



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO

**ARRANJOS DE MEMBRANAS DE OSMOSE INVERSA: AVALIAÇÃO E
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE PEQUENOS SISTEMAS**

GIOVANNE DE SOUSA MONTEIRO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Kepler Borges França

CAMPINA GRANDE, MARÇO DE 2009.

**ARRANJOS DE MEMBRANAS DE OSMOSE INVERSA: AVALIAÇÃO E
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE PEQUENOS SISTEMAS**

GIOVANNE DE SOUSA MONTEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França.

Campina Grande, Março de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M775a
2009

Monteiro, Giovanne de Sousa

Arranjos de membranas de osmose inversa: avaliação e comparação do desempenho de pequenos sistemas / Giovanne de Sousa Monteiro. — Campina Grande, 2009.
70f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França.

1. Dessalinização 2. Arranjos 3. Membranas 4. Pré-Tratamento I.
Título.

CDU – 628.112(043)



**ARRANJOS DE MEMBRANAS DE OSMOSE INVERSA: AVALIAÇÃO E
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE PEQUENOS SISTEMAS**

GIOVANNE DE SOUSA MONTEIRO

BANCA EXAMINADORA:

DATA: 31/03/2009



Prof. Kepler Borges França (Ph.D)
Orientador – UFCG/UAEQ



Prof. Hervé Michel Laborde (D.Sc)
Examinador Interno - UFCG/UAEQ



Prof. Vimário Simões Silva (D.Sc)
Examinador Externo - UFCG/UAEQ

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e sabedoria para vencer mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais, João Monteiro de Souza e Gêlza de Sousa Monteiro por sempre ter acreditado em mim e me dado força ao longo de toda minha vida.

As minhas irmãs Gesyanne de Sousa Monteiro e Gerlanne de Sousa Monteiro pela amizade e carinho com que sempre me trataram.

Ao professor Kepler Borges França, pelos ensinamentos e conselhos que foram de fundamental importância para a conclusão desse trabalho.

Aos grandes amigos Sidinei Kleber da Silva e José Nilton Silva, pela ajuda durante toda a execução desse trabalho.

Ao amigo Jorge pelo empenho e apoio nos momentos finais deste trabalho.

As amigas Weruska Brasileiro, Kelly e Sueleni pelas palavras de carinho e amizade.

Ao Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES, pelo apoio financeiro e suporte técnico imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Química pelos ensinamentos transmitidos.

A todos que de uma forma ou de outra me ajudaram a alcançar mais essa conquista na minha vida.

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o desempenho de um dessalinizador via osmose inversa que possui três elementos de membranas com os diferentes tipos de arranjos: três em paralelo (3-MP), 3 em série (3-MS) e 2 em paralelo com o terceiro em série (2-MP/1-MS). Os experimentos foram realizados na comunidade Uruçu no município de São João do Cariri – PB, a água de alimentação utilizada com cerca de 2.000 mg/L de sais dissolvidos é oriunda de uma mistura entre o concentrado e o permeado de um dessalinizador que se encontra na referida comunidade. Foram realizados experimentos *sem* e *com* pré-tratamento químico com HCl (pH = 3) onde avaliou-se as vazões do concentrado e permeado, recuperação, temperatura, pH do concentrado e permeado, condutividade elétrica do concentrado e permeado, Índice de Saturação de Langelier (ISL), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e a vazão do permeado para cada arranjo. Nenhum dos arranjos apresentou risco de incrustações por carbonato de cálcio nos elementos de membranas nos experimentos *sem* e *com* pré-tratamento químico, para o STD o arranjo que apresentou o menor valor *sem* pré-tratamento foi o 3 – MP e *com* pré-tratamento o 3 – MS. No que diz respeito à vazão do permeado o arranjo que apresentou o maior valor *sem* pré-tratamento foi o 2-MP / 1-MS e *com* pré-tratamento os arranjos 3 – MP e 2-MP / 1-MS possuem praticamente o mesmo valor.

Palavras chaves: dessalinização, arranjos, membranas, pré-tratamento

ABSTRACT

The present work aims at to evaluate the performance of a desalination machine throw reverse osmosis process build with three elements of membranes. The experiment used different types of arrangements: three in parallel (3-MP), 3 in series (3-MS) and 2 in parallel with third in series (2-MP/1-MS). The experiments had been carried through in the Uruçu community searched on city of São João do Cariri – PB. The water of feed used with about 2,000 mg/L of dissolved salts deriving of a mixture between the concentrated and the permeated of a desalination machine finds in the cited community. Experiments without and with chemical pre-treatment using HCl had been carried through (pH = 3) where evaluated the outflows of the concentrated and permeated, system recovery, temperature, pH, electric conductivity, Langelier Saturation Index (LSI), Total Dissolved Solids (TDS) and the outflow of the permeated for each arrangement. None of the arrangements had presented risk of precipitation for calcium carbonate on the elements of membranes in the experiments with and without chemical pre-treatment. For the TDS, the arrangement that presented the minor value without pre-treatment was the 3 - MP and with pre-treatment the 3 – MS. The biggest value for outflow of permeated without pre-treatment was found in 2-MP/1-MS and with pre-treatment for the arrangements 3 - MP and 2-MP/1-MS, were showed the same value.

Word keys: desalination, arrangements, membranes, pre-treatment

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
SIMBOLOGIA	v
CAPÍTULO I	1
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS GERAIS	3
3 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO II	4
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 – Histórico	4
4.2 – Processos de Separação com Membranas	5
4.3 – Osmose	8
4.4 – Osmose Inversa	8
4.5 - Dessalinização	11
4.6 - Principais Parâmetros do Processo de Dessalinização	11
4.6.1 - Pressão Osmótica	11
4.6.2 - Fluxo do Permeado	11
4.6.3 - Recuperação	13
4.6.4 – Taxa de rejeição de sais	14
4.6.5 - Passagem de Sais (PS)	14
4.7 – Incrustações	15
4.8 - Indicadores de Incrustações	15
4.9 - Índice de Densidade de Sedimentos (IDS)	16
4.10 - Índice de Saturação de Langelier (ISL)	17
4.11 – Pré – Tratamento	20
CAPÍTULO - III	21
5.0 – MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1 – Água	21
5.2 – Dessalinizador	22
5.3 – Arranjos dos elementos de membranas	23
5.4 – Experimental	24
5.5 – Reagentes e instrumentos utilizados	25
CAPÍTULO IV	27
6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
6.1 – Variáveis de medidas dos sistemas estudados <i>sem</i> e <i>com</i> pré-tratamento químico	27
6.2 – Comparação dos resultados simulados <i>sem</i> pré-tratamento químico dos arranjos dos elementos de membranas	30
6.3 – Comparação dos resultados simulados <i>com</i> pré-tratamento químico dos arranjos dos elementos de membranas	33
6.4 – Resultados experimentais versus resultados simulados <i>sem</i> e <i>com</i> pré-tratamento químico para os arranjos de membranas estudados	35
6.4.1 – Comparação dos dados experimentais com os simulados <i>sem</i> pré-tratamento químico para os três arranjos dos elementos de membranas	35

6.4.2 – Comparação dos dados experimentais com os simulados <i>com</i> pré-tratamento químico para os três arranjos dos elementos de membranas	39
7.0 – CONCLUSÕES	43
8.0 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45
APÊNDICE I	48
Análises físico-químicas da água de alimentação, concentrado e do permeado para os três tipos de arranjos <i>com</i> e <i>sem</i> pré-tratamento químico	48
APÊNDICE II	56
System Design Overview	63
System Design Overview	65
System Design Overview	67
Anexo	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.2.1 – Representação Esquemática do Processo de Separação por Membranas.	8
Figura 4.2.2 – Modelo de filtração de fluxo cruzado	8
Figura 4.4.1 – Fenômeno da osmose em um osmômetro de laboratório.	10
Figura 4.4.2 – Início da aplicação de uma pressão mecânica em um osmômetro de laboratório.	10
Figura 4.4.3 – Processo de osmose inversa em um osmômetro de laboratório.	10
Figura 4.9.1 – Equipamento básico para medida do IDS	17
Figura 5.1.1 – Misturador utilizado na produção da água de alimentação	22
Figura 5.1.2 – Misturador em funcionamento	22
Figura 5.2.1 – Sistema de dessalinização	23
Figura 5.2.2 – Bomba dosadora	23
Figura 5.3.1: Arranjo com três elementos de membranas em série.	24
Figura 5.3.2: Arranjo com dois elementos em paralelo em série com um.	24
Figura 5.33: Arranjo com três elementos em paralelo.	25
Figura 6.1 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>sem</i> pré-tratamento químico	32
Figura 6.2 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>sem</i> pré-tratamento químico	33
Figura 6.3 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>sem</i> pré-tratamento químico	34
Figura 6.4 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>com</i> pré-tratamento químico	35
Figura 6.5 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>com</i> pré-tratamento químico	35
Figura 6.6 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas <i>com</i> pré-tratamento químico	36
Figura 6.7 – ISL experimental e simulado para os diferentes tipos de arranjos de membranas <i>sem</i> pré-tratamento químico	37
Figura 6.8 – Variação do STD do permeado em função dos arranjos dos elementos de	38

membranas para uma água de alimentação com STD = 2.189,03 mg/L, <i>sem</i> pré-tratamento	
Figura 6.9 – Vazão do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas <i>sem</i> pré-tratamento químico	39
Figura 6.10 – ISL experimental e simulado para os diferentes tipos de arranjos de membranas <i>com</i> pré-tratamento químico	40
Figura 6.11 – Variação do STD do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas para uma água de alimentação com STD = 2.189,03 mg/L, <i>com</i> pré-tratamento químico	41
Figura 6.12 – Vazão do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas com pré-tratamento químico	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Porosidade de membranas e pressões de operação usuais em PSM	6
Tabela 4.4.1 – Processo de separação por membranas comerciais	11
Tabela 6.1 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MP	29
Tabela 6.2 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MS	29
Tabela 6.3 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 2-MP/1-MS	29
Tabela 6.4 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MP sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Q_a) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$	30
Tabela 6.5 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MS sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Q_a) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$	31
Tabela 6.6 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 2-MP/1-MS sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Q_a) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$	31

SIMBOLOGIA

A	área da membrana (m^2)
Ca	concentração da alimentação (mg/L)
Cc	concentração do concentrado (mg/L)
Cp	concentração do permeado (mg/L)
c_i	concentração molar do soluto (mol/L)
I	força iônica (mol/L)
IDS	índice de densidade de sedimentos
IS&D	índice de saturação de Stiff&Davis
ISL	índice de saturação de Langelier
J_p	fluxo do permeado ($L/m^2 \cdot h$)
J_s	fluxo mássico do soluto ($L/m^2 \cdot h$)
K_a	coeficiente de permeação de água ($L/m^2 \cdot h \cdot kgf/cm^2$)
K_c	condutividade elétrica do concentrado (mS)
K_p	condutividade elétrica do permeado (mS)
K_s	coeficiente de transferência do soluto (m/h)
OI	osmose inversa
P3	pressão de alimentação (kgf/cm^2)
P4	pressão de saída (kgf/cm^2)
P_p	pressão do permeado (kgf/cm^2)
PS	taxa de passagem de sais (%)
pH	potencial hidrogeniônico
pH_s	potencial hidrogeniônico de saturação
pH_c	pH do concentrado
pH_p	pH do permeado
pCa	logaritmo negativo da concentração de Ca^{+2}
palc	logaritmo negativo da alcalinidade
PSM	processo de separação com membranas
Qa	vazão de alimentação (m^3/h)
Qp	vazão do permeado (m^3/h)

Qc	vazão do concentrado total (m ³ /h)
STD	sólidos totais dissolvidos (mg/L)
r	recuperação do sistema (%)
R	constante dos gases ideais (kgf.L/cm ² .mol.K)
T	temperatura (°C) pode ser Kelvin, dependendo da aplicação
TRS	rejeição de sais (%)
v _i	número de íons formados na dissociação do soluto
2-MP/1MS	dois elementos de membranas em paralelo em série com o terceiro
3-MP	três elementos de membranas em paralelo
3-MS	três elementos de membranas em série

Subscritos

A	alimentação
c	concentrado
i	espécie química dissociada
p	permeado
s	saturação

Letras gregas

$\Delta\pi$	gradiente de pressão osmótica (kgf/cm ²)
ΔP	gradiente de pressão (kgf/cm ²)
ΔC	diferença de concentração de sais (mg/L)
π	pressão osmótica (kgf/cm ²)
π_a	pressão osmótica da alimentação (kgf/cm ²)
π_c	pressão osmótica do concentrado (kgf/cm ²)
π_p	pressão osmótica do permeado (kgf/cm ²)

CAPÍTULO I

1 – INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos existentes desde o início da humanidade, do ponto de vista quantitativo, mantêm-se mais ou menos os mesmos. Todavia, podem representar um aspecto crítico relativamente ao crescimento real da população. Considerando a água como substância necessária à vida e as atividades humanas atuais, à medida que aumenta a população e os hábitos de consumir água, aumenta conseqüentemente à sua demanda (SOUSA, 2003).

Entre os elementos da natureza, a água é uma forma de energia essencial à vida e a manutenção dos ecossistemas. O ser humano ingere, por dia, cerca de três litros de água; um é consumido na ingestão dos alimentos sólidos e os outros dois são ingeridos como bebida. A água desempenha funções importantes no organismo, pois é responsável pela assimilação dos alimentos nutritivos, pela circulação sanguínea e pela respiração, como também pela eliminação de urina e dejetos (SOUSA, 2001).

O problema da escassez de água no mundo já foi bem diagnosticado, configurando-se como um dos grandes desafios para o século XXI. No Brasil, também é um problema que envolve há décadas vários setores da sociedade e reveste-se de características dramáticas em algumas regiões do país, como é o caso do semi-árido nordestino (PEREIRA, 2005).

Em geral, quando não há outra opção viável e segura de dispor de água doce, dessalinizar água salobra de poços perfurados na região é uma solução desejável, e uma das técnicas mais econômicas, de uso consagrado em vários países, é a osmose inversa. Fundamentalmente, consiste em pressurizar a água salobra circulando por cima da superfície de membranas seletivas acomodadas em módulos e que praticamente só deixam permear a água com mínimas concentrações de sais. Esta é recolhida como um filtrado, para distribuição ao usuário. O sal retido se concentra na corrente que não passa pela membrana, sendo esta recolhida para descarte ou aproveitamento posterior (como, por exemplo, em tanques de criação de peixes). Os principais fatores técnicos determinantes da eficiência do processo são: a qualidade da água salobra disponível, seu pré-tratamento, o tipo de membrana e as condições operacionais (HABERT et al., 1997).

O uso da tecnologia de osmose inversa para dessalinização de águas salobras e marinhas reinicia ao final da década de 1960 e se consolida nos anos 70. Concorrendo com técnicas evaporativas, de troca iônica e de eletrodialise, conquista um apreciável nicho de mercado em função de aspectos econômicos e práticos (instalação e operação facilitadas). Enquanto a indústria de equipamentos se consolida em alguns países, a sua expansão para o tratamento de pequenos volumes demora a vigorar no Brasil (em parte por causa de dependência de importações, escala de mercado, falta de investimentos) (PEREIRA, 2005).

Na dessalinização de águas, a osmose inversa, do ponto de vista técnico e econômico, é um dos processos mais versáteis podendo ser usado numa ampla faixa de concentração de sais dissolvidos. Para que se obtenha um desempenho adequado na produção de água potável e no tempo de vida das membranas, a água subterrânea ou de superfície deve ser pré-tratada antes do processo de osmose inversa.

O pré-tratamento da água *in natura* protege os elementos de membranas contra vários fenômenos de incrustações de ordem inorgânicas e orgânicas. Esses tipos de incrustações denominados como “fouling” ou “scaling”, consistem na formação de depósitos indesejáveis na superfície da membrana. O “fouling” pode ser proveniente de sais dissolvidos, sólidos suspensos e microorganismos na superfície da membrana, através dos seguintes processos: Depósitos inorgânicos (“scaling”); Adsorção de moléculas orgânicas (“fouling” orgânico); Deposição de substâncias coloidais; Desenvolvimento e adesão de microorganismos (“biofouling”).

É de nosso conhecimento que existem vários equipamentos de dessalinização instalados na região do Nordeste que operam com diferentes tipos de águas salobras para o mesmo tipo de membranas. A produção média destes equipamentos fica na ordem de 0,6 m³/h para o mesmo tipo de arranjo de membranas.

Normalmente, se tem observado que os arranjos de membranas são em serie por ser fácil de instalação. Essa peculiaridade, no ponto de vista de rendimento, ou seja, o fluxo de água que permeia a membrana é diretamente dependente da pressão e a concentração do soluto presente no meio. Esse detalhe pode ser mais aprofundado, estudando com o mesmo número de membranas arranjos diferentes com o objetivo de obter melhor rendimento em termos de qualidade/quantidade de água produzida.

2 – OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa com três elementos de membranas *sem* e *com* pré-tratamento químico com HCl (pH = 3,0), para diferentes arranjos dos elementos de membranas, assim como segue: três em série, três em paralelo e dois em paralelo com um em série

3 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar qual arranjo dos elementos de membranas apresenta a melhor eficiência, em relação ao:

- Risco de incrustações por carbonato de cálcio;
- Qualidade do permeado e
- Vazão do permeado.

CAPÍTULO II

4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 – Histórico

O fenômeno de osmose foi descoberto por Abbè Nollet a mais de 200 anos quando ele observou o transporte de água através de uma bexiga de porco, a qual cobria a boca de uma garrafa de vinho (LONSDALE, 1982).

Por volta de 1800 a dessalinização era praticada a bordo de barcos. O processo envolvia um dessalinizador de único estágio operado na modalidade de grupo. Em 1912, uma planta de dessalinização de seis efeitos com capacidade de 75 m³/d é instalada no Egito. A capacidade total de dessalinização aumentou durante o período de 1929-1937 devido à indústria de óleo. Um crescimento exponencial ocorre durante o período de 1935 a 1960 anual de cerca de 17%, e 1957, o marco da instalação da planta de dessalinização de quatro estágios por Westinghouse no Kuwait (ELL-DESSOUKY e ETTOUNEY, 2002).

O processo de osmose inversa vem oferecendo grandes margens de pesquisa com membranas de acetato de celulose desde meados de 1950 na Universidade da Florida e na Universidade da Califórnia. Loeb e Sourirajan receberam créditos em desenvolver as primeiras membranas com alto desempenho, criando uma estrutura de acetato de celulose assimétrica com rejeição de sais e transporte do fluxo de água. A história e conhecimento desses desenvolvimentos se encontram documentados pelos seguintes autores (MERTEN, 1966; SOURIRAJAN, 1970; LOEB, 1981).

A era comercial de membranas de osmose inversa se deu início na década de 60 pela Gulf General Atomics (mais tarde conhecida como Fluid Systems Division of Universal Oil Products e atualmente Allied-Signal Corporation) e a Aerojet General, usaram o sistema de acetato de celulose de Loeb-Sourirajan para lançar no mercado o permeador espiral enrolado, sob o financiamento do Departamento do Interior dos Estados Unidos da América de águas salinas.

Os permeadores espirais enrolado de membranas formados por um filme fino de compósito de poliamida foi introduzido pela Fluid System Division e a FilmTec (hoje é uma

subsidiária da Dow Chemical Company). A partir da década de 80, vem se investindo no desempenho dessas membranas para aumentar o fluxo de água e rejeição de sais para água salobra e água do mar.

4.2 – Processos de Separação com Membranas

Os processos de separação por membranas com transporte de uma dada espécie, ocorrem devido à existência de uma força motriz. Nos processos de separação com membranas como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI), a força motriz é o gradiente de pressão.

A classificação da porosidade e pressão de operação das membranas citadas acima é apresentada na Tabela 4.1.

Existe outro processo de separação por membrana que utiliza como força motriz o potencial elétrico: é a eletrodialise (ED). A ED é uma tecnologia de separação por membrana que leva em conta a troca de íons eletricamente conduzida da qual é capaz de separar, concentrar e purificar íons selecionados de misturas aquosas (BUROS, 1990).

Tabela 4.2 – Porosidade de membranas e pressões de operação usuais em PSM (HABERT et al., 1997).

Membrana	Porosidade	Pressão (kgf/cm ²)
Microfiltração	0,05 µm – 5,0µm	< 2,00
Ultrafiltração	3,0 nm – 50,0 nm	2,00 – 10,00
Nanofiltração	1,0 nm – 4,0 nm	5,00 – 41,00
Osmose Inversa	0,1 nm – 1,0 nm	8,00 – 204,00

A microfiltração é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,05 e 5,0 µm, são processos indicados para retenção de materiais em suspensão e emulsão. A pressão aplicada não ultrapassa 2,0 kgf/cm². Uma das aplicações da microfiltração é no pré-tratamento utilizado no processo de OI (SILVEIRA, 1999).

A ultrafiltração é um processo de separação por membranas utilizada quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de UF apresentam poros

na faixa de 3,0 a 50,0 nm. Soluções contendo solutos de peso molecular 103 a 106 Daltons¹ podem ser tratadas por este processo. Como os poros das membranas de UF são menores, então a diferença de pressão varia na faixa de 2,0 a 10,0 kgf/cm². A UF tem uma relação muito grande com a osmose inversa, pois ambas necessitam de agitação na interface fluido/membrana, limitando a polarização do concentrado. A UF é largamente utilizada na indústria de alimentos, bebidas e laticínios, assim como em aplicações na biotecnologia e na área médica (HABERT et. al.,1997).

A nanofiltração compreende um processo de membranas, no qual as partículas rejeitadas situam-se na faixa de 20 a 1000 Daltons. Este processo atua no setor entre a UF e a OI. Todas as moléculas orgânicas com elevado peso molecular são rejeitadas. Os sais dissolvidos constituídos por ânions monovalentes têm taxas de rejeição de 30 a 85%, muito inferiores aos das membranas de OI, tanto que a NF não é considerada uma tecnologia de dessalinização (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). A NF é empregada para: redução de dureza, remoção de cor, purificação de enzimas entre outros.

As membranas constituem, atualmente, a principal inovação tecnológica nos processos de tratamento de água, sendo a primeira grande inovação, desde o desenvolvimento das tecnologias convencionais de tratamento de água no início do século passado (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Convencionalmente, a filtração refere-se à separação de partículas sólidas de correntes líquidas ou gasosas. A filtração por membranas estende esta aplicação à separação de solutos dissolvidos em correntes líquidas e a separação de misturas gasosas.

Uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que seletivamente transfere massa entre essas fases. A membrana tem assim a capacidade de transportar determinados componentes mais eficazmente, retendo outros que fazem parte da mistura de alimentação. É, portanto uma barreira permeável e seletiva ou uma interface entre duas fases. A Figura 4.2.1 apresenta um esquema da separação por membranas.

¹ Dalton, medida de peso molecular e corresponde ao peso de um átomo de hidrogênio.

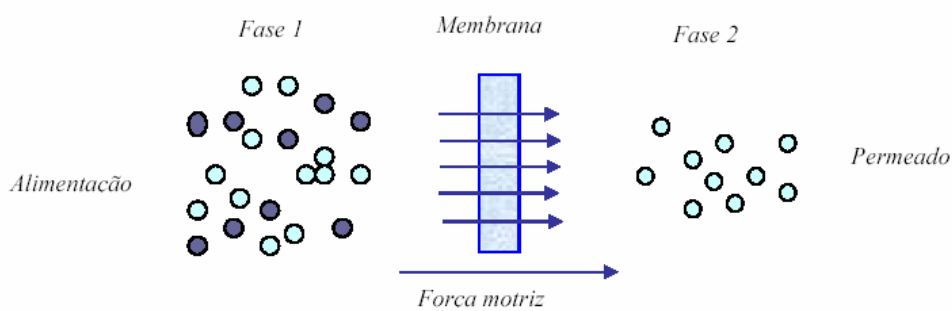


Figura 4.2.1 – Representação Esquemática do Processo de Separação por Membranas.

O que distingue o processo de separação de membranas de outras técnicas de separação é a utilização de uma outra fase, a membrana. Esta fase, sólida, líquida ou gasosa, introduz uma interface entre o volume das duas fases envolvidas na separação e pode originar vantagens de eficiência e seletividades (MULDER,1997).

O processo de separação por membranas é caracterizado pelo fato da corrente de alimentação ser dividida em duas correntes, a de concentrado e a de permeado, o que implica que ou a corrente de concentrado ou a de permeado será o resultado da separação (produto). As partículas e os solutos retidos na superfície da membrana são continuamente removidos no concentrado que flui tangencialmente ao longo da superfície da membrana, denominado de fluxo cruzado. A solução purificada flui através da membrana como permeado (HABERT ET al., 1997), conforme mostra a Figura 4.2.2.

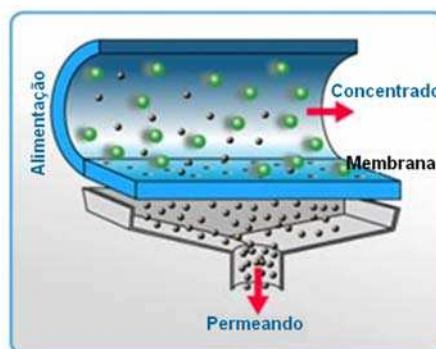


Figura 4.2.2 - Modelo de filtração de fluxo cruzado

4.3 – Osmose

A Osmose Inversa é uma operação unitária onde através de membranas semipermeáveis e com auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas numa faixa menor que 200 Daltons. As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada. A parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana, conhecida como concentrado ou rejeito leva consigo os compostos rejeitados pela mesma. As rejeições típicas de sais dissolvidos atingem a marca de 95 a 99%. (DOW LATIN AMERICA, 1996).

Em resumo, podemos dizer que a MF, a UF, a NF e a OI são processos de separação por membranas, os quais diferem entre si na dimensão física do material retido pela membrana.

O fenômeno de osmose foi descoberto por Abbè Nollet há mais de 200 anos quando ele observou o transporte da água através de uma bexiga de porco que tampava a boca de uma jarra contendo “espírito de vinho” (LONSDALE, 1982).

A osmose é um fenômeno físico-químico natural, quando dois líquidos com diferentes concentrações de sais em solução são separados por uma membrana semipermeável, naturalmente o solvente da solução mais diluída passa pela membrana em direção da concentração mais concentrada. O processo continua até alcançar um ponto de equilíbrio, no qual a coluna da solução mais concentrada estará acima da mais diluída, esta diferença de altura entre as colunas se denomina pressão osmótica.

4.4 – Osmose Inversa

A osmose inversa ou hiperfiltração acontece quando uma pressão mecânica superior a pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada invertendo-se, desta maneira, o sentido do fluxo de soluto que atravessa a membrana, obtendo-se assim uma corrente de água purificada isenta de sais, vírus, bactérias e fungos.

A taxa de transporte de água através da membrana depende das propriedades da mesma, da temperatura da solução, da diferença de pressão aplicada na membrana, e a baixa diferença de

pressão osmótica entre e solução mais concentrada e a de menor concentração (AMJAD, 1992).
 A Figura abaixo ilustra um processo de osmose inversa:

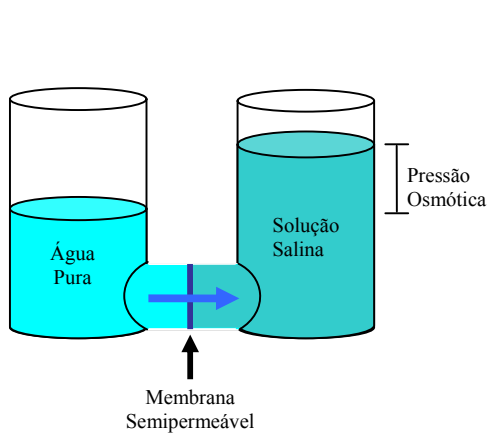


Figura - 4.4.1 Fenômeno da osmose em um osmômetro de laboratório (SILVA, 2008).

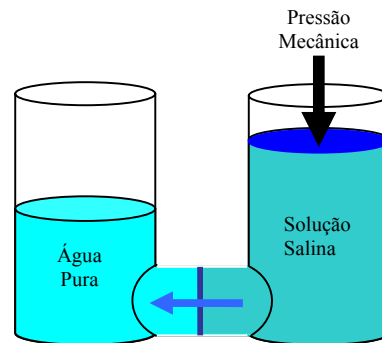


Figura – 4.4.2 Início da aplicação de uma pressão mecânica em um osmômetro de laboratório (SILVA, 2008).

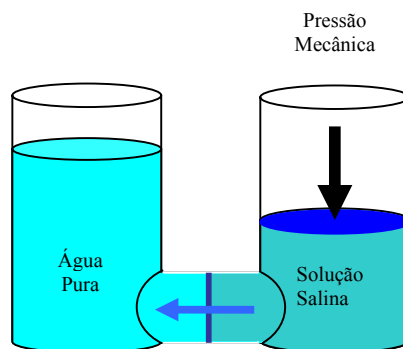


Figura – 4.4.3 Processo de osmose inversa em um osmômetro de laboratório (SILVA, 2008).

Na osmose inversa, as membranas são um dos elementos mais importantes, sua função característica de seletividade induz ao desenvolvimento de membranas para a dessalinização em escala industrial.

Existem hoje, vários tipos de membranas seletivas para diferentes processos, onde as mais utilizadas são as membranas de poliamida aromáticas, estas por sua vez, possuem uma alta rejeição de sais e matérias orgânicas, não biodegradáveis, possuem baixa taxa de compactação e podem trabalhar com uma faixa de temperatura superior a 45°C e alta taxa de rejeição de sílica, sua desvantagem pode ser comentada apenas a sua sensibilidade ao cloro. A Tabela 4.4.1 abaixo mostra alguns dos principais processos de separação em escala comercial.

Tabela – 4.4.1. Processo de separação por membranas comerciais.

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	MATERIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA	APLICAÇÕES
MICROFILTRAÇÃO (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em Suspensão, Bactérias PM > 500.000 (0,01 μ m)	Água e Sólidos Dissolvidos	Esterilização Bacteriana, Clarificação de Vinhos e Cervejas, Oxigenação do Sangue.
ULTRAFILTRAÇÃO (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Colóides, Macromoléculas PM > 5000	Água (Solvente), Sais Solúveis de Baixo Peso Molecular	Fracionamento e concentração de Proteínas, Recuperação de Pigmentos.
NANOFILTRAÇÃO (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de Peso Molecular Médio 500 < PM < 2000	Água, Sais e Moléculas de Baixo Peso Molecular	Purificação de Enzimas, Bioreatores a Membranas.
OSMOSE INVERSA (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo Material Solúvel ou em Suspensão	Água (Solvente)	Dessalinização de Águas, Concentração de suco de Frutas.
DIALISE (D)	ΔC	Moléculas de PM > 5000	Íons e Orgânicos de Baixo Peso Molecular	Hemodiálise (Rim Artificial), Recuperação de NaOH.
ELETRODIÁLISE (ED)	ΔV	Macromoléculas e Compostos não Iônicos.	Íons	Concentrações de Soluções Salinas, Purificação de Águas.
PERMEAÇÃO DE GASES (PG)	$\Delta P \Rightarrow \Delta C$	Gás Menos Permeável	Gás Mais Permeável	Recuperação de Hidrogênio, Separação CO ₂ /CH ₄
PERVAPORAÇÃO (PV)	Pressão de Vapor	Líquido Menos Permeável	Líquido Mais Permeável	Desidratação de Alcoois.

4.5 - Dessalinização

O objetivo dos processos de dessalinização até hoje desenvolvidos é o de remover os sais diluídos nas águas de um modo geral, tornando-as desta forma, uma água de boa qualidade para o consumo humano.

O que diferencia os vários dessalinizadores disponíveis no mercado são as qualidades dos materiais neles empregados, a tecnologia de produção, o grau e automação incorporado, a experiência do fabricante e o tipo de membrana utilizada.

4.6 - Principais Parâmetros do Processo de Dessalinização

Os principais parâmetros do processo de dessalinização via OI são aqueles que estão relacionados com a produtividade do sistema, quantidade de sais extraída em função da qualidade da água de alimentação, faixa de pressão de operação e consumo de energia.

4.6.1 - Pressão Osmótica

A pressão osmótica depende da concentração de solutos, temperatura da solução e do tipo de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução. Para soluções diluídas, a pressão osmótica pode ser calculada pela equação de Van't Hoff (Equação 1) (BRANDT et al., 1993).

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (1)$$

onde: π : pressão osmótica da solução iônica (kgf/cm²); v_i : n° de íons formados na dissociação do soluto; c_i : concentração molar do soluto (mol/L); R: constante dos gases ideais (kgf.L/cm²mol.K) e T: temperatura absoluta (K).

4.6.2 - Fluxo do Permeado

O fluxo do permeado do processo de dessalinização depende diretamente de vários fatores como, por exemplo: a qualidade da água de alimentação em termos de concentração de

sais dissolvidos e outras substâncias de ordem orgânica. A formação dessas substâncias próxima à superfície da membrana impede a permeação durante o processo, conseqüentemente altera as diferenças de pressões da alimentação e osmótica do sistema.

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica e pode ser representado pela Equação 2 (DOW LATIN AMERICA, 1996):

$$J_p = K_a (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2)$$

onde: J_p : fluxo do permeado ($L/m^2 h$); K_a : coeficiente de permeação de água ($L/m^2 h \text{ kgf/cm}^2$); ΔP : gradiente de pressão hidráulica (kgf/cm^2); $\Delta \pi$: gradiente de pressão osmótica (kgf/cm^2); Q_p : vazão de permeado e A : área ativa da membrana (m^2).

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou diferença de potencial químico, depende da diferença de concentração e independe da pressão aplicada ao sistema, que pode ser representado pela seguinte Equação 4.:

$$J_s = K_s \Delta C \quad (3)$$

onde: J_s : fluxo mássico do soluto ($\text{kg/m}^2 h$); K_s coeficiente de permeação do soluto (m/s); ΔC : diferença de concentração de sais (mg/L).

ΔP , $\Delta \pi$ e ΔC são dados por:

$$\Delta P = \left[\frac{(P_a + P_c)}{2} - P_p \right] \quad (4)$$

$$\Delta \pi = \left[\frac{\pi_a + \pi_c}{2} - \pi_p \right] \quad (5)$$

$$\Delta C = \left[\frac{(C_a + C_c)}{2} - C_p \right] \quad (6)$$

onde: P_a , P_c e P_p são as pressões de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente (kgf/cm^2). π_a , π_c e π_p são as pressões osmóticas da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente (kgf/cm^2). C_a , C_c e C_p são as concentrações da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente (mg/L) (TAYLOR e JACOBS, 1996).

4.6.3 - Recuperação

A recuperação do sistema refere-se à percentagem da água de alimentação convertida em água permeada e depende de vários fatores, como a formação de incrustação na superfície das membranas, a pressão osmótica e a qualidade da água de alimentação do sistema.

A recuperação de um sistema pode ser definida de acordo com a Equação 7 (TAYLOR e JACOBS, 1996)

$$r(\%) = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100 = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \times 100 \quad (7)$$

onde: r : recuperação do sistema (%); Q_p : vazão de permeado (m^3/h); Q_a : vazão de alimentação (m^3/h) e Q_c : vazão do concentrado (m^3/h).

A recuperação máxima em qualquer instalação de OI, depende dos sais presentes na água de alimentação e de sua tendência a se precipitar na superfície da membrana. Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana (DOW LATIN AMERICA, 1996).

4.6.4 – Taxa de rejeição de sais

A taxa rejeição de sais (TRS) fornece a capacidade da membrana de rejeitar os sais dissolvidos durante a permeação da água (SILVEIRA, 1999) e pode ser definida como:

$$TRS(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \times 100 \quad (8)$$

onde: TRS é a rejeição de sais (%), C_a é a concentração de alimentação (mg/L) e C_p é a concentração do permeado (mg/L).

A rejeição de sais indica a efetividade de remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana, possuindo valores que variam de 90 a 99,8 % para a maioria dos íons existentes na água (HYDRANAUTICS, 2002).

Uma grande variedade de fatores influencia a rejeição de solutos por membranas: dimensões do soluto, morfologia dos componentes retidos pela membrana, tamanho dos poros da membrana, propriedades químicas da solução a ser filtrada e fatores hidrodinâmicos, que determinam a tensão de arraste e as forças de cisalhamento na superfície da membrana (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

4.6.5 - Passagem de Sais (PS)

É oposta a rejeição de sais e representa a porcentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, ela é calculada de acordo com a Equação 9 (BRANDT et al., 1993):

$$PS(\%) = \left(\frac{C_p}{C_a}\right) * 100 \quad (9)$$

onde: PS: taxa de passagem de sais (%); C_a : concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/l); C_p : concentração de soluto na corrente de permeado (mg/L).

4.7 – Incrustações

Durante o processo de dessalinização podem surgir alguns problemas que afetam a produtividade do sistema, como as incrustações. Estas, por sua vez, são fenômenos capazes de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o passar do tempo.

As incrustações podem ser entendidas como todo o material em suspensão na água e que se deposita na superfície da membrana. Podem ser classificadas por quatro categorias: depósitos inorgânicos (*scaling*), colóides (*fouling* coloidal), sólidos em suspensão e material biológico (*biofouling*) (AMJAD, 1992).

Os colóides podem ser de origem mineral ou orgânica, e tendem a coalescer e se aglomerar na área próxima à superfície da membrana depositando-se nela. Os sólidos em suspensão são partículas maiores de origens diversas e que tem tendência a se depositar na superfície da membrana. O depósito orgânico de origem biológica é constituído por fungos e bactérias e apresenta maiores problemas porque estão presentes em praticamente todas as águas e normalmente se multiplicam em determinadas condições (SOUSA, 2001).

Na prática, os compostos mais críticos para membranas são: sílica, sulfato de cálcio, estrôncio e bário. Um sal precipita quando a concentração dos seus componentes ultrapassa o valor limite correspondente ao produto de solubilidade (Kps) e geralmente a precipitação ocorre nos elementos de membranas instalados na saída dos vasos de pressão (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

4.8 - Indicadores de Incrustações

O desempenho de um sistema de membranas depende diretamente da forma como foi projetado o sistema em função da qualidade da água de alimentação. Sabe-se que há uma tendência em função do tempo de operação dos componentes presentes na água de alimentação cria um filme na superfície da membrana, dificultando a passagem da água. O desempenho dos sistemas de membranas, custo de operação, exigências de pré-tratamento, frequência de limpezas são afetados por estes bloqueios nas membranas (TAYLOR e JACOBS, 1996).

4.9 - Índice de Densidade de Sedimentos (IDS)

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos ou através de análises físico-químicas. O Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) é um dos testes mais utilizados.

O equipamento básico, conforme mostra a Figura 4.9.1 consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de $0,45\mu\text{m}$ de porosidade e diâmetro de 47mm. A amostra deve ser filtrada a uma pressão de 30 psig ($2,1\text{kgf/cm}^2$) (TAYLOR e JACOBS, 1996).

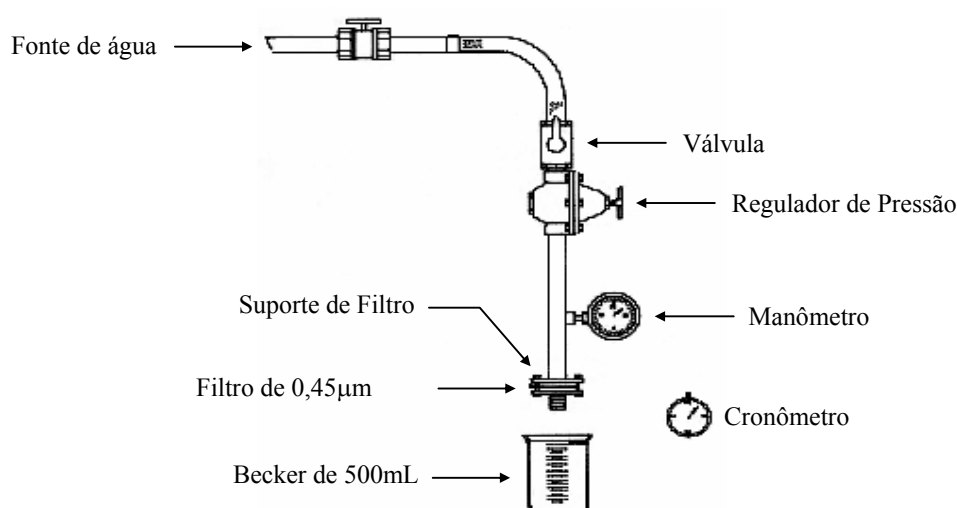


Figura 4.9.1: Equipamento básico para medida do IDS (AMJAD, 1992).

O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_i) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL de permeado, o segundo intervalo de tempo (t_c) varia de 5, 10 ou 15 minutos, o qual é intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 mL de permeado e o início da coleta dos segundos 500 mL de permeado. O terceiro intervalo (t_f) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o t_i é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação 10 (TAYLOR e JACOBS, 1996):

$$IDS = \frac{100 \left[1 - \left(\frac{t_i}{t_f} \right) \right]}{t_i} \quad (10)$$

O teste de IDS é um teste de *fouling* por filtração frontal. Esse teste não reflete com exatidão as condições de acúmulo de material em sistemas operados por filtração tangencial, ou em sistemas de filtração frontal com retrolavagem periódica da membrana. (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A determinação do IDS é essencial em todos os projetos de membranas, mas assume importância especial em sistemas de NF e OI. Águas com índices excessivos de *fouling* podem causar o bloqueio irreversível de módulos espirais, e devem ser submetidas a algum tipo de pré-tratamento que produza um efluente com características adequadas, para processamento por membranas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Geralmente os fabricantes de membranas especificam a faixa de operação de IDS para suas membranas. Existem várias técnicas disponíveis para levar o IDS requerido, fazendo uso de sistemas de filtros multi-meios ou combinação com coagulantes.

4.10 - Índice de Saturação de Langelier (ISL)

Para evitar a formação de incrustação de carbonato de cálcio, comumente se usa a injeção de uma solução ácida na água de alimentação, a qual converte o carbonato para dióxido de carbono. Esse tipo de pré-tratamento leva o Índice de Saturação de Langelier (ISL) ou Índice de Estabilidade de Stiff e Davis do concentrado do sistema de dessalinização a tornar-se negativo, para água salobra e água do mar respectivamente (STRANTZ, 1982).

Em algumas situações a injeção ácida no pré-tratamento pode ser minimizada ou eliminada por abrandadores para reduzir a dureza (cálcio + magnésio) ou por adição de inibidores poliméricos orgânicos que tem a função de retardar a precipitação. Normalmente, a escala do potencial destes materiais pode ser estimada pelas suas constantes de solubilidades na corrente do concentrado e podem ser retardados pela adição de inibidores ou pela redução da recuperação do sistema.

O ISL (também chamado de Índice de Estabilidade de Langelier) é um valor numérico usado para prever a estabilidade do carbonato de cálcio da água, isto é, se uma água irá precipitar, dissolver ou ficar em equilíbrio com o carbonato de cálcio.

A avaliação do risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com STD até 10.000 mg/L é avaliado através do valor do ISL, enquanto que, o Índice de Estabilidade de Stiff e Davis (S&DSI) é utilizado em água de salinidades altas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Os dois índices são calculados pela mesma fórmula (Equação 11), mas diferem no fator de correção da salinidade, que no ISL é baseado no STD da solução e no S&DSI, no poder iônico da solução.

$$ISL, S \& DSI = pH_c - pH_s \quad (11)$$

onde ISL é o Índice de Saturação de Langelier; S&DSI: Índice de Estabilidade de Stiff e Davis; pH_c : pH do concentrado; pH_s : pH no qual o concentrado fica saturado com $CaCO_3$.

O pH_s é calculado pelas seguintes equações (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

$$ISL : pH_s = pCa + palc + C(STD) \quad (12)$$

$$S \& DSI : pH_s = pCa + palc + K(I) \quad (13)$$

Onde, pCa e $palc$ são os logaritmos negativos da concentração de Ca^{+2} e da alcalinidade (na forma de $CaCO_3$), respectivamente. O fator de correção C é calculado a partir da concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), enquanto que o fator de correção K é determinado a partir da força iônica I da solução. Os fatores de correção C e K podem ser obtidos a partir de gráficos com base no cálculo das concentrações dos componentes no concentrado ou na superfície da membrana.

O pH_s também pode ser calculado através da equação (MINDLER e EPSTEIN, 1986):

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (14)$$

onde:

$$A = \frac{(\log[STD]-1)}{10} \quad (15)$$

$$B = -13,12 * \log[^\circ C + 273] + 34,55 \quad (16)$$

$$C = \log[Ca^{+2} \text{ como } CaCO_3] - 0,4 \quad (17)$$

$$D = \log[Alcalinidade \text{ como } CaCO_3] \quad (18)$$

Neste caso, A é um fator que depende da concentração total de sólidos dissolvidos, B depende da temperatura, o fator C depende da concentração de cálcio em mg/L, e D é um fator que depende da alcalinidade em mg/L (MINDLER e EPSTEIN, 1986).

Valores de ISL *negativos* indicam que não há potencial de precipitação de carbonato de cálcio. Se o ISL for *positivo*, indica que a precipitação do carbonato de cálcio poderá ocorrer, para valores de índice cada vez mais positivos, o potencial de precipitação aumenta (NING e NETWIG, 2002).

Para evitar a precipitação de carbonato de cálcio, os índices ISL e S&DSI da água de alimentação devem ser negativos. Quando é feita correção de pH ou adição de anti-incrustante, os valores de ISL e S&DSI devem ficar abaixo dos valores estipulados para esses tratamentos, geralmente entre 1 e 1,5 (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). O ISL e o S&DSI são usados por alguns fabricantes de membranas de OI para auxiliar o uso de produtos químicos no pré-tratamento da água de alimentação (NING e NETWIG, 2002).

É importante ressaltar que o potencial de formação de precipitado químico na superfície da membrana não é condicionado somente pela composição química da água bruta. O uso de cloreto férrico ou sais de alumínio na etapa de coagulação em processos de pré-tratamento pode comprometer seriamente o fluxo das membranas de OI ou de NF pela formação de precipitados químicos (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

4.11 – Pré – Tratamento

O pré-tratamento tem o papel de evitar incrustações de micropoluentes e de substâncias de ordem orgânica e inorgânica nas superfícies das membranas. O tipo de pré-tratamento a ser utilizado, irá depender da qualidade da água de alimentação, e esta é definida em termos de concentração de partículas suspensas e níveis de saturação de sais solúveis dispersos no meio. Alguns dos sais mais conhecidos são: sulfato de cálcio, fosfato de cálcio, fluoreto de cálcio, sulfato de bário e de estrôncio e sílica (SUDAK, 1990).

Mas o pré-tratamento pode envolver desinfecção, coagulação, floculação, filtração e ajustes nos parâmetros de solubilidade para evitar a precipitação de sais sobre as membranas (ISAIAS, 2001).

No pré-tratamento, há dois parâmetros que devem ser medidos, monitorados ou controlados, porque eles influenciam diretamente o desempenho da OI. Um parâmetro é o potencial de incrustação de cálcio, que envolve cálculos para determinar o grau de saturação do carbonato de cálcio ou o sulfato de cálcio através do Índice de Saturação de Langelier (ISL). O segundo parâmetro é o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS), que envolve também, caracterizar o potencial de incrustação da água de alimentação (MINDLER & EPSTEIN, 1986).

CAPITULO - III

5.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo encontra-se os equipamentos, materiais e os procedimentos utilizados para a realização deste trabalho.

5.1 – Água

O presente estudo foi realizado na comunidade Uruçú no município de São João do Cariri – PB, a água utilizada neste trabalho é o resultado de uma mistura, ver Figura 5.1.1 e 5.1.2, entre o concentrado e o permeado de um dessalinizador instalado nessa comunidade, esse processo de mistura foi necessário em razão da água do poço apresentar uma alta concentração de sais dissolvidos a qual não seria permeada pelo dessalinizador em estudo.



Figura 5.1.1 – Misturador utilizado na produção da água de alimentação (SILVA, 2008).



Figura 5.1.2 – Misturador em funcionamento (SILVA, 2008).

5.2 – Dessalinizador

O dessalinizador utilizado foi montado no Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES onde o mesmo apresenta os seguintes componentes:

- Estrutura metálica;
- 03 elementos de membranas de osmose inversa da *FILMETEC™ BW30-4040*;
- 03 vasos de alta pressão de fibra de vidro reforçado com capacidade para um elemento de membrana;
- 03 copos de filtro de cartucho contendo filtros de acetato de celulose de $5\mu\text{m}$;
- 02 manômetros glicerizados com faixa de leitura de (0,0 a 10,0) Kgf/cm^2 ;
- Sensores para medição de vazão e pressão;
- Display de cristal líquido;
- 01 bomba de alta pressão com uma potência de 1CV,
- 01 bomba de retro-lavagem com potência de 1/3 CV.e
- 01 bomba dosadora.



Figura 5.2.1 – Sistema de dessalinização



Figura 5.2.2 – Bomba dosadora

5.3 – Arranjos dos elementos de membranas

Foram utilizados três diferentes tipos de arranjos de membranas de acordo com as Figuras 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3.

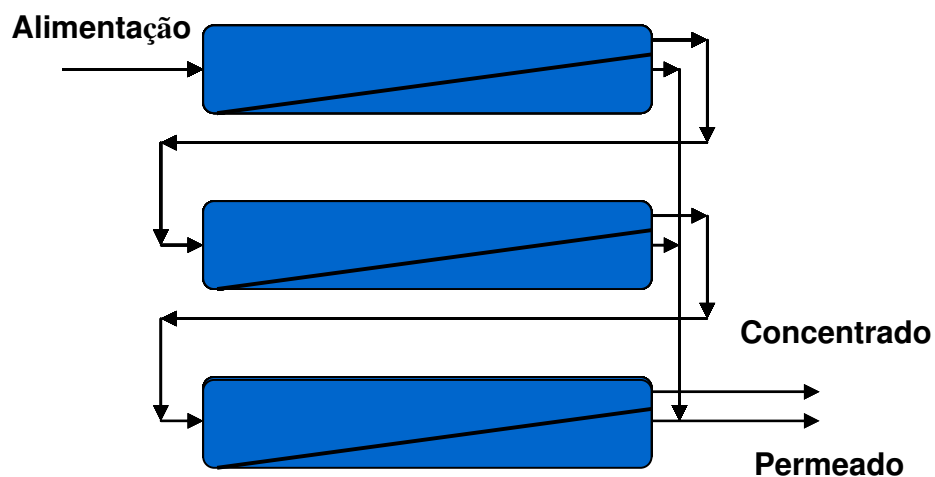


Figura 5.3.1: Arranjo com três elementos de membranas em série.

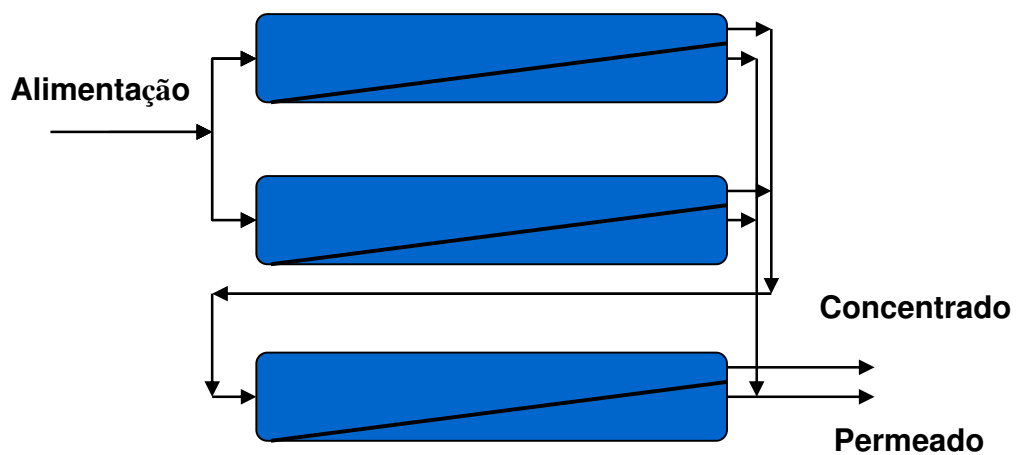


Figura 5.3.2: Arranjo com dois elementos em paralelo em série com um.

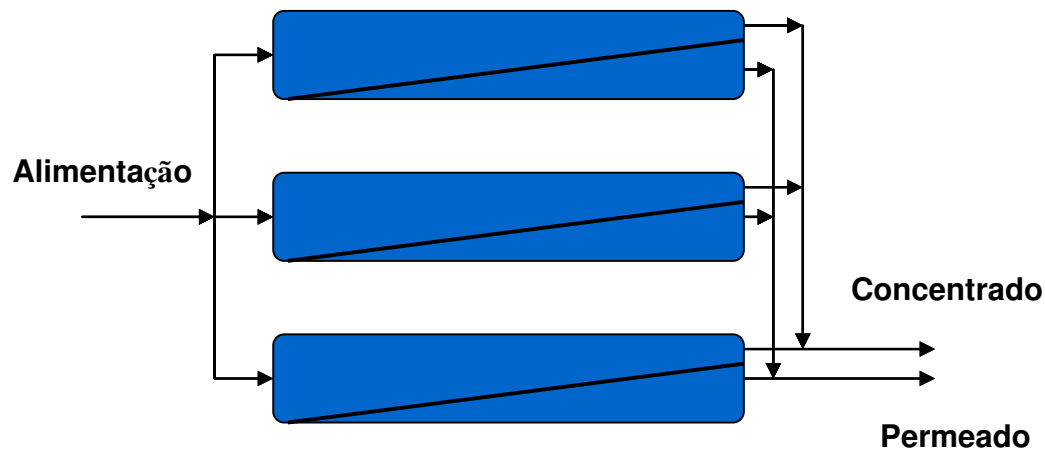


Figura 5.33: Arranjo com três elementos em paralelo.

5.4 – Experimental

Inicialmente foi preparada uma água misturando-se o permeado e o concentrado de um dessalinizador localizado na comunidade Uruçu no município de São João do Cariri – PB com STD de 2000 mg/L aproximadamente, e feita uma análise físico-química dessa água para que os valores obtidos fossem alimentados no simulador comercial ROSA da Filmtec® e assim definidas as condições de funcionamento do dessalinizador.

Após a simulação foi realizado uma batelada *sem* e *com* pré-tratamento químico de HCl (pH = 3), com a duração de 1h para cada arranjo dos elementos de membranas como segue:

- (I) Três elementos de membrana em paralelo (3-MP);
- (II) Três elementos de membrana em série (3-MS) e
- (III) Dois elementos de membrana em paralelo e em série com mais um (2-MP/1-MS)

Durante cada batelada os valores das vazões do permeado e concentrados, recuperação, temperatura, pH do permeado e concentrado e condutividade elétrica do permeado e concentrado foram monitorados, ao termino de cada batelada foi medido o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) e coletadas amostras para a realização de análises físico-químicas.

Neste experimento a pressão de alimentação (P3) igual a 8,5 kgf/cm² e vazão de alimentação (Qa) igual a 2,6m³/h mantiveram-se constantes, apenas os arranjos foram modificados.

Ao término da realização das análises físico-químicas do concentrado e do permeado de cada arranjo, foi possível comparar os resultados experimentais e simulados *sem* e *com* pré-tratamento e verificar qual arranjo é mais eficiente e o que apresentou uma maior proximidade entre esses valores, o simulador ROSA foi escolhido porque as membranas utilizadas neste trabalho são da Filmtec®.

5.5 – Reagentes e instrumentos utilizados

Foram utilizados os seguintes reagentes químicos e instrumentos:

1. Cloreto de Potássio (0,3 M);
2. Hidróxido de Sódio P.A.;
3. Hidróxido de Amônio;
4. Ácido Clorídrico P.A.;
5. Ácido Sulfúrico (0,02 N);
6. Ácido Cítrico P.A.;
7. Murexida P.A.;
8. Fenolftaleina P.A.;
9. Metilorange 0,4% P.A.;
10. Cromato de Potássio 5,0% P.A.;
11. Negro de Eriocromo P.A.;
12. Ácido Etilenodiaminotetracético (EDTA, 0,05N) P.A.;
13. Nitrato de Prata (0,05 N) P.A.;
14. Hidróxido de Sódio 1N P.A.;
15. Beckeres;
16. Condutivímetro 600 da Analyses;
17. pHmetro digital DMPH-2 de Digimed;

18. Bureta eletrônica;
19. Spectrofotômetro;
20. Colorímetro digital;
21. Fotômetro de chama;
22. Turbidímetro;
23. Equipamento para medição do IDS.

Todas as análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES localizado no âmbito da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG seguindo as metodologias do STANDARD METHODS (SMEWW 1998).

CAPÍTULO IV

6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo trata de analisar o desempenho dos arranjos dos elementos de membranas, simulados e experimentais *sem* e *com* pré-tratamento químico, para os seguintes sistemas:

- (I) Três elementos de membranas em paralelo (3 – MP);
- (II) Três elementos de membranas em série (3 – MS) e
- (III) Dois elementos de membranas em paralelo em série com o terceiro (2 – MP/1 - MS).

6.1 – Variáveis de medidas dos sistemas estudados *sem* e *com* pré-tratamento químico

Os valores de vazões do permeado e do concentrado, (Q_p) e (Q_c) e as recuperações ($r\%$) apresentaram variações para os diferentes tipos de arranjos dos elementos de membranas devido as diferentes níveis de temperatura em que foram realizadas as bateladas no campo.

Para os arranjos de membranas mencionados acima às condições de operação foram às seguintes:

Pressão de entrada no elemento de membrana (P_3) igual a $8,5 \text{ kgf/cm}^2$, pressão de saída no elemento de membrana (P_4), os valores da pressão de saída variaram em função dos arranjos dos elementos de membranas.

Os valores do pH do permeado (pH_p), pH do concentrado (pH_c), condutividade elétrica do permeado (K_p) e condutividade elétrica do concentrado (K_c), também apresentaram variações de acordo com os arranjos dos elementos de membranas.

As Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam os valores das vazões do permeado e concentrado, recuperação do sistema, temperatura in loco, pH e condutividade elétrica do permeado, pH e condutividade do concentrado *sem* pré-tratamento químico.

Observou-se que o sistema 2-MP/1-MS apresentou maior recuperação do que os demais. Sabe-se que a produção do permeado e a condutividade elétrica do permeado aumentam com a temperatura do meio (AMJAD, 1992). A variação da condutividade elétrica do permeado para os três casos estudados foi significativa somente para o sistema 3-MS. Esse fato pode ser explicado pela diferença de concentração de sais dissolvidos das “águas” de alimentação preparada para cada batelada. Outro fator que contribui para a diferença de dados entre os obtidos experimentalmente e os simulados é falta de precisão dos instrumentos de leitura. Como por exemplo: os sensores para medição de pressão e vazão digitais não conseguem registrar as pequenas perturbações que passa entre cada elemento de membrana.

Tabela 6.1 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MP sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Q_a) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$

Tempo (min.)	Q_p (m^3/h)	Q_c (m^3/h)	r %	$T^\circ\text{C}$	pHp	K_p (mS)	pHc	K_c (mS)
0	0,48	1,90	20,17	27,81	5,50	0,21	6,90	5,82
10	0,47	2,00	19,03	27,81	5,60	0,19	6,90	5,88
20	0,48	1,90	20,17	27,81	5,70	0,18	7,00	5,88
30	0,48	2,00	19,35	27,21	5,70	0,18	7,00	5,82
40	0,47	2,00	19,03	27,21	5,50	0,19	6,90	5,87
50	0,47	1,90	19,83	27,81	5,60	0,19	6,90	5,87
60	0,48	2,00	19,35	27,81	5,60	0,19	7,00	5,85
Média	0,48	2,00	19,22	27,64	5,60	0,19	6,94	5,86

Tabela 6.2 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MS sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Q_a) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$

Tempo (min.)	Q_p (m^3/h)	Q_c (m^3/h)	r %	$T^\circ\text{C}$	pHp	K_p (mS)	pHc	K_c (mS)
0	0,44	1,90	18,80	26,87	5,60	0,12	7,00	6,37
10	0,45	2,00	18,37	26,87	5,60	0,12	7,00	6,45
20	0,44	1,90	18,80	26,87	5,50	0,12	7,00	6,48
30	0,44	1,90	18,80	26,41	5,60	0,11	7,10	6,47
40	0,44	1,90	18,80	26,41	5,60	0,11	7,10	6,46
50	0,45	2,00	18,37	26,80	5,60	0,11	7,10	6,50
60	0,44	2,00	18,03	26,80	5,60	0,12	7,10	6,50
Média	0,44	1,94	18,56	26,72	5,59	0,12	7,06	6,45

Tabela 6.3 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 2-MP/1-MS sob as seguintes condições de pressão; P3 = 8,5 kgf/cm² e Vazão de alimentação; (Qa) igual a 2,6 m³/h

Tempo (min.)	Qp (m ³ /h)	Qc (m ³ /h)	r %	T°C	pHp	Kp (mS)	pHc	Kc (mS)
0	0,49	1,88	20,68	29,37	5,60	0,19	7,00	7,51
10	0,50	1,88	21,01	29,37	5,50	0,19	7,00	6,86
20	0,49	1,87	20,76	29,84	5,60	0,16	7,00	6,51
30	0,49	1,88	20,68	29,84	5,50	0,16	7,00	6,48
40	0,50	1,87	21,10	29,84	5,40	0,17	7,00	6,51
50	0,50	1,87	21,10	29,35	5,40	0,17	7,00	6,49
60	0,50	1,88	21,01	29,35	5,60	0,16	7,00	6,46
Média	0,50	1,88	20,90	29,57	5,51	0,17	7,00	6,69

As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam os valores das vazões do permeado e concentrado, recuperação do sistema, temperatura in loco, pH e condutividade elétrica do permeado, pH e condutividade do concentrado *com* pré-tratamento químico.

Foram realizados os mesmo experimentos e simulações para os arranjos dos elementos de membranas com o pré-tratamento químico e avaliado o comportamento de cada um deles, as condições de operações iniciais foram mantidas constantes em relação aos experimentos *sem* pré-tratamento químico, como a pressão de entrada (P3) igual a 8,5 kgf/cm² e alimentação dos sistemas. Os valores de vazões do permeado e do concentrado (Qp), (Qc) e as recuperações (r%) apresentaram variações para os diferentes tipos de arranjos dos elementos de membranas.

Em relação os valores com o pré-tratamento químico, o arranjo que apresentou a maior recuperação foi o 3 – MP como também uma menor concentração de sais dissolvidos, embora os outros dois estejam dentro dos padrões de potabilidade de acordo com o Ministério da Saúde.

Tabela 6.4 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MP sob as seguintes condições de pressão; P3 = 8,5 kgf/cm² e Vazão de alimentação; (Qa) igual a 2,6 m³/h

Tempo (min.)	Qp (m ³ /h)	Qc (m ³ /h)	r %	T°C	pHp	Kp (mS)	pHc	Kc (mS)
0	0,46	1,80	20,35	29,06	5,60	0,19	6,90	5,80
10	0,46	1,90	19,49	29,54	5,60	0,19	6,90	5,82
20	0,47	1,90	19,83	29,06	5,70	0,16	6,90	5,83
30	0,46	1,80	20,35	29,06	5,70	0,16	6,90	5,86
40	0,47	1,90	19,83	29,54	5,80	0,17	7,00	5,81
50	0,46	1,90	19,49	29,54	5,60	0,17	6,90	5,86
60	0,47	1,90	19,83	29,06	5,70	0,16	6,90	5,83
Média	0,46	1,87	19,88	29,27	5,67	0,17	6,91	5,84

Tabela 6.5 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 3-MS sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Qa) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$

Tempo (min.)	Qp (m^3/h)	Qc (m^3/h)	r %	T°C	pHp	Kp (mS)	pHc	Kc (mS)
0	0,41	1,90	17,75	27,18	5,60	0,13	7,10	6,35
10	0,42	1,90	18,10	27,20	5,60	0,12	7,10	6,36
20	0,42	1,80	18,92	27,86	5,60	0,12	7,10	6,37
30	0,43	1,90	18,45	27,80	5,60	0,12	7,10	6,37
40	0,42	1,90	18,10	27,18	5,60	0,12	7,10	6,37
50	0,42	1,80	18,92	27,78	5,70	0,11	7,10	6,37
60	0,43	1,90	18,45	27,20	5,70	0,12	7,10	6,37
Média	0,42	1,87	18,38	27,46	5,63	0,12	7,10	6,37

Tabela 6.6 – Monitoramento das variáveis de medidas do sistema 2-MP/1-MS sob as seguintes condições de pressão; $P_3 = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$ e Vazão de alimentação; (Qa) igual a $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$

Tempo (min.)	Qp (m^3/h)	Qc (m^3/h)	r %	T°C	pHp	Kp (mS)	pHc	Kc (mS)
0	0,46	1,90	19,49	29,37	5,80	0,16	7,00	6,30
10	0,47	2,00	19,03	29,67	5,70	0,15	7,00	6,29
20	0,46	1,90	19,49	29,67	5,40	0,16	7,00	6,69
30	0,47	1,90	19,83	29,37	5,50	0,16	7,00	6,65
40	0,47	2,00	19,03	29,67	5,50	0,16	7,00	6,64
50	0,47	2,00	19,03	29,37	5,50	0,16	7,00	6,65
60	0,47	2,00	19,03	29,37	5,40	0,17	7,00	6,65
Média	0,47	1,96	19,27	29,50	5,54	0,16	7,00	6,55

6.2 – Comparação dos resultados simulados *sem* pré-tratamento químico dos arranjos dos elementos de membranas

Conforme já comentado os arranjos foram simulados através do simulador comercial ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) com o propósito de averiguar a faixa de pressão de operação, produção, Índice de Saturação de Langelier, dentre outros.

A produção de um sistema de dessalinização depende de vários parâmetros como: qualidade da água de alimentação, número de elementos de membranas, temperatura e pressão de operação. Considerando que a concentração e a vazão da água de alimentação foram iguais para os três sistemas estudados a interpretação dos resultados obtidos da simulação dos desempenhos dos sistemas foram as seguintes:

(a) A Figura 6.1 mostra o comportamento do sistema com três elementos de membranas em paralelo (3-MP), o qual divide a vazão de alimentação em três partes iguais para cada elemento de membrana, fazendo com que cada elemento apresente uma recuperação e vazão do permeado constante de 19% e 0,17 m³/h, respectivamente. O fato do desempenho deste ser inferior ao do sistema dois elementos de membranas em paralelo com um em série (2-MP/1-MS), se deve a recuperação de cada elemento de membrana ser superior ao da recuperação recomendada pelo boletim técnico do fabricante, conforme mostra no Anexo 1. A vantagem desse arranjo é a formação uniforme do perfil de concentração do concentrado para todos os elementos de membranas.

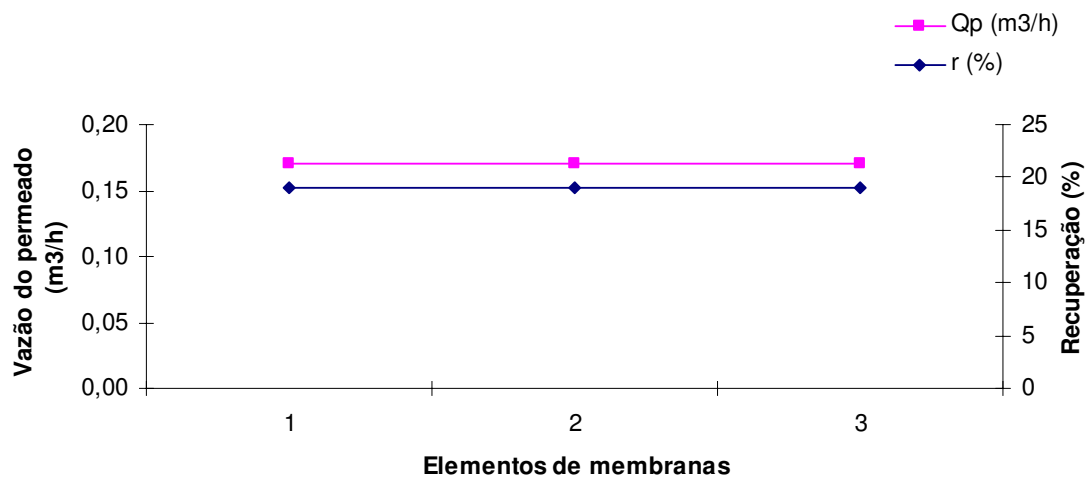


Figura 6.1 – Vazão do permeado e recuperação simulados para os elementos de membranas *sem* pré-tratamento químico

(b) A Figura 6.2 mostra que a recuperação e vazão do permeado do sistema de três elementos de membranas em série (3-MS) tende a diminuir para cada elemento de membrana. Este fato ocorre devido o efeito do aumento da concentração de sais na alimentação de cada elemento de membrana aumentar progressivamente, ou seja, a concentração de sais do segundo elemento é maior do que a do primeiro e assim sucessivamente. Além desse fato, a quantidade de água que alimenta cada elemento é superior a sua capacidade de operação, logo a recuperação de cada

elemento não ultrapassa a 7%, ficando abaixo de 50% de sua recuperação máxima de acordo com o boletim técnico.

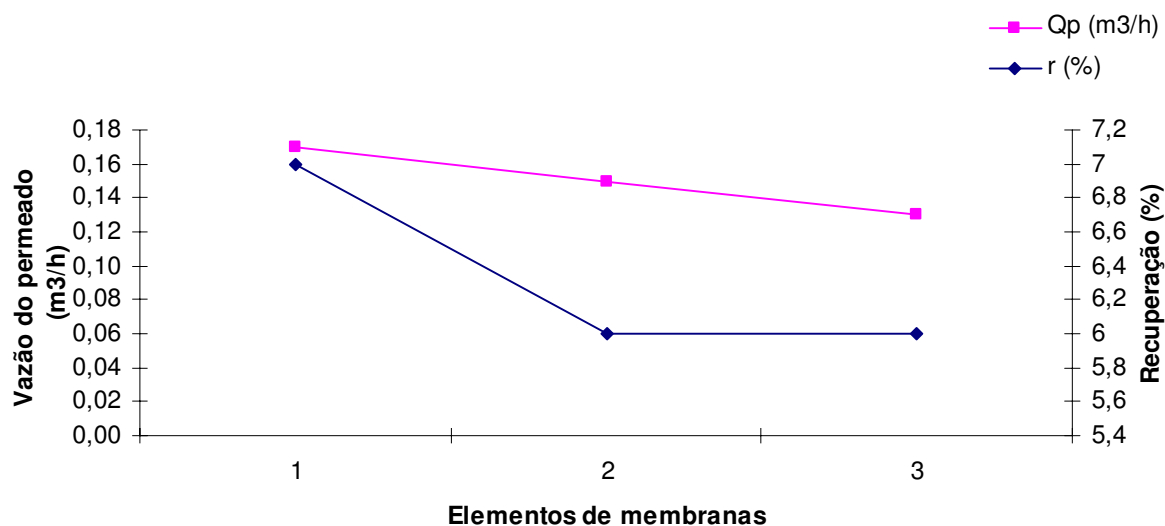


Figura 6.2 – Vazão do permeado e recuperação simulados para os elementos de membranas *sem* pré-tratamento químico

(c) A Figura 6.3 mostra o comportamento das mesmas curvas apresentadas para os sistemas anteriores. Pode-se observar que tanto a recuperação e a vazão do permeado se encontram dentro da faixa limite recomendada pelo fabricante. Nesse caso a quantidade de água de alimentação é dividida de forma que as recuperações fiquem muito próximas do valor limitante. Isso leva a uma produção significativa no primeiro estágio de membrana o qual soma com o do segundo, tornando assim no final, a recuperação ser superior aos demais sistemas.

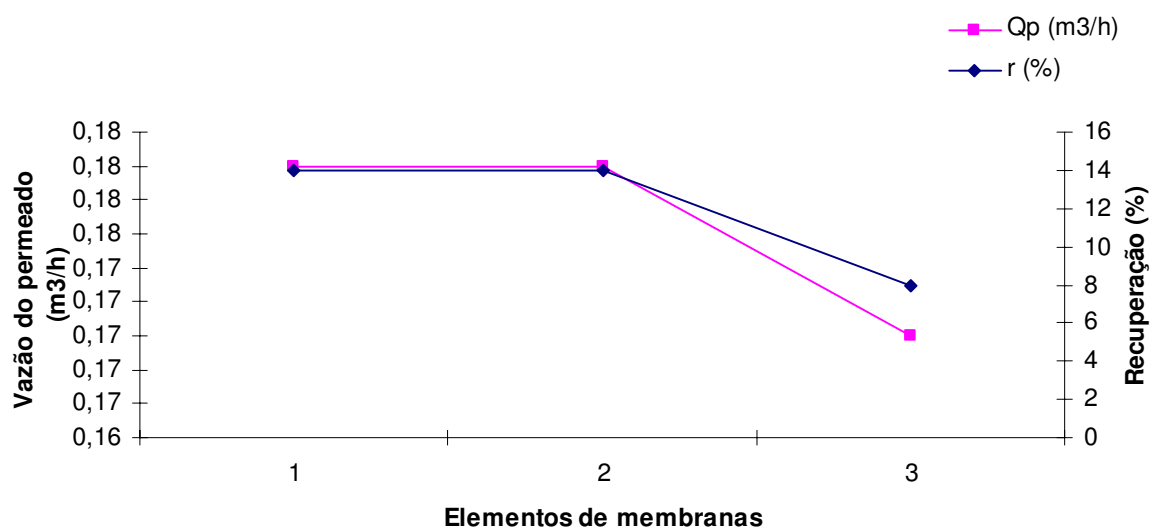


Figura 6.3 – Vazão do permeado e recuperação simulados para os elementos de membranas *sem* pré-tratamento químico

6.3 – Comparação dos resultados simulados *com* pré-tratamento químico dos arranjos dos elementos de membranas

Da mesma forma foram feitas simulações da vazão do permeado e recuperação para cada elemento de membrana utilizando o pré-tratamento químico, os resultados obtidos foram os seguintes:

- (a) A Figura 6.4 mostra o comportamento do sistema com três elementos de membranas em paralelo (3-MP) com o uso do pré-tratamento químico, os valores da vazão do permeado e a recuperação apresentaram um valor inferior ao apresentado na simulação sem o pré-tratamento químico, mais ainda apresenta um valor acima da recuperação ideal sugerida pelo fabricante.

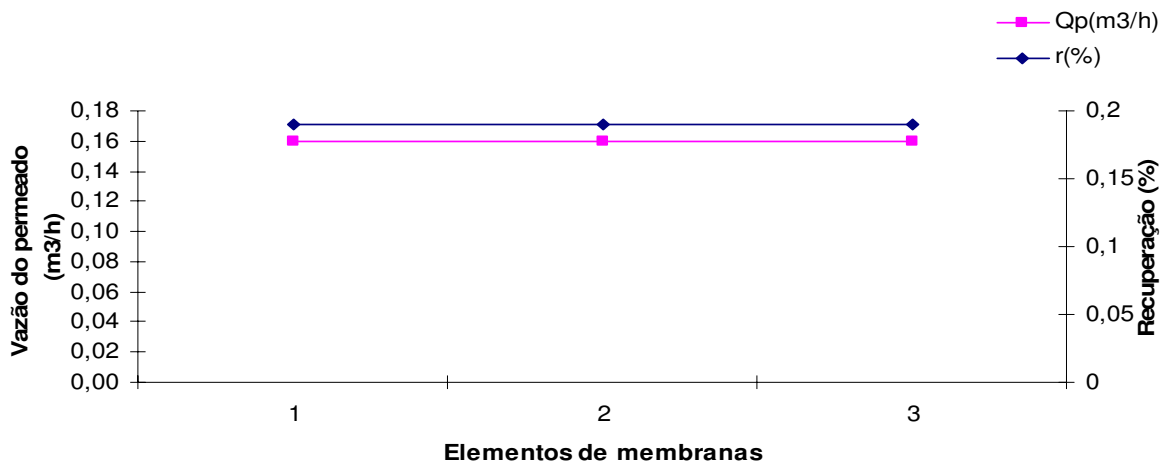


Figura 6.4 – Vazão de alimentação e recuperação simulados para os elementos de membranas *com* pré-tratamento químico

(b) A Figura 6.5 mostra que a recuperação apresentou o mesmo valor da simulação sem o pré-tratamento químico e a vazão do permeado foi praticamente o mesmo, O valor da recuperação para cada elemento acompanhou o comportamento da simulação sem pré-tratamento mantendo-se abaixo do valor ideal.

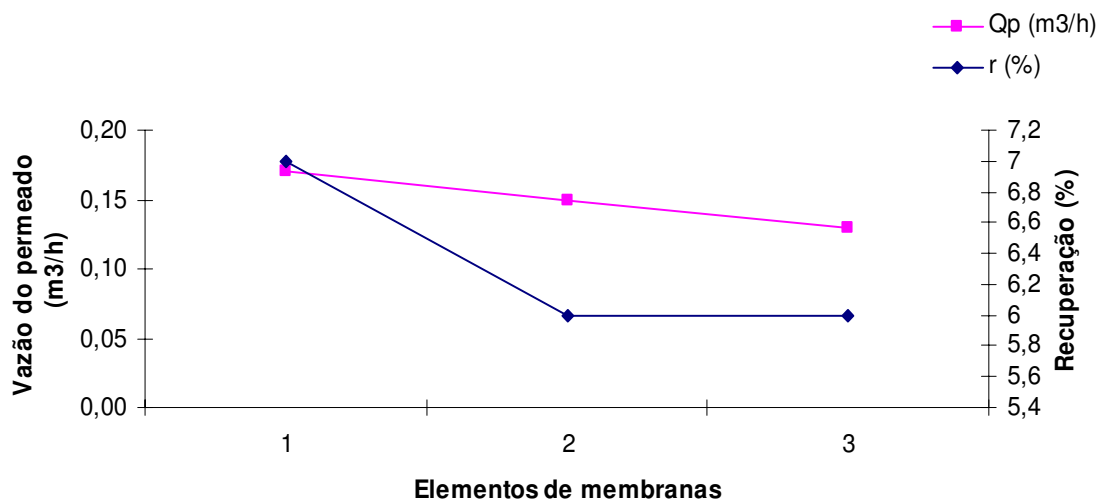


Figura 6.5 – Vazão do permeado e recuperação simulados para os elementos de membranas *com* pré-tratamento químico

(c) A Figura 6.6 mostra o comportamento da vazão do permeado e a recuperação de cada elemento de membrana para o arranjo (2-MP/1-MS), esses valores ficaram muito próximos dos valores simulados para o arranjo (3-MP), embora a recuperação para cada elemento de membrana foi inferior aos do arranjo (3-MP).

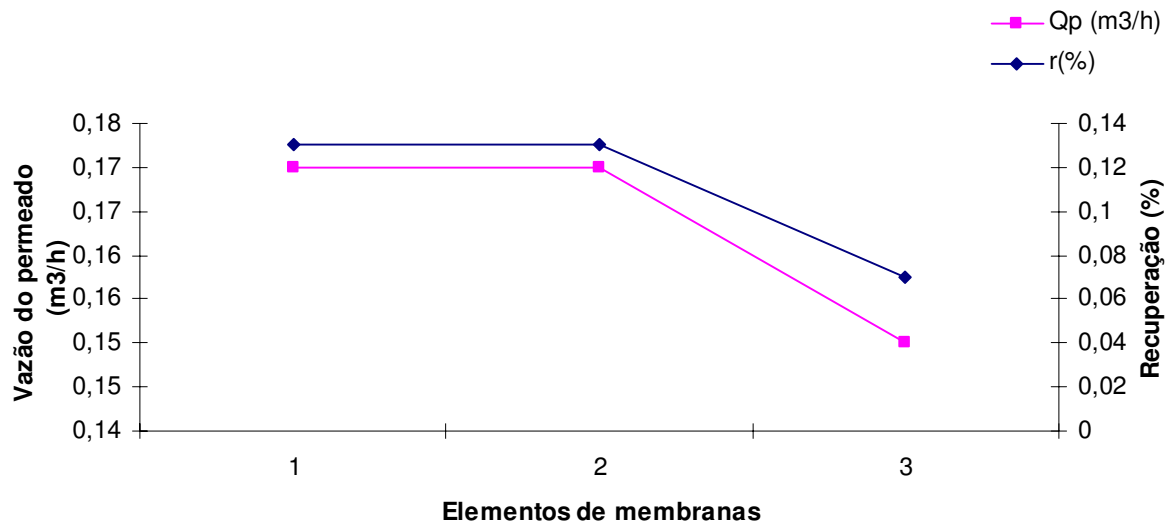


Figura 6.6 – Vazão do permeado e recuperação simulados para os elementos de membranas *com* pré-tratamento químico

6.4 – Resultados experimentais versus resultados simulados *sem* e *com* pré-tratamento químico para os arranjos de membranas estudados

Os dados experimentais e simulados para os três sistemas estudados *sem* e *com* pré-tratamento químico fazendo uso da água preparada, conforme mencionado no Capítulo III, foram comparados através dos seguintes parâmetros: índice de saturação de Langelier, sólidos totais dissolvidos, e produção de água permeada.

6.4.1 – Comparação dos dados experimentais com os simulados *sem* pré-tratamento químico para os três arranjos dos elementos de membranas

A Figura 6.7 mostra o Índice de Saturação de Langelier (ISL) experimental e simulado para os três diferentes tipos de arranjos dos elementos de membranas para o concentrado.

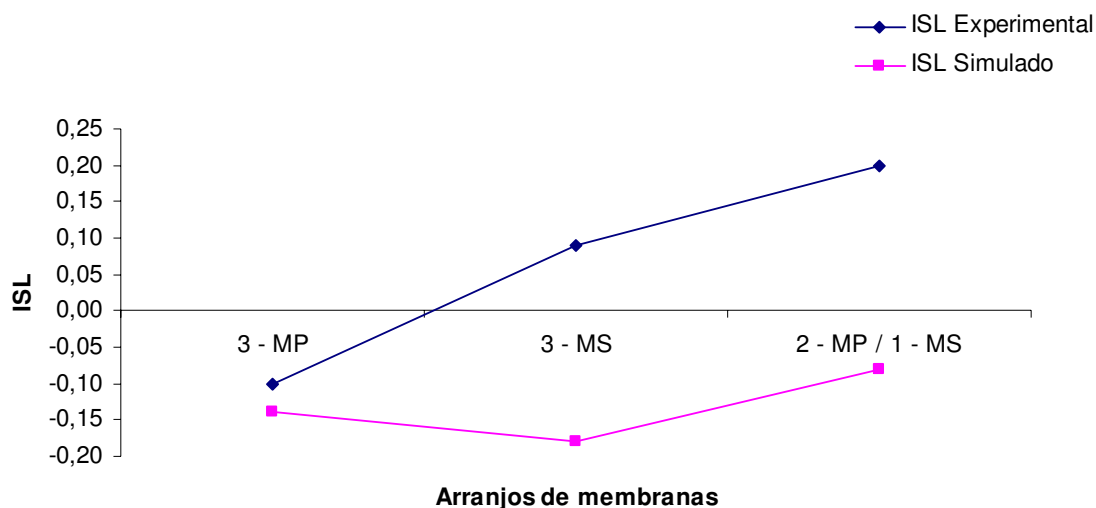


Figura 6.7 – ISL experimental e simulado para os diferentes tipos de arranjos de membranas *sem* pré-tratamento químico

Em relação aos dados experimentais, apenas o arranjo 3 – MP apresentou valor negativo. Sabe-se que ISL menor do que zero não apresenta tendência de incrustações de carbonato de cálcio na superfície da membrana (AMJAD, 1992). Para os demais casos seus valores foram positivos, logo existe uma tendência de incrustações de carbonato de cálcio com o tempo. Comparando esses dados com os valores obtidos no simulador comercial ROSA da Filmtec®, somente o arranjo 3-MP apresentou valores aproximados, enquanto que os demais apresentaram uma pequena divergência. Os dados simulados mostram que o concentrado não possui potencial de incrustações com carbonato de cálcio.

O que pode justificar a diferença de valores dos ISL experimental e simulado são os valores dos pH's das amostras coletadas no campo. Sabe-se que o valor do pH varia com a temperatura (BACCAN, 2001).

Valores do ISL em sistemas de membranas quando são muito negativos recomenda-se uma correção do pH para minimizar uma possível corrosão das tubulações (FRITZMANN, 2007).

O valor médio do Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) para água de alimentação do sistema *sem* pré-tratamento químico foi 4,0 e *com* o pré-tratamento foi 5,0. Sabe-se que o IDS

acima de 4,0 é recomendado limpeza química periodicamente (TAYLOR, 1996). Esse parâmetro é bastante discutido por outros pesquisadores como indicador de formação de incrustação na superfície de membrana dentro da faixa de 1,0 a 4,0. Todavia, existem outros que comentam que IDS acima de 5,0 não trazem problemas de ordem econômica para o sistema (FRITZMANN, 2007).

A Figura 6.8 ilustra a variação experimental e simulada dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) do permeado para os três tipos de arranjos dos elementos de membranas.

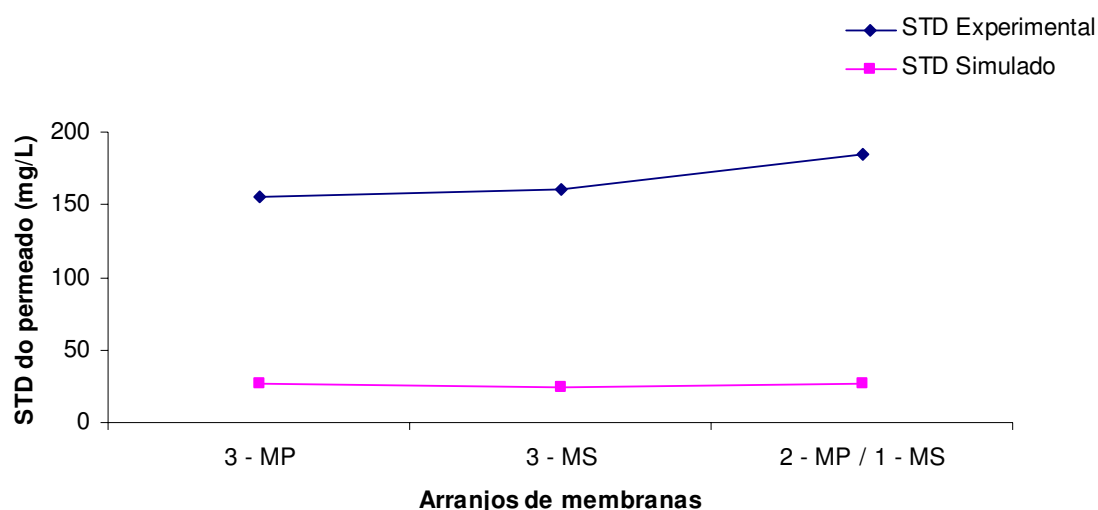


Figura 6.8 – Variação do STD do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas para uma água de alimentação com STD = 2.189,03 mg/L, *sem* pré-tratamento

Os dados experimentais apresentam uma pequena variação dos STD do permeado entre os arranjos 3-MP e 3-MS, enquanto que o arranjo com 2-MP/1-MS possui um valor maior que os outros dois. Os valores simulados dos STD, não apresentaram variações significativas entre os três tipos de arranjos de elementos de membranas.

Comparando os dados experimentais e simulados, observa-se que houve uma divergência entre os valores, esse comportamento pode ser explicado, pelo fato de que, o simulador não analisa a mesma quantidade de íons presentes no permeado.

Outro fator que pode explicar a variação dos resultados tanto entre os valores experimentais como em relação aos simulados é variação da temperatura, onde seu aumento

implicara em uma maior passagens de sais pelos elementos de membranas, dessa forma, os dados experimentais tendem a apresentar valores superiores comparados com o simulado.

A Figura 6.9 mostra a variação experimental e simulada da vazão do permeado para os três tipos de arranjos dos elementos de membranas.

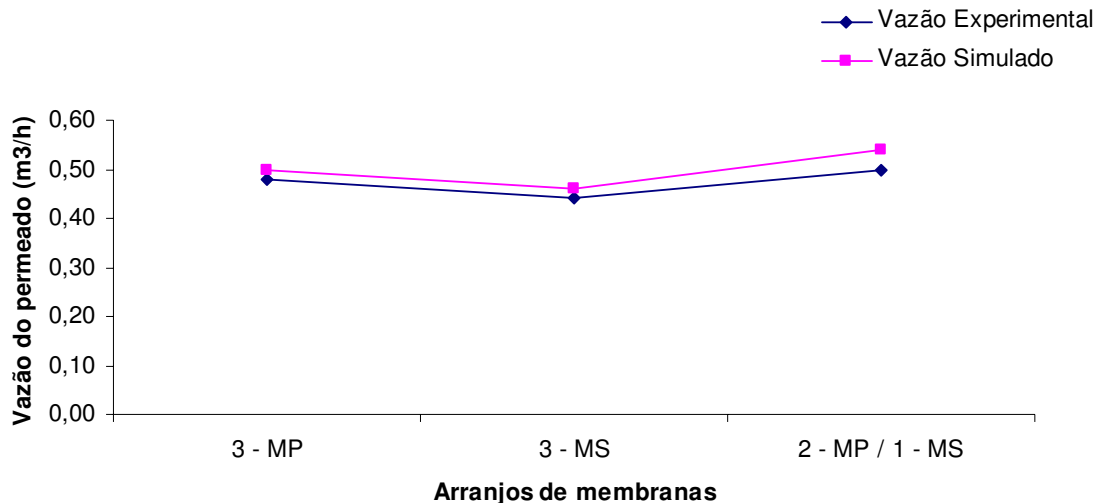


Figura 6.9 – Vazão do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas *sem* pré-tratamento químico

Para as vazões do permeado, o arranjo que apresentou o maior valor foi o 2-MP/1-MS, seguido por 3-MP e 3-MS. Os valores da vazão do permeado para os diferentes tipos de arranjos dos elementos de membranas apresentaram uma pequena variação, essa diferença ocorreu devido aos diferentes tipos de arranjos, uma vez que, todos possuem a mesma área de membrana e operaram com a mesma pressão de entrada e vazão se alimentação.

É possível observar no gráfico que, os valores experimentais e simulados, apresentaram uma aproximação entre seus valores, isso indica uma reprodução significativa entre a simulação e os experimentos.

6.4.2 – Comparação dos dados experimentais com os simulados *com* pré-tratamento químico para os três arranjos dos elementos de membranas

A Figura 6.10 mostra o Índice de Saturação de Langelier (ISL) experimental e simulado com os três diferentes tipos de arranjos dos elementos de membranas para a corrente do concentrado com pré-tratamento químico.

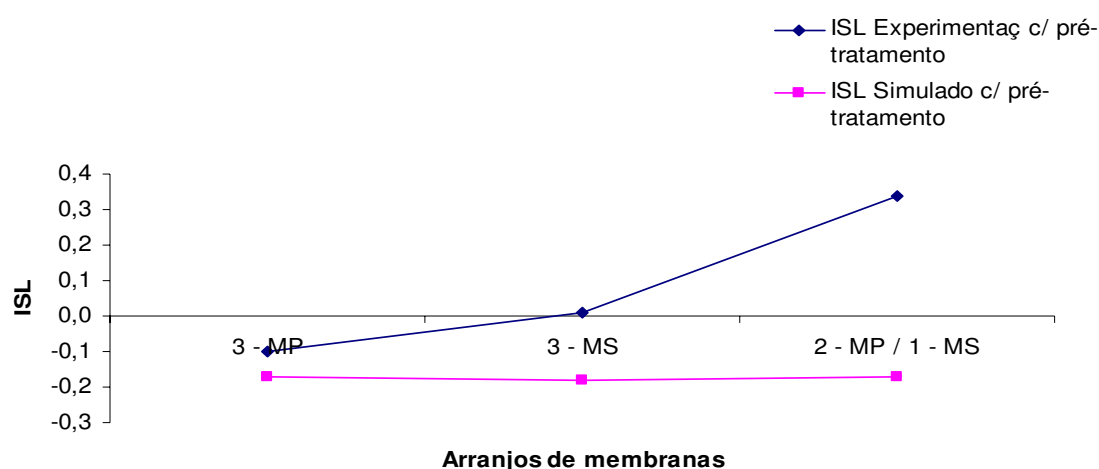


Figura 6.10 – ISL experimental e simulado para os diferentes tipos de arranjos de membranas *com* pré-tratamento químico

Os valores do ISL simulados obtidos através do simulador comercial ROSA (Reverse Osmosis Analysis da Filmtec) foram negativos para os três sistemas estudados. Os dados do programa mostram que não há uma tendência de formação de incrustação de carbonato de cálcio na superfície dos elementos de membranas. Os valores do ISL experimentais mais aproximado com os simulados foram para os sistemas 3-MP e o 3-MS.

Convém salientar que os valores da simulação foram obtidos a partir da análises físico química da água da alimentação do sistema, onde os ISL na corrente do concentrado foram negativos com a injeção de HCl (pH = 3,0) na corrente da água de alimentação.

Sabe-se que os íons de carbonatos e bicarbonatos na água são um dos parâmetros responsáveis pelo pH do meio. Quando é adicionado o ácido clorídrico na corrente de alimentação ocorrem as seguintes reações químicas para os íons de carbonatos e bicarbonatos:



Em casos que a reação não se completa na íntegra na adição do ácido, o pH de saturação do meio (corrente do concentrado) faz por onde a diferença entre o pH da água de alimentação e pH saturação (pH_s) aumentar, tornando assim o ISL positivo. Isso pode ter ocorrido para o caso do sistema 2 – MP / 1 – MS. Mesmo assim, se o ISL experimental desse sistema não se afasta significativamente do valor zero.

A Figura 6.11 ilustra a variação dos dados experimentais e simulados dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) do permeado para os três tipos de arranjos dos elementos de membranas *com* pré-tratamento químico.

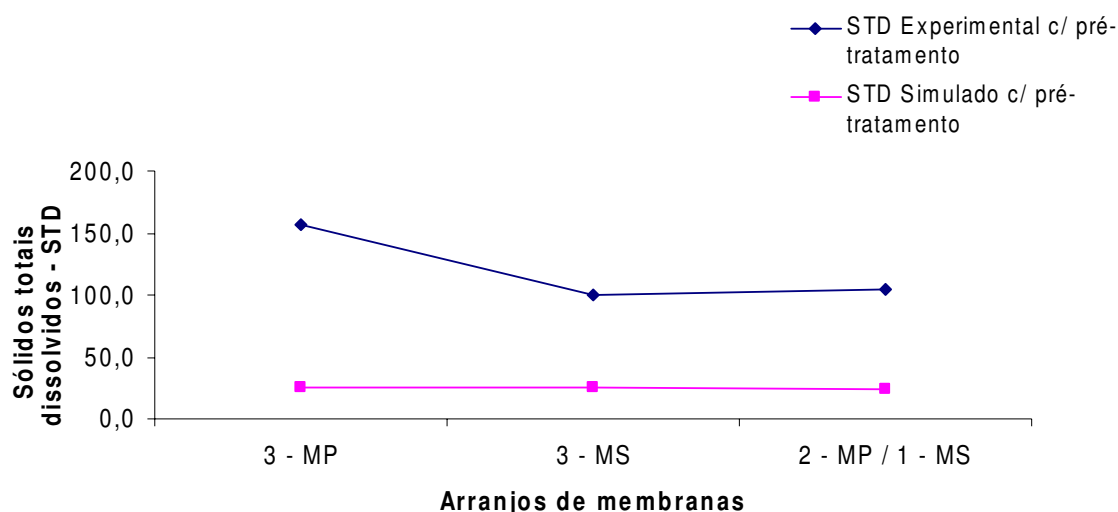


Figura 6.11 – Variação do STD do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas para uma água de alimentação com $STD = 2.189,03 \text{ mg/L}$, *com* pré-tratamento químico

Para os três casos estudados os valores dos STD, simulados e experimentais, ficaram dentro da faixa de potabilidade, conforme recomendado pela Legislação Brasileira de 2004 do Ministério de Saúde. Deve-se observar que os perfis das curvas foram diferentes, apresentando uma diferença significativa entre os valores. Essa diferença pode ser explicada por dois caminhos: (a) o ROSA não tem na entrada dos dados de análises físico-química todos os íons analisados nas análises físico-químicas; (b) o ROSA assume que STD é apenas a soma dos íons presentes no meio que foram tomados como dados do *software*. Enquanto que as análises físico-químicas realizadas pelo LABDES o STD é calculado a 180°C, ou seja, os valores incluem todos os componentes solúveis e insolúveis do meio. Essa diferença de valores reflete no valor médio do Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) da água de alimentação dos sistemas que foi igual a 4,0 conforme é mostrado no Item 6.4.1.

A Figura 6.12 mostra os valores da variação da vazão do permeado experimental e simulada para os três arranjos de elementos de membranas com pré-tratamento químico.

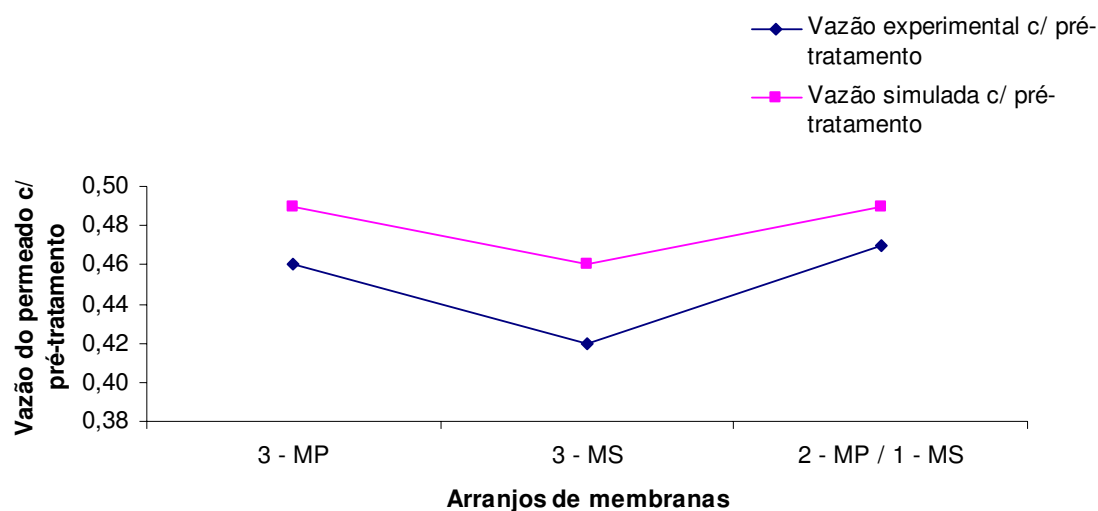


Figura 6.12 – Vazão do permeado em função dos arranjos dos elementos de membranas *com* pré-tratamento químico

Embora a diferença da variação entre os valores da vazão do permeado (simulado e experimental) não tenha sido significativa, o arranjo que apresentou o maior produção foi o 2 –

MP / 1 – MS e o que apresentou o menor valor foi o arranjo 3 – MS. Fazendo uma comparação entre os valores a diferença média foi de 6,3%. Considerando que os perfis das curvas foram similares, os valores simulados foram maiores em relação ao experimental. Esse fato pode ser explicado pelo fato do ROSA não levar em conta as perdas hidráulicas do sistema como: o coeficiente de atrito, a resistência do filtro de cartucho, contribui com a diferença apresentada.

7.0 – CONCLUSÕES

A partir das simulações e experimentos realizados *sem* e *com* pré-tratamento químico chegou-se as seguintes conclusões:

1. Para os dados simulados *sem* pré-tratamento químico o arranjo que apresentou a maior vazão do permeado e recuperação foi o 2-MP / 1-MS,
2. Nas simulações *com* pré-tratamento químico os arranjos 2-MP / 1-MS e 3 – MP apresentaram o mesmo valor para a vazão do permeado e em relação a recuperação, não houve uma variação significativa entre eles;
3. Em relação ao Índice de Saturação de Langelier (ISL), nenhum dos arranjos apresentou risco de incrustações por carbonato de cálcio nos elementos de membranas nos experimentos *sem* e *com* pré-tratamento químico;
4. Para os Sólidos Totais Dissolvidos (STD) o arranjo que apresentou o menor valor *sem* pré-tratamento foi o 3 – MP e *com* pré-tratamento 3 – MS;
5. O arranjo que apresentou o maior valor da vazão do permeado para os dados experimentais *sem* pré-tratamento foi o 2-MP / 1-MS e *com* pré-tratamento os arranjos 3 – MP e 2-MP / 1-MS possuem praticamente o mesmo valor.

8.0 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar os mesmos arranjos dos elementos de membranas para diferentes fabricantes;
- Procurar explorar a variação do pH do ácido clorídrico em função da qualidade de diferentes tipos de água *in natura*;
- Estudar outros tipos de pré-tratamento químico como: Flocon 100, Flocon 200;
- Desenvolver um estudo que envolva um balanço de massa e custo para a produção e consumo de energia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMJAD, Z. Reverse Osmosis: *Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications* Copyright, by Van Nostrand Reinhold, pp. 9, 1992.

BACCAN, N., ANDRADE, J. C., GODINHO, O. E. S., BARONE, J. S., *Química Analítica Elementar 2º ed.* Editora Blucher, São Paulo – SP, 2001.

BRANDT, D. C., LEITNER, G. F., LEITNER, W. E., *Reverse osmosis membrane states of the art.* In Zahid Amjad (ed), *Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications*, Van Nostrand-Reinold, New York, 1993.

BUROS, O.K., *O ABC da Dessalinização.* Associação Internacional de Dessalinização (IDA), Massachusetts, 1990.

DOW LATIN AMERICA, *A tecnologia de membrana de osmose reversa.* Boletim Técnico, 1996.

EL-DESSOUKY, Hisham T., ETTOUNEY, Hisham M. *Fundamentals of Salt Water Desalination* – Library of Congress Cataloging in Publication, first edition, 2002.

FRITZMANN, C., LOWENBERG, T., WINTGENS, T. M., *State-of-the-art of reverse osmosis desalination.* Desalination, vol. 216, 2007.

HABERT, A. C., BORGES, C. P. E NÓBREGA, R., *Processos de separação com membranas.* Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 1997.

HYDRANAUTICS. *Technical Service Bulletin*, 2002.

ISAIAS, N. P., *Experience in reverse osmosis pretreatment.* Desalination, vol. 139, pp. 57-64, 2001.

LOEB, S., *The Loeb-Sourirajan membrane and how it came about.*” Chap. 1 in *Synthetic membranes*, edited by A.F.Turbak, vol.1, Desalination, ACS Symposium Series 153. Washington, D. C: American Chemical Society, 1981.

LONSDALE, H.K., *The growth of membrane technology.* Journal of Membrane Science, pp 10-81, 1982.

MERTEN, U., *Desalination by reverse osmosis.* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1966.

MINDLER, A. B. and EPSTEIN, A. C., *Measurements and control in reverse osmosis desalinations.* Desalination, vol.59, pp. 343-379, 1986.

MULDER, M., *Basic principle of membrane technology.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht The Netherlands, 1997.

NING, R. Y. and NETWIG, J. P., *Complete elimination of acid injection in reverse osmosis plants.* Desalination, vol.143, pp. 29-34, 2002.

PEREIRA, Márcia Liana. *Avaliação dos Tipos de Pré-Tratamentos de Águas Salobras e Salinas para fins de Dessalinização Via Osmose Inversa.* Relatório de atividades, UFCG, Campina Grande – PB, 2005.

STRANTZ, J. W., *Predicting CaCO₃ scaling in seawater RO systems.* Technical Proceedings, vol 1, 10th Annual Conference and Trade Fair of the Water Supply Improvement Association, 25-29 July 1982, Hawaii, 1982.

SILVA, S. K. *Sistema de Dessalinização da Comunidade de Uruçu – São João do Cariri – PB: Análises, Monitoramento e Avaliação de um Misturador para o uso do Concentrado.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

SILVEIRA, M. C., *Avaliação de sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, Campina Grande – PB, 1999.

SMEWW - *Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater*. American Public Health Association – APHA. 20^a Edition. Washigton, 1998.

SOUSA, J. T., *Tratamento e Utilização de Esgotos Domésticos na Agricultura*, 2^o ed. – Campina Grande-PB, EDUEP, 2003.

SOUSA, S. E. H., *Normalização de sistemas de dessalinização via osmose inversa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2001.

SOURIRANJAN, S., *Reverse osmosis*. London: Logos Press. 1970.

SCHNEIDER, R. P., and TSUTIYA, M. T., *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*. ABES, 1^a ed., São Paulo, 2001.

SUDAK, R.G., *Reverse osmosis in porter*, M. C. (ed.), *Handbook of Industrial Membrane Technology*, Noyel Publications, New Jersey, 1990.

TAYLOR, J.S., JACOBS, E. P., *Reverse osmosis and nanofiltration*. In: Joel Mallevalle et al (eds), *Water Treatment Membrane Processes*, pp. 9.1-9.70. McGraw Hill, New York, 1996.

APÊNDICE I

Análises físico-químicas da água de alimentação, concentrado e do permeado para os três tipos de arranjos *com* e *sem* pré-tratamento químico

Laudo N^o: 221/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçu	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Alimentação	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	3.930,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,2	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	120,0	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	132,0	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	850,0	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	508,4	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	14,1	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	28,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	82,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	110,0	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	68,2	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.217,7	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,00	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,01	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	0,59	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	11,2	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,32	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	3.019,0	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Laudo N^o: 220_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 3P com PT	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.040,0	219,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	6,0	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	0,2	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	199,0	1,6	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	180,6	1,9	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.250,0	12,0	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	775,9	37,1	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	13,0	0,7	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,00	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	68,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	84,0	12,8	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	152,0	12,8	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	115,1	0,9	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.842,5	58,9	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,04	0,18	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,02	0,00	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	2,69	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	16,8	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,10	-4,20	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	3.824,0	156,0	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:

(a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;

(c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade.

OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

Laudo N^o: 218_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 3S com PT	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.630,0	154,2	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	6,2	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	0,2	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	215,0	5,2	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	220,8	0,8	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.457,5	16,5	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	824,3	26,5	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	13,6	0,6	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	52,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	126,0	19,2	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	178,0	19,2	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	122,2	5,3	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	2.073,2	36,9	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,00	0,84	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,02	0,00	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	3,44	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	20,0	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,01	-3,22	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	3.914,0	99,66	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:

(a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;

(c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade.

OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

Laudo N^o: 219_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 2P / 1S com PT	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.920,0	180,4	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	5,6	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	0,1	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	434,0	1,4	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	116,4	1,9	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.570,0	11,5	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	867,1	32,9	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	15,3	0,6	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,00	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	64,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	120,0	10,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	184,0	10,0	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	111,5	0,6	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	2.165,5	54,0	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,00	0,49	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,01	0,00	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	3,74	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	20,4	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,34	-4,76	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	4.074,0	104,12	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:

(a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;

(c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade;

OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

Laudo N^o: 220_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 3-MP	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.040,0	219,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	6,0	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	0,2	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	199,0	1,6	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	180,6	1,9	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.250,0	12,0	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	775,9	37,1	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	13,0	0,7	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,00	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	68,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	84,0	12,8	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	152,0	12,8	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	115,1	0,9	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.842,5	58,9	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,04	0,18	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,02	0,00	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	2,69	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	16,8	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,10	-4,20	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	3.824,0	156,0	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:
 (a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;
 (c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade.

Laudo N^o: 217_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 3-MS	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.740,0	224,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	7,8	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,2	0,1	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	205,0	21,0	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	216,0	0,4	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.412,5	54,0	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	845,6	26,2	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	13,6	0,6	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,01	0,00	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	68,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	128,0	56,8	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	196,0	56,8	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	115,1	2,1	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	2.130,0	40,5	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,00	0,23	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,01	0,01	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	3,50	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	20,0	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,09	-0,59	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	4.131,0	160,3	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:
 (a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;
 (c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade.

Laudo N^o: 215_SD/2008	Data da Coleta: 13/11/2008
Interessado: Giovanne Monteiro	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 14/11/2008
Localidade: Uruçú	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Sist. Dessalinização - Batelada 2-MP / 1-MS	Data da Análise: 18/11/2008

PARÂMETROS	CONCENTRADO	PERMEADO	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	6.790,0	276,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,1	8,2	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,1	0,1	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	241,0	19,6	---
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	196,8	2,2	---
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.422,5	58,0	500,0
Sódio (Na ⁺), mg/L	874,3	34,0	200,0
Potássio (K ⁺), mg/L	13,6	0,7	---
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0,00	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,00	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	64,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	138,0	60,8	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	202,0	60,8	---
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	200,6	0,3	250,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	2.108,7	53,3	250,0
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg/L	0,00	0,84	10,0
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg/L	0,02	0,00	1,0
Amônia (NH ₃), mg/L	3,27	0,00	1,5
Sílica, mg/L (SiO ₂)	20,0	0,0	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,20	-0,22	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	4.135,0	184,87	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

LAUDO:

De acordo com a Legislação Brasileira em vigor, os resultados analíticos das amostras de águas são os seguintes:
 (a) a água do concentrado **não** se encontram dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade;
 (c) a água do permeado encontra-se dentro dos padrões de potabilidade;

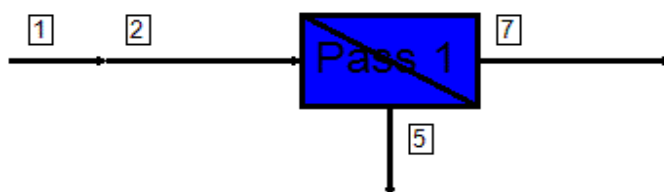
APÊNDICE II

Projetos da simulação do dessalinizador para os três tipos de arranjos *sem* e *com* pré-tratamento químico

PROJETOS DOS DESSALINIZADORES *SEM* PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO PARA OS ARRANJOS DE ELEMENTOS DE MEMBRANAS ESTUDADOS

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 3-MP

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.25 mg/l	% System Recovery (7/1)	19.40 %
Water Classification	Well Water SDI < 3	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	27.6 C		

Pass #	Pass 1
Stage #	1
Element Type	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	3
Elements per Pressure Vessel	1
Total Number of Elements	3
Pass Average Flux	23.20 lmh
Stage Average Flux	23.20 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar
Chemical Dose	-
Energy Consumption	1.52 kWh/m ³

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.25
3	2.60	8.50	2173.26
5	2.10	8.11	2689.85
7	0.50	-	26.77
7/1	% Recovery	19.40	

Project Information:**Design Warnings**

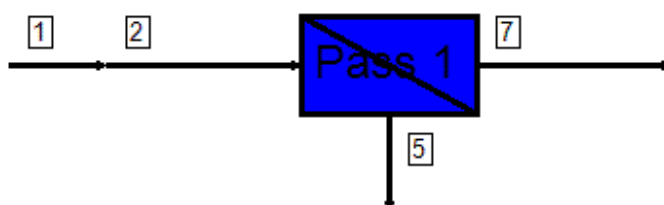
-None-

Solubility Warnings:

-None-

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 3-MS

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.25 mg/l	% System Recovery (7/1)	17.51 %
Water Classification	RO Permeate SDI < 1	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	26.7 C		

Pass #	Pass 1		
	1	2	3
Stage #			
Element Type	BW30-4040	BW30-4040	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	1	1	1
Elements per Pressure Vessel	1	1	1
Total Number of Elements	1	1	1
Pass Average Flux	20.94 lmh		
Stage Average Flux	23.38 lmh	20.92 lmh	18.52 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-		
Energy Consumption	1.69 kWh/m ³		

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.25
3	2.60	8.50	2173.26
5	2.14	6.76	2629.15
7	0.46	-	24.74
7/1	% Recovery	17.51	

Project Information:**Design Warnings:**

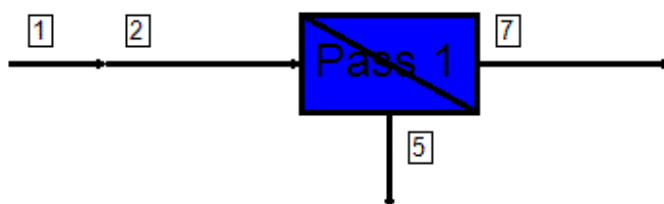
-None-

Solubility Warnings:

-None-

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 2-MP/1MS

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.26 mg/l	% System Recovery (7/1)	20.65 %
Water Classification	Well Water SDI < 3	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	29.6 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #		
Element Type	BW30-4040	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	2	1
Elements per Pressure Vessel	1	1
Total Number of Elements	2	1
Pass Average Flux	24.70 lmh	
Stage Average Flux	25.46 lmh	23.18 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar	0.00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	1.43 kWh/m ³	

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.26
3	2.60	8.50	2173.28
5	2.06	7.53	2731.83
7	0.54	-	27.05
7/1	% Recovery	20.65	

Design Warnings:

-None-

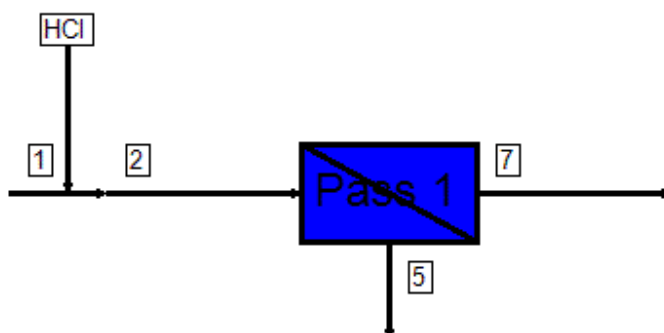
Solubility Warnings:

-None-

PROJETOS DOS DESSALINIZADORES COM PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO PARA OS ARRANJOS DE ELEMENTOS DE MEMBRANAS ESTUDADOS

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 3-MP

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.25 mg/l	% System Recovery (7/1)	18.78 %
Water Classification	RO Permeate SDI < 1	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	26.7 C		

Pass #	Pass 1
Stage #	1
Element Type	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	3
Elements per Pressure Vessel	1
Total Number of Elements	3
Pass Average Flux	22.47 l/mh
Stage Average Flux	22.47 l/mh
Permeate Back Pressure	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar
Chemical Dose	100% HCl 1.09 mg/l
Energy Consumption	1.57 kWh/m ³

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.25
3	2.60	8.50	2172.53
5	2.11	8.11	2668.90
7	0.49	-	26.40
7/1	% Recovery	18.78	

Design Warnings:

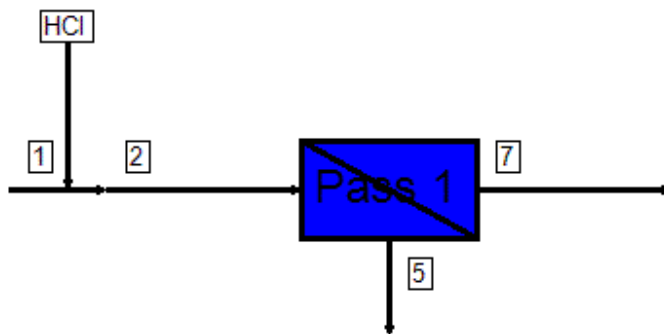
-None-

Solubility Warnings:

-None-

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 3-MS

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.25 mg/l	% System Recovery (7/1)	17.51 %
Water Classification	RO Permeate SDI < 1	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	26.7 C		

Pass #	Pass 1		
	1	2	3
Stage #			
Element Type	BW30-4040	BW30-4040	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	1	1	1
Elements per Pressure Vessel	1	1	1
Total Number of Elements	1	1	1
Pass Average Flux	20.94 lmh		
Stage Average Flux	23.38 lmh	20.92 lmh	18.52 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar	0.00 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 1.09 mg/l		
Energy Consumption	1.69 kWh/m ³		

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.25
3	2.60	8.50	2172.53
5	2.14	6.76	2628.22
7	0.46	-	25.28
7/1	% Recovery	17.51	

Design Warnings:

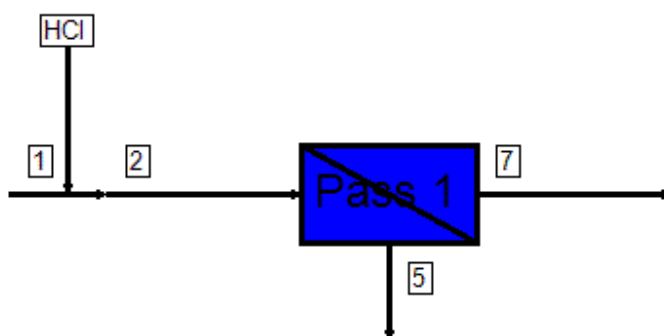
-None-

Solubility Warnings:

-None-

PROJETO DO DESSALINIZADOR PARA O ARRANJO 2-MP/1MS

System Design Overview



Raw Water TDS	2173.25 mg/l	% System Recovery (7/1)	18.67 %
Water Classification	RO Permeate SDI < 1	Fouling Factor (Pass 1)	0.85
Feed Temperature	26.7 C		

Pass #	Pass 1	
	1	2
Stage #		
Element Type	BW30-4040	BW30-4040
Pressure Vessels per Stage	2	1
Elements per Pressure Vessel	1	1
Total Number of Elements	2	1
Pass Average Flux	22.33 lmh	
Stage Average Flux	23.00 lmh	20.99 lmh
Permeate Back Pressure	0.00 bar	0.00 bar
Booster Pressure	8.50 bar	0.00 bar
Chemical Dose	100% HCl 1.09 mg/l	
Energy Consumption	1.58 kWh/m ³	

Pass 1			
Stream #	Flow (m³/h)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	2.60	0.00	2173.25
3	2.60	8.50	2172.53
5	2.11	7.51	2665.57
7	0.49	-	24.97
7/1	% Recovery	18.67	

Design Warnings:

-None-

Solubility Warnings:

-None-

Anexo

1 - Boletim técnico da membrana

FILMTEC BW30-4040

FILMTEC™ brackish water reverse osmosis membrane elements provide consistent, outstanding system performance in light industrial applications.

- FILMTEC BW30-4040 is the industry standard for reliable operation and production of the highest quality water.
- Features the industry's thickest feed spacer (34 mil) to lessen the impact of fouling.
- May be cleaned over the widest pH range (pH 1-13) for the most effective cleaning.

Elements with a hard shell exterior are recommended for systems with multiple-element housings containing three or more membranes, as they are designed to withstand higher pressure drops.

Product Name	Nominal Active Surface Area ft ² (m ²)	Permeate Flow Rate gpd (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
FILMTEC BW30-4040	78 (7.2)	2400 (9.1)	99.5

1. Permeate flow rate and salt rejection based on the following test conditions: 2000 ppm NaCl, 225 psig (15.5 bar), 77°F (25°C), and 15% recovery.

2. Permeate flow rates for individual elements may vary +/-20%.
3. For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.

These membranes may be subject to drinking water application restrictions in some countries: please check the application status before use and sale.

®™* Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow