção mecânica dos elementos da membrana. As dimensões de cada elemento de membrana são: diâmetro de 6,35 centímetros (2,5 polegadas) e comprimento de 101,60 centímetros (40 polegadas). Testes operacionais realizados pelo fabricante com uma concentração de 2.000 mg/L e pressão nominal de 1,55 MPa (1.550 kPa) apresentam um fator de recuperação de 15%. As principais características da membrana podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de ensaios a 2000 mg/L fornecidos pelo fabricante para a membrana de OR
– RE 2540-TE (SAEHAN CSM)

Parâmetros	Valores
Pressão máxima de operação	2,78 MPa
Vazão máxima de alimentação	1,3 m ³ .h ⁻¹
Vazão mínima do concentrado	0,22 m ³ .h ⁻¹
Fator de Recuperação por elemento	15%

O fator de recuperação (FR) de uma membrana é determinado pela razão entre a vazão do permeado e a vazão de alimentação ($FR = Q_p/Q_f$). O FR de um conjunto de membranas varia com o número de membranas utilizadas e depende da configuração. Quanto mais membranas em série, maior será a taxa de recuperação, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Taxa ou fator de recuperação máximo da Membrana- RE2540-TE

Número de elementos	1	2	3	4	5	6	7
Fator de recuperação (%)	15	29	38	46	53	59	64

3.4 Metodologia dos Ensaios experimentais

Foram realizados ensaios experimentais com o sistema OR operando com um conversor de frequência conectado à rede elétrica. A utilização do conversor de frequência permite simular a alimentação do sistema por uma fonte de energia variável, como a fotovoltaica, utilizando diferentes valores de frequência de alimentação. Os ensaios permitiram obter os dados experimentais das grandezas como as vazões, concentrações e pressões aplicadas ao sistema.

Todos os ensaios mantiveram os mesmos procedimentos básicos, a fim de manter um único padrão de medições. Os procedimentos foram:

- I) Obter a concentração desejada para cada ensaio adicionando Cloreto de Sódio (NaCl) à água no tanque de água de alimentação;
- II) O sistema é ligado com o conversor de frequência operando à 60 Hz (a máxima frequência);
- III) A posição da Válvula (VA) é escolhida de forma que se obtenha um fator de recuperação (FR) próximo de 42% (operando na potência máxima do sistema);
- IV) Aguarda-se cerca de 30 min. para a estabilização da concentração na entrada do sistema;
- V) São anotados os valores dos parâmetros no início do ensaio;
- VI) Com o conversor de frequência, varia-se a frequência, decrescentemente de 60 Hz para 59 Hz, 58 Hz, e assim até obter a frequência mínima de 40 Hz, em um intervalo médio de 1 minuto em cada valor de frequência;
- VII) Por fim, os dados são coletados e tratados.

Vários ensaios foram realizados na bancada de OR ao longo do ano de 2010 na Área de Testes do Grupo FAE. Os dados utilizados nesse trabalho foram os dos ensaios realizados

entre 09/08/2010 e 28/08/2010. Antes do início dos ensaios todos os sensores foram calibrados. Foi realizado um dia de ensaios para cada nível de salinidade. Após cada dia de ensaios foram feitas vistorias no sistema para preparar para o próximo dia.

Após a preparação da mistura do sal à água é verificado o teor de salinidade até que se obtenha a concentração desejada. O conversor de frequência, conectado à rede elétrica, é ligado na frequência de 60 Hz, aguardando-se até que as leituras de vazão e de concentração de entrada se estabilizem.

A escolha do posicionamento da válvula levou em consideração um fator de recuperação máximo para a operação do sistema de membranas. Para o sistema de 3 membranas de 1 metro cada, conectadas em série, o FR máximo de operação é de 38% (Tabela 3). Valores muito superiores ao máximo FR podem danificar as membranas. Entretanto, considerando-se que o sistema foi projetado para operar com uma fonte fotovoltaica, que irá atingir a máxima potência (à frequência de 60 Hz) apenas eventualmente, utilizou-se como parâmetro um FR máximo de 42% (9% superior ao valor de catálogo (38%)). Essa consideração é bastante razoável já que em dias normais, o sistema fotovoltaico atingirá sua máxima potência operacional apenas em alguns instantes do dia. A posição definida para a válvula (VA) foi entre as posições Aberta e a PSc (Figura 10) para obtenção do fator de recuperação (FR) máximo escolhido.

Variando-se a frequência do conversor entre 60 Hz e 40 Hz, foram simuladas diferentes situações às quais o sistema OR estaria submetido com a utilização de uma fonte variável (FV). Para cada valor de frequência, têm-se uma nova condição de pressão e vazão. Observa-se que a cada manipulação do controle da frequência, o comportamento do sistema OR passa a ter um decréscimo (ou um acréscimo) na pressão de entrada do arranjo de membranas e consequentemente uma diminuição (ou aumento) na sua vazão de entrada. Alterando assim, os valores dos parâmetros iniciais e dos parâmetros estudados.

Os dados experimentais obtidos para cada níveis de salinidade foram: o fluxo volumétrico da água de alimentação (Q_f), a concentração da água de alimentação (C_f), o fluxo volumétrico da água permeada (Q_p), a concentração da água permeada (C_p), e a pressão aplicada na entrada (P).

3.4.1 Dados obtidos nos ensaios experimentais

Os dados obtidos foram tratados e separados por níveis de salinidade. Um conjunto de dados experimentais, chamado amostra A, foi utilizado para a obtenção dos parâmetros a partir dos modelos disponíveis na literatura (seção 3.3.1.1) e do modelo de Fraidenraich et al. (2009) (seção 3.3.1.2). Os mesmos foram utilizados para os cálculos dos resultados e suas comparações. As características principais do conjunto de dados da amostra A são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características principais do conjunto de dados da amostra A.

Amostra A	Pressão (MPa)		Vazão de Alimentação (L/h)		Vazão do Permeado (L/h)		Concentração do permeado (mg/L)
	Min.	Máx.	Min.	Max.	Min.	Máx.	Médio
2000 mg/L	0,616	0,885	297,6	395,4	113,0	176,5	58,0
4000 mg/L	0,615	0,885	255,8	341,5	68,8	121,1	186,6
6000 mg/L	0,623	0,990	195,9	292,1	43,2	104,3	537,2

Outro conjunto de dados foi utilizado para a verificação das correlações obtidas na seção 4.2.1. Este conjunto de dados foi denominado amostra B e está representado na tabela 5.

Tabela 5 – Características principais do conjunto de dados da amostra B.

.Amostra B	Pressão (MPa)		Vazão de Alimentação (L/h)		Vazão do Permeado (L/h)		Concentração do permeado (mg/L)
	Min.	Máx.	Min.	Max.	Min.	Máx.	Médio
2000 mg/L	0,642	1,045	307,6	453,4	118,8	211,7	65,9
4000 mg/L	0,637	1,054	263,2	392,7	73,1	153,8	179,6

3.5 Estimativa dos parâmetros f_p e K_{per}

De maneira geral, a metodologia adotada para a estimativa dos parâmetros f_p e K_{per} pode ser descrita a seguir:

a) Cálculo dos **valores médios** do f_p e K_{per} para todo o sistema de membranas:

Valores médios de f_p e K_{per} foram calculados para o sistema de membranas, considerando-se diferentes valores de pressão à entrada, utilizando-se dois procedimentos:

- i) No primeiro, foi utilizado o modelo da teoria do filme para o cálculo do f_p (Equação 2) e o modelo de Psoch & Schiewer (2008) para o cálculo do K_{per} (Equação 13). As vazões do permeado utilizadas para os cálculos, em ambos os modelos, foram obtidas utilizando-se o modelo de Fraidenaich et al. (2009);
- ii) No segundo procedimento foi utilizado o modelo de Fraidenaich et al. (2009) e os dados experimentais para obter os valores médios de f_p e K_{per} . O método aplicado foi o de otimização dos parâmetros que consiste em determinar os pares de f_p e K_{per} que minimizam os desvios entre os valores calculados e os valores experimentais de vazão do permeado. Os resultados obtidos forneceram correlações empíricas para f_p e K_{per} , em função da pressão transmembrânica. As correlações foram avaliadas, repetindo os mesmos procedimentos para uma nova amostra de dados experimentais (Amostra B).

Comparações dentre os valores calculados e experimentais das vazões do permeado obtidas utilizando-se valores médios dos parâmetros f_p e K_{per} **variáveis com as condições de entrada** (procedimentos descritos) e os obtidos quando se consideram f_p e K_{per} **constantes para diferentes condições de entrada** (caso apresentado por Fraidenaich et al. (2009)) foram realizadas.

3.3.1. Cálculo dos valores médios do f_p e K_{per} para todo o sistema de membranas

Dois procedimentos foram utilizados para a determinação dos parâmetros f_p e K_{per} . O primeiro, denominado método (i), utiliza equações disponíveis na literatura para o cálculo desses parâmetros. A vazão de permeado, necessária para os cálculos é atribuída em um procedimento iterativo que utiliza como condição final um desvio mínimo entre os valores atribuídos a Q_p e os valores estimados utilizando-se o modelo de Fraidenraich et al. (2009). Para esse procedimento, apenas as condições de entrada do sistema (vazão, pressão, salinidade) são necessárias. No segundo procedimento, os parâmetros f_p e K_{per} são obtidos pelo método denominado de “extração de parâmetros” ou “otimização dos parâmetros”. Utiliza-se para o cálculo da vazão de permeado o mesmo modelo do sistema OR citado anteriormente (Fraidenraich et al., 2009). Os valores dos parâmetros f_p e K_{per} são modificados a cada passo da iteração. O valor da vazão do permeado, obtido experimentalmente, permanece constante no processo de iteração, desempenhando o papel de parâmetro de comparação com a vazão calculada.

3.3.1.1. Obtenção de f_p e K_{per} utilizando modelos disponíveis na literatura - Teoria do filme e modelo de Psoch & Schiewer (2008)

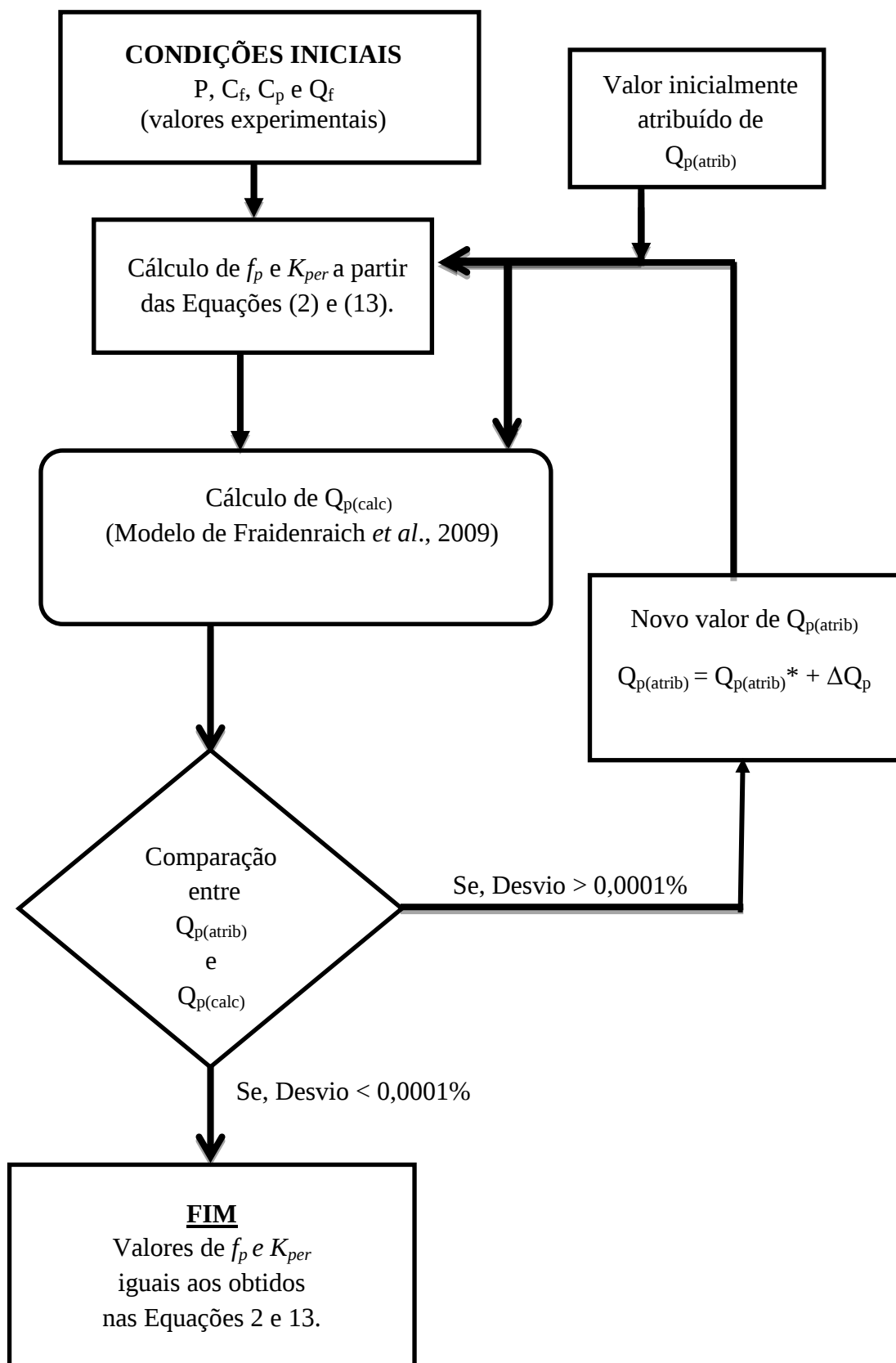
A metodologia utilizada para o cálculo dos parâmetros a partir do **primeiro método (Met. (i))** é descrita a seguir:

- I) Foram estabelecidas, a partir dos dados experimentais, as faixas de operação e as condições iniciais: Valores de P , Q_f , C_f e C_p ;
- II) As Equações da teoria do filme (Equação 2) e do modelo de Psoch & Schiewer (2008) (Equação 13) foram utilizadas para o cálculo de f_p e K_{per} respectivamente;
- III) Inicialmente é atribuído um valor de $Q_{p(atrib)}$ nas Equações para o cálculo dos parâmetros f_p e K_{per} ;
- IV) Para a obtenção dos valores de $Q_p(x)$, utiliza-se o modelo de Fraidenraich et al. (2009);
- V) No procedimento de iteração entre as Equações utilizadas e o modelo, foi estabelecida, como condição final, a consideração de que os desvios entre os valores do fluxo do permeado atribuídos $Q_{p(atrib)}$ e do fluxo do permeado calculados $Q_{p(calc)}$ sejam menores que 0,0001%;

Os procedimentos de cálculo são mostrados no Fluxograma 1

MÉTODO (i)

Fluxograma 1 – Procedimento para a obtenção dos parâmetros a partir de modelos encontrados na literatura.



O modelo de Fraidennaich et al. (2009) foi utilizado para o cálculo do $Q_{p(\text{calc})}$. A solução fornece o valor integrado para o fluxo do permeado (Equação 15 repetida abaixo com a numeração original), portanto, na análise realizada considerou-se o comprimento (L) total da membrana ($x = L = 3\text{m}$). Como parâmetros de entrada foram utilizados dados experimentais de Q_f (fluxo volumétrico da água de alimentação), C_f (concentração da água de alimentação), C_p (concentração da água permeada) e P (Pressão aplicada à entrada). As perdas de carga ao longo das membranas foram consideradas desprezíveis devido ao pequeno tamanho do sistema. A concentração da água permeada (C_p) foi considerada constante para todo o sistema de membranas dado que a saída do permeado encontra-se interligada por uma única tubulação em todo o conjunto, resultando em uma mistura da mesma.

A teoria do filme foi utilizada para o cálculo teórico do fator de polarização (f_p). Conforme mostrado na Equação 2 (repetida abaixo com a numeração original), a expressão para obtenção de (f_p) consiste em uma função exponencial da razão entre a velocidade do fluxo do permeado (J_v) e o coeficiente de transferência de massa da membrana (k_m).

$$Q_p(x) = \frac{x \cdot Q_f}{\lambda} + \Theta \cdot \ln \left(1 - \frac{Q_p(x)}{Q_f - \Theta} \right) \quad (15)$$

$$f_p = \exp \left(\frac{J_v}{k_m} \right) \quad (2)$$

A velocidade média do fluxo do permeado é dada pela razão entre o fluxo volumétrico ($Q_p(x)$) e a área efetiva da membrana (ΔS), essa última, obtida a partir de dados fornecidos pelo fabricante.

O coeficiente de transferência de massa foi calculado a partir da Equação 5 proposta por Sutzkover et al. (2000), repetida abaixo (numeração original).

$$k_m = \frac{(J_v)_{sal}}{\ln \left\{ \frac{P}{\pi_b - \pi_p} \cdot \left[1 - \frac{(J_v)_{sal}}{(J_v)_{sem.sal}} \right] \right\}} \quad (5)$$

onde $(J_v)_{sal}$ e $(J_v)_{sem\ sal}$ são as velocidades do fluxo do permeado com sal e sem sal. Na solução sem sal a concentração de entrada e a do permeado são iguais a 0 mg/L e o fator de polarização igual a 1. A pressão aplicada e as pressões osmóticas são parâmetros de entrada.

O coeficiente de permeabilidade foi obtido pela Equação de Psoch; Schiewer (2008) (Equação 13, repetida abaixo), onde J_v é a velocidade do fluxo do permeado. A pressão transmembrânica (ΔP), expressa pela (Equação 14), é resultante da diferença entre a pressão aplicada (P) e a pressão osmótica estabelecida na membrana. Essa última consiste na diferença entre pressão osmótica no concentrado ($f_p \pi_c$) e no permeado (π_p).

$$K_{per} = \frac{Q_p}{\Delta P \cdot \Delta S} = \frac{J_v}{\Delta P} \quad (13)$$

A solução dos cálculos de f_p e K_{per} exige conhecer os valores de $Q_p(x)$. O modelo utilizado para o cálculo de $Q_p(x)$ (Fraidenraich et al., 2009). por sua vez, necessita do conhecimento prévio de f_p e K_{per} para a determinação dos parâmetros λ e Θ (Equações 17 e 18). Isso faz com que seja necessário o uso de um procedimento iterativo para a solução conjunta das Equações 2, 50, 13 e 15.

Os resultados obtidos com esse primeiro método (Met. (i)) a partir dos procedimentos descritos são mostrados no Capítulo 4.

3.3.1.2. Obtenção dos valores médios dos parâmetros f_p e K_{per} a partir dos dados experimentais.

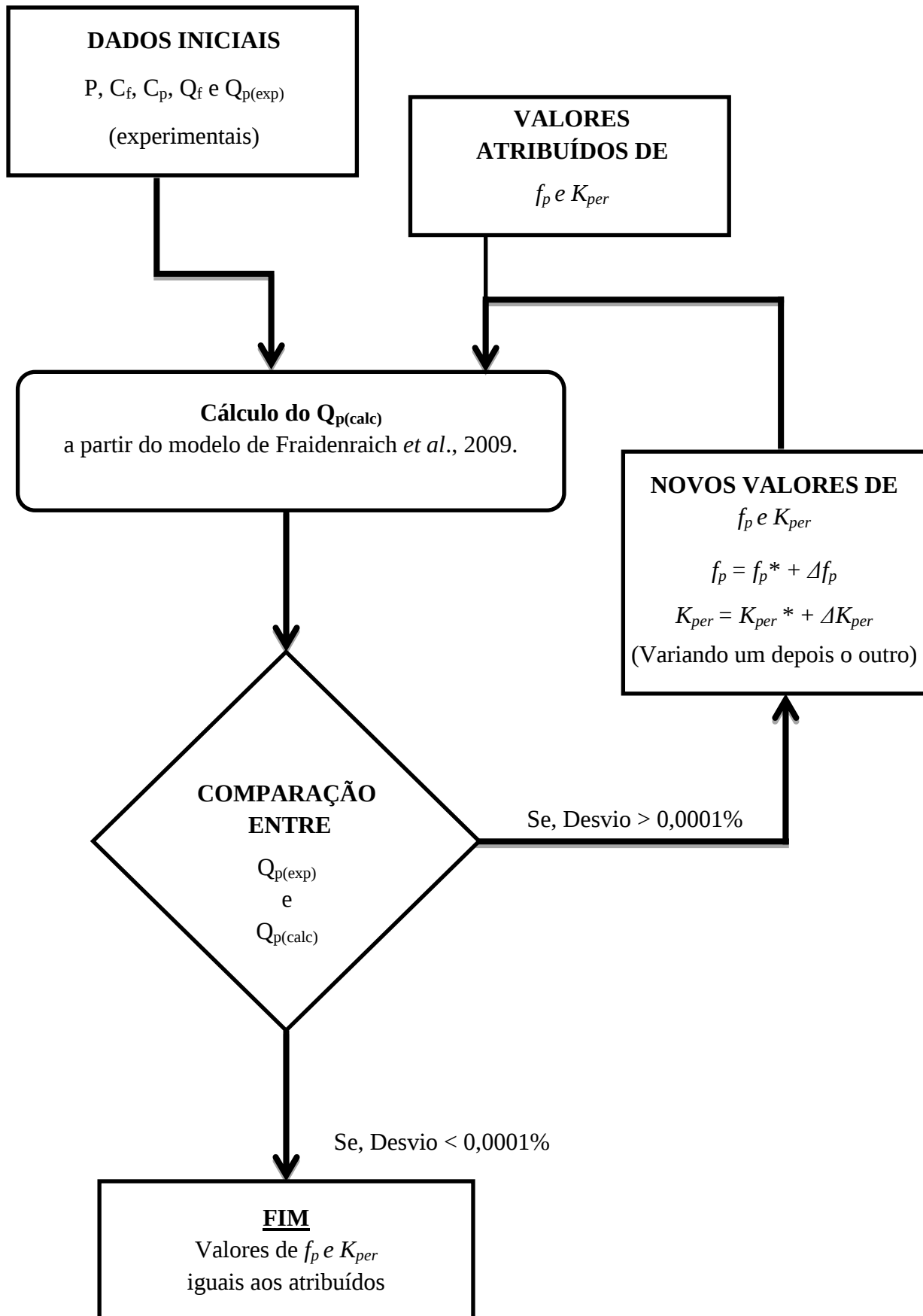
A metodologia do **segundo método (Met. (ii))** para a obtenção dos valores médios dos parâmetros f_p e K_{per} a partir dos dados experimentais, utilizando como base o modelo de Fraidenraich et al. (2009) é descrita a seguir:

- I) Os valores de P , C_f , C_p , Q_f , obtidos experimentalmente (seção 3.2), foram índices utilizados como dados de entrada;
- II) As Equações do modelo de Fraidenraich et al. (2009) (Equações 15, 17 e 18) foram utilizadas para o cálculo dos valores do fluxo do permeado ($Q_{p(calc)}$);
- III) Para cada conjunto de dados de entrada, estipulando-se valores para f_p e K_{per} , calculam-se valores de $Q_{p(calc)}$. Como ponto de partida, utiliza-se Q_p experimental na Equação proposta por Fraidenraich et al. (2009), para obtenção do primeiro valor de $Q_{p(calc)}$;
- IV) Na obtenção dos os valores de f_p e K_{per} foi utilizado o método de otimização dos parâmetros. O método foi aplicado através da comparação entre os valores de vazão do permeado calculados ($Q_{p(calc)}$) e os experimentais ($Q_{p(exp)}$);

O procedimento de cálculo é mostrado no fluxograma 2.

MÉTODO (ii)

Fluxograma 2 – Método de obtenção dos parâmetros a partir dos dados experimentais



O método de otimização dos parâmetros utilizado nesse trabalho, consiste na atribuição de valores f_p e K_{per} para calcular o valor da vazão do permeado ($Q_{p(calc)}$) utilizando-se o modelo de Fraidenraich et al. (2009) e fazer uma comparação com o valor experimental da vazão do permeado ($Q_{p(exp)}$), com isso são obtidos desvios entre esse valores. Variando-se os valores de f_p e K_{per} , são determinados os pares que minimizam os desvios entre os valores de ($Q_{p(exp)}$) e os valores obtidos através do modelo para ($Q_{p(calc)}$).

A Equação do modelo para obtenção do $Q_p(x)$ é implícita e necessita de uma interação circular para sua solução (Equação 15). O procedimento foi feito variando-se, individualmente, os valores de f_p e K_{per} , até que se encontre o par de parâmetros que atenda à condição de desvio relativo médio entre $Q_{p(exp)}$ e $Q_{p(calc)}$, da ordem de 0,0001%. A Equação 20 fornece o desvio relativo médio (Desvio (%)) dos valores analisados.

$$Q_{p(calc)} = \frac{\ell \cdot Q_f}{\lambda} + \Theta \cdot \ln \left(1 - \frac{Q_p}{Q_f - \Theta} \right) \quad (15)$$

onde ℓ representa o comprimento total do sistema de membranas

$$Desvio (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N abs \left(\frac{Q_{p(exp)} - Q_{p(calc)}}{Q_{p(exp)}} \right)}{N} \quad (20)$$

Soluções de NaCl com concentração de 2000, 4000 e 6000 mg/L foram utilizadas nos ensaios. Os cálculos foram realizados para 4 valores de Pressão aplicada. Considerou-se que a pressão é aproximadamente constante ao longo de toda a membrana (perdas de carga desprezíveis).

Planilhas do software Microsoft Excel 2007 foram usadas para os cálculos das iterações proposta nesse trabalho. Os parâmetros f_p e K_{per} obtidos representam valores médios para todo o sistema de membranas, para diferentes níveis de salinidades e diferentes condições de operação (pressão e vazão à entrada).

3.3.1.2.1. Metodologia de obtenção das correlações empíricas para f_p e K_{per}

A partir dos valores calculados para o coeficiente de permeabilidade e o fator de polarização, foram obtidas correlações entre esses parâmetros e a Pressão Transmembrânica. No caso de (K_{per}) a pressão transmembrânica (ΔP) utilizada é resultante da diferença entre a pressão aplicada (p) e a pressão osmótica estabelecida na membrana (Equação 6).

Para o fator de polarização, a correlação obtida considera uma pressão transmembrânica denominada aqui como (ΔP_0) (sem a influência do f_p). A pressão transmembrânica (ΔP_0) é obtida pela diferença entre a pressão aplicada e a pressão osmótica média estabelecida na membrana (diferença entre pressão osmótica média do concentrado (π_{med}) e a pressão osmótica do permeado (π_p)), expressa na Equação 21. A pressão osmótica π_{med} é calculada pelo valor médio entre a concentração final do concentrado e a concentração de entrada.

$$\Delta P_0 = P - (\pi_{med} - \pi_p) \quad (21)$$

As correlações que forneceram os melhores ajustes, tanto para f_p quanto para K_{per} , apresentaram-se na forma de potências de ΔP e ΔP_0 (Equações 22 e 23) (ver seção 4).

$$K_{per} = a. \Delta P^b \quad (22)$$

$$f_p = c. \Delta P_0^d \quad (23)$$

onde a, b, c, e d são os coeficientes de ajuste das curvas, posteriormente abordadas no capítulo 4.

3.3.1.2.3. Metodologia de verificação das correlações obtidas

A partir das correlações obtidas é possível estimar a vazão do permeado para o conjunto de membranas utilizado. Entretanto, a metodologia apresentada permite obter as Equações para outros sistemas de OR.

Para validar as correlações foi utilizado outro conjunto de dados (amostra B). O procedimento é descrito a seguir:

- I) Uma nova amostra de dados, chamada de amostra B, foi obtida experimentalmente utilizando a mesma metodologia descrita na seção 3.2;
- II) O modelo de Fraidenraich et al. (2009) foi utilizado para o cálculo do $Q_p(x)$, utilizando-se como parâmetros de entrada os valores de P , C_f , C_p , Q_f obtidos experimentalmente. As correlações obtidas anteriormente para f_p e K_{per} foram utilizadas para a obtenção dos parâmetros λ e Θ no modelo;
- III) Os valores de $Q_p(x)$ calculados foram comparados aos valores experimentais da amostra B.

A segunda amostra foi obtida em ensaios realizados em dias distintos. Valores de concentração da água de alimentação e concentração do permeado, além de valores mínimos e máximos de pressão, vazão de alimentação, vazão do permeado, da amostra B são apresentados na Tabela 5.

As Equações utilizadas nos cálculos são repetidas abaixo (com a numeração original):

$$Q_p(x) = \frac{x \cdot Q_f}{\lambda} + \Theta \cdot \ln \left(1 - \frac{Q_p(x)}{Q_f - \Theta} \right) \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{Q_f}{k_{per} w [P + (1 - f_p) \pi_p]} \quad (17)$$

$$\Theta = \frac{Q_f f_p (\pi_f - \pi_p)}{P + (1 - f_p) \pi_p} \quad (18)$$

$$K_{per} = a.\Delta P^b \quad (22)$$

$$f_p = c.\Delta P^d \quad (23)$$

As 5 Equações mostradas anteriormente, permitem calcular os valores dos fluxos do permeado. Variando-se os parâmetros de entrada, obtém-se a vazão do permeado em diferentes condições, simulando, por exemplo, a utilização de uma fonte de energia variável (fotovoltaica). As correlações obtidas são válidas para o sistema estudado e para o tipo de sal (NaCl) utilizado.

Uma comparação entre os valores obtidos com o procedimento descrito acima (f_p e K_{per} médios, variáveis com as condições de entrada) e o procedimento utilizado em Fraidenraich et al. (2009) (f_p e K_{per} fixos para todas as condições de entrada) foi realizada. As vazões calculadas com os dois procedimentos são comparadas com os valores experimentais, os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4 Produção do permeado e características de operação do sistema de osmose reversa (OR)

Os resultados experimentais permitiram definir as condições de operação do sistema OR, em cada ensaio. Valores médios horários de vazão do permeado, vazão de alimentação, concentração do permeado, além da faixa de pressão na qual o sistema operou para cada valor de concentração de alimentação são mostrados na tabela 6. O sistema foi operado nos níveis de salinidades de 2.000, 4.000 e 6.000 mg/L.

Tabela 6 – Dados dos ensaios para as concentrações de alimentação à entrada (C_f) iguais a 2.000, 4.000 e 6.000 mg/L.

Dados	C_f		
	2.000 mg/L	4.000 mg/L	6.000 mg/L
Vazão do permeado (L/h)	113,0 a 176,5	68,8 a 121,1	43,2 a 104,3
Vazão de alimentação (L/h)	297,6 a 395,4	255,8 a 341,5	195,9 a 292,1
Concentração média do permeado (mg/L)	58,3	186,5	537,1
Faixa de Pressão de operação (MPa)	0,616 a 0,885	0,615 a 0,885	0,623 a 0,990

As faixas de pressão de operação utilizadas nos ensaios para as 3 concentrações são bastante próximas (tabela 6). Verifica-se que na medida em que a concentração de entrada aumenta, a vazão do permeado diminui e sua concentração aumenta. Esse comportamento é esperado dado que em concentrações elevadas, as pressões osmóticas produzidas no interior da membrana são também altas, reduzindo, consequentemente, a produção do permeado. A Figura 14 mostra os resultados experimentais da vazão do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada.

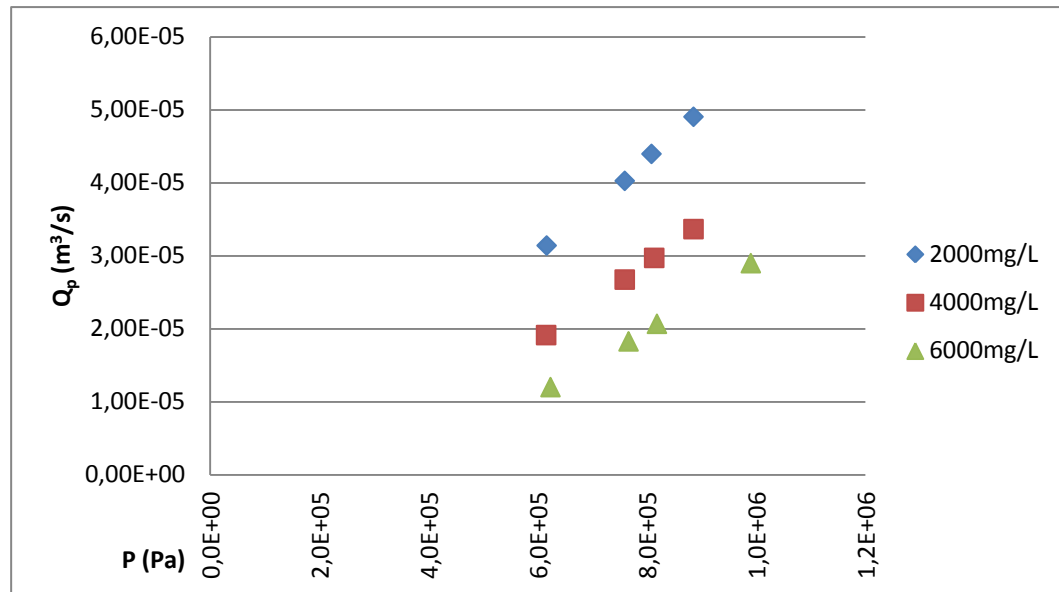


Figura 14 – Vazão do permeado (Q_p) em função da Pressão aplicada (P)

Verifica-se um comportamento linear crescente da vazão do permeado com relação à pressão aplicada (P) (Figura 14). Observa-se também o deslocamento das curvas para regiões de maiores vazões na medida em que a concentração diminui de 6000 mg/L para 2000 mg/L. Comportamentos também descritos em alguns trabalhos da literatura (LIMA, 2006; RIFFEL, 2005; CARVALHO et al., 2005).

4.5 Comportamento dos valores médios de f_p e K_{per}

Os resultados referentes aos cálculos de f_p e K_{per} apresentados a seguir foram obtidos utilizando-se as metodologias apresentadas nas seções 3.3.1.1 - modelos disponíveis na literatura (Teoria do filme e modelo de Psoch; Schiewer, 2008), **(Met. (i))** e 3.3.1.2 – procedimento de otimização dos parâmetros com o modelo de Fraidenaich et al.(2009).

Os valores experimentais de concentração da água de alimentação e concentração do permeado, além de valores mínimos e máximos de pressão, vazão de alimentação, vazão do permeado, utilizados nos cálculos são os descritos na tabela 4. Também foram utilizados parâmetros constantes como o a largura da membrana (w) igual à 2,5 m, o comprimento da membrana (l) que é igual à 3 m, a área efetiva da membrana (ΔS) igual a 7,5 m² e a Temperatura da solução (T) igual à 300 K, obtidos a partir dos dados do fabricante da membrana. Foram calculados os valor de k_m e das pressões osmóticas π a partir das Equações 5 e 6, respectivamente.

Para os três valores de concentração à entrada (2000, 4000 e 6000mg/L) foram obtidos os valores de f_p e K_{per} de acordo com as metodologias Met. (i) e Met. (ii), os quais serão apresentados nas Figuras a seguir. Os resultados de f_p em função da pressão transmembrânica sem a interação do f_p ($f_p \times \Delta P_0$) são mostrados na Figura 15.

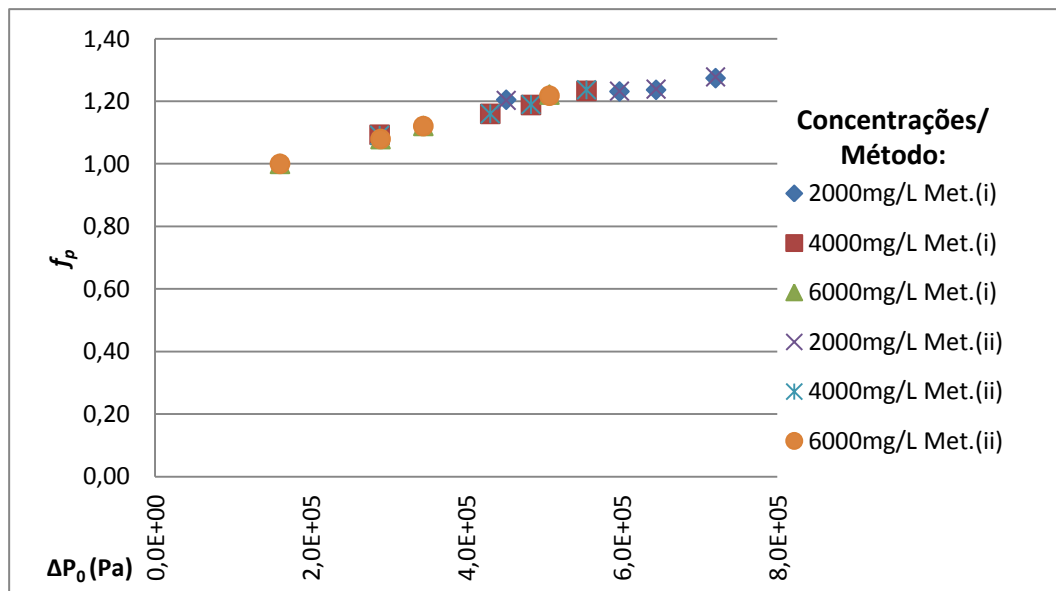


Figura 15 - Resultados obtidos: Fator de polarização (f_p) em função da pressão transmembrânica sem a interação do f_p (ΔP_0), obtidos pelos Métodos (i) e (ii).

Verifica-se (Figura 15) que os pontos obtidos para os três níveis de salinidades apresentam um comportamento crescente. Esses valores encontram-se distribuídos ao longo de uma região bem determinada, podendo ser visualizados como uma curva única. Para as maiores concentrações, os valores de f_p localizam-se na região inferior da curva e para menores níveis salinidades, na região superior. Em algumas regiões da curva os valores de f_p para as diferentes concentrações convergem. O desvio médio entre os fatores de polarização calculados pelos métodos (i) e (ii) foi menor que 0,3%.

Os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade em função da pressão transmembrânica são apresentados a seguir (Figura 16).

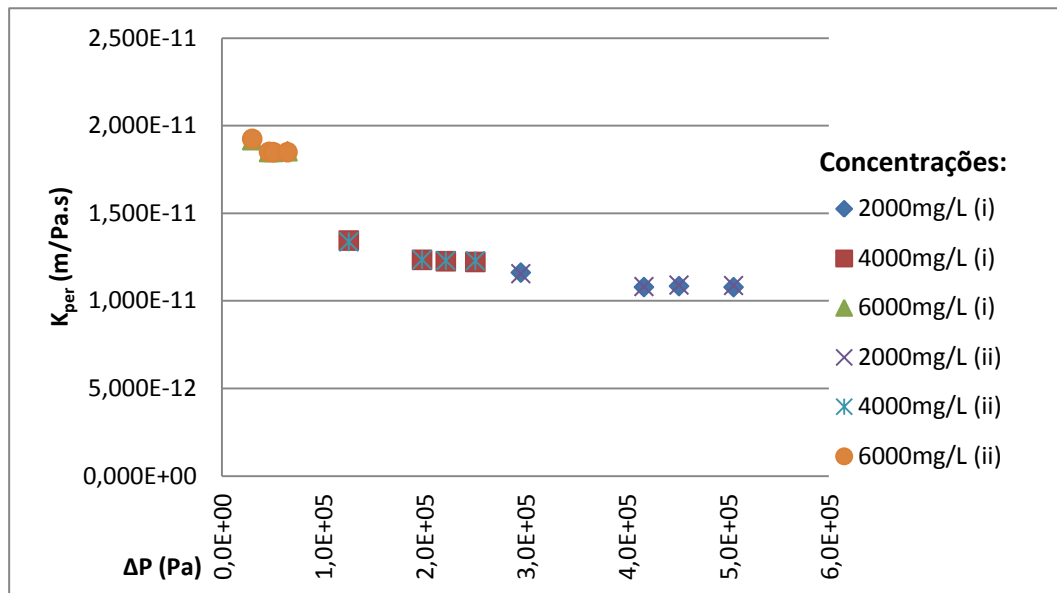


Figura 16 - Resultados obtidos: Coeficiente de permeabilidade (K_{per}) em função da pressão transmembrânica (ΔP), obtidos pelos Métodos (i) e (ii).

No gráfico (Figura 16) observa-se uma variação decrescente do coeficiente de permeabilidade K_{per} com o aumento da pressão transmembrânica. Da mesma forma que para f_p , verifica-se que os valores obtidos para os três níveis salinidades encontram-se distribuídos ao longo de uma curva única. A curva apresenta uma queda acentuada no início (baixas pressões transmembrânicas), tendendo a valores constantes para pressões mais elevadas. Onde as maiores concentrações encontram-se na região superior da curva, com menores ΔP devido às altas pressões osmóticas e as menores concentrações na região inferior da curva com maiores ΔP e tendo poucas variações do K_{per} .

Os resultados obtidos pelos dois métodos apresentados nesse trabalho, confirmam as observação feitas por Alexiadis et al. (2007) acerca do comportamento variável do coeficiente de permeabilidade em relação a pressão.

4.2.1. Correlações obtidas para f_p e K_{per}

Considerando-se que os dados de f_p para as três concentrações mostrados na Figura 16 representam um único conjunto de dados, foi possível se obter, como representado na curva apresentada na Figura 17, uma expressão para a correlação entre os valores de f_p e ΔP_0 .

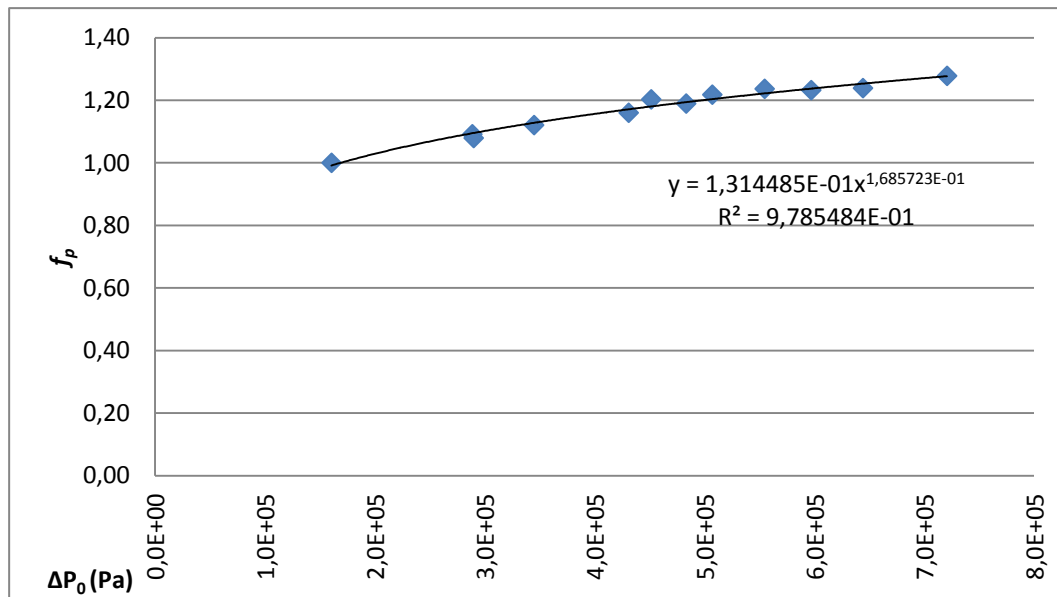


Figura 17 – Curva de tendência da relação entre f_p e ΔP_0 .

A correlação que forneceu o melhor ajuste para f_p em função de ΔP_0 é mostrada na Equação 24 a seguir

$$f_p = 1,31448 \cdot 10^{-1} \cdot (\Delta P_0^{0,16857}) \quad (24)$$

As mesmas considerações foram aplicadas ao parâmetro K_{per} (os dados de K_{per} para os três níveis de salinidades mostrados na Figura 16 representam um único conjunto de dados). Nesse caso, obteve-se, através da curva mostrada na Figura 18 uma expressão para a correlação entre os valores de f_p e ΔP (Equação 25).

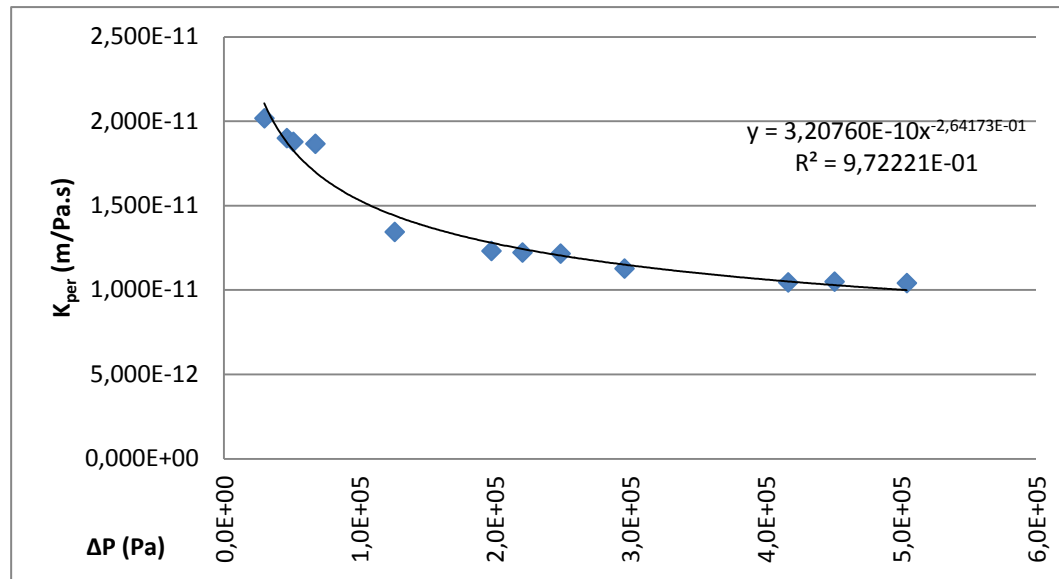


Figura 18 – Curva de tendência da relação entre K_{per} e ΔP .

$$K_{per} = 3,30760.10^{-10}.(\Delta P^{-0,264173}) \quad (25)$$

As correlações são válidas para o sistema de OR utilizado para a concentração salina de NaCl. Conforme comentado na seção 3.3.2, as correlações apresentadas foram verificadas com uma segunda amostragem de dados (amostra B). Os resultados da verificação são apresentados na seção seguinte.

4.2.1.1. Verificação das correlações obtidas

Utilizando os mesmos métodos para a obtenção dos dados, descritos na (secção 3.1), foram obtidos resultados de Q_p em função de P , com uma amostra experimental diferente da utilizada anteriormente (Amostra B), para avaliar a validade das correlações. Os resultados são mostrados nas Figuras 19 e 20.

Os resultados na Figura 19 demonstram um desvio médio na ordem de 1,95% na comparação resultados de Q_p obtidos pelo método das correlações em relação aos dados experimentais, para a concentração média de 2000mg/L.

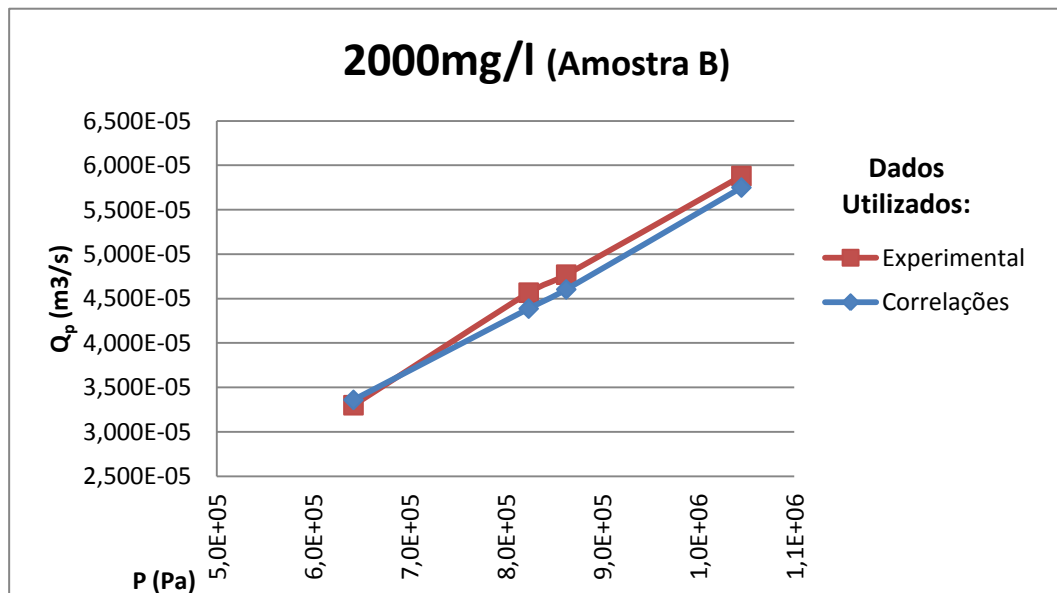


Figura 19 – Resultados obtidos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para os dados da amostra B com 2000mg/L.

Para a concentração média de 4000mg/L (Figura 19) foi obtido um desvio médio na ordem de 1,39% para os resultados de Q_p calculados com as correlações em relação aos dados experimentais. Os pequenos desvios apresentados nos resultados obtidos com a amostra B confirmam a validade da utilização das correlações para o cálculo dos parâmetros f_p e K_{per} (parâmetros variáveis) com modelo de Fraidenraich et al. (2009).

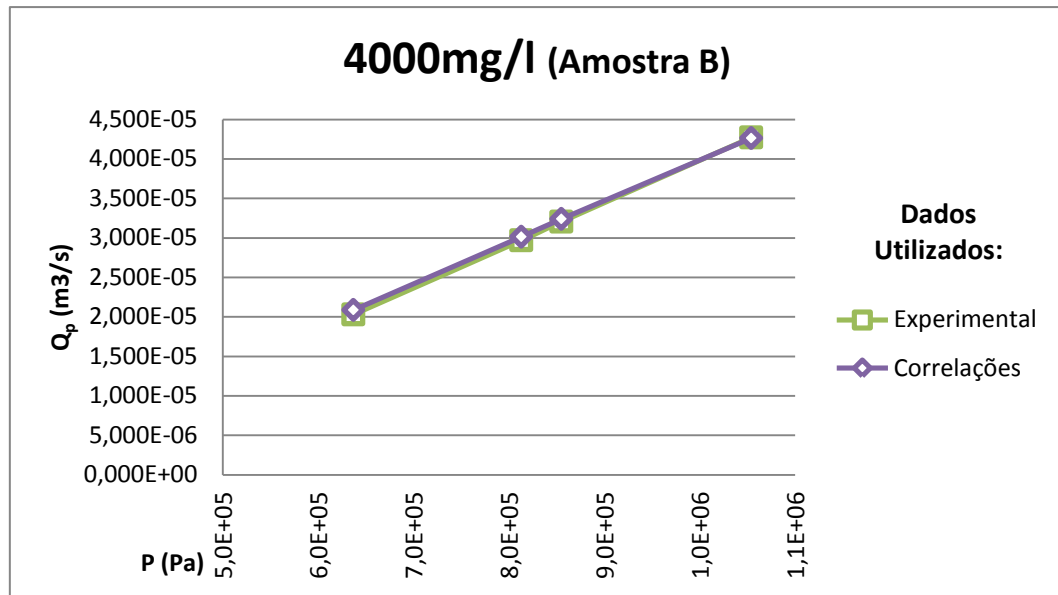


Figura 20 – Resultados obtidos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para os dados da amostra B com 4000mg/L.

4.6 Comparação entre os cálculos de Q_p considerando f_p e K_{per} variáveis e f_p e K_{per} constantes com a pressão.

Como já visto, no trabalho de Fraidenrach et al. (2009) o fluxo do permeado (Q_p) é calculado utilizando os parâmetros f_p e K_{per} constantes com a pressão. Com a proposta de inserir as variações dos parâmetros, a partir das correlações obtidas, ao modelo de Fraidenrach et al. (2009), foram obtidos resultados para Q_p , mostrados nos gráficos das Figuras 21, 22 e 23. Os gráficos permitem comparar os resultados obtidos pelos métodos utilizados com os resultados experimentais.

Os resultados foram obtidos e são mostrados nos gráficos a seguir considerando os seguintes métodos:

a) O procedimento de cálculo utilizado no trabalho de Fraidenrach et al. (2009), que considera os parâmetros f_p e K_{per} constantes com a pressão, que foi denominado **Método dos Parâmetros Fixos**;

b) O método de cálculo dos parâmetros utilizando modelos da literatura (Método (i) - seção 3.3.1.1) considerando suas variações em relação a pressão, que foi chamado de **Método Teórico**;

c) É o proposto por este trabalho para o cálculo do f_p e do K_{per} utilizando as correlações obtidas empiricamente (método (ii) - seção 3.3.1.2), método que foi denominado **Método das Correlações**, também considerando as variações dos parâmetros em relação a pressão.

Os métodos dos parâmetros fixos, o teórico e o das correlações, são métodos que resultam no cálculo do fluxo do permeado (Q_p).

A comparação dos resultados obtidos pelos métodos demonstra que se obtém uma melhor aproximação teórica quando se consideram as variações dos parâmetros em relação à pressão aplicada. Confirmando assim, a importância de inserir as variações dos parâmetros f_p e K_{per} nos cálculos de Q_p .

Para o nível de salinidade de 2000mg/L foi estabelecido para o **método dos parâmetros Fixos** os valores de f_p igual a 1,165 e do K_{per} igual a $1,0883 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s. No **método Teórico** os valores dos parâmetros variaram de 1,2049 a 1,2786 para o fator de polarização e entre $1,1604 \cdot 10^{-11}$ a $1,0277 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s para o coeficiente de permeabilidade. E no **método das correlações** os valores do f_p variaram de 1,19498 a 1,2734 e entre $1,1743 \cdot 10^{-11}$ e $1,0361 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s para K_{per} .

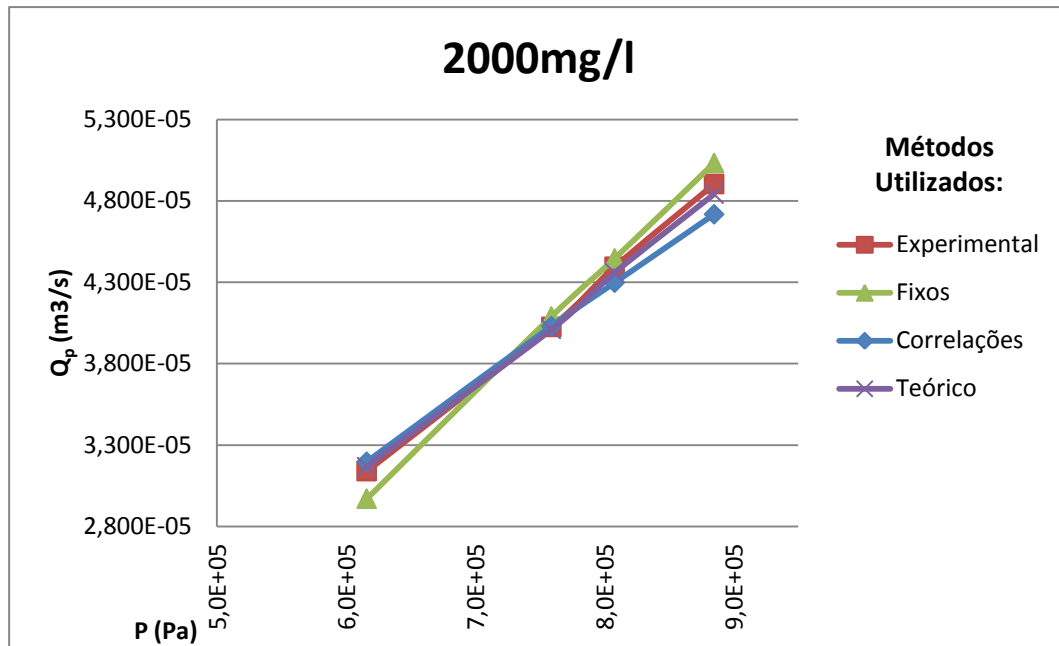


Figura 21 – Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 2000mg/L.

Os resultados do gráfico (Figura 21) mostram um desvio médio da ordem de 2,69% para os resultados de Q_p obtido pelo método dos parâmetros fixos em relação ao Q_p Experimental, da ordem de 1,28% para os resultados de Q_p obtido pelo método Teórico em relação ao Q_p experimental e da ordem de 1,99% para os resultados de Q_p obtido pelo método das correlações em relação ao Q_p experimental. Verifica-se que para baixas concentrações as variações dos parâmetros são pequenas.

Para a concentração média de 4000mg/L foram estabelecidos, para o **método dos parâmetros fixos**, os valores de f_p igual a 1,1650 e do K_{per} $1,4822 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s, no **método Teórico** os valores dos parâmetros variaram entre 1,0931 e 1,2333 para o fator de polarização e entre $1,4439 \cdot 10^{-11}$ e $1,2216 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s para o coeficiente de permeabilidade e no **método das correlações** os valores do f_p variaram de 1,11088 a 1,21777 para e K_{per} entre $1,4650 \cdot 10^{-11}$ e $1,2144 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s.

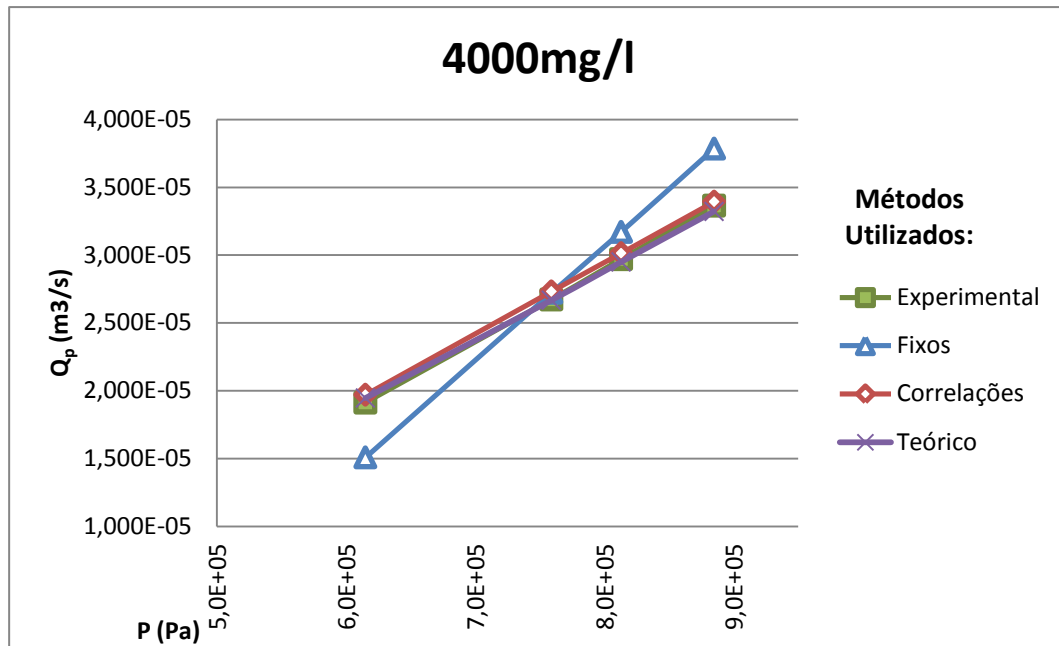


Figura 22 – Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 4000mg/L.

Os resultados do gráfico (Figura 22) mostram um desvio médio da ordem de 10,56% para os resultados de Q_p obtido pelo método dos parâmetros fixos em relação ao Q_p experimental, da ordem de 1,27% para os resultados obtidos de Q_p pelo método Teórico em relação ao Q_p experimental e da ordem de 1,91% para os resultados obtidos de Q_p pelo método das correlações em relação ao Q_p experimental. Foi observada uma maior influência das variações dos parâmetros no sistema quando comparado aos resultados obtidos para 2000 mg/L.

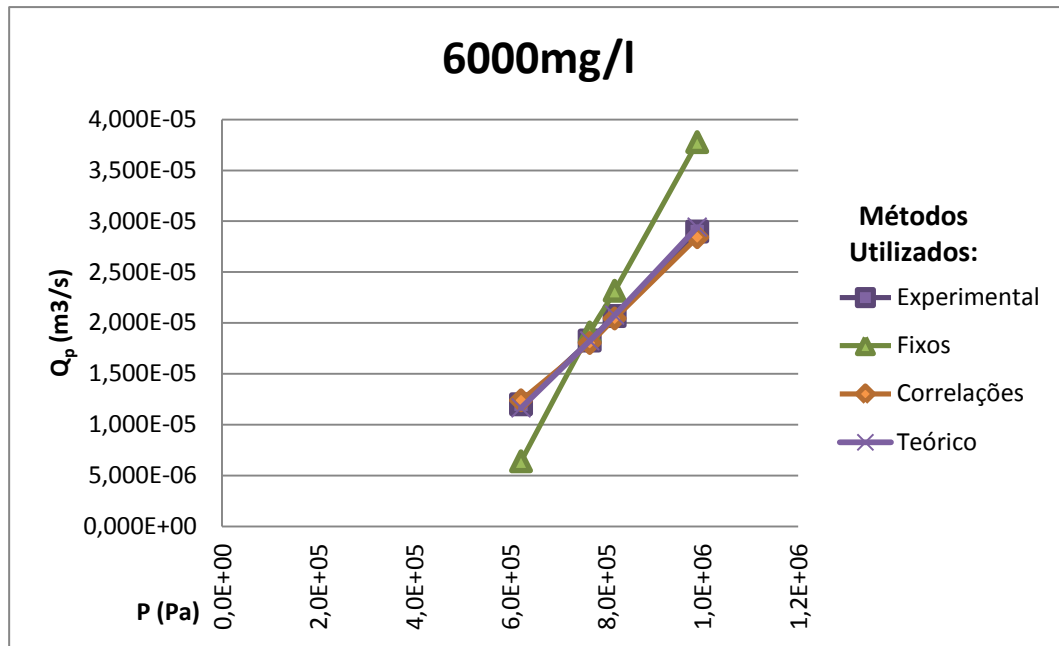


Figura 23 – Comparação dos resultados obtidos pelos métodos: Vazão do fluxo do permeado (Q_p) em função da pressão aplicada (P), para 6000mg/L.

Para o nível de salinidade de 6000 mg/L, os valores de f_p e do K_{per} utilizados para o **método dos parâmetros fixos** (Figura 23) foram iguais a 1,165 e $1,9258 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s respectivamente. No **método Teórico** os valores dos parâmetros variaram entre 1,0002 e 1,2215 para o fator de polarização e entre $1,9616 \cdot 10^{-11}$ e $1,6532 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s para o coeficiente de permeabilidade. E no **método das correlações** os valores do f_p variaram de 1,00002 a 1,18373 e para o K_{per} entre $1,9934 \cdot 10^{-11}$ e $1,5416 \cdot 10^{-11}$ m/Pa.s.

Os resultados obtidos para a concentração média de 6000mg/L (Figura 23) demonstraram, com mais clareza, a influência das variações dos parâmetros nos resultados. Com um desvio médio na ordem de 23,35% para os resultados de Q_p obtido pelo método dos parâmetros fixos em relação ao Q_p experimental, na ordem de 1,23% para os resultados de Q_p obtido pelo método Teórico em relação ao Q_p experimental e na ordem de 1,91 % para os resultados de Q_p obtido pelo método das correlações em relação ao Q_p experimental.

Uma comparação entre os desvios médios dos resultados de Q_p obtidos pelos métodos de cálculo dos parâmetros em relação ao Q_p experimental, são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Desvios médios do Q_p obtidos pelos métodos em relação ao Q_p experimental.

C_f	Método dos parâmetros fixos	Método Teórico	Método das correlações
	Desvio médio	Desvio médio	Desvio médio
2000 mg/L	2,69%	1,28%	1,99%
4000 mg/L	10,56%	1,27%	1,91%
6000 mg/L	23,35%	1,23%	1,91%

Os resultados apresentados na tabela 7 que foram obtidos para os níveis de salinidade demonstram um desvio médio crescente entre os valores dos Q_p calculados pelo método dos parâmetros fixos em relação aos dados experimentais. Os valores médios de concentração do permeado foram 58 mg/L, 187 mg/L e 537 mg/L, para as concentrações de 2000 mg/L, 4000 mg/L e 6000 mg/L, respectivamente.

Os métodos utilizados têm diferenças fundamentais entre as forma de cálculo do Q_p e na utilização dos parâmetros f_p e K_{per} . No método dos parâmetros fixos o Q_p é obtido utilizando valores fixos dos parâmetros, produzindo um maior desvio, entre o Q_p obtido e o experimental, com o aumento da concentração. No método Teórico o Q_p é calculado utilizando valores de f_p e K_{per} , obtidos pelas equações da teoria do filme e de Psoch & Schiewer (2008) que independem dos valores experimentais para o cálculo e no método das correlações os parâmetros utilizados, foram calculados por correlações obtidas a partir dos dados experimentais.

Os resultados obtidos utilizando os métodos propostos nesse trabalho foram satisfatórios, os métodos teórico e das correlações, podendo ser observado um controle sobre os desvios médios entre o Q_p calculados pelos métodos em relação aos dados experimentais, gerando uma melhor previsão teórica.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise do comportamento do coeficiente de permeabilidade (K_{per}) e do fator de polarização (f_p) perante as variações de pressão e vazão em um sistema de osmose reversa alimentado por um gerador variável. Esses parâmetros foram calculados para diferentes níveis de salinidade e pressões aplicadas. Dois procedimentos foram propostos para o cálculo de (K_{per}) e (f_p), ambos utilizando como base para o cálculo da vazão de permeado o modelo de Fraidennaich et al. (2009). No procedimento que utiliza o método da otimização dos parâmetros para o cálculo de K_{per} e f_p (Método (ii)) além das variáveis de entrada (Q_f , C_f , P), é necessário conhecer a vazão do permeado (Q_p). No procedimento que utiliza as Equações da teoria do filme e o modelo de PSOCH e SCHIEWER (2008) (Método (i)) não é necessário conhecer essa variável. Embora ambos os procedimentos tenham apresentado resultados satisfatórios, o método (i) é mais vantajoso quando os valores experimentais de Q_p não são disponíveis.

Utilizando-se a vazão de permeado como base para as comparações, os resultados obtidos mostraram que a utilização dos parâmetros f_p e K_{per} variáveis com a pressão aplicada permite obter valores de Q_p mais próximos dos valores experimentais do que no caso em que esses parâmetros são considerados constantes. Os desvios médios entre o fluxo do permeado calculado e o experimental quando f_p e K_{per} são considerados constantes variaram entre 2,7%, para baixas concentrações (2000 mg/L), até 23,3%, para altas concentrações (6000 mg/L). Considerando-se os parâmetros variáveis com a pressão os desvios obtidos com os dois métodos propostos foram menores que 2,00%.

a. Considerações finais

Ensaio com um sistema de OR, com níveis de salinidade da água variando entre 2000 e 6000 mg/L forneceram resultados experimentais que foram utilizados para obter os parâmetros (K_{per} e f_p). Para esse fim foram propostos procedimentos de cálculo baseados em modelos existentes na literatura;

Verificou-se que, para o sistema analisado, K_{per} e f_p apresentam uma dependência significativa com a pressão transmembrânica. Cabe ressaltar que no caso específico do sistema de OR estudado, a pressão aplicada (um dos parâmetros determinantes da pressão transmembrânica) está fortemente vinculada à vazão de entrada e à vazão de permeado, o que pode explicar o fato de que a pressão transmembrânica seja a variável que permite uma melhor representação do comportamento dos parâmetros K_{per} e f_p .

O estudo realizado possibilitou confirmar a forte influência das variações do fator de polarização e do coeficiente de permeabilidade no comportamento do sistema de OR. Os efeitos das variações dos parâmetros em relação à pressão são mais evidenciados no processo de dessalinização quando operado com altos níveis de salinidade da água à entrada do sistema.

As expressões obtidas para K_{per} e f_p em função da pressão transmembrânica, para a membrana utilizada, juntamente com a solução obtida por Fraidenraich et al. (2009) permitem obter de forma simples, as curvas que descrevem o comportamento da operação de sistemas de OR que operam com geradores variáveis de energia, como o fotovoltaico e o eólico.

b. Sugestões para trabalhos futuros

Consideramos que outros estudos deverão ser feitos e deverão contemplar a continuidade dos resultados aqui sinalizados. Entende-se que diversos aspectos sobre o comportamento dos sistemas de OR alimentados por fontes variáveis de energia devem ser desenvolvidos. Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Análise de sensibilidade do cálculo da vazão de permeado com a variação dos parâmetros fator de polarização (f_p) e coeficiente de permeabilidade (K_{per});
- b) Cálculo de (f_p) e (K_{per}) para altas salinidades, como a do mar;
- c) A elaboração de um software para o cálculo dos parâmetros estudados utilizando os procedimentos propostos;
- d) Análise do comportamento dos parâmetros (f_p) e (K_{per}) em um sistema de osmose reversa alimentado por fonte variável de energia. (Ex. solar, eólico).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALEXIADIS, A.; WILEYA, D.E.; VISHNOIB, A.; LEEA, R.; FLETCHERC, D.F.; BAOA, J. **CFD modelling of reverse osmosis membrane flow and validation with experimental results.** Desalination. 217, 242–250p. 2007.

ALVES, T. L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membrana de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação.** 2006. Tese (Doutorado Pelo programa de Pós-graduação em ciência dos Materiais e Metalurgia do Centro de Tecnologia.) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

AVLONITIS, S. A.; PAPPAS, M.; MOUTESIDIS, K. **A unified model for the detailed investigation of membrane modules and RO plants performance.** Desalination. 203. 218–228p. 2007.

BISET, R. **La riviera maya: Desalinización en lugares turísticos.** Córdoba. Água latinoamérica. Vl. 2, n. 3. 2002.

BRITO, P.; FERREIRA, L.; PORTUGAL, A.; BLOX, M.; KERKHOF P. V. **Modelização de separações por membrana através de Métodos de refinamento de malha.** APMTAC, 2004

CARVALHO P. C. M.; PONTES, R. S. T.; OLIVEIRA JR, D. S.; RIFFEL, D. B.; OLIVEIRA, R. G. V. **Mathematical model of a photovoltaic powered reverse osmosis plant without batteries.** Rio 5 - world climate & energy event, 15-17p, Fevereiro, Rio de Janeiro. 2005.

CHONG, T. H.; WONG, F. S.; FANE, A. G. **Enhanced concentration polarization by unstirred fouling layers in reverse osmosis: Detection by sodium chloride tracer response technique.** Journal of Membrane Science. 287, 198-210p. 2007.

DOW. **literature - FILMTEC.** Disponível em **DOW- Water;Process Solutions:** <http://www.dow.com/Liquidseps/Lit/down_lit.htm>, acessado 28/05/09.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C.; LIMA, G. A.; GORDON, J. M. **Reverse Osmosis Desalination: Modeling and Experiment.** Applied Physics Letters American Institute of Physics. N. 94. 2009.

FRISCHKORN, H.; ROCHA NETO, J. L. **Osmose Reversa: Limpeza química em membranas de dessalinizadores do Ceará.** Rev. Tecnol., Fortaleza, v.30, n.1, p. 61-76, 2009.

GREEN, M.A. **Solar Cells – Operating Principles, Technology and System Applications.** Englewood Cliffs. NJ-USA, Prentice-Hall Inc. 1982.

HOEK, E.M.V.; Kim, A.S.; ELIMELECH, M. **Influence of cross flow membrane filter geometry and shear rate on colloidal fouling in reverse osmosis and nanofiltration separations.** Environ. Eng. Sci. Vl. 19, n. 6. 357-373p. 2002

JARUSUTTHIRAK, C.; AMY, G.; CROUÉ, J.P. **Fouling characteristics of wastewater effluent organic matter (EFOM) Isolates on NF and UF membranes.** Desalination. 145, 247-255p. 2002.

JAMAL, K.; KHAN, M. A.; KAMIL, M. **Mathematical Modeling of Reverse osmotic systems.** Desalination. Vl. 160, 29-42p. 2004.

KIM, S.;HOEK, E. M.V. **Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes.** Desalination. 186, 111–128p. 2005.

LIDE, D.R., **CRC Handbook of Chemistry and Physics**; ed. CRC Press: Washington, D.C., Ed. 85^a, 2005.

LIMA, G. A. **Sistema de dessalinização por osmose reversa acionada por gerador fotovoltaico com conversor de frequência.** 2006. Dissertação (mestrado em fontes renováveis de energia) – PROTEN/DEN, Universidade Federal De Pernambuco.

LYSTER, E.;COHEN, Y. **Numerical study of concentration polarization in a rectangular reverse osmosis membrane channel: Permeate flux variation and hydrodynamic end effects.** Journal of Membrane Science. 303. 140-153p. 2007.

MARRIOTTI, J.; SHRENSEN, E. **A general approach to modeling membrane modules.** Chemical Engineering Science 58. 4975-4990p. 2003.

MAURICCI, J. J. **Vuelco del concentrado de plantas potabilizadoras por membranas a una red cloacal.** Santa fé. Água latinoamérica. Vl. 2, n. 3. 2002.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology.** Kluwer Academic Publishers, 1991.

PENG, W.; ESCOBAR, I. C.; WHITE, D. B. **Effects of water chemistries and properties of membrane on the performance and fouling- a model development study.** Journal of Membrane Science. 238, 33-46p. 2004.

PORTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA. **Processo de separação – membrana.** Disponível em: <http://Labvirtual.Equaçãouc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=206>, acessado 10/04/10.

PSOCH, C.;SCHIEWER, S. **Simple Long-term flux improvement by air sparging and backflushing for a membrane bioreactor, and modeling permeability decline.** Desalination. 230, 193–204p. 2008.

RIFFEL, D. B. **Unidade de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias: simulação, projeto e validação experimental**. 2005. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) – centro de tecnologia, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE.

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. V. 1. 234p. São Paulo: ABES. 2001.

SOCIOAMBIENTAL, INSTITUTO. **Água doce e limpa: de "dádiva" à raridade**. Disponível em: <<http://www.socioambiental.org/esp/agua/pgn/>>, acessado 02/07/09.

SOUZA, A.; LAVERDE JR., A. **Aplicação da espectroscopia de ressonância magnética nuclear para estudos de difusão molecular em líquidos: a técnica dosy**. Quím. Nova. VI.25, p. 1022-1026. 2002

SONG, L.; EIIMELECH, M. **Theory of Concentration Polarization in Crossflow Filtration**. J. Chem. Soc. Faraday Trans. 91(19), 3389-3398p. 1995.

SUTZKOVER, I.; HASSON, D.; SEMIAT, R. **Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system**. Desalination. 131, 117–127p. 2000.

THOMSON, M.; INFELD, D. **A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries**. Desalination. 153. 1-8p. 2002.

VILELA O. C.; FRAIDENRAICH N. **A methodology for the design of photovoltaic water supply systems**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 9, pp 349-361. 2001.

ZHOU, W.; SONG, L.; GUAN, T. K. **A numerical study on concentration polarization and system performance of spiral wound OR membrane modules**. Journal of Membrane Science. 271. 38-46p. 2006.