



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

**“ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
COMPOSTO DE MEMBRANA-RESINA PARA FINS
DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE BAIXA
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA”**

Mestrando: José Theódulo Fernandes Neto.

Orientador: Prof. Kepler B. França (Ph.D).

Campina Grande-PB, Setembro/2012

JOSÉ THEÓDULO FERNANDES NETO

**“ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA COMPOSTO DE MEMBRANA-
RESINA PARA FINS DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE BAIXA CONDUTIVIDADE
ELÉTRICA”**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Recursos Regionais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Kepler B. França (Ph.D)

Campina Grande-PB, Setembro/2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCEG

F363e Fernandes Neto, José Theódulo.
Estudo e avaliação de um sistema composto de membrana-resina para fins de produção de água de baixa condutividade elétrica / José Theódulo Fernandes Neto. - Campina Grande, 2012.

69f.: il., color.

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

Orientador: Prof. Ph.D Kepler B. França.

Referências.

1. Membrana de Osmose Inversa. 2. Resina Trocadora de Íons. 3. Condutividade Elétrica. 4. Recuperação e Manutenção. I. Título.

CDU 66.081.63(043)

JOSÉ THEÓDULO FERNANDES NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

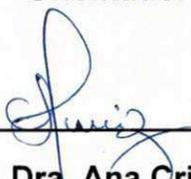
**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA COMPOSTO DE MEMBRANA-
RESINA PARA FINS DE PRODUÇÃO DE ÁGUA DE BAIXA CONDUTIVIDADE
ELÉTRICA**

BANCA EXAMINADORA



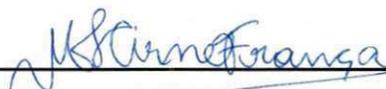
Prof. Kepler B. França (Ph. D)

Orientador



Profª. Dra. Ana Cristina Silva Muniz

Examinadora Interna



Profª. Dra. Márcia Izabel Cirne França

Examinadora Externa

Campina Grande, Setembro/2012

DEDICATÓRIA

À Minha Família, que serve de apoio para realizações dos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família que serve de base para minhas conquistas.

Ao Professor Kepler B. França, pela valiosa orientação, pela paciência e pelos ensinamentos prestados.

A Tamiris Guedes Vieira, pela sua preciosa companhia e por ter dado-me ânimo para prosseguir.

A Valéria Kelly, Rafael Felipe, João Utemberg, Rodrigo Vieira, Maniza Sofia e Murilo Pinto, que fazem parte do Labdes que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas de mestrado que de alguma forma me ajudaram a trilhar esse caminho.

A Antônio José Ferreira Gadelha, Daniel Baracuy Campos, Franciso Rubens Macedo de Queiroz e Tiago Baracho, sempre dispostos a ajudar nas horas difíceis.

A Maricé pela excelente assistência que foi dada durante todo esse período.

A Universidade Federal de Campina Grande por conceder-me a concretização deste projeto.

RESUMO: Com a crescente demanda de água de boa qualidade, não apenas para o consumo humano, mas também para algumas aplicações industriais, várias tecnologias de purificação de águas vêm sendo aplicadas com êxito, tais como dessalinização através de membranas de osmose inversa, da eletrodialise, processos térmicos, resinas de troca iônica, dentre outros. O sistema visa à produção de água pura, com baixa condutividade elétrica, o qual poderá ser uma fonte de pesquisa para estudar e produzir águas para fins hospitalares. Esse tipo de água é bastante vigiado pela ANVISA e outros órgãos do governo federal e que suas características físico-químicas e biológicas estão sujeitas a alterações em função dos tratamentos para avaliação da qualidade do produto e do bom funcionamento do sistema. A partir dos parâmetros do pH e da condutividade elétrica foi observado uma considerável diminuição após a regeneração de resinas de troca iônica no período de 30 a 80 minutos de operação. O pH variou de 6,2 a 4,2 e a condutividade elétrica após 40 minutos tornou-se constante, chegando a $0,8\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, evidenciando a regeneração. Pode-se observar no presente trabalho uma baixa rejeição de sais na coluna de resina II, para uma pressão de $8,2\text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, chegando no máximo a 30% indicando uma pequena eficiência dos sistemas de dessalinização de osmose inversa, ao contrário das demais pressões estudadas ($2,2$ e $6,2\text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$), onde são observadas uma taxa de rejeição de 90% para maioria dos íons presentes.

Palavras Chaves: Membrana de osmose inversa, resina trocadora de íons, condutividade elétrica, recuperação e manutenção.

ABSTRACT: With the growing need for good quality water, not only for human consumption, but also for some industrial applications, several purification technologies on water have been implemented successfully, such as desalination through reverse osmosis membranes, electrodialysis, thermal processes, ion exchange resins and others. The system aims the production of pure water, with low electrical conductivity, which may be a research source for study and producing waters for hospital and pharmaceuticals purposes, etc... It is our understanding that these types of waters are very guarded by ANVISA and other federal agencies and their physico-chemical and biological properties are subject to change by the treatments to assess the quality of the product and the proper functioning of the system. From the parameters of pH and electrical conductivity, we observed a considerable decrease after regeneration of ion exchange resins within 30 to 80 minutes of operation. The pH varied from 6.2 to 4.2 and after 40 minutes the electrical conductivity became constant, reaching $0.8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, indicating the regeneration. It can be observed in the present study a low salt rejection in a resin II column, to a pressure of $8.2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, reaching a maximum of 30% indicating a little efficiency of the reverse osmosis desalination systems, unlike the other studied pressures (2.2 and $6.2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$), where a rejection rate of 90% for most ions is observed.

Keywords: reverse osmosis membrane, ion exchange resin, electrical conductivity, restoration and maintenance.

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1: Porosidade de membranas e pressões de operações	4
Quadro 2: Exemplos de aplicações de processos com membranas	5
Quadro 3: Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar	9
Quadro 4: Valores limites para o ISL e S&DSI	19
Quadro 5: Resumo sobre os tipos de resina, grupos funcionais e suas seletividades	31
Quadro 6: Resultados da taxa de rejeição de sais das membranas antes e após o procedimento de limpeza química com ácido cítrico e hidróxido de sódio	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fenômeno da osmose em um osmômetro de laboratório	7
Figura 2: Filtração frontal e tangencial	11
Figura 3: Elemento de membrana em espiral para o processo de OI	13
Figura 4: Mecanismo de fouling para membrana	15
Figura 5: Equipamento básico para medida do IDS	21
Figura 6: Estrutura de uma resina trocadora de cátions	27
Figura 7: Clarificação dos flocos de resina	28
Figura 8: Resina de troca iônica	29
Figura 9: Processo de troca iônica em uma resina catiônica e em uma resina aniônica	30
Figura 10: Sistema composto de membrana-resina (LABDES)	34
Figura 11: Ilustração dos componentes para o processo de deionização da água dessalinizada com resina mista (LABDES)	37
Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de membrana-resina trocadora de íons (LABDES)	40
Figura 13: Vazão do permeado e do concentrado em função da pressão para o sistema de membranas	42
Figura 14: Recuperação do sistema composto de membrana-resina em função da pressão de operação	43
Figura 15: Variação do pH da solução de HCL usada durante a limpeza química dos elementos de membrana	44
Figura 16: Variação da condutividade elétrica da solução de HCL usada durante a limpeza química dos elementos de membrana	45
Figura 17: Fotografias das superfícies das membranas antes e após 96 horas de contato com os agentes convencionais de limpeza	46
Figura 18: Variação da condutividade elétrica com o tempo durante o processo de regeneração da resina mista	48
Figura 19: Comportamento do pH com o tempo durante a regeneração da resina mista	49
Figura 20: Concentração de sais de um sistema composto de membrana-	

resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm ⁻²	50
Figura 21: Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm ⁻²	50
Figura 22: Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm ⁻²	51
Figura 23: Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm ⁻²	52
Figura 24: Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de 8,2 kgf.cm ⁻²	53
Figura 25: Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm ⁻²	54
Figura 26: Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm ⁻²	54
Figura 27: Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm ⁻²	55
Figura 28: Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm ⁻²	55
Figura 29: Perfil das membranas no período de incrustação, sob efeito da pressão de 8,2 kgf.cm ⁻²	56
Figura 30: Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de saturação das membranas, sob efeito da pressão de 8,2 kgf.cm ⁻²	57
Figura 31: Monitoramento do pH de um sistema compostos de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm ⁻²	58

Figura 32: Monitoramento do pH de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$ 58

Figura 33: Monitoramento do pH de um sistema composto de membrana-resina, no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de $8,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$ 60

Figura 34: Monitoramento da condutividade elétrica de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de $8,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$ 60

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a	constante (g/kgf.cm.s)
A	área da membrana (cm ²)
C _i	concentração molar do soluto (mol.L ⁻¹)
C _a	concentração de alimentação (mg.L ⁻¹)
C _c	concentração do concentrado (mg.L ⁻¹)
C _p	concentração do permeado (mg.L ⁻¹)
C _{STD}	concentração de sólidos totais dissolvidos (mg.L ⁻¹)
CV	destilação por compressão de vapor
ED	eletrodialise
H	altura do nível da coluna de alimentação (m)
IDS	índice de densidade de sedimentos
IFM	índice de incrustação modificado (s.L ⁻²)
ISL	índice de saturação de langelier
J _p	fluxo do permeado (L.m ⁻² h ⁻¹)
J _c	fluxo do concentrado (L.m ⁻² h ⁻¹)
k	constante cinética
K _b	constante cinética para mecanismo de fouling por bloqueio completo de poro
K _c	constante cinética para mecanismo de fouling por formação de torta
K _i	constante cinética para mecanismo de fouling por bloqueio parcial de poro
K _{os}	constante osmótica
K _s	constante cinética para mecanismo de fouling por bloqueio interno de poro
KW	coeficiente de permeação de água (L.m ⁻² h ⁻¹)
MF	microfiltração
MED	destilação múltiplo efeito
MSF	destilação flash com múltiplos estágios
NF	nanofiltração

n	constante para cada mecanismo de fouling
OI	osmose inversa
pH	potencial hidrogeniônico
p _{alc}	logaritmo negativo da concentração de alcalinidade (na forma de CaCO ₃)
pC _a	logaritmo negativo da concentração de Ca ⁺² (na forma de CaCO ₃)
pH _c	potencial hidrogeniônico do concentrado
pH _s	potencial hidrogeniônico de saturação
PRS	percentual de rejeição de sais (%)
PS	percentual de passagem de sais (%)
Q'	fluxo determinado em intervalo de 30 segundos (m ³ .h ⁻¹)
Q _a	vazão de alimentação (m ³ .h ⁻¹)
Q _p	vazão do permeado (m ³ .h ⁻¹)
Q _c	vazão do concentrado (m ³ .h ⁻¹)
r	recuperação do sistema (%)
R	constante dos gases ideais (atm cm ³ .mol.k)
RS	rejeição de sais (%)
SLQ	sistema de limpeza química
STD	sólidos totais dissolvidos (mg.L ⁻¹)
t _i	tempo inicial (s)
t _f	tempo final (s)
t _e	tempo de espera (15min)
T	temperatura absoluta (K)
UF	ultrafiltração
V	volume do permeado (m ³)
ΔP	gradiente de pressão hidráulica (kgf.cm ⁻²)
Δπ	gradiente de pressão osmótica (kgf.cm ⁻²)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1.INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO II	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Processos de separação com membranas	4
2.1.1 Principais aplicações de processos de separação	5
2.1.1.1 Vantagens e aplicações do processo de dessalinização via OI	6
2.1.2 Osmose inversa	7
2.2 Processo de dessalinização	8
2.2.1 Aspectos relevantes de projeto de sistema de dessalinização via OI	9
2.3 Filtração frontal e tangencial	10
2.4 Módulos comerciais	12
2.4.1 Módulos espirais	12
2.5 Incrustações	13
2.5.1 Tipos de incrustações	14
2.5.1.1 Depósito de material biológico	16
2.5.1.2 Depósitos inorgânico	16
2.5.2 Prevenção de incrustação CaCO_3	17
2.5.3 Prevenção de incrustação de sílica	19
2.6 Pré-tratamento	20
2.7 IDS	20
2.8 Pós-tratamento	21
2.9 Principais variáveis no processo de dessalinização	23
2.9.1 Passagem de sais	23
2.9.2 Taxa de rejeição de sais	23
2.9.3 Recuperação do sistema	24
2.9.4 Concentração de sais dissolvidos	24
2.10 Resinas de troca iônica	25

2.10.1	Processo de clarificação das resinas	28
2.10.2	Princípio da troca iônica	29
2.10.3	Tipos de resinas e suas aplicações	31
	CAPÍTULO III	33
3.1	Material utilizado no sistema de dessalinização	33
3.1.1	Material utilizado no processo de osmose inversa	33
3.1.2	Características e composição das membranas utilizadas	34
3.1.3	Análises físico-químicas utilizada no sistema de OI	35
3.1.4	Limpeza química das membranas	35
3.1.4.1	Ácido Clorídrico	35
3.1.5	Procedimento utilizado na recuperação das membranas do sistema de OI	36
3.1.6	Material utilizado na coluna de resina	36
3.1.6.1	Instrumentação utilizada	37
3.1.6.2	Reagentes químicos utilizados	38
3.1.6.3	Procedimento utilizado na regeneração de resinas de troca iônica	39
3.1.6.4	Procedimento experimental	40
	CAPÍTULO IV	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Comportamento da vazão do permeado e do concentrado em função da pressão	41
4.2	Recuperação do sistema de membrana de osmose inversa em função da pressão	42
4.3	Variação do potencial hidrogeniônico da solução usada durante a limpeza química de membranas	43
4.4	Variação da condutividade elétrica durante a limpeza química de membranas	45
4.5	Recuperação das membranas do sistema de osmose inversa no período de incrustação	46
4.6	Regeneração de resinas de troca iônica no período em que as membranas estavam incrustadas	47
4.7	Concentração de sais presentes na água antes da limpeza química	49
4.8	Concentração de sais presentes na água após a limpeza química	51

4.9 Concentração de sais presentes na água no período de incrustação	52
4.10 Taxa de rejeição de sais	53
4.11 Taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas	56
4.12 Comportamento do potencial hidrogeniônico com o tempo antes e após a limpeza química	57
4.13 Comportamento do pH e da condutividade elétrica no período de incrustação das membranas	59
CAPÍTULO V	62
5. CONCLUSÕES	62
CAPÍTULO VI	64
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
CAPÍTULO VII	65
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

Os processos com sistema de dessalinização e resina mista vêm sendo aplicadas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) com o objetivo de produzir água pura de baixa condutividade elétrica para uso laboratorial na preparação de reagentes, diluições, lavagens de vidrarias, etc. A utilização de água com elevada pureza vem sendo, a cada dia, ampliada. Seja pela demanda em laboratórios de análises para a produção de soluções aquosas, seja na produção de medicamentos. Para tanto, existe hoje, uma gama de processos utilizados para a produção de água de baixa condutividade elétrica, seja por processos térmicos, aplicação de resinas de troca iônica ou processos por membranas.

A aplicação de resinas tem se difundido bastante devido a sua gama de aplicabilidade. As resinas são bastante utilizadas em indústrias, na purificação de águas para a alimentação de caldeiras, obtenção de água pura para química fina, extração de materiais orgânicos, extração de colóides, dessalinização de águas, extração de metais pesados (POHL, 2006).

Segundo Silva (2007) a extração de sais por resinas de troca iônica é uma tecnologia que não envolve mudança de fase, o que significa uma economia no consumo de energia, principalmente comparada aos processos tradicionais, toda a água que alimenta o sistema é convertida em água purificada, eliminando a possibilidade de produção de um subproduto não desejado e seu processo de recuperação é simples e barato.

As resinas possuem a capacidade de trocar cátions e ânions dissolvidos na água de alimentação por íons H^+ e ânions OH^- encontrados nas resinas. Quando a troca ocorre, os íons H^+ e OH^- são liberados na água que se encontra em contato com a resina e reage entre si como forma de neutralizar a água purificada formando, a cada instante, uma nova molécula de água.

Os processos de purificação ou dessalinização com membranas seletivas vêm a cada ano, se consolidando como uma das tecnologias que apresentam melhores resultados de separação de misturas. Sua aplicação vem crescendo em demasido devido à facilidade de operação, ao baixo custo de manutenção,

quantidade e qualidades dos produtos etc. Nos anos recentes, os avanços científicos no campo de indústria de micro-chips e da biotecnologia provocaram uma demanda por água de elevada pureza. Por outro lado, a consciência de preservação do meio ambiente da sociedade implica também em tratamentos de rejeitos industriais mais sofisticados e de maior eficiência. Nestes campos a osmose inversa tem se desenvolvido bastante (AQUANET, 2012).

A consolidação dessa linha de pesquisa vem ocorrendo ao longo das duas últimas décadas, com o laboratório de dessalinização (LABDES), esse laboratório é referência mundial na área de membranas.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa à obtenção de água de baixa condutividade elétrica a partir de um sistema composto de membrana de osmose inversa e resina trocadora iônica.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Analisar a variação do potencial hidrogeniônico e da condutividade elétrica durante a limpeza química das membranas.
- b) Fazer um estudo em relação à regeneração das resinas trocadoras de íons.
- c) A Recuperação das membranas do sistema de osmose inversa pela remoção de incrustantes no período de incrustação;
- d) Observar a Variação da concentração de sais presentes na água antes e após a limpeza química das membranas;
- e) Fazer um comparativo da vazão do permeado e do concentrado em função da pressão.

CAPITULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de separação com membranas

Os processos de separação com membrana 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 no Quadro 1.

Quadro 1 – Porosidade de membranas e pressões de operações.

MEMBRANA	POROSIDADE	PRESSÃO(kgf.cm ²)
Microfiltração	0,05µm – 5 µm	< 2
Ultrafiltração	3 nm – 5 nm	2 – 10
Nanofiltração	1 nm – 4 nm	5 – 41
Osmose Inversa	0,1 nm – 1 nm	8 – 204

Fonte – Schneider and Tsutiya, 2001; Habert et al., 1997.

A microfiltração é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utilizam-se membranas porosas com poros na faixa entre 0,05 e 5µm, são processos indicados para retenção de materiais em suspensão e emulsão. A pressão aplicada não ultrapassa 2,00 kgf.cm². Uma das aplicações da microfiltração é no pré-tratamento utilizado no processo de OI (SILVEIRA, 1999).

As membranas de UF apresentam poros na faixa entre 3,0 a 50,0 nm. Soluções contendo solutos de peso molecular 10^3 a 10^6 Dalton podendo ser tratados por este processo. Como os poros das membranas de UF são menores, então a diferença de pressão varia na faixa de 2,00 a 10,00 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).

2.1.1 Principais aplicações de processos de separação

O processo de separação por membranas tem sido utilizado nos mais diferentes setores de atividade, como na indústria química, na área médica, passando pela biotecnologia, indústria alimentícia, farmacêutica e também tratamentos de águas industriais e municipais. No Quadro 2 são apresentados exemplos de aplicações de processos com membranas em algumas áreas acima mencionadas.

Quadro 2 – Exemplos de Aplicações de Processos com Membranas.

ÁREA	APLICAÇÕES
Biotecnologia e Farmacêutica	Purificação de enzimas; Desidratação de etanol; Bio – reatores a membranas; Esterilização de meios de fermentação;
Tratamento de Águas	Dessalinização de águas; Eliminação de traços orgânicos; Desmineralização de águas para caldeiras; Tratamento de esgotos municipais; Água ultra pura para indústria eletrônica;

Tratamento de Despejos Industriais	Separação água/óleo; Recuperação de íons metálicos – couro; Tratamento de águas – papel e celulose; Recuperação de proteínas – Laticínio; Recuperação de PVA – Têxtil;
Medicina	Rim artificial – Hemodiálise; Esterilização de soluções injetáveis; Pulmão artificial – Oxigenadores; Dosagem controlada de remédios; Ar enriquecido em oxigênio;
Alimentícia e Bebidas	Concentração de leite; Concentração do soro de queijo; Concentração de sucos de fruta; Clarificação de vinhos e cervejas; Desalcoolização de vinhos e cervejas;

Fonte – Habert et al, 1997.

2.1.1.1 Vantagens do Processo de Dessalinização de águas via Osmose inversa:

Vantagens:

- Não necessita de grandes espaços físicos para sua instalação.
- É um processo contínuo.
- Possui baixo custo de investimento.
- Possui baixo custo energético.
- Sua taxa de rejeição de sais chega a 99,4%.
- 100% na taxa de rejeição de bactérias, fungos e microorganismos.
- O rendimento de água purificada chega a 75%.

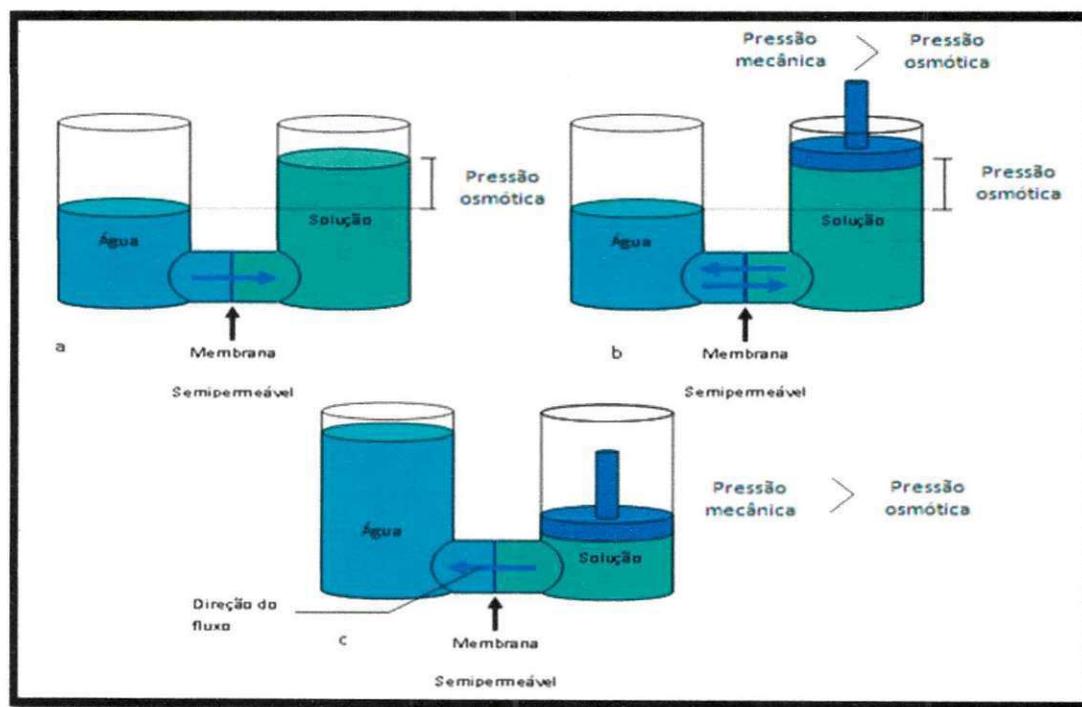
2.1.2 Osmose Inversa

A membrana de osmose inversa atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com massa molar acima de 100. As moléculas de água, por outro lado, permeam preferencialmente através da membrana (DOW LATIN AMERICA, 1996).

Este processo pode remover sais, dureza, microorganismos em geral e patogênicos em particular, turbidez, compostos orgânicos, pesticidas e a maioria dos contaminantes presentes na água. Mas muitos dos gases dissolvidos tais como hidrogênio sulfídrico e dióxido de carbono, irão passar através da membrana de osmose inversa (TAYLOR e JACOBS, 1996).

A taxa de transporte de água através da membrana depende das propriedades da membrana, da temperatura da solução, da diferença de pressão aplicada na membrana e a baixa diferença de pressão osmótica entre a solução mais concentrada e a de menor concentração (AMJAD, Z; 1993). A Figura 1 abaixo está representando todo o processo.

Figura 1 – Fenômeno da osmose em um osmômetro de laboratório.



Fonte – França, 2008.

2.2 Processos de dessalinização

Um dessalinizador essencialmente efetua a separação de água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos, conhecido como permeado e, o outro contendo o restante dos sais dissolvidos, conhecido como concentrado ou rejeito.

Existem diversos processos de purificação de água, mas somente podem ser retirados sais dissolvidos através dos processos térmicos e de membranas (AMJAD, Z., 1993).

Os processos mais utilizados estão listados a seguir:

- **Processos térmicos:**

Destilação flash com múltiplos Estágios (MSF);

Destilação Múltiplo Efeito (MED);

Destilação por Compressão de Vapor (CV).

- **Processos de membranas:**

Osiose inversa (OI);

Eletrodialise (ED).

Todos os métodos citados apresentam vantagens e desvantagens em suas aplicabilidades e em relação aos seus custos de instalação, consumo de energia, manutenção, operação, volume de água tratada, volume de rejeito, qualidade da água produzida, tempo e espaço físico utilizado.

A quantidade de energia requerida em plantas de dessalinização difere conforme a técnica usada na dessalinização da água. Os processos de destilação apresentam um consumo de energia superior ao de OI, como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 – Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar.

PROCESSO	CONSUMO (kWh. m ⁻³)	TEMPERATURA(°C)
Osmose Inversa	4,76	45
Destilação Múltiplo Efeito (MED)	6,87	75
Destilação por Compressão de Vapor (VC)	9,25	100
Destilação Flash com Múltiplo Estágio (MSF)	9,52	95

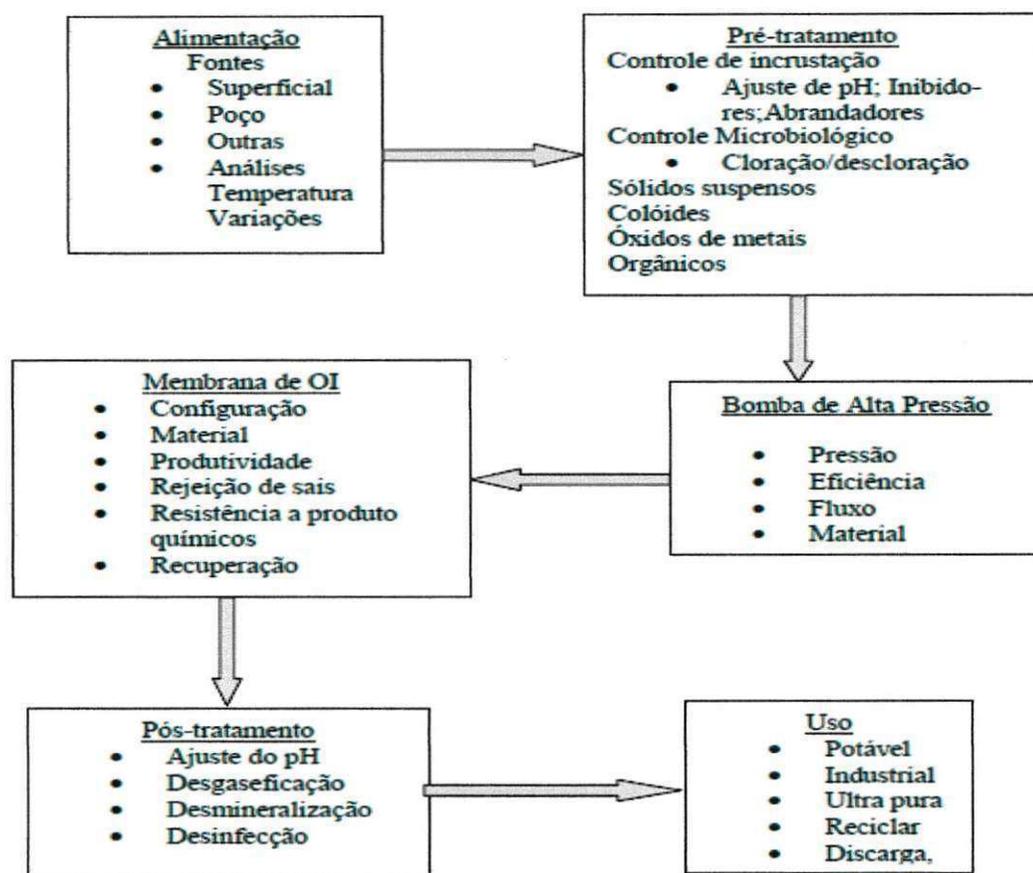
Fonte – Amjad, 1993.

Existem maneiras de se aumentar a oferta de água potável e diminuir assim o consumo de energia por m³ de água produzida (FILHO, 2000):

- ✓ Misturando parte da solução de alimentação com o permeado produzido até um teor de sais aceitável da solução resultante;
- ✓ Evitando incrustações nas membranas, através da limpeza química e física;
- ✓ Fazendo recirculação do concentrado, para diminuir o consumo de energia;

2.2.1 Aspectos relevantes de projeto de sistema de dessalinização via osmose inversa (OI)

O diagrama de blocos abaixo apresenta um sumário das considerações que um plano de projeto deve apresentar para um sistema de osmose inversa.



As considerações apresentadas acima não abrangem todas aquelas necessárias para se trabalhar com um determinado tipo de água, mas não deixa de ser um guia quando se deseja projetar o sistema de OI. Cada interface deve apresentar seu próprio controle, visando gerar segurança no desempenho e confiança durante a operação.

2.3 Filtração Frontal e Tangencial

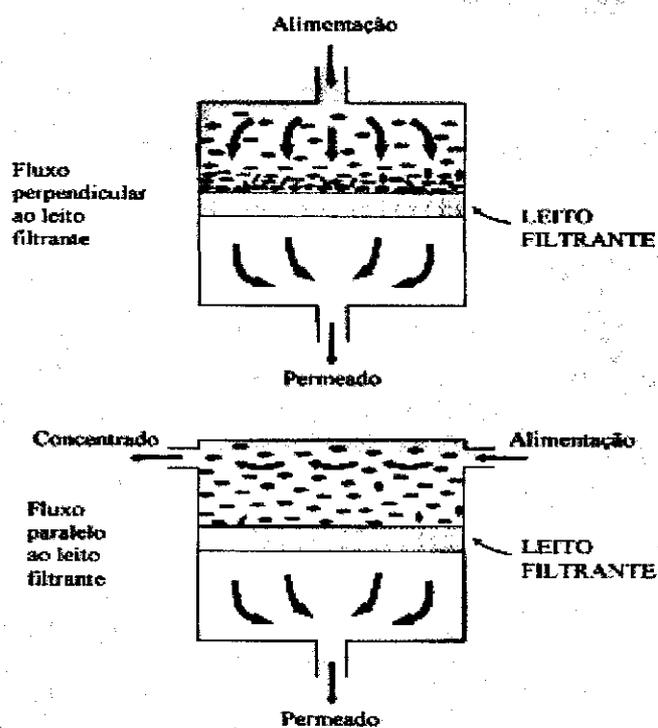
A filtração por membranas pode ocorrer de forma frontal (dead-end) ou tangencial (cross-flow). Na operação do tipo frontal a solução ou suspensão é pressionada contra a membrana. O permeado passa pela membrana e o soluto ou materiais em suspensão são retidos, acumulando-se na interface membrana/solução, no fenômeno chamado polarização de concentração. Da mesma maneira que na filtração clássica, ocorre a formação de uma torta. Trata-se de um modo de operação fundamentalmente transiente. Na filtração tangencial a solução escoia paralelamente a superfície da membrana enquanto o

permeado é transportado transversalmente à mesma. Neste caso é possível operar o sistema nas condições de regime estabelecido de transferência de massa.

O fluxo do permeado é uma variável crítica na determinação da eficiência do processo de separação por membranas, sendo desejável a máxima taxa de permeação, com mínimo consumo de energia. Quando se processa uma solução utilizando-se um processo de separação cross-flow, haverá um aumento da concentração de soluto na interface membrana/solução. Imediatamente, inicia-se a retrodifusão deste soluto em direção ao seio da solução, estabelecendo-se, rapidamente, um perfil de concentração deste soluto nesta região próxima à interface membrana/solução. Este fenômeno é conhecido como "polarização de concentração" (HABERT et al., 1997)

Além da polarização de concentração, existe uma série de outros fatores que reduzem o fluxo do permeado. Na Figura 2 são apresentados esquematicamente os dois modos de filtração.

Figura 2 – Filtração frontal e tangencial.



Fonte – Dow Latin America, 1996.

2.4 Módulos Comerciais

Os módulos são projetados com os seguintes objetivos:

- a) Evitar a contaminação do permeado com o material do concentrado;
- b) Maximizar a superfície da membrana por volume de módulo;
- c) Limitar o acúmulo de material retido pela membrana através da otimização da circulação do fluido a ser tratado;

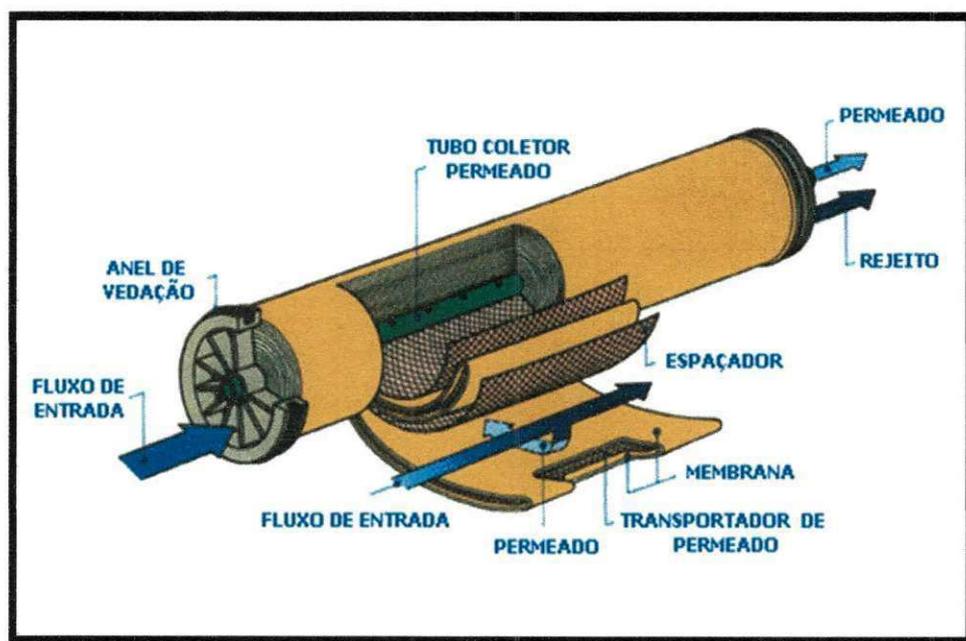
O projeto dos módulos deve também atender os seguintes requisitos:

- a) Volume mínimo retido no interior do módulo;
- b) Permitir limpeza eficiente da membrana;
- c) Simplicidade de manuseio;

2.4.1 Módulos Espirais

Cada elemento consiste de um pacote de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central, mostrado na Figura 3. O módulo espiral é o módulo mais utilizado em aplicações que demandam pressões altas e intermediárias, ou seja, na NF e na OI. Os canais de alimentação são delimitados por membranas dos dois lados, sendo que o canal de concentrado é mantido aberto por espaçadores no formato de telas. A superfície oposta das folhas de membrana onde fica localizada a estrutura porosa de suporte e por onde escorre o permeado onde é colocado em contato com um segundo espaçador formado por um tecido fino poroso, cuja função é manter aberto o canal de água filtrada. Este canal é vedado em três lados por linhas de cola. O lado aberto é inserido dentro do tubo coletor localizado no interior do elemento.

Figura 3 – Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa.



Fonte – Gawbergen, 1997.

2.5 Incrustações

Um dos problemas no uso da osmose inversa é a presença de certas substâncias na água de alimentação do processo que, sem a devida atenção, podem diminuir a produtividade, diminuindo o fluxo de água produzida, ou tornar a água permeada mais concentrada em sais, até torná-la imprópria para utilização. A pressão de operação tende também a aumentar gradativamente, para superar a diminuição de área útil de permeação da membrana (SOUSA, 2001).

Os três fatores, que individualmente ou em conjunto diminuem a eficiência do sistema de OI são (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- Acúmulo irreversível de material na superfície da membrana.
- Compactação.
- Acúmulo reversível de material retido na superfície da membrana.

2.5.1 Tipos de incrustações

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. 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).

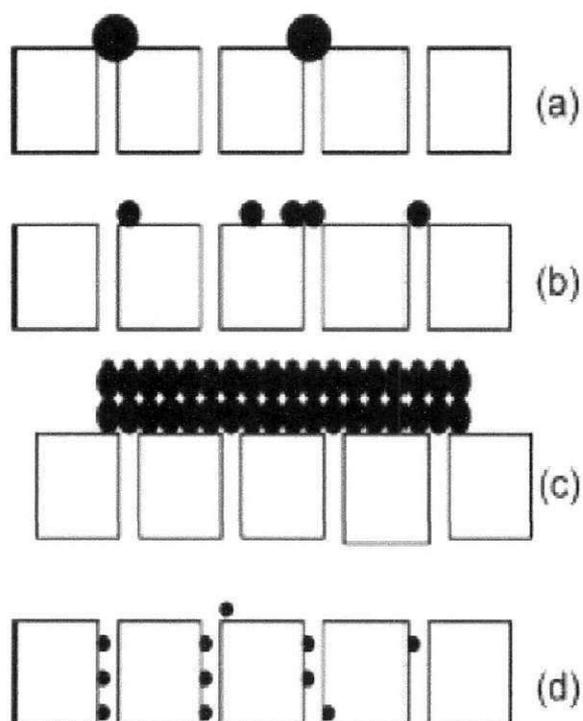
Segundo a "International Union for Pure and Applied Chemistry" (IUPAC), "fouling" pode ser definido como o processo que resulta em um decréscimo na performance da membrana, causado pela deposição de sólidos suspensos ou dissolvidos sobre sua superfície externa, interna ou sobre seus poros (Koros et al., 1996) e cada mecanismo de "fouling" ocasiona um tipo de resistência no processo de separação por membranas, que consiste na ocorrência de fouling em quatro mecanismo, sendo:

- Formação de torta: partículas ou macromoléculas que não entram nos poros formam uma torta na superfície da membrana. A resistência global do processo está composta de uma resistência da torta e uma resistência da membrana segundo (Todisco et al., 1996). A formação de torta pode ocorrer quando o tamanho médio do soluto é maior do que o diâmetro médio dos poros que já tenham sido bloqueados por moléculas de tamanho menor ou semelhante.
- Bloqueio parcial dos poros: quando partículas sólidas ou macromoléculas encontram um poro aberto podendo ocorrer o bloqueio do mesmo. No bloqueio parcial, as partículas atravessam o poro, obstruindo a sua entrada, mas não bloqueando completamente o mesmo.

- Bloqueio interno dos poros: partículas entram nos poros e são depositadas ou adsorvidas, reduzindo o volume de poros. Neste caso, a resistência da membrana aumenta com consequência da redução do tamanho do poro.
- Bloqueio completo dos poros: quando as partículas são maiores que o tamanho do poro, a porção de membrana de área de filtração é alcançada por essas partículas ficando bloqueada como consequência de uma obstrução completa de poro.

Estes tipos de bloqueio de poro estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Mecanismo de fouling para membrana: (a) Bloqueio completo de poro; (b) Bloqueio parcial do poro; (c) Formação de torta; (d) Bloqueio interno de poro.



Fonte – Todisco et al., 1996.

2.5.1.1 Depósito de material biológico

O depósito de material biológico ("biofouling") é definido como o acúmulo, crescimento e/ou depósito de biomassa na superfície da membrana, ocasionando problemas operacionais (VROUWENVELDER e KOOIJ, 2001).

O depósito de material biológico pode provocar os seguintes efeitos nos sistemas de OI (Al-AHMAD et al., 2000):

Redução do fluxo de operação das membranas: isto é devido à formação de um filme de baixa permeabilidade na superfície da membrana, o que aumenta a área da membrana necessária para a produção de um mesmo volume de produto;

Aumento da pressão diferencial e da pressão de alimentação: isto é resultado da resistência do filme de baixa permeabilidade.

Biodegradação da membrana: subprodutos tipicamente ácidos produzem microorganismos que se concentram na superfície da membrana onde eles podem causar o maior dano, reduzindo a vida útil das membranas.

Aumento da passagem de sal: os biofilmes aumentam o acúmulo de íons dissolvidos na membrana, aumentando o grau de polarização de concentração. Isto causa o aumento da passagem de sal pela membrana e reduz a qualidade da água do produto.

2.5.1.2 Depósitos inorgânicos

Os depósitos inorgânicos ("scalings") são sais normalmente solúveis em água e que precipitam e se cristalizam na superfície das membranas. Isso é facilmente entendido quando verificamos que na área externa próxima à membrana a concentração de sais é bem superior à concentração do sal na água de entrada, podendo atingir o limite de solubilidade e assim precipitando (BENNET et al., 1996).

Um sal precipita quando a concentração dos seus componentes ultrapassa o valor limite correspondente ao produto de solubilidade (K_{ps}) e geralmente a precipitação ocorre nos elementos de membranas instalados na

saída dos vasos de pressão localizados na última bancada do sistema (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

2.5.2 Prevenção de incrustação de CaCO_3

O risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com STD até 10.000 mg.L^{-1} é avaliado através do valor do índice de saturação de Langelier (ISL), enquanto que, o índice de Estabilidade de Stiff e Davis (S&DSI) é utilizado em água de salinidades altas. Os dois índices são calculados pela mesma fórmula (Equação 1), 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

$$ISL = pH_c - pH_s \quad (1a)$$

$$S\&DSI = pH_c - pH_s \quad (1b)$$

Onde:

ISL: 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:

$$ISL: pH_s = pCa + palc + C(STD) \quad (2)$$

$$S \& DSI : pH_s = pCa + palc + K(I) \quad (3)$$

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 (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Outra forma de calcular o pH_s é pela seguinte Equação (MINDLER e EPSTEIN, 1986; NING e NETWIG, 2002).

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (4)$$

Onde:

$$A = \frac{(\text{Log } [STD] - 1)}{10} \quad (5)$$

$$B = -13,12 * \text{Log } [^{\circ}C + 273] + 34,55 \quad (6)$$

$$C = \text{Log } [Ca^{+2} \text{ como } CaCO_3] - 0,4 \quad (7)$$

$$D = \text{Log} [Alcalinidade \text{ como } CaCO_3] \quad (8)$$

Observação importante:

O ISL igual a zero não haverá precipitação nem dissolução do $CaCO_3$. Para controlar o "scaling" de $CaCO_3$, o ISL tem que ser ajustado a um valor negativo (tendência de dissolução).

Quando o ISL for positivo, algum método de controle de incrustação, por exemplo, a dosagem de anti-incrustante, deve ser utilizado. O ISL e o S&SDI são usados por alguns fabricantes de membranas de OI para guiar o uso de produtos químicos no pré-tratamento da água de alimentação. como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores limites para o ISL e S&DSI.

	HYDRANAUTICS	PERMASEP	FILMTEC
ISL e S&DSI, água sem inibidor de incrustação	< -0,2	< 0,0	< 0,0
ISL e S&DSI, água com inibidor SHMP*	≤ 0,5	< 1,0	< 1,0
ISL e S&DSI, água com inibidor orgânico	≤ 1,8	< 2,3	< 1,8

Fonte – Ning e Netwig, 2002.

(1) SHMP – inibidor de incrustação a base de hexametáfosfato de sódio.

2.5.3 Prevenção de incrustação de Sílica

A sílica foi descrita como um incrustante mais problemático em unidades de OI e sua redução é considerada uma importante fase do pré-tratamento. A sílica existe em muitas formas cristalinas e amorfas (SHEIKHOLESAMI e BRIGHT, 2002).

A presença de certos metais, por exemplo, Al^{+3} , pode alterar significativamente a solubilidade de SiO_2 por formação de silicatos de metal insolúvel. A ocorrência de incrustação de sílica está principalmente correlacionada com a ocorrência de alumínio ou ferro (FILMTEC, 1995).

A incrustação de sílica nas membranas pode ocorrer por um dos três mecanismos:

- Deposição monomérica na superfície da membrana;
- Deposição coloidal por meio de colóides que se formam na solução e se acumulam na superfície da membrana, e sílica amorfa biogênica (SHEIKHOLESAMI e BRIGHT, 2002).
- Deposição correlacionada com a ocorrência de alumínio ou ferro;

2.6 Pré-tratamento

A utilização de um sistema de pré-tratamento em um processo de OI tem como objetivo reduzir o potencial de incrustação na água de alimentação, pela remoção de partículas micropoluentes e microorganismos, bem como a prevenção da formação de incrustante inorgânico, melhorando assim a qualidade da água de alimentação para um nível que resultará numa maior segurança de operação para os sistemas de OI (DURDLEY e DARTON, 1997). No pré-tratamento, há dois parâmetros que devem ser medidos, monitorados ou controlados, porque eles influenciam diretamente no 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 e EPSTEIN, 1986). O alto custo dos processos convencionais de pré-tratamento e a dificuldade de manter a qualidade da água tratada constante, independentemente das oscilações da qualidade da água bruta, estão impulsionando a adoção de tecnologias de pré-tratamento, baseados em membranas de microfiltração ou ultrafiltração (ROSBURG, 1997; EBRAHIM et al., 1997).

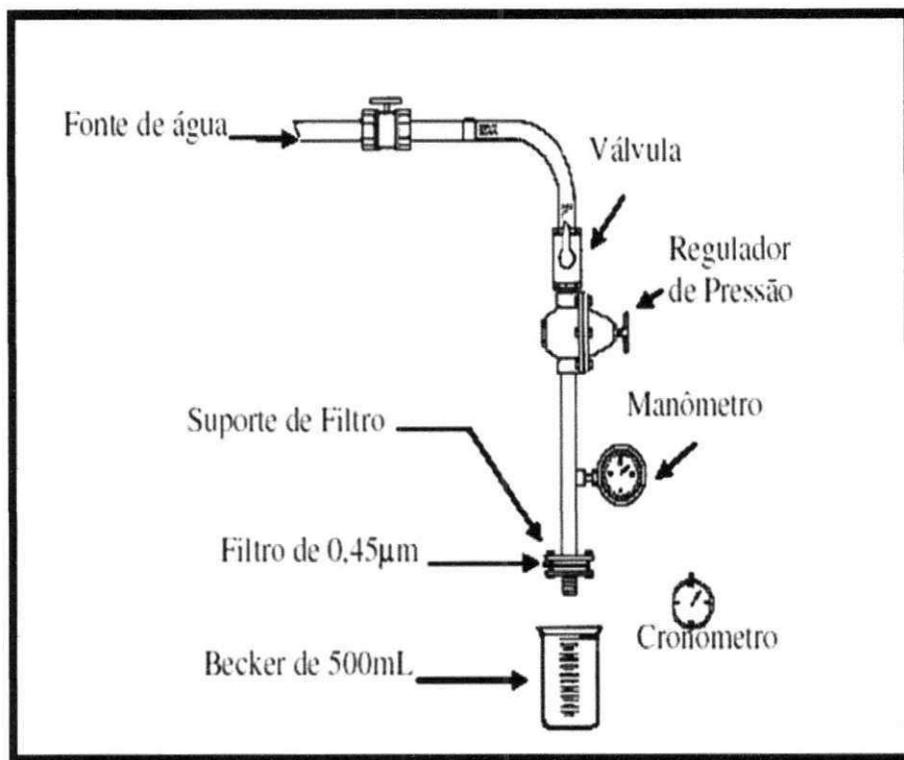
2.7 Índice de densidade de sedimentos

O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_1) é o tempo, em minutos, necessário para a coleta dos primeiros 500 mL da amostra da água de alimentação, o segundo intervalo (t_2) é o tempo, em minutos, necessário para a coleta dos últimos 500 mL da amostra. O terceiro intervalo de tempo (t_3) varia de 5, 10 ou 15 minutos e é o intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 mL e o início da coleta dos segundos 500 mL. O tempo padrão para o t_3 é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação 9 (TAYLOR e JACOBS, 1996).

$$IDS = \left[\frac{\left(1 - \frac{t_i}{t_f} \right)}{t_i} \right] \times 100 \quad (9)$$

O equipamento básico, como mostra a Figura 5 consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45 µm de diâmetro de 47 mm. A amostra deve ser filtrada a uma pressão de 2,00 kgf.cm⁻² (TAYLOR e JACOBS, 1996).

Figura 5 – Equipamento básico para medida do IDS.



Fonte – Taylor et al; 1996.

2.8 Pós – Tratamento

O processo utilizando nas membranas remove essencialmente todos os microorganismos, dentre eles os patogênicos e a maioria dos sais e outros solutos presentes na água de alimentação. Porém, todos os gases dissolvidos,

incluindo dióxido de carbono e hidrogênio sulfídrico passa através da membrana. Com a finalidade de remover esses gases do permeado, o processo de osmose inversa necessita de algum tipo de pós-tratamento antes de ser utilizado para o consumo humano (TAYLOR e JACOBS, 1996).

O pós-tratamento é aplicado em função do uso final da água. Em uma aplicação industrial, consiste na desmineralização com resinas trocadoras de íons e desinfecção via radiação ultravioleta.

A desinfecção é um tipo de pós-tratamento que tem como objetivo assegurar que a água potável, antes de ser distribuída, esteja completamente isenta de microorganismos patogênicos (SILVEIRA, 1999).

Nas aplicações para as águas de abastecimento, o produto da osmose inversa é geralmente desinfetado por adição de cloro. Em grandes sistemas, o gás cloro (Cl_2) é adicionado à água e em pequenos sistemas, geralmente injetam-se soluções aquosas de hipoclorito de sódio.

O gás cloro é dissolvido em hidrólise com água de acordo com a Equação 10



A ação desinfetante e oxidante do cloro é controlada pelo ácido hipocloroso que se dissocia instantaneamente segundo a Equação 11:



A água produzida pelo processo de osmose inversa contém baixos níveis de compostos que reagem com o cloro, tais como Fe^{+2} , Mn^{+2} e orgânicos. Desta maneira a quantidade de cloro necessária para desinfecção pode ser menor comparado com que é requerida para a desinfecção da água do poço. Além disso, as baixas concentrações de orgânicos minimizam ou eliminam a formação de triclorometanos e outros compostos orgânicos clorados. A desinfecção do permeado (água potável) produzido por osmose inversa é geralmente concluída com um nível de cloro residual, embora somente a análise bacteriológica possa determinar a eficiência da desinfecção por cloro (ALMEIDA, 2003).

2.9 Principais variáveis no processo de dessalinização

2.9.1 passagem de sais

É a aposta a rejeição e é a porcentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, ela é calculada de acordo com a Equação 12 (BRANDT e LEITNER, 1992):

$$PS (\%) = \left(\frac{C_p}{C_a} \right) * 100 \quad (12)$$

Onde: PS: passagem de sais (%); Ca: concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg.L^{-1}); Cp: concentração de soluto na corrente de permeado (mg.L^{-1}).

2.9.2 Taxa de rejeição de sais

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. A eficácia de processos de separação é geralmente medida pelo parâmetro denominado rejeição (RS), é calculada de acordo com a Equação 13, (WIESNER e BUCKLEY, 1996):

$$RS (\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_a} \right) * 100 \quad (13)$$

Onde: Ca: concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg.L^{-1}); Cp: concentração de soluto na corrente de permeado (mg.L^{-1}).

A determinação exata deste parâmetro em sistemas de membranas é praticamente impossível, pois seria necessário medir com precisão a concentração do soluto rejeitado na faixa subcamada laminar em contato com a

superfície da membrana. Além disso, o valor exato da rejeição varia ao longo do módulo, devido à contínua remoção de líquido do canal de alimentação.

2.9.3 Recuperação do sistema

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

O nível de recuperação de um sistema pode ser definido de acordo com a Equação 14 (TAYLOR e JACOBS, 1996):

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} * 100 = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} * 100 \quad (14)$$

Onde: r: razão de recuperação (%); Q_p: Vazão do permeado (m³.h⁻¹); Q_a: vazão de alimentação (m³.h⁻¹); e Q_c: vazão do concentrado (m³.h⁻¹).

2.9.4 Concentração de sais dissolvidos

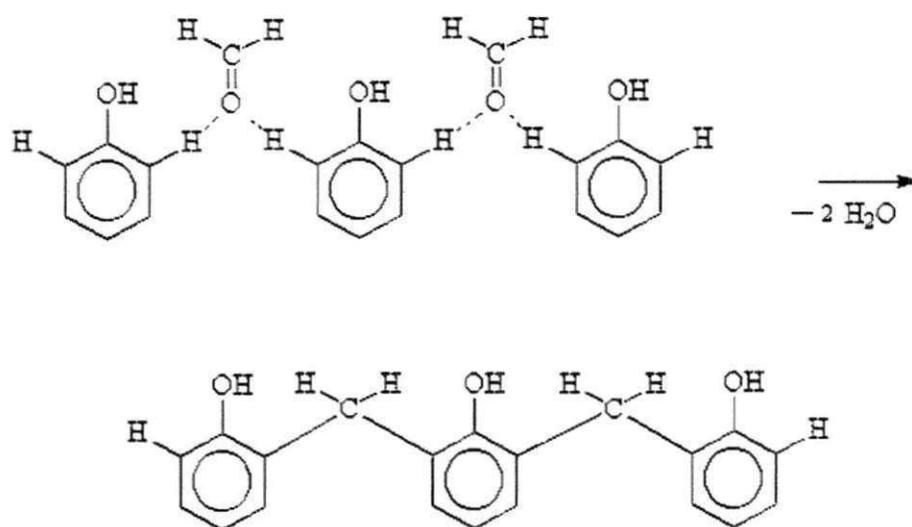
A concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado é matematicamente estimado, baseando-se nos resultados analíticos obtidos das águas de alimentação, através da Equação 15 (EL-MANHARAWY e HAFEZ, 2001):

$$C_c = \frac{C_a}{1 - r} \quad (15)$$

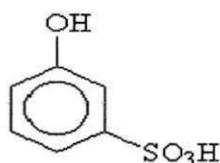
Onde: C_c: concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado (mg.L⁻¹); C_a: concentração de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg.L⁻¹) e r: nível de recuperação do sistema (%).

2.10 Resinas de troca iônica

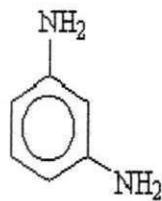
As resinas de troca-iônica constituem formidável ferramenta na química moderna. A primeira resina de troca-iônica sintética foi preparada por dois ingleses, Adams e Holmes, por aquecimento de vários fenóis com formaldeído. Dá-se uma reação de poli-condensação com eliminação de água.



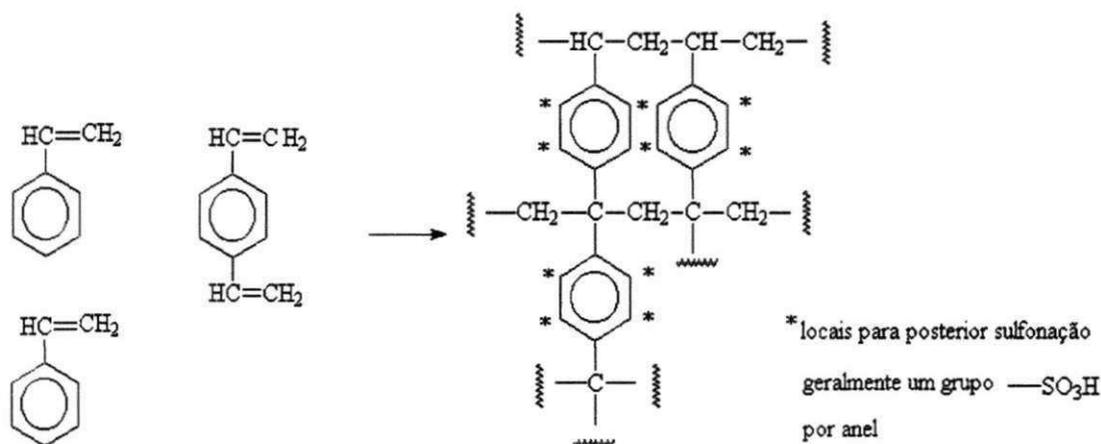
O produto a seguir é sulfonado. Pode-se também usar ácidos fenol-sulfônicos que são diretamente condensados. Estas seriam resinas catiônicas:



Para obter resinas aniônicas Adams e Holmes condensaram m-fenileno diamina com formaldeído.



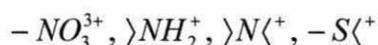
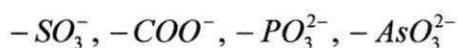
Em 1944 D'Alelio preparou a resina que ainda hoje é a mais usada por co-polimerização de estireno com divinil-benzeno (DVB) e posterior sulfonação com ácido.



A preparação de ligações entre as cadeias formando um copolímero espacial (cross-linking) é controlada pela quantidade de divinil-benzeno; quanto maior a porcentagem deste, menores serão os "buracos" na estrutura do copolímero. Esta resina foi no fim de 1945 chamada Dowex-50, sendo a primeira resina produzida comercialmente. Encontra-se usualmente na forma de esferas.

A primeira resina aniônica fortemente básica (trocadora em pH elevado) foi a Ambiente IRA-400 introduzida em 1948.

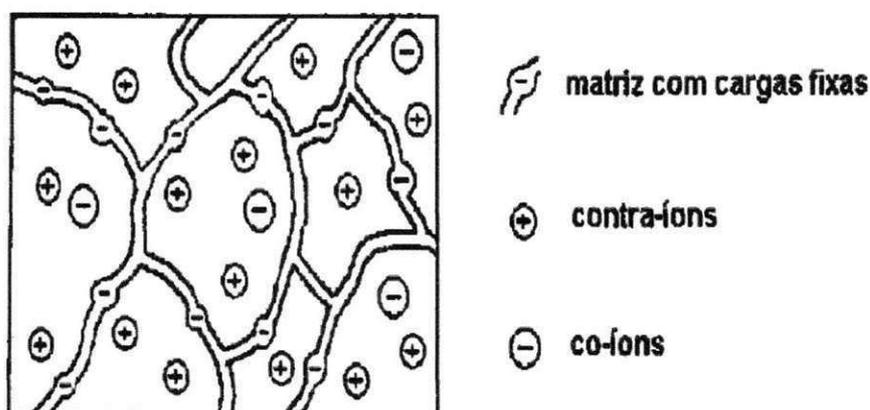
Resinas orgânicas de troca iônica formam uma classe muito importante entre os trocadores iônicos. A estrutura das resinas trocadoras de íons, denominada matriz, consiste em uma rede macromolecular, tridimensional e irregular de cadeias hidrocarbônicas. A matriz contém grupos iônicos tais como:



Considerando, por tanto, que as resinas são polieletrólitos reticulados. Sendo reticuladas, as resinas trocadoras de íons são insolúveis em praticamente todos os solventes. Sua dissolução em um líquido requer que as cadeias hidrocarbônicas sejam destruídas. Contudo, observa-se que a matriz é elástica e pode expandir-se, por isso resinas trocadoras podem intumescer em contato com determinados solventes (INORGAN, 2012).

A estrutura das resinas é constituída por uma rede aleatória flexível conforme mostra a Figura 6. A flexibilidade das cadeias depende do grau de reticulação das cadeias carbônicas da matriz (INORGAN, 2012).

Figura 6 – Estrutura de uma resina trocadora de cátions.



Segundo Almeida (1999) algumas outras propriedades como seletividade, capacidade de troca, tamanho dos grãos e durabilidade estão diretamente relacionados com a aplicação futura a qual a resina será submetida. A escolha da resina trocadora de íons para uma determinada aplicação deve ser baseada nas características químicas e físicas do objeto ou sistema a ser estudado. A estabilidade mecânica, térmica e química e o comportamento da troca iônica das resinas dependem principalmente da estrutura, do grau de reticulação e do número de grupos iônicos da matriz. A maioria das resinas vendidas comercialmente é estável nos solventes normalmente utilizados (exceto na presença de agentes fortemente oxidantes ou redutores), e a temperaturas inferiores a 100°C (INORGAN, 2012).

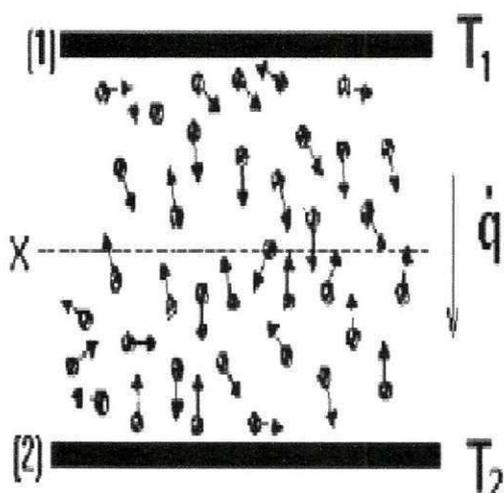
No processo de deionização existe uma troca de íons entre a resina e a solução problema. Para fins de medidas quantitativas da transferência de massa entre essas fases, algumas equações da cinética de reação foram desenvolvidas (COCHRANE, 2006). Quando se estudam fenômenos de troca iônica, frequentemente surge a dúvida entre considerar o fenômeno como adsorção ou absorção. Para se evitar qualquer confusão neste ponto, reações de troca iônica envolvendo trocadores iônicos sintéticos são referidas simplesmente como

processos de sorção, ou seja, um íon A foi sorvido pelo trocador, que desorveu um íon B.

2.10.1 Processo de clarificação das resinas

O processo de clarificação das resinas consiste nas etapas de floculação, decantação e filtração. Para que essas etapas ocorram, é dosado na entrada de água bruta o floculante que pode ser o cloreto férrico, por exemplo, que através de processos químicos é o responsável pela aglomeração das partículas em suspensão (TAMURA, 2004). A quantidade dosada varia de acordo com a quantidade e tipos de partículas em suspensão na água a ser tratada. Para fazer a correção do pH, de modo que a floculação e a decantação ocorram de maneira satisfatória, é feita uma dosagem de soda cáustica. O pH ideal varia de acordo com a qualidade da água que será tratada e a dosagem de cloreto férrico é feita por bombas dosadoras automáticas com set points de vazão ajustados de acordo com a vazão de alimentação de água bruta, como mostrado na Figura 7 (TAMURA, 2004).

Figura 7 – Clarificação dos flocos de resina.

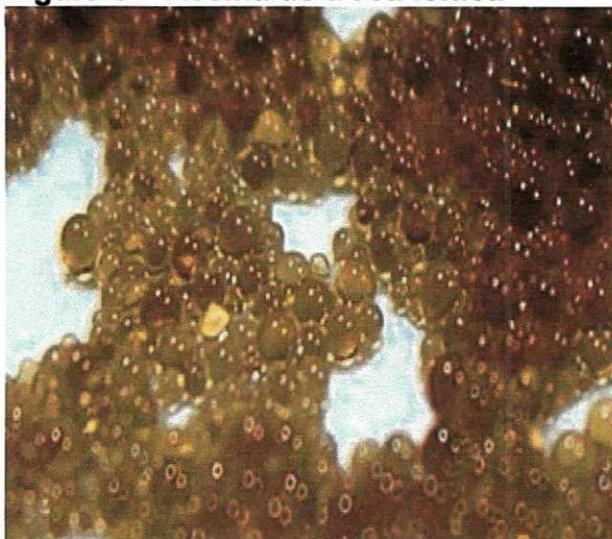


Fonte – Tamura, 2004.

2.10.2 Princípio da troca iônica

Segundo Almeida (1999) um trocador iônico é constituído por um material poroso inerte, natural e sintético, praticamente insolúvel em água e em solventes orgânicos, que apresenta cargas elétricas em sua estrutura, contrabalanceadas por íons de carga oposta. A troca de íons entre a resina e a solução externa é relativamente rápida, onde o volume de equilíbrio tem sido medido e utilizado para avaliar a capacidade e a afinidade de troca com íons (TAMURA, 2004). Mas é preciso observar que a capacidade de troca da resina depende das condições de operação do sistema, da qualidade da água que entrará em contato com a resina e com a qualidade da água desejada. Segundo Silva (2007) estas águas desmineralizada ou deionizada são bastante utilizadas em indústrias, na purificação de águas para a alimentação de caldeiras, obtenção de água pura para química fina, extração de materiais orgânicos, extração de colóides, dessalinização de águas, extração de metais pesados poderá também alimentar geradores de vapor e utilizadas em laboratórios para lavagem de vidrarias, e em todos os processos que exijam água de alta pureza. A Figura 8 mostra a quantidade de uma resina do tipo gel pronta para ser utilizada.

Figura 8 – Resina de troca iônica

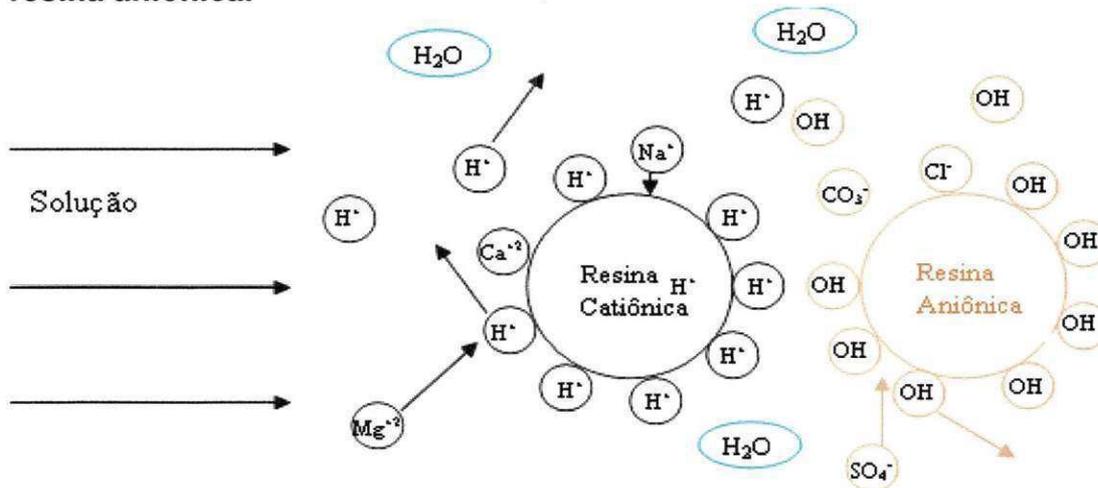


Fonte – <http://www.naturaltec.com.br>

Segundo Silva (2007) as resinas possuem a capacidade de trocar cátions e ânions dissolvidos na água de alimentação por íons H^+ e ânions OH^-

encontrados nas resinas como mostra a Figura 9. Quando a troca ocorre, os íons H^+ e OH^- são liberados na água que se encontra em contato com a resina e reagem entre si como forma de neutralizar a água purificada, formando, a cada instante, uma nova molécula de água.

Figura 9 – Processo de troca iônica em uma resina catiônica e em uma resina aniônica.



Fonte: Silva, 2007.

As principais vantagens apresentadas pelas resinas são:

- Estabilidade em água quente (exceto fortemente básicas);
- Estabilidade a agentes químicos em solução;
- Apenas um grupamento funcional;
- Obtidas na granulometria desejada;
- Vários tipos: aniônicos e catiônicos fracos ou fortemente ácidos e básicos;
- Grau de ligação variável entre as cadeias.

As principais desvantagens apresentadas pelas resinas são:

- As resinas de troca iônica não são eficazes para a remoção de compostos não-iônicos, bem como para compostos orgânicos;

- As resinas trocadoras iônicas só removem compostos iônicos, podendo ocorrer a proliferação de microorganismos e sólidos em suspensão;

2.10.3 Tipos de resinas e suas aplicações

O processo de deionização de água é realizado utilizando-se resinas globulares porosas de troca iônica com diâmetros entre 0,3 e 0,8 mm. Essas resinas são fabricadas com cadeias poliméricas contendo ligações cruzadas de estireno e divinil-benzeno nas quais estão ligados a grupos químicos carregados (CIENFUEGOS, 2000). As resinas de poliestireno são esferas com poros irregulares particugrafitados e insolúveis com negativo (sulfônica ou carboxílica) ou positivo (quaternário, terciário, secundário ou primário amino) grupos de troca catiônica e aniônica respectivamente (SERDOLIT, 2012).

As resinas são divididas em quatro grupos (DOW et al, 2012) principais. O Quadro 5, logo a seguir, descreve de forma resumida as propriedades de cada grupo funcional das resinas e suas principais seletividades.

Quadro 5 – Resumo sobre os tipos de resina, grupos funcionais e suas seletividades.

Resina	Grupo funcional	Tipo	Seletividade
Fortemente ácida	Ácido sulfônico	Poliestireno sulfonado ou poliAMPS ¹	Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺
Fortemente básica	Trimetilamonio	poliAPTAC ²	(SO ₄) ²⁻ , (NO ₃) ⁻
Fracamente ácida	Ácido carboxílico	---	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ ,
Fracamente básica	Amino	Amino polietileno	(SO ₄) ²⁻ , (HSiO ₃) ⁻

Fonte – Filho, 1983; Remco, 2006

¹ PoliAMPS, ou poli(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid).

² PoliAPTAC, ou poli (acrylamido-N-propyltrimethylammonium chloride).

Existe diversos tipos de resinas produzidas para serem submetidas a uma vasta gama de processos industriais como na catálise de reações orgânicas, no tratamento de água para a extração de radioisótopos, purificação de formamida, clarificação de soluções de uréia e acrilamida, "amolecimento" da água, produção de água ultra-pura, entre várias outras aplicações (DOW et al, 2012).

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido no laboratório de dessalinização (LABDES) da unidade acadêmica de Engenharia Química, localizado na Universidade Federal de Campina Grande.

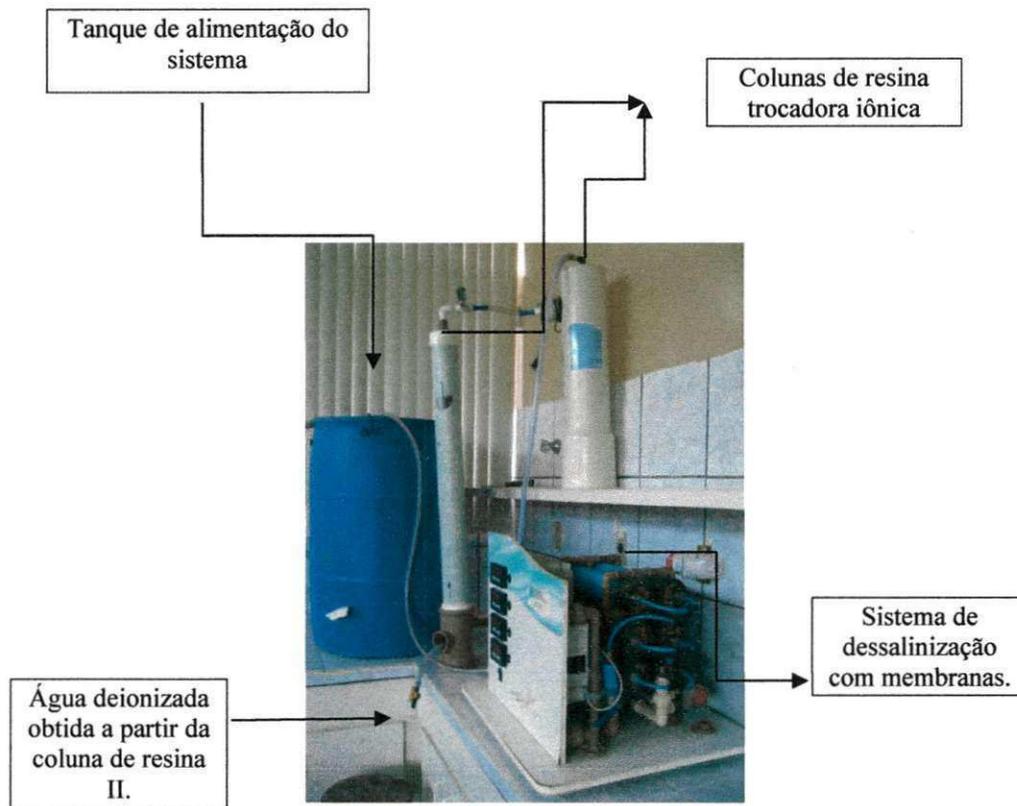
Uma das linhas de atuação do LABDES é o projeto e implementação de sistemas de dessalinização via osmose inversa. Para isso se fez necessário o conhecimento prévio da qualidade de água a ser dessalinizada, sendo de fundamental importância à determinação de seus parâmetros físico-químicos. Para isto, foi construído um sistema de dessalinização de pequeno porte e duas colunas recheadas com resina mista para a produção de água de baixa condutividade elétrica a partir da água de abastecimento público.

3.1 Material utilizado no sistema de dessalinização

3.1.1 Material utilizado no processo de osmose inversa

O sistema conta com seis elementos de membranas poliméricas TW30-2514 da Filmtec, constituído por quatro permeadores em série, dois permeadores em paralelo, um motor bomba de alta pressão de aço inox, com potência $\frac{1}{4}$ CV, modelo B480596 da Procon, com capacidade volumétrica de 60L/h. O permeado que sai da osmose inversa passa por duas colunas de resina trocadora iônica mista, que é constituída com capacidade de 3,8kg cada, sofrendo uma troca iônica. A figura 10 mostra como o sistema composto de membrana-resina está montado no laboratório de dessalinização (LABDES):

Figura 10 – Sistema composto de membrana-resina (LABDES).



Todas as análises físico-químicas das amostras de águas foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) na Universidade Federal de Campina Grande – PB, a partir das análises físico-químicas o ISL foi calculado.

3.1.2 Características e composição das membranas utilizadas

Tipo:

- Configuração: Espiral;
- Composição da membrana: Polimérica.

Capacidade:

- Fluxo do permeado: 1,08 m³/dia;
- Rejeição de sais: 98,2 %;

- Área nominal: 0,58 m².

Aplicação:

- Capacidade de limpeza pH padrão: 2,5 -11,0;
- Operação máxima de temperatura: 45°C;
- Operação normal de temperatura: 25°C;
- Operação de pressão: 14 kgf.cm⁻².

3.1.3 Análises físico-químicas da água utilizada no sistema de osmose inversa

Esta análise é útil para avaliar fontes de águas como também localizar condições de água com variações químicas e os efeitos delas em sistemas operacionais. Os dados gerados são úteis para determinar exigências de pré-tratamento de desígnio sistema além de indicar o período necessária para limpeza química.

A qualidade da água dessalinizada através de processos com membranas, deve responder as características físico-químicas indicadas pela *Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde*. Os parâmetros físico-químicos são características essenciais do processo de dessalinização (STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 1998).

3.1.4 Limpeza Química das membranas

A limpeza química foi realizada com a utilização de Ácido Clorídrico (HCl), com uma concentração de 0,025 molar.

3.1.4.1 Ácido Clorídrico

Foi preparada uma solução de Ácido Clorídrico até o pH do próprio tanque de alimentação do sistema chegar à aproximadamente 3 . Deixou-se a solução em repouso por aproximadamente 4h. Em seguida foi ligado o sistema e

fez-se a solução circular (em ciclo fechado) pelos elementos de membrana por aproximadamente 15min, até que as mesmas estivessem totalmente embebidas com a solução (este procedimento inicial foi feito para facilitar a remoção das substâncias incrustantes na superfície das membranas). Passado os 15min, e mediante a agitação, deram-se início as leituras. A cada intervalo de 15min mediu-se o pH em dois pontos: alimentação e concentrado. O pH nos dois pontos citados acima foi igualado, indicando que a limpeza estava concluída para as membranas de Osmose Inversa. Descartou-se a solução utilizada e, em seguida as membranas foram lavadas com água deionizada para retirar o excesso de solução que se encontrava nas superfícies da mesma, sendo este um ciclo aberto, ou seja, descartando o volume de água utilizado.

3.1.5 Procedimento utilizado na recuperação das membranas do sistema de osmose inversa no período de incrustação

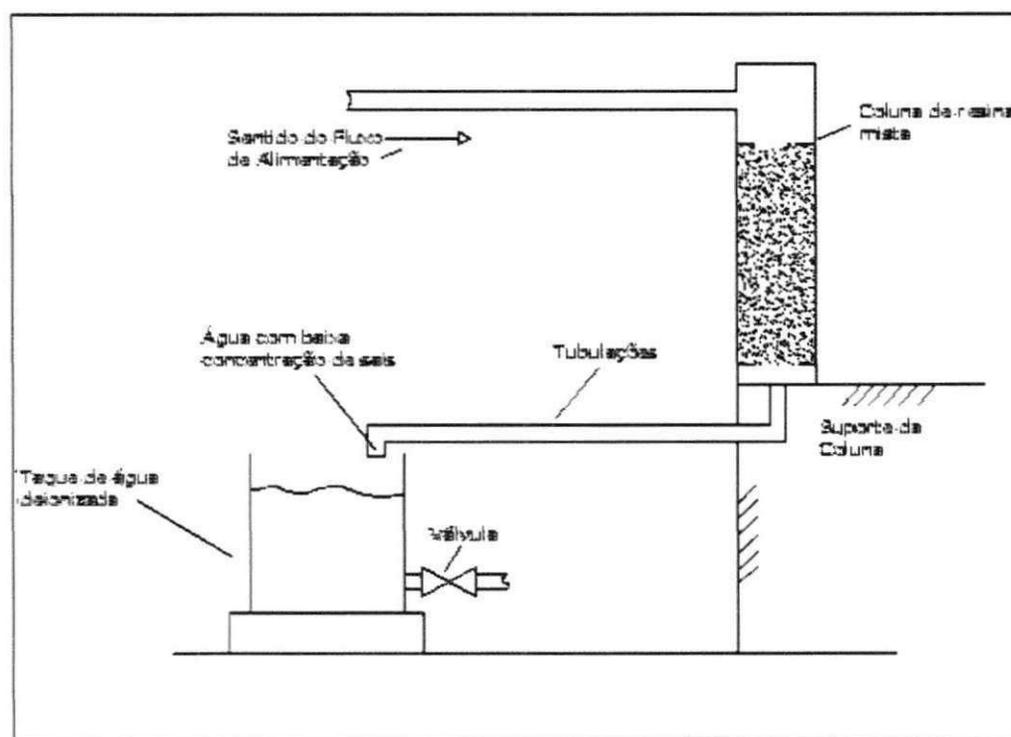
A avaliação da remoção de incrustantes foi realizada com os agentes de limpezas convencionais, ácido cítrico e hidróxido de sódio, utilizando as melhores condições observadas nos testes em agitador mecânico do tipo "Shaker". No procedimento empregado, o contato das membranas com os agentes de limpeza totalizou 96 horas, os elementos membrana foram transportados para tambores, ficando submersas e aquecidas por uma serpentina, sendo que as primeiras 48 horas foi mantido contato com hidróxido de sódio (pH 10), e às 48 horas restantes mantido contato com ácido cítrico (pH 4), ambos a 40°C, totalizando a limpeza.

3.1.6 Material utilizado na coluna de resina

A coluna de resina mista é constituída por uma bomba hidráulica, tubulações de Policloreto de Vinila (PVC) com (1/2) cm de espessura e 8 cm de diâmetro; válvulas de passagem DECA ½ polegada; tubos e conexões em PVC de ½ polegada; tubos plásticos; mangueiras de plásticos de ¼ de polegada. A desmineralização por troca iônica foi realizada por um método conhecido como

trocador de leito misto. Um único vaso trabalha com resinas catiônica e aniônica adequadamente misturadas, obtendo água desmineralizada com valores abaixo de $1,0 \text{ microsiemens.cm}^{-1}$. O princípio de operação é o mesmo, mas, com as duas resinas misturadas, esse contato íntimo entre ambos consegue produzir uma água de qualidade superior, superando assim o sistema de leitos separados em qualidade de água produzida. O sistema de troca iônica por leito misto requer cuidados especiais para sua regeneração, como a separação física das resinas, introdução de ácido e soda simultâneos, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Ilustração dos componentes para o processo de deionização da água dessalinizada com resina mista (LABDES).



Considerando que no início o sistema será alimentado com água da torneira, deve-se ter um elemento de filtro de carvão ativado antes dos elementos de membranas para fins de retirar a presença de cloro remanescente na água, o qual poderá afetar as membranas de osmose inversa.

3.1.6.1 Instrumentação utilizada

- pHmetro Digital PG 2000 da GEHAKA;

- Condutivímetro – 600 da Analyser;
- Colorímetro com disco de cor – NESSLER QUANTI 200 da, PoliControl;
- Turbidímetro Hach – 2100P;
- Pipetador eletrônico Pipetus-akku da Hirschmann Laborgerateforam;
- Bureta eletrônica da modelo akku-drive 50 ml Titanion da Hirschmann Laborgerate;
- Fotômetro de chama modelo 910 da ANALYSER;
- Colorímetro digital modelo SMARTCOLORIMETER da LAMOTTE série 481;
- Espectrofotômetro Biospectro SP – 220;
- Balança analítica, HR-200;
- Agitador magnético da 713D da Fisatom;
- Banho Maria – Marconi;
- Agitador de tubos AP56 – Phoenix;
- Estufa 180°C, ORION 515 A;
- Filtro de cartucho 5 micra;
- Membrana de porosidade 0,45 μ .
- Manômetro;
- Cronômetro;
- Pipetas volumétricas, béqueres, balões volumétricos, erlemmeyers, bastão de vidros, cápsulas de porcelana, pisseta, cuvetas, dessecador.

3.1.6.2 Reagentes químicos utilizados

- Solução para calibração do PHMETRO, pH 4 e pH 7, Synth;
- Solução de KCl para calibração do Condutivímetro, 1412 μ MHO.cm⁻¹;
- Ácido Clorídrico, HCl, 1N;
- Cloreto de Potássio, KCl, P.A.;
- Cloreto de Sódio, NaCl, P.A.;
- Carbonato de Cálcio, CaCO₃, 0,02N
- Hidróxido de Sódio, NaOH, 1N;
- Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 N P.A.;

- Solução Tampão (NH₄Cl)+(NH₄OH) pH 10
- Murexida, P. A.;
- Metilorange 0,4 % P. A.;
- Fenolftaleína P. A.;
- Cromato de Potássio 5,0 % P. A.;
- Negro de Eriocromo P. A.;
- Água Deionizada;
- Sal Dissódico (EDTA) 0,025 N, P. A.;
- Nitrato de Prata (AgNO₃) 0,05 N P. A.;
- Solução de calibração para Fotômetro de chama Na⁺140meq.L⁻¹ e K⁺5,0meq.L⁻¹;
- Cloreto de magnésio Hexahidratado (MgCl₂.6H₂O) P.A.;
- Acetato de Sódio Trihidratado (CH₃COONa.3H₂O) P.A.;
- Ácido Acético (CH₃COOH) (99%);
- Sulfato de Sódio (Na₂SO₄) P.A.;
- Cloreto de Bário (BaCl₂) P.A.;
- Kits da Policontrol para análise de ferro total, sílica, nitrato, nitrito e amônia.

3.1.6.3 Procedimento utilizado na regeneração de resinas de troca iônica

Têm-se a seguir as etapas de regeneração abaixo:

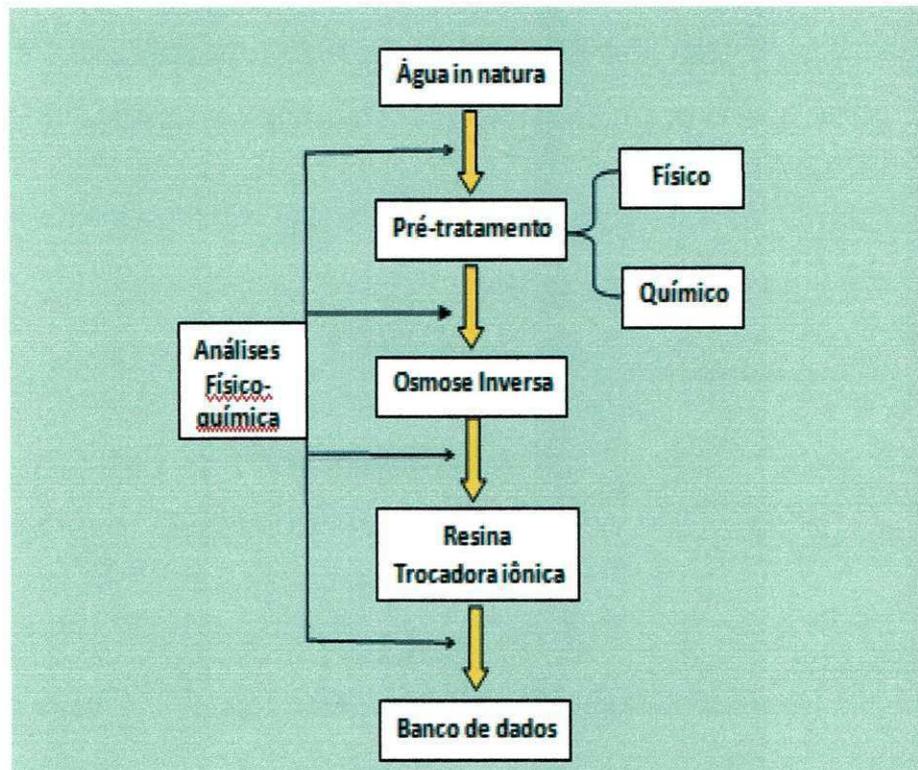
1ª Etapa: as resinas catiônicas e aniônicas são regeneradas realizando a passagem da solução de ácido clorídrico e conseqüentemente com hidróxido de sódio por aproximadamente 24 horas, seguida de enxágüe com água desmineralizada pelo mesmo período ou até chegar ao pH e na condutividade desejada.

2ª Etapa: Após a regeneração das resinas mistas, é realizado o teste com uma proveta contendo a amostragem de resina regenerada. No teste podemos averiguar as novas condutividade elétrica e pH.

3.1.6.4 Procedimento experimental

O procedimento dar-se-á em função do diagrama de blocos apresentado, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema composto de membrana-resina trocadora de íons (LABDES).



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.

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).

O sistema conta com um filtro de carvão ativado o qual é responsável pela retirada do cloro dentre outros da água para que não haja interferência no tempo de vida das membranas poliméricas.

CAPITULO IV

4. Resultados e Discussões

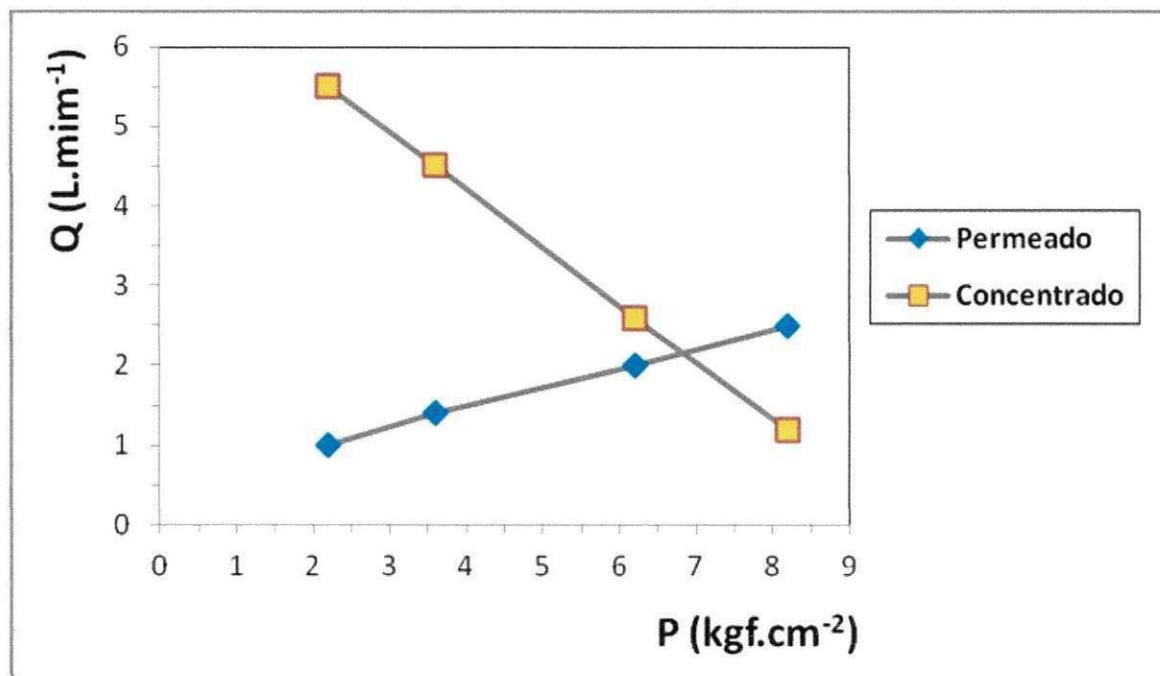
Neste capítulo são avaliados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental deste trabalho.

Para análise destes resultados foram necessárias a utilização de gráficos e tabelas relacionados com o comportamento dos parâmetros do processo do sistema composto de membrana-resina. Os gráficos encontram-se no corpo deste capítulo e todas as tabelas referentes aos gráficos encontram-se nos anexos I, II e III, respectivamente.

4.1 Comportamento da vazão do permeado e do concentrado em função da pressão

O comportamento da variação da vazão do permeado e do concentrado em função da pressão de operação, está representado na Figura 13, respectivamente.

Figura 13 – Vazão do permeado e do concentrado em função da pressão para o sistema de membranas.

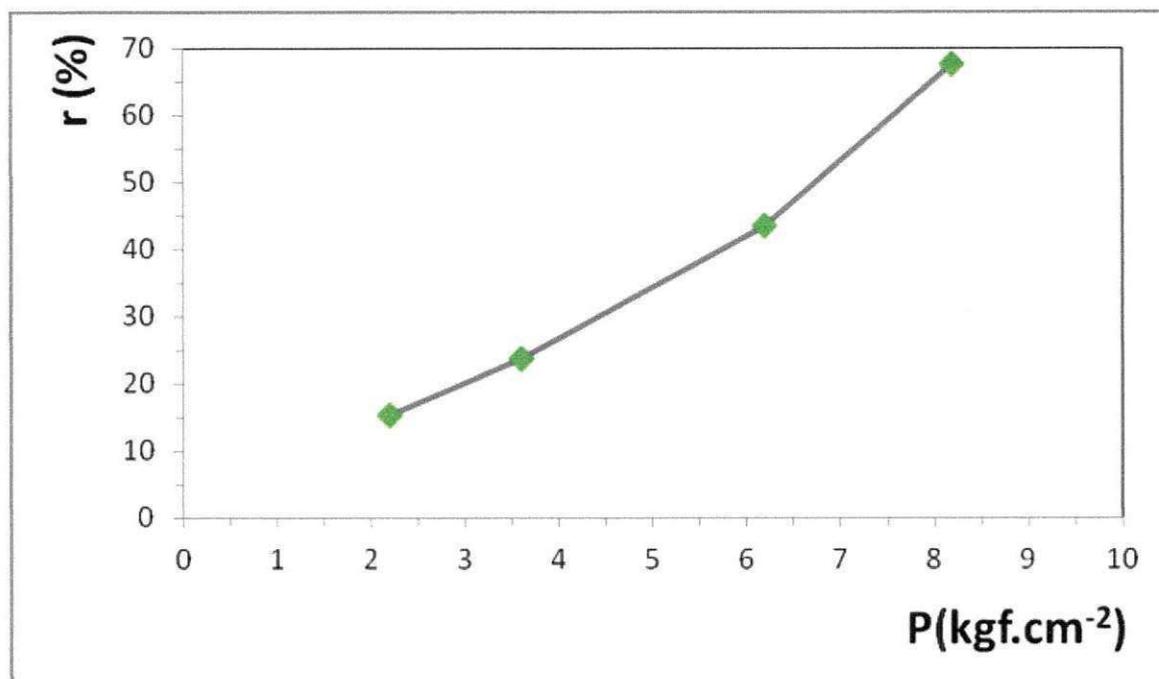


A Figura 13 apresenta o comportamento da vazão do permeado e do concentrado em função da pressão de operação do sistema composto de membrana-resina. Observa-se na medida em que a pressão aumenta a vazão de permeado aumenta e a vazão do concentrado diminui, de maneira proporcional para ambos os casos. Foi utilizada água da torneira para fazer o estudo e o tempo de operação durou 30 minutos. Observa-se que na pressão 7 kgf.cm⁻² a vazão do permeado e do concentrado são iguais, atingindo assim o equilíbrio químico.

4.2 Recuperação do sistema de membrana de osmose inversa em função da pressão

A Figura 14 apresenta o comportamento da recuperação do sistema de osmose inversa em função da pressão de operação. Observa-se que ocorre um comportamento não-linear para todas as combinações estudadas. Esse comportamento está relacionado com a Equação 14, o qual a variação dos gradientes de pressão e da pressão osmótica pode variar em função do tempo.

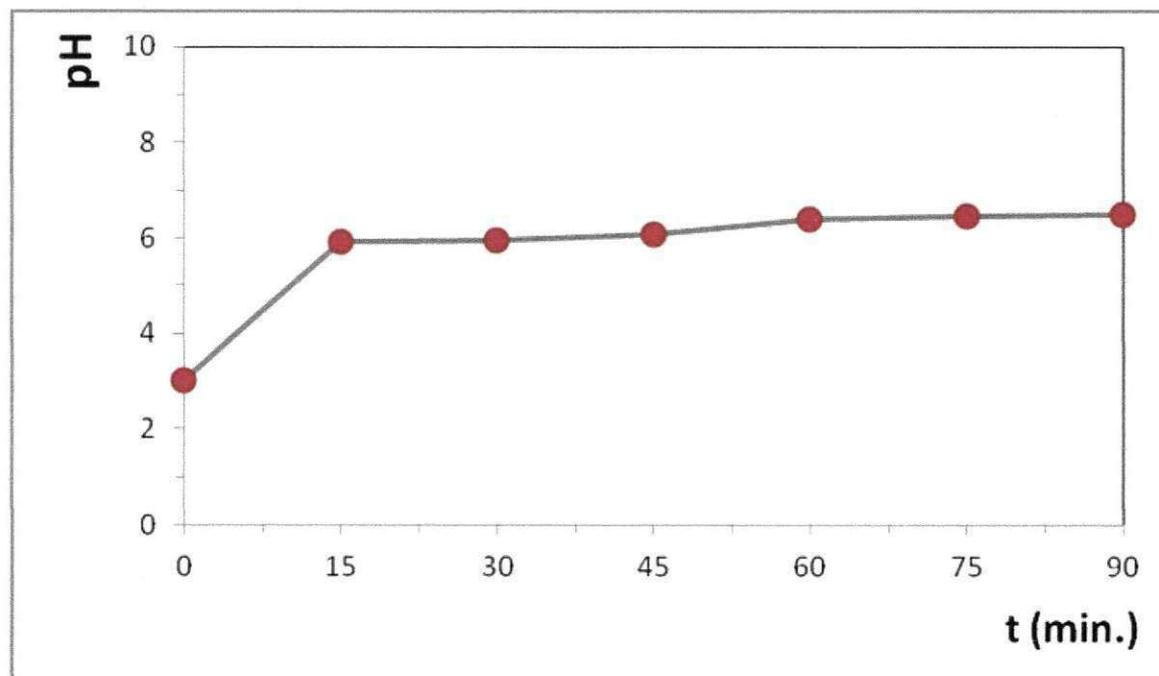
Figura 14 – Recuperação do sistema de membrana em função da pressão de operação.



4.3 Variação do potencial hidrogeniônico da solução usada durante a limpeza química de membranas

Considerando que a variação do potencial hidrogeniônico é um dos parâmetros que fundamenta a limpeza química de membranas, a Figura 15, referente à tabela A2 do anexo I, apresenta o comportamento do pH durante a limpeza química, onde foram utilizadas soluções de HCL, obedecendo as etapas técnicas de limpeza química, conforme mencionado no Item 3.1.4 do capítulo III.

Figura 15 – Variação do pH da solução de HCL usada durante a limpeza química dos elementos de membrana.



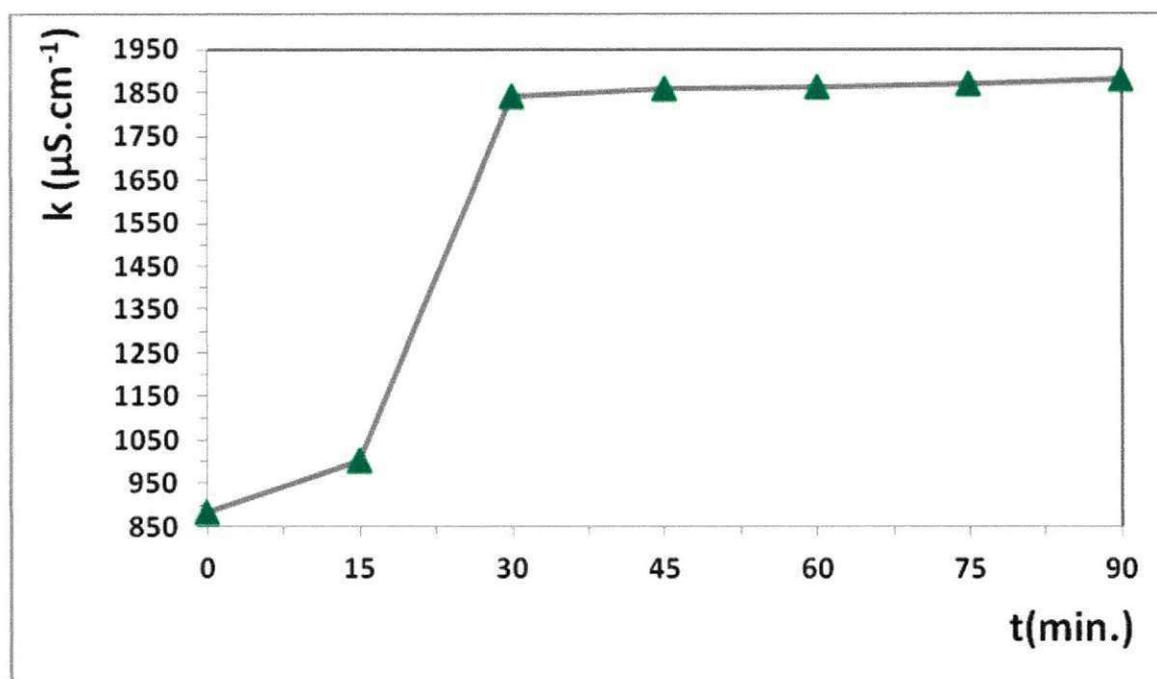
O pH da solução de HCL para limpeza química das membranas foi ajustado dentro da faixa oferecida pelo fabricante das membranas, conforme boletim técnico presente nos anexos, onde o pH inicial da solução foi de aproximadamente 3 e a temperatura da solução foi controlada variando entre 35 e 40 °C, com o objetivo de facilitar a dissolução dos sais incrustados na superfície das membranas, durante a limpeza química.

O resultado obtido está de acordo com a metodologia para limpeza química dos elementos de membrana, para os 15 minutos o pH da solução aumentou praticamente duas vezes acima do valor inicial. Essa variação é decorrente da dissociação dos sais que se encontram incrustado na superfície das membranas. A partir dos 30 minutos o pH apresenta um comportamento de estabilização, indicando que a extração de sais na superfície das membranas ocorre mais lentamente em função do pH. Considerando que o pH após 60 minutos não apresentou variações significativas, considerou-se concluída a limpeza química.

4.4 Variação da condutividade elétrica durante a limpeza química de membranas

O comportamento da variação da condutividade elétrica das soluções de HCL, usadas durante a limpeza química dos elementos de membrana, está representado na Figura 16.

Figura 16 – Variação da condutividade elétrica da solução de HCL usada durante a limpeza química dos elementos de membrana.

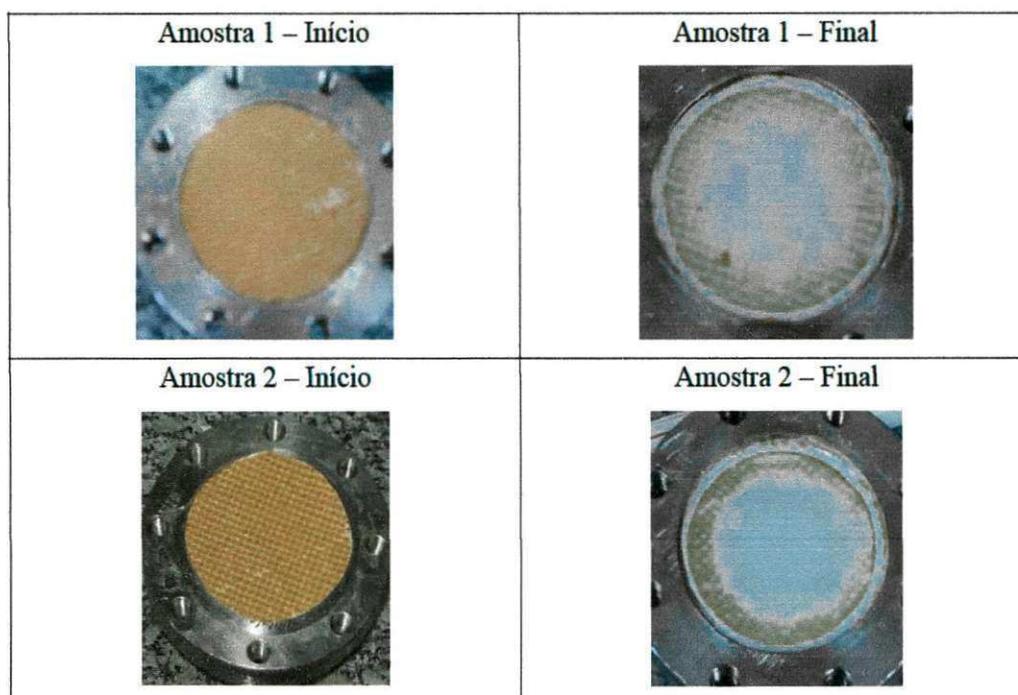


A condutividade elétrica apresentou variações elevadas em pequeno espaço de tempo, chegando a atingir valores acima de $1870 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ próximo aos 75 minutos de limpeza. A Figura 16 mostra que entre 15 e 30 minutos houve uma maior remoção dos sais incrustados nas membranas, fato comprovado pela inclinação da curva entre esse intervalo de tempo, devido à elevada variação da condutividade. A partir dos 45 minutos temos uma menor remoção dos sais, observada pela tendência a estabilização da curva, ou seja, esse fato nos mostra que a limpeza química foi significativa em termos de remoção de sais.

4.5 Recuperação das membranas do sistema de osmose inversa no período de incrustação

As fotografias apresentadas na Figura 17 mostram que a utilização de agentes de limpeza convencionais possibilita remoção parcial dos depósitos presente na superfície das membranas, associado ao aumento da permeabilidade hidráulica. Entretanto, observa-se que as deposições permanecem especialmente nas regiões aonde a velocidade de escoamento é mais reduzida, ou seja, nas extremidades da célula de permeação.

Figura 17 – Fotografias das Superfícies das Membranas antes e após 96 horas de contato com os agentes convencionais de limpeza (ácido cítrico e hidróxido de sódio).



Devido às variações normalmente observadas na membrana retirada do módulo de permeação, observou-se uma melhora significativa nos resultados após o procedimento de limpeza química com ácido cítrico e hidróxido de sódio, os resultados todos são expressos em termo de permeabilidade hidráulica e da taxa de rejeição de sais (%), como mostrado no Quadro 6 abaixo:

Quadro 6 – Resultados da taxa de rejeição de sais das membranas antes e após o procedimento de limpeza química com ácido cítrico e hidróxido de sódio.

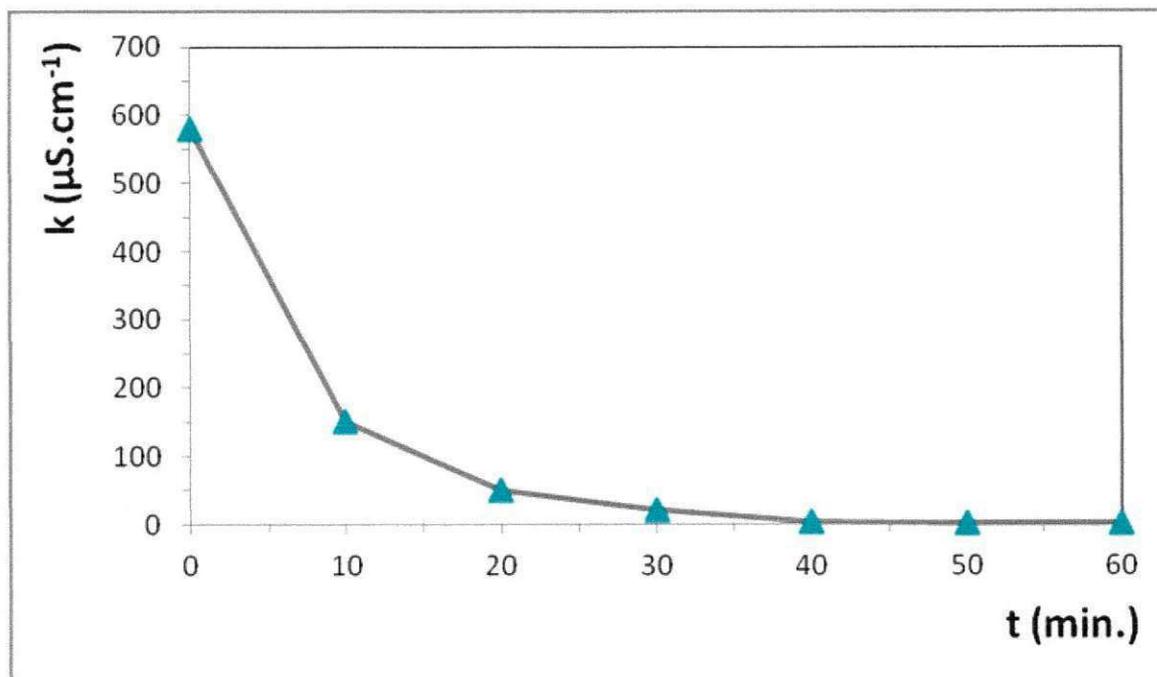
ka ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Inicial	Final
		690
kp ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	450	62,3
TRS (%)	34,7	90,8

Como pode ser observado, após o contato com as soluções de limpeza, houve diminuição na permeabilidade e aumento significativo na taxa de rejeição de sais.

4.6 Regeneração de resinas de troca iônica no período em que as membranas estavam incrustadas

A variação da condutividade elétrica com o tempo durante o processo de regeneração da resina foi observada uma diminuição rápida da condutividade elétrica entre os 10 primeiros minutos de regeneração, em seguida observa-se uma diminuição exponencial tornando constante aos 40 minutos, evidenciando a regeneração da resina saturada. O tempo de regeneração tornou constante aos 40 minutos ($0,8\mu\text{S.cm}^{-1}$), como apresentado na Figura 18 abaixo:

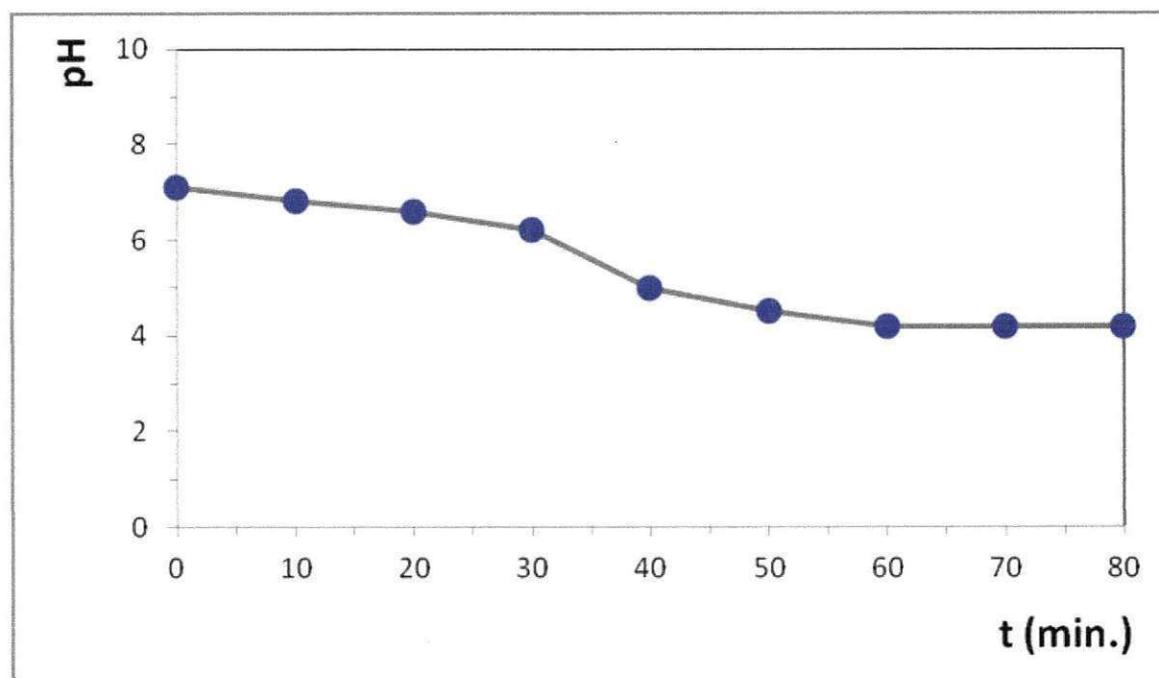
Figura 18 – Variação da condutividade elétrica com o tempo durante o processo de regeneração da resina mista.



A condutividade elétrica das soluções ácidas utilizadas na regeneração das resinas diminui com o tempo de regeneração podendo chegar a um valor constante quando a resina for totalmente regenerada. Assim a troca iônica entre as resinas e as soluções ocorreu de forma evidente, indicando que o intercâmbio iônico ocorrido é um bom mecanismo para se obter uma água com condutividade elétrica próxima de zero.

A variação do pH durante o experimento pode avaliar a regeneração das resinas e verificar o quanto a adsorção se faz presente em todo este processo, como mostrado na Figura 19 abaixo:

Figura 19 – Comportamento do pH com o tempo durante a regeneração da resina mista.



No período de 30 a 80 minutos de operação foi observado o pH variando em torno de 6,2 a 4,2, esta diminuição é decorrência da presença de gás carbônico presente na água, tornando constante em 4,2 para um tempo de 60 minutos de experimento.

4.7 Concentração de sais presentes na água antes da limpeza química

As Figuras 20 e 21 apresentam as concentrações de sais presentes na água de alimentação, concentrado, permeado, coluna de resina I e coluna de resina II, antes da limpeza química, de acordo com os dados das Tabelas B1 e B2 do anexo II.

Figura 20 – Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm⁻².

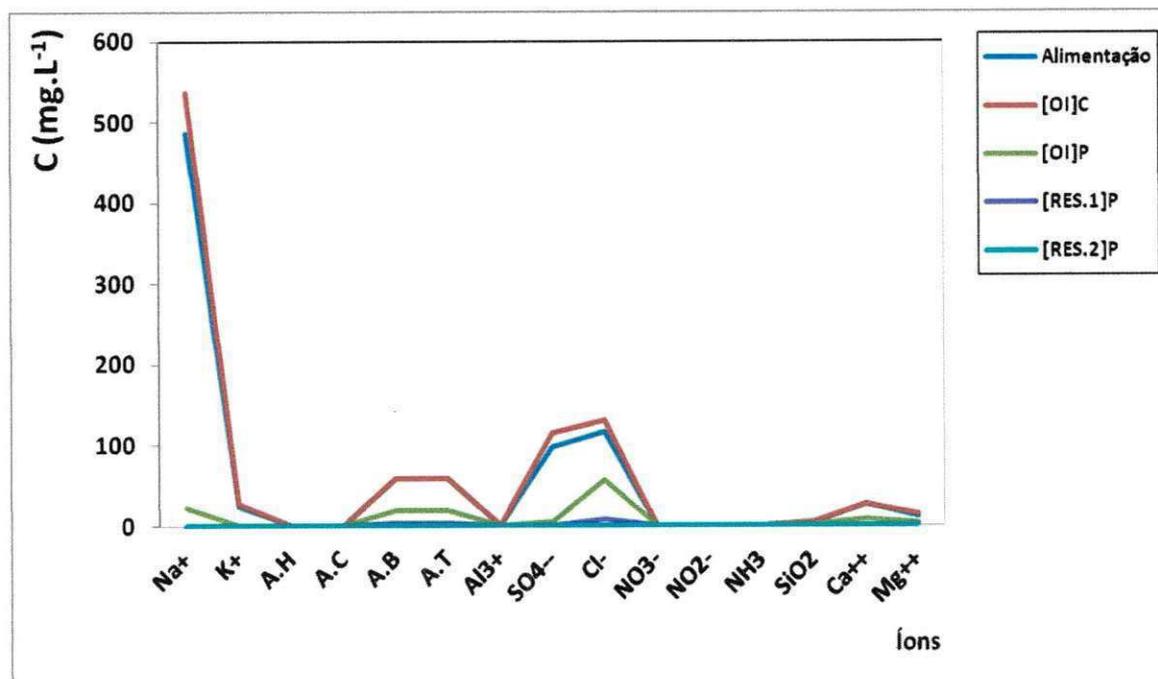
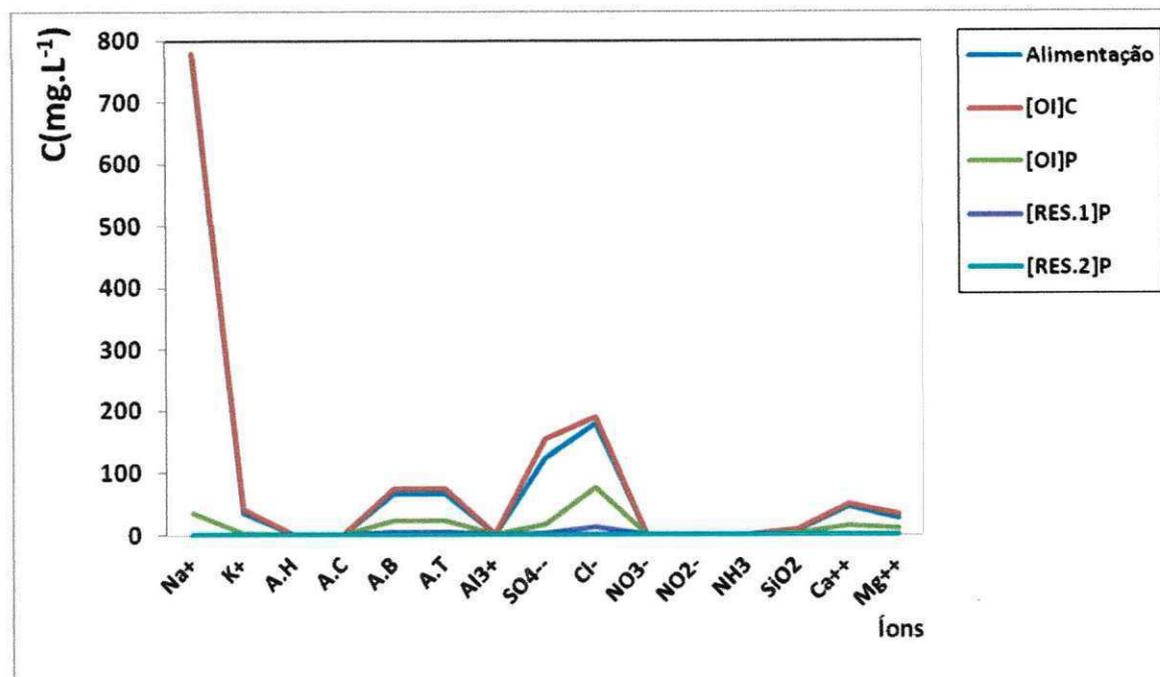


Figura 21 – Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 6,2 kgf.cm⁻².



As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados comparativos das análises físico-químicas do sistema antes da limpeza química, sob os efeitos das pressões de 2,2 e 6,2 kgf.cm⁻². A Figura 20 mostra que ocorreu uma diminuição

nos valores do sulfato e do cloreto na água de permeação em relação as demais pressões, que pode ser explicado pela ação do anti-incrustante, diminuindo o risco de precipitação destes sais na superfície da membrana.

Nota-se que alguns sais não aparecem nos gráficos, principalmente na coluna de resina I e na coluna de resina II, pelo fato destas apresentarem um alto poder de troca iônica, retirando assim quase que 100% dos sais presentes.

4.8 Concentração de sais presentes na água após a limpeza química

As Figuras 22 e 23 apresentam as concentrações de sais presentes na água de alimentação, concentrado, permeado, coluna de resina I e coluna de resina II, após a limpeza química com a solução de HCL de acordo com os dados das Tabelas B3 e B4 do anexo II.

Figura 22 - Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de $2,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

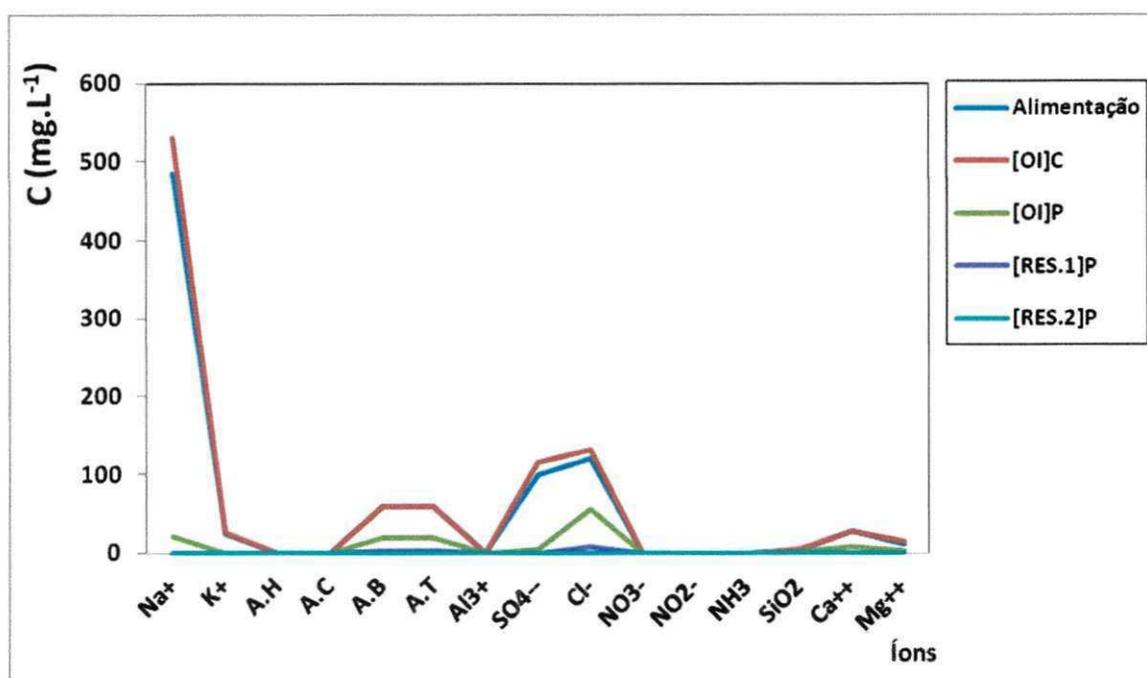
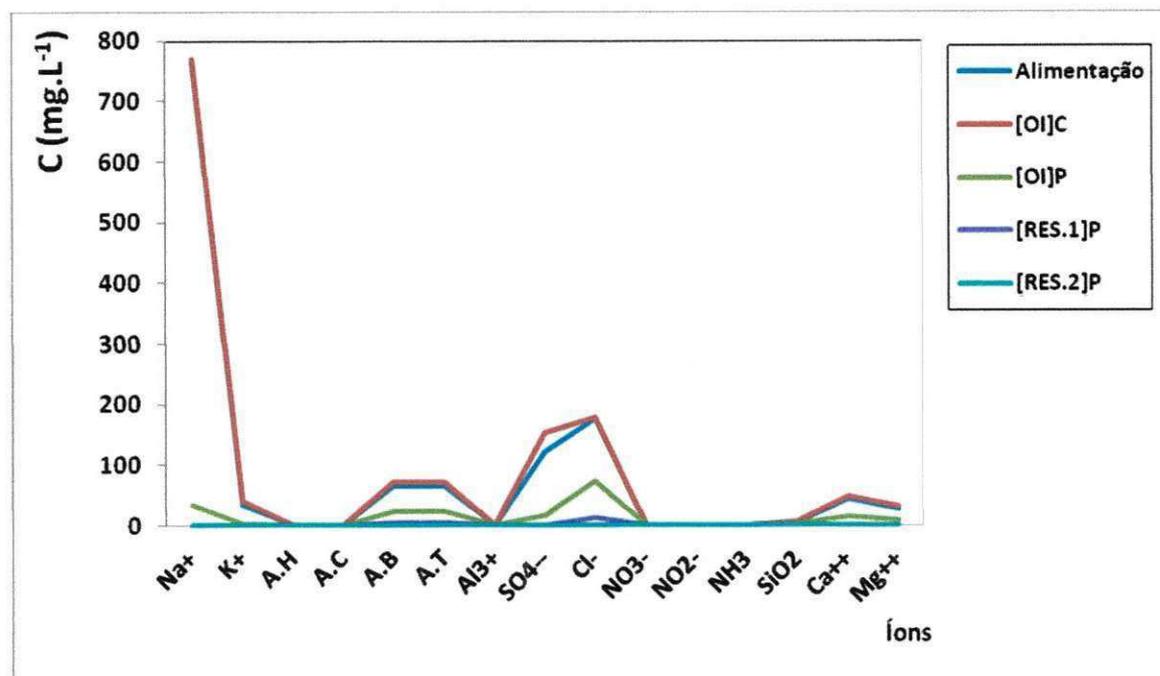


Figura 23 – Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

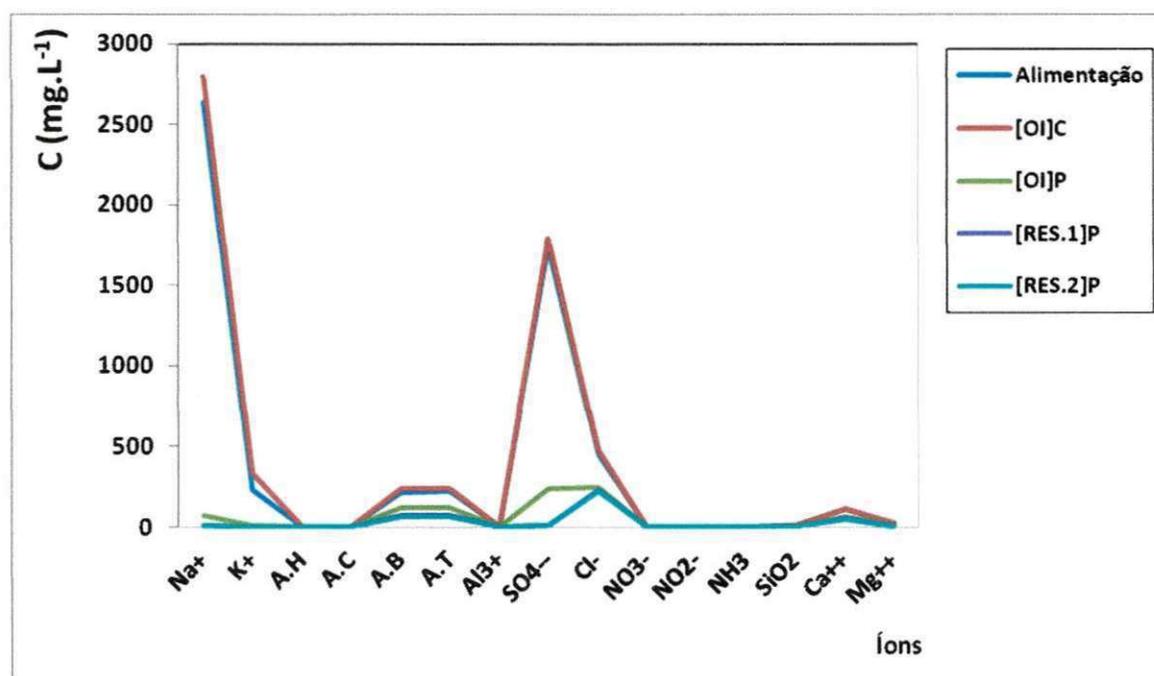


Nas Figuras 22 e 23 a maioria dos íons analisados apresenta concentração de sais iguais em relação às pressões antes da limpeza química, esse fato ocorreu devido à boa qualidade na água de alimentação, não apresentando uma elevada concentração de sais na superfície das membranas. Em todos os experimentos realizados, a qualidade de água produzida sempre apresentou dentro dos padrões de portabilidade para o consumo humano, sendo que a pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-1}$ obteve a melhor recuperação r (43,5%).

4.9 Concentração de sais presente na água no período de incrustação das membranas

A Figura 24 apresenta as concentrações de sais presentes na água de alimentação, concentrado, permeado, coluna de resina I e coluna de resina II, no período de incrustação das membranas, de acordo com os dados da Tabela B5 do anexo II.

Figura 24 – Concentração de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de $8,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.



Observou-se altas variações nas concentrações dos íons de cálcio, sulfato, alcalinidade total e do cloreto, estas variações são decorrência das mudanças de pressões trabalhadas, da própria eficiência da membrana e pela não ação do anti-incrustante aumentando o risco de precipitação destes sais na superfície da membrana prejudicando muito as colunas de resinas I e II, podendo com isso, contaminá-las.

4.10 Taxa de rejeição de sais

As Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram o perfil da taxa de rejeição de sais antes e após a limpeza química dos sistemas, onde a TRS (%) foi calculada através da Equação 13 presente no capítulo II e com os dados das tabelas B1, B2, B3 e B4 do anexo II.

Figura 25 – Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm⁻².

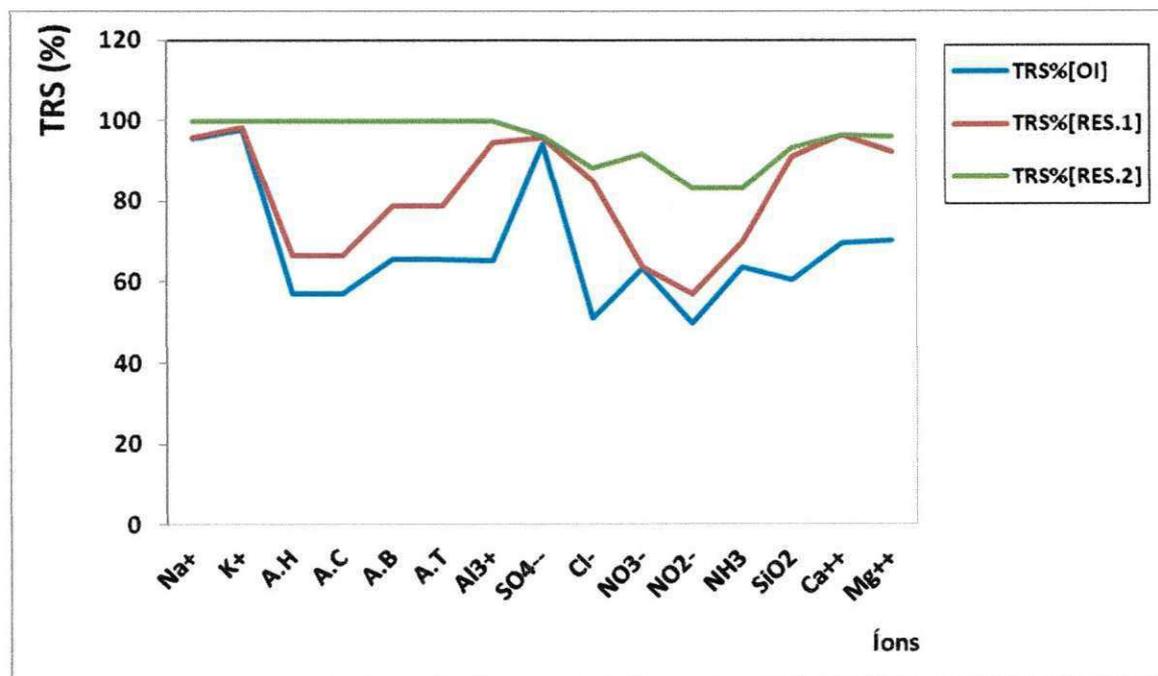


Figura 26 – Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de 2,2 kgf.cm⁻².

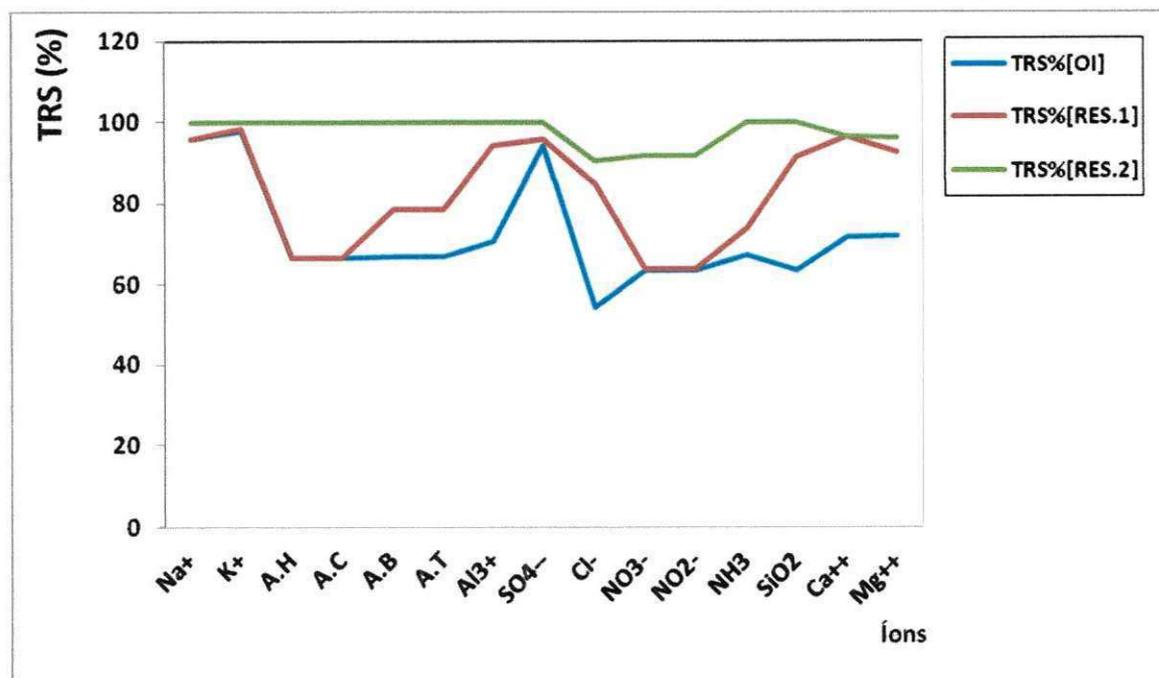


Figura 27 – Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

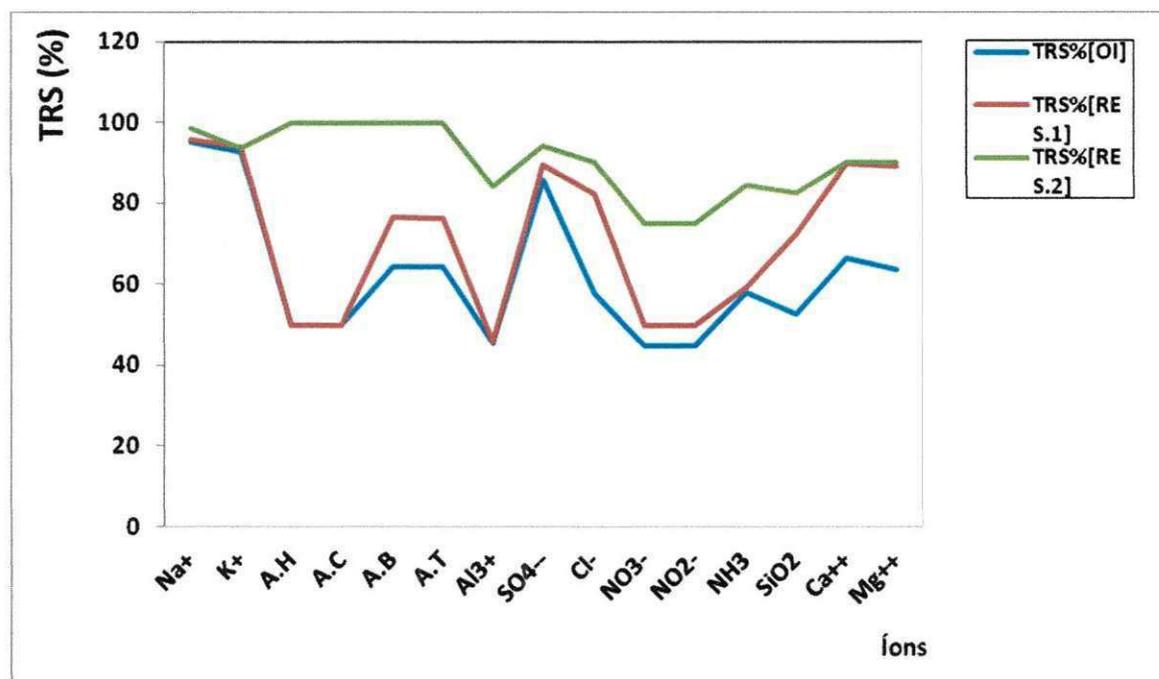
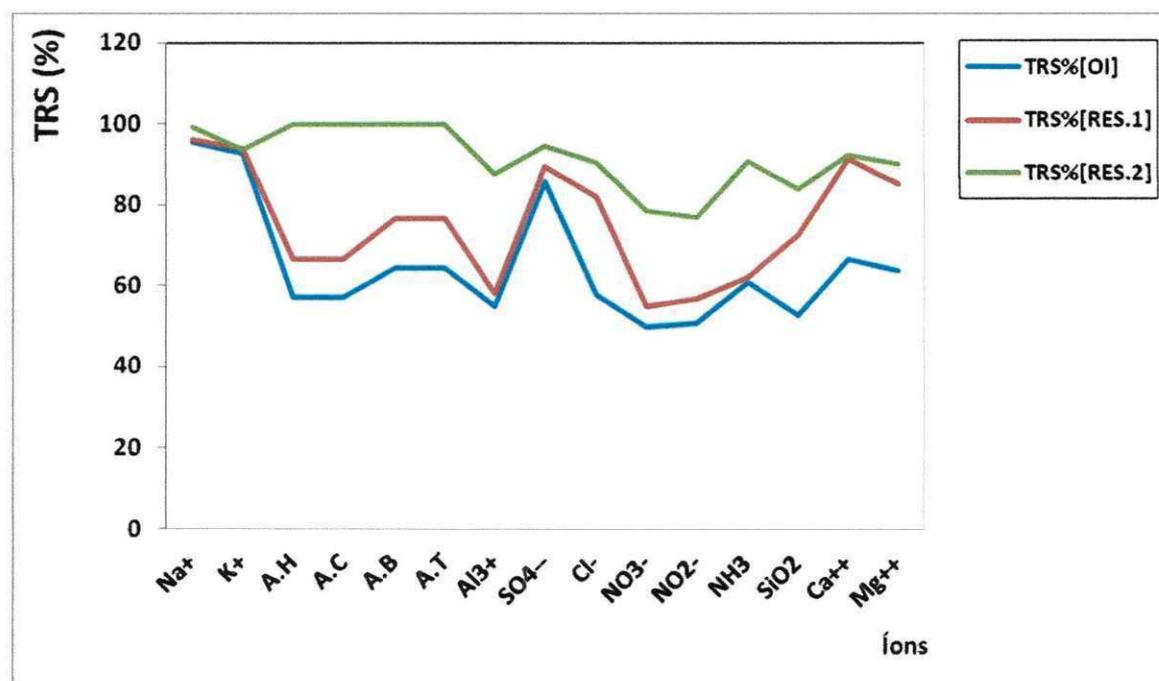


Figura 28 – Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.



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. Pode-se observar, pelas figuras acima, que o sistema composto de membrana-resina tem uma grande eficiência para tais estudos, tendo uma enorme capacidade na retirada de alguns sais em 100%, sendo estas águas utilizadas no tratamento de hemodiálises, em laboratórios, na obtenção de água pura para química fina, etc.

A rejeição faz parte do processo, considerando que a taxa na ordem de 100% para as colunas de resina I e resina II, indicando assim uma excelente rejeição de sais e uma grande eficiência dos sistemas de dessalinização de osmose inversa. Considerando que o processo de dessalinização é contínuo a tendência de incrustação de sais é aumentar com o tempo, caso não ocorra um programa periódico de limpeza química das membranas.

4.11 Taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas

As Figuras 29 e 30 mostram o perfil da taxa de rejeição de sais no período de saturação das membranas, de acordo com os dados da tabela B5 do anexo II.

Figura 29 – Perfil das membranas no período de incrustação, sob efeito da pressão de $8,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

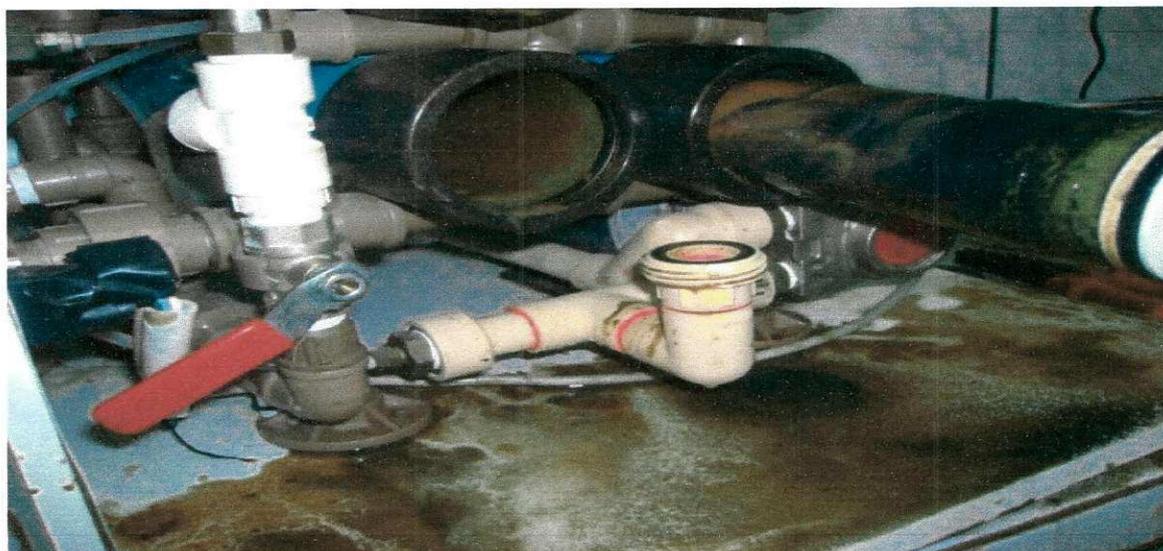
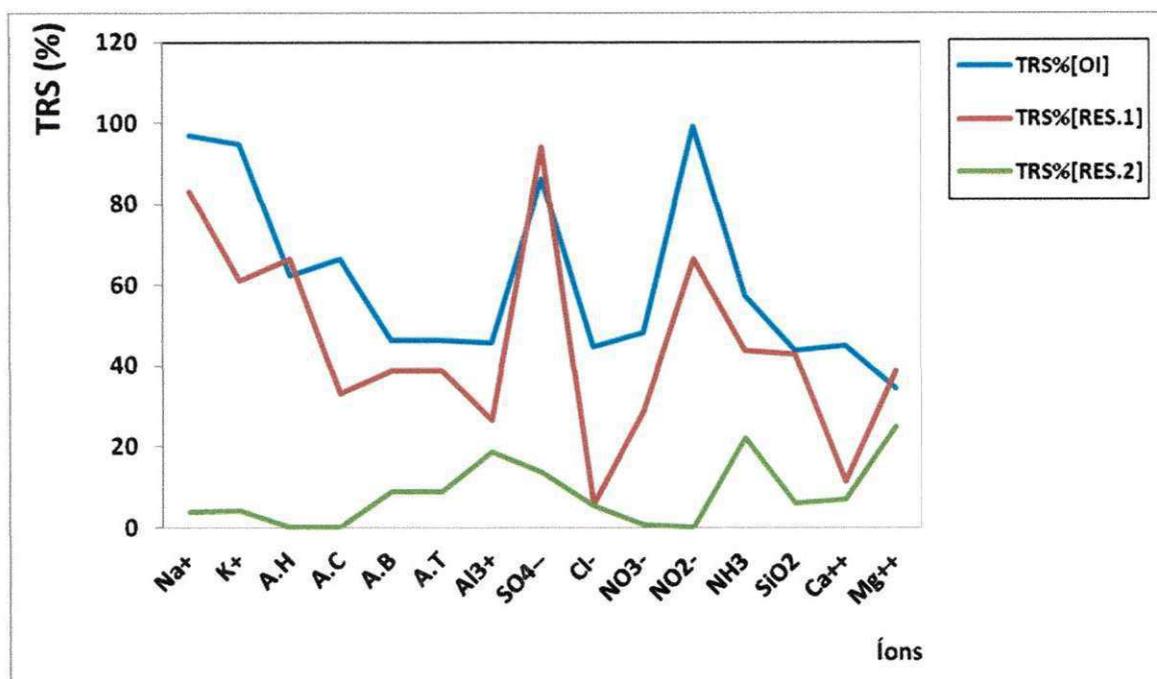


Figura 30 – Perfil da taxa de rejeição de sais de um sistema composto de membrana-resina no período de saturação das membranas, sob efeito da pressão de $8,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.



Pode-se observar uma baixa rejeição de sais na coluna de resina II, chegando no máximo a 30%, para praticamente todos os íons presentes no sistema, indicando assim uma péssima rejeição de sais e uma pequena eficiência dos sistemas de dessalinização de osmose inversa. Depois de exaurida a capacidade de troca das resinas trocadoras iônicas, analisaremos as etapas de regeneração como mostrado no Item 3.1.6.3.

4.12 Comportamento do potencial hidrogeniônico com o tempo antes e após a limpeza química

Para estudar o efeito do comportamento do potencial hidrogeniônico em função do tempo, foi tomado como exemplo o experimento com a pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$, pois foi apresentada a melhor recuperação r (43,5%) dentre as pressões estudadas. As Figuras 31 e 32 mostram o pH para a água de alimentação, permeado, concentrado, coluna de resina I e coluna de resina II. Os dados são referentes as Tabelas C1 e C2 do anexo III.

Figura 31 – Monitoramento do pH de um sistema compostos de membrana-resina antes da limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

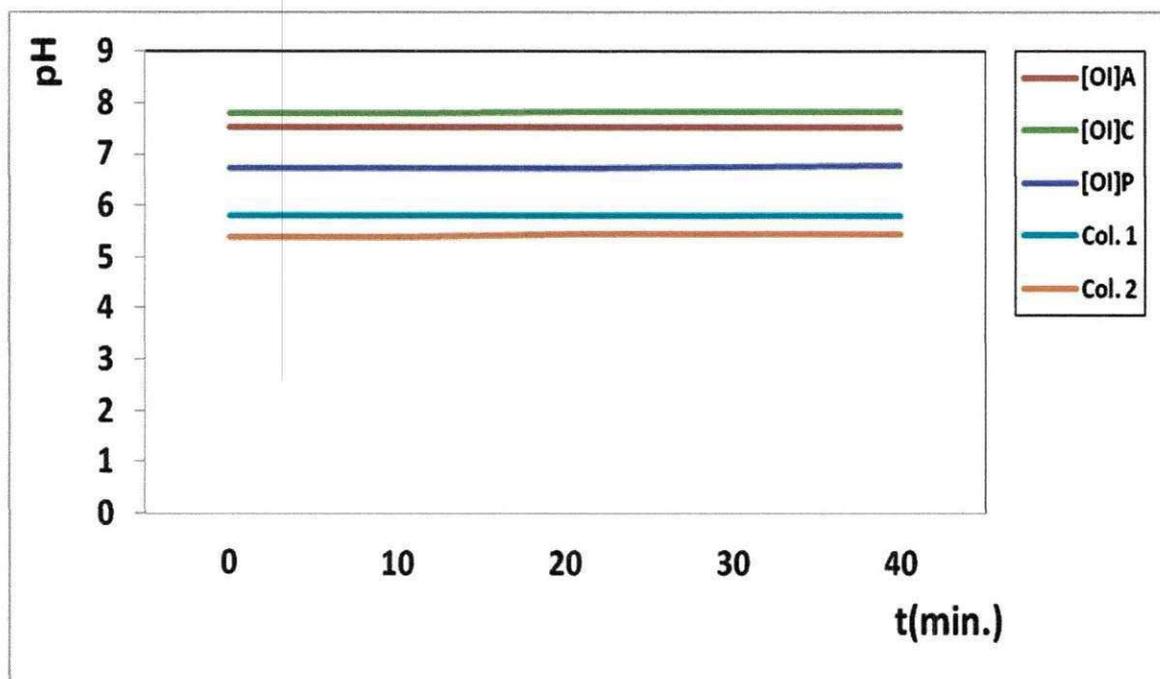
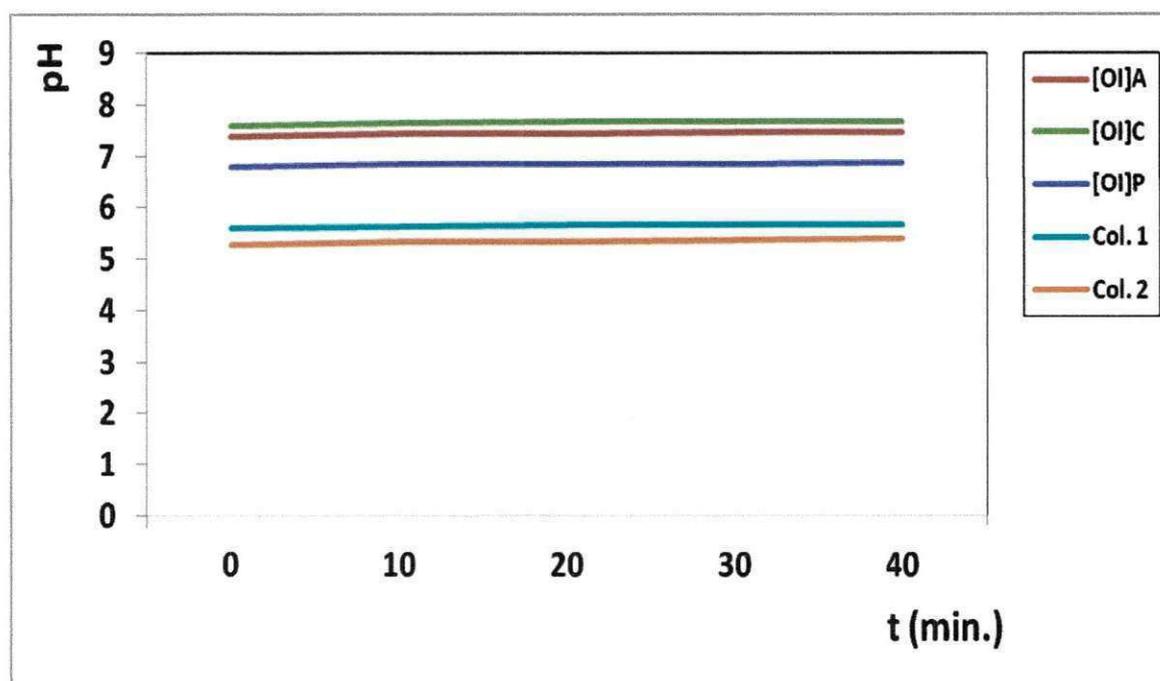


Figura 32 – Monitoramento do pH de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química, sob efeito da pressão de $6,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$.



Analisando o comportamento dos gráficos, observa-se que durante o tempo de operação as variações do pH para a alimentação, permeado,

concentrado, coluna de resina I e coluna de resina II durante os 40 minutos não houve praticamente nenhuma alteração de valores. Os valores do pH do permeado para os casos estudados foram inferiores aos do concentrado. Esse fato ocorre devido à separação dos sais dissolvidos na corrente de alimentação do sistema, isto é, a ausência de hidroxilas, carbonatos e bicarbonatos no permeado faz o pH diminuir, a presença destes no concentrado eleva o pH. As demais pressões trabalhadas tiveram comportamentos semelhantes.

Segundo Silveira (1999), a variação do pH entre o permeado e o concentrado, depende de diversos fatores como: tipo de elemento de membrana, pressão de operação do sistema, pressão osmótica, temperatura da solução de alimentação e outras substâncias de gênero coloidal.

4.13 Comportamento do pH e da condutividade elétrica no período de incrustação das membranas

Para estudar o efeito do comportamento do pH e da condutividade elétrica em função do tempo, foi tomado como exemplo o experimento com a pressão de 8,2 kgf.cm⁻² (pressão problema), conforme mostra as Figuras 33 e 34, para a água de alimentação, permeado, concentrado, coluna de resina I e coluna de resina II, os dados são referentes a Tabela C3 do anexo III.

Figura 33 – Monitoramento do pH de um sistema composto de membrana-resina, no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de 8,2 kgf.cm⁻².

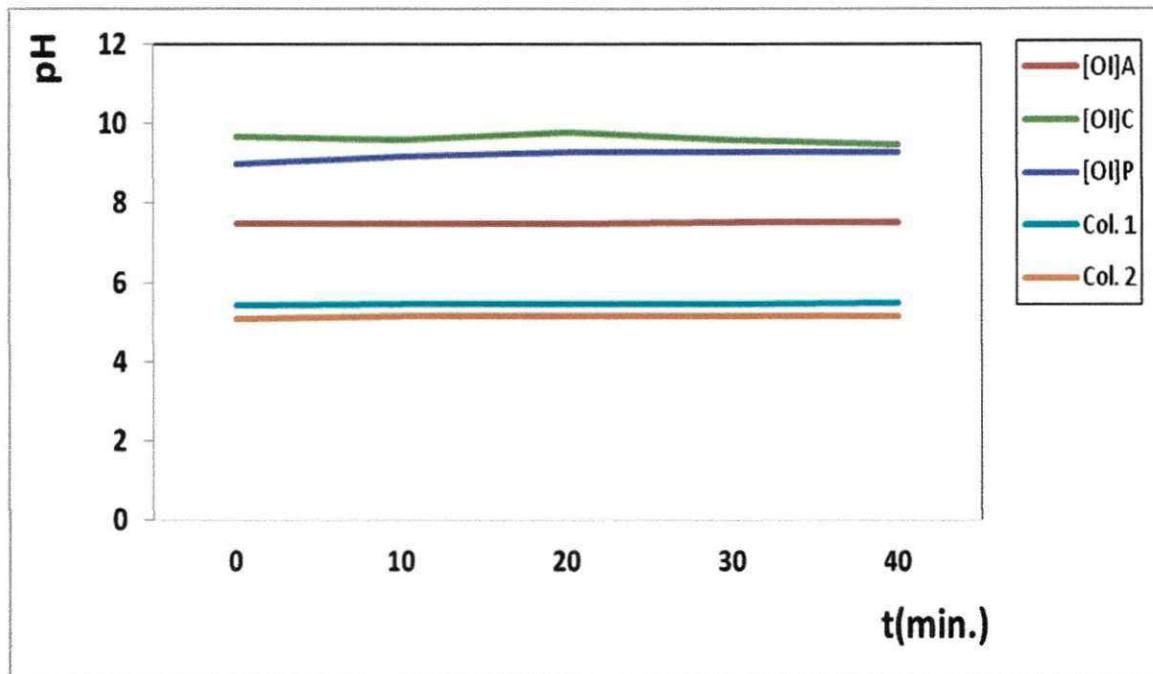
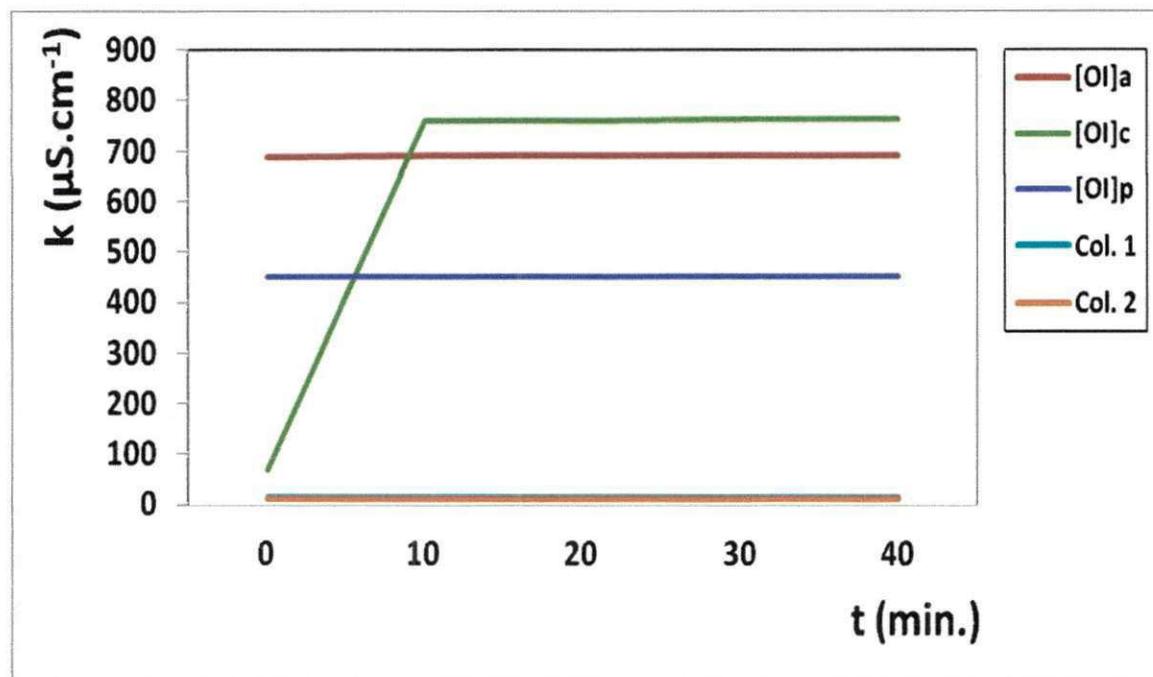


Figura 34 – Monitoramento da condutividade elétrica de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas, sob efeito da pressão de 8,2 kgf.cm⁻².



Analisando o comportamento dos gráficos 33 e 34, observa-se que durante o tempo de operação ocorreram altas variações do pH e da

condutividade elétrica em relação as outras pressões estudadas para a água de alimentação, permeado, concentrado, coluna de resina I e coluna de resina II. O sistema de troca iônica por leito misto requer cuidados especiais para sua regeneração, como a separação física das resinas, introdução de ácido e soda simultâneos e diferentes lavagem, para que se obtenha uma resina recuperada para obtermos um alto poder de troca, o que não ocorre neste caso, observando valores aproximados a $16\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ na coluna de resina II, necessitando de uma regeneração, como mostrado no Item 3.1.6.3.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

1. Observou-se na medida em que a pressão aumenta a vazão do permeado aumenta e a vazão do concentrado diminui, de maneira proporcional para ambos os casos.
2. A recuperação do sistema aumentou de forma linear com o aumento da pressão de operação, mantendo o mesmo comportamento para os diferentes tipos de pressões.
3. Observou-se que a variação do pH da solução de limpeza química aumentou duas vezes em relação ao pH inicial nos primeiros 15 minutos e após 60 minutos permaneceu constante para todos os casos estudados.
4. Após o procedimento de limpeza química com ácido cítrico e hidróxido de sódio, observou-se uma significativa melhora nos resultados finais referentes à condutividade elétrica e a taxa de rejeição de sais, chegando a valores de $62,3\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e 90,8%, respectivamente.
5. O pH e a condutividade elétrica diminuí consideravelmente após a regeneração de resinas de troca iônica, observou-se que no período de 30 a 80 minutos de operação o pH variou de 6,2 a 4,2 e a condutividade elétrica após 40 minutos tornou-se constante, chegando a $0,8\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, evidenciando a regeneração.
6. Foi observado que na pressão de $8,2\text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ houve um aumento nas concentrações de sais dos íons de cálcio, sulfato, alcalinidade total e cloreto, comparado com as demais pressões envolvidas no sistema de dessalinização de osmose inversa.
7. Pode-se observar uma baixa rejeição de sais na coluna de resina II, para uma pressão de $8,2\text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, chegando ao máximo a 30%, indicando uma pequena eficiência dos sistemas de dessalinização de osmose inversa, ao contrário das demais pressões, onde são observadas uma taxa de rejeição de 90% para maioria dos íons presentes.

8. Durante o monitoramento do sistema, ocorreram variações do pH e da condutividade elétrica, esta última, chegando a valores de $16\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ na coluna de resina II.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver um estudo para gerenciar o custo do consumo das resinas trocadoras iônicas em função da concentração iônica e de outros componentes presentes na água de alimentação.

Através da limpeza química de membrana desenvolver um estudo para verificar quais os sais mais comuns que ficam incrustados na superfície das membranas dos dessalinizadores.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AHMAD, M., ALEEM, F. A. A., MUTRI, A. e UBAISY, A., biofouling in RO membrane systems Part: Fundamentals and control, *Desalination*, vol. 132, pp. 173-179, 2000.

ALMEIDA, A.M., A Resina de Troca Iônica Como Extrator Multielementar em Análise de Solos Para Fins de Fertilidade. 1999. Dissertação (Mestrado no Instituto de Química, Departamento de Química Analítica), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 122p.

ALMEIDA, E. P., Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas. Campina Grande-PB, 2003.

AMJAD, Z. *Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications* Copyright, by Van Nostrand Reinhold, 1993. p. 9.

APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed., Washington, D.C: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1998.

AQUANET (<http://www.sattamini.com.br/tech/processo.htm>) (acessado em 31/05/2012).

BENNETT, P., Scale and deposit control for reverse osmosis systems, *Membrane Technology Conference Proceedings*, AWWA, New Orleans, LA, pp. 691-693, 1996.

BERGMAN, R., Cost of membrane softening in Florida. *J. AWWA*, vol. 88, pp. 32-43, 1996.

BRANDT, D.C., LEITNER, G.F LEITNET, W.E., *Reverse Osmosis membrane states of the art*, In Zahid Amjad (ed.), *Reverse Osmosis – Membrane Tecnology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>> Acesso em 01/06/2012.

CIENFUEGOS, F., VAITSMAN, D., *Análise Instrumental*, Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, 2000.

COCHRANE, E.L., LU, S., GIBB, S.W., VILLAESCUSA, I. A comparison of low-cost biosorbents and commercial sorbents for the removal of copper from aqueous media, *Journal of Hazardous Materials*, 2006.

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

DOW, Ion Exchange http://www.dow.com/liquidseps/prod/ix_apps.htm acessado em 06/06/2012.

DUDLEY, L. Y. e DARTON, E. G., Pretreatment procedures to control biogrowth and scale formation in membrane systems, *Desalination*, vol. 110, pp. 11-20, 1997.

EL-MANHARAWY, S. e HAFEZ, A., Molar ratios as a useful tool for predictions of scaling potencial incide RO systems. *Desalination*, vol. 136, pp. 243-254, 2001.

EBRAHIM, S., BOU-HAMED, S., ABDEL-JAWAD, M. and BURNEY, N., Microfiltration system as a pretreatment for RO units technical and economic assessment. *Desalination*, vol. 109, pp. 165-175, 1997.

FILHO, A. B. L., Estudo e desenvolvimento de um sistema de dessalinização via osmose inversa para pequenas comunidades, fazendo uso de painéis fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, Campina Grande-PB, 2000.

FILMTEC, *Filmtec reverse osmosis membranes technical manual*, Dow Chemical Company, 1998.

GAUWBERGEN, D. V. e BAEYENS, J., *Macroscopic fluid flow conditions in spiral-wound membrane elements*, *Desalination*, v 110, Issue 3, (1997), 287-299.

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

INORGAN, http://inorgan221.iq.unesp.br/quimgeral/experimental2/q_ger_exp_2s_em_3.html, acessado em 12/06/2012.

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

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Editora Átomo. Campinas, SP, 2ª edição, 2008. 444p.

LOZIER, J. C., JONES, G. e BELLAMY, W., *Integrated membrane treatment in Alaska*. *J. AWWA*, vol. 89, pp. 50-64, 1997.

MINDLER, A.B. e EPSTEIN, A.C., *Measurements and control in reverse osmosis desalinations*. *Desalination*, vol. 59, pp. 434-379, 1986.

Ministério da Saúde. *Portaria nº 2419/11*, Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

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

POHL, PAWEL, Application of Ion-Exchange Resins to The Fractionation of Metals in Water, *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 25, No. 1, 2006.

ROSBURG, R., Ultrafiltration (new technology) viable cost-saving pretreatment for reverse osmosis and nanofiltration – a new approach to reduce costs. *Desalination*, vol. 110, pp. 107-114, 1997.

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

SERDOLIT, <http://www.serva.de/products/knowledge/0711110.shtml>, acessado em 20/06/2012.

SHEIKHOESLAMI, R. e BRIGHT, J., Silica and metals removal by pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes. *Desalination*, vol. 143, pp. 225-267, 2002.

SILVA, J. I. S. Estudo da Regeneração de Resina Mista para fins de Desmineralização de Águas. 2007. Artigo (CNPq), Graduação em Engenharia Química – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

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

SILVEIRA, M.C., Avaliação de sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa. Campina Grande-PB, 1999.

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.

TAMURA, H., Theorization on ion-exchange equilibria: activity of species in 2-D phases, *Journal of Colloid and Interface Science*, 279 (2004) 1–22.

TODISCO, S., PEÑA, L., DRIOLI, E., TALLARICO, P., Analysis of the fouling mechanism in microfiltration of Orange juice. *Journal of the Food Processing and Preservation*, 20, 453-466, 1996.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed.,. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

VROUWENVELDER, J. S. and KOOIJ, D., Van der, Diagnosis, Prediction and prevention of biofouling of NF and RO membranes. *Desalination*, vol. 139, pp. 65-71, 2001.

KIM, C. G., YOON, T. I. and LEE, M. J., Characterization and control of foulants occurring from RO disc-tube-type, membrane treating, fluorine manufacturing, process wastewater. *Desalination*, vol. 151, pp. 283-292, 2002.

WIESNER, M. R., e APTEL, P., BUCKLEY, Mass transport and permeate flux and fouling in pressure-driven processes. In: Joel Mallevalle et al (eds.), *Water Treatment Membrane Processes*, pp. 4.1-4.30. Mc Graw Hill, New York, 1996.

ANEXO I

Dados Experimentais

O anexo I refere-se às tabelas de dados experimentais, informações adicionais obtida durante a realização do diagnóstico técnico, boletim técnico do sistema composto de membrana-resina para fins de produção de água de baixa condutividade elétrica, referentes ao sistema de dessalinização do LABDES, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – PB.

Tabela A1: Vazão do permeado e do concentrado em função da pressão para o sistema composto de membrana-resina (dados coletados em abril de 2011).

t (min.)	P (kgf.cm ⁻²)	Q _p (L.min ⁻¹)	Q _c (L.min ⁻¹)
0	2,2	1	5,5
10	3,6	1,4	4,5
20	6,2	2	2,6
30	8,2	2,5	1,2

Tabela A2: Variação do pH da solução usada durante a limpeza química dos elementos de membrana (dados coletados em maio de 2011).

t (min.)	pH
0	3
15	5,92
30	5,94
45	6,09
60	6,40

75	6,45
90	6,50

Tabela A3: Variação da condutividade elétrica da solução usada durante a limpeza química dos elementos de membrana (dados coletados em junho de 2011).

t (min.)	K ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
0	884
15	1001
30	1842
45	1859
60	1861
75	1870
90	1879

Tabela A4: Recuperação do sistema composto de membrana-resina em função da pressão de operação (dados coletados em julho de 2011).

P (kgf.cm^{-2})	r(%)
2,2	15,4
3,6	23,7
6,2	43,5
8,2	67,6

Tabela A5: Comportamento do pH com o tempo durante a regeneração da resina mista (dados coletados em agosto de 2011).

Tempo (min)	pH
0	7,1
10	6,8
20	6,6
30	6,2
40	5
50	4,5
60	4,2
70	4,2
80	4,2

Tabela A6: Variação da condutividade elétrica com o tempo durante o processo de regeneração da resina mista, dados coletados em setembro de 2011.

t (min.)	K ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
0	580
10	150
20	50
30	20
40	2
50	0,8
60	0,8

ANEXO II

Dados Experimentais

O anexo II refere-se aos parâmetros físico-químicos experimentais, obtidas durante a realização do diagnóstico técnico do sistema composto de membrana-resina antes e após a limpeza química e no período de incrustação das membranas, referentes ao sistema de dessalinização do LABDES, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – PB.

Tabela B1: Parâmetros físico-químicos de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química para uma pressão de 2,2 kgf.cm⁻² (amostras analisadas em 14/09/2011).

PARÂMETROS	MEMBRANAS					
	VMP*	ALI.	[OI] _c	[OI] _p	[RES.] _p	[RES.] _p
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho.cm}^{-1}$ a 25°C	---	680	730	185,2	1,05	0,6
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,0 a 9,5	7,44	7,41	7,02	5,4	4,8
Turbidez, (uT)	5,0	1,4	1,5	0,18	0,15	0,11
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co.L ⁻¹)	15,0	10	10	0	0	0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	27,4	27,6	8,3	0,29	0,01
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	12,1	14,3	3,6	0,27	0,01
Dureza Total (CaCO ₃), mg.L ⁻¹	500	119	128,5	36	0	0
Sódio (Na ⁺), mg.L ⁻¹	200	487	537,1	22	0,9	0
Potássio (K ⁺), mg.L ⁻¹	---	25	27,9	0,6	0,01	0
Alumínio (Al ³⁺), mg.L ⁻¹	0,2	0,52	0,56	0,18	0,01	0
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,05	0,06	0,01	0	0
Alcalinidade em Hidróxidos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,07	0,08	0,03	0,01	0
Alcalinidade em Carbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,07	0,08	0,03	0,01	0
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	58,4	58,8	20	4,2	0
Alcalinidade Total, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	58,54	58,96	20,06	4,22	0

Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg.L ⁻¹	250	98,5	116,3	5,8	0,25	0,01
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	---	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1
Cloreto (Cl ⁻), mg.L ⁻¹	250	116,4	131,4	57	8,5	1
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg.L ⁻¹	10	0,9	0,56	0,33	0,12	0,01
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg.L ⁻¹	1,5	0,56	0,59	0,28	0,12	0,02
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,3	0,55	0,57	0,2	0,06	0,01
Sílica (SiO ₂), mg.L ⁻¹	---	4,3	4,8	1,7	0,15	0,01
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	≤ 0	-0,88	-0,91	-2,16	-6,03	-5,57
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.000,00	842,6	931,8	127,5	16,9	12,8

VMP* – Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 1469/00 MS).

Tabela B2: Parâmetros físico-químicos de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química para uma pressão de 2,2 kgf.cm⁻² (amostras analisadas em 21/10/2011).

PARÂMETROS	VMP*	ALI.	MEMBRANAS			
			[OI] _c	[OI] _p	[RES.] _p	[RES.] _p
Condutividade Elétrica, µmho.cm ⁻¹ a 25°C	---	685	725	180,7	1	0,3
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,0 a 9,5	7,32	7,6	6,8	5,1	5
Turbidez, (uT)	5,0	2,3	2,52	0,13	0,1	0,08
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co.L ⁻¹)	15,0	5	5	0	0	0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	28	28,6	8	0,29	0,01
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	12,5	15,1	3,5	0,26	0,01
Dureza Total (CaCO ₃), mg.L ⁻¹	500	106	107,5	26,5	0	0
Sódio (Na ⁺), mg.L ⁻¹	200	485	530	21	0,85	0
Potássio (K ⁺), mg.L ⁻¹	---	25	27	0,58	0,01	0
Alumínio (Al ³⁺), mg.L ⁻¹	0,2	0,58	0,6	0,17	0,01	0
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,01	0,02	0	0	0
Alcalinidade em Hidróxidos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,09	0,1	0,03	0,01	0
Alcalinidade em Carbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,09	0,1	0,03	0,01	0
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	58,6	58,8	19,5	4,18	0
Alcalinidade Total, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	58,78	59	19,56	4,2	0

Sulfato (SO ₄ ²⁻), mg.L ⁻¹	250	99	115,9	5,75	0,24	0
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	---	0,1	0,3	0	0	0
Cloreto (Cl ⁻), mg.L ⁻¹	250	120	132	55	8,3	0,8
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg.L ⁻¹	10	0,9	0,56	0,33	0,12	0,01
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg.L ⁻¹	1,5	0,9	0,56	0,33	0,12	0,01
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,3	0,58	0,62	0,19	0,05	0
Sílica (SiO ₂), mg.L ⁻¹	---	4,5	5	1,65	0,14	0
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	≤ 0	-1,07	-0,8	-2,86	-6,41	-5,67
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.000,00	733,6	812,1	112,7	8,2	5,2

VMP* – Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 1469/00 MS).

Tabela B3: Parâmetros físico-químicos de um sistema composto de membrana-resina antes da limpeza química para uma pressão de 6,2 kgf.cm⁻² (amostras analisadas em 23/09/2011).

PARÂMETROS	VMP*	ALI.	MEMBRANAS		COLUNA1	COLUNA2
			[OI] _c	[OI] _p	[RES.] _p	[RES.] _p
Condutividade Elétrica, µmho.cm ⁻¹ a 25°C	---	721	839	189	1,2	0,8
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,0 a 9,5	7,31	7,57	6,72	5,8	5,4
Turbidez, (uT)	5,0	1,71	3	0,8	0,24	0,2
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co.L ⁻¹)	15,0	10	10	0	0	0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	45,1	50	15,05	1,51	0,15
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	28	33,1	10,2	1,1	0,11
Dureza Total (CaCO ₃), mg.L ⁻¹	500	152,5	167	50,5	7,5	6,5
Sódio (Na ⁺), mg.L ⁻¹	200	770	780	36	1,5	0,02
Potássio (K ⁺), mg.L ⁻¹	---	36,2	41,5	2,66	0,16	0,01
Alumínio (Al ³⁺), mg.L ⁻¹	0,2	0,64	0,72	0,35	0,19	0,03
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,07	0,07	0,04	0,03	0,02
Alcalinidade em Hidróxidos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,08	0,12	0,04	0,02	0
Alcalinidade em Carbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,08	0,12	0,04	0,02	0
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	66,8	74	23,8	5,6	0
Alcalinidade Total, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	66,96	74,24	23,88	5,64	0
Sulfato (SO ₄ ²⁻), mg.L ⁻¹	250	123,8	155	17,64	1,86	0,11
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	---	0,5	0,6	0	0	0
Cloreto (Cl ⁻), mg.L ⁻¹	250	179,65	190	76	13,51	1,31

Nitrato (NO ₃ -), mg.L ⁻¹	10	0,58	0,72	0,32	0,16	0,04
Nitrito (NO ₂ -), mg.L ⁻¹	1,5	0,58	0,72	0,32	0,16	0,04
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,3	0,76	0,9	0,32	0,13	0,02
Sílica (SiO ₂), mg.L ⁻¹	---	6,22	8,1	2,95	0,81	0,14
ISL (Índex de Saturação de Langelier)	≤ 0	-0,98	-0,6	-2,31	-4,44	-4,92
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.000,00	1.273,10	1.461,90	237	33,8	21,2

VMP* – Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 1469/00).

Tabela B4: Parâmetros físico-químicos de um sistema composto de membrana-resina após a limpeza química para uma pressão de 6,2 kgf.cm⁻² (amostras analisadas em 28/10/2011).

PARÂMETROS	VMP*	ALI.	MEMBRANAS			
			[OI] _c	[OI] _p	[RES.] _p	[RES.] _p
Condutividade Elétrica, µmho.cm ⁻¹ a 25°C	---	725	760	188	1,1	0,5
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,0 a 9,5	7,4	7,6	6,8	5,6	5,3
Turbidez, (uT)	5,0	1	2,8	0,7	0,16	0,14
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co.L ⁻¹)	15,0	5	5	0	0	0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	44,7	49	15	1,05	0,1
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	27,5	33	10	1,3	0,15
Dureza Total (CaCO ₃), mg.L ⁻¹	500	140	160	45	6	5
Sódio (Na ⁺), mg.L ⁻¹	200	765	770	34	1,35	0,01
Potássio (K ⁺), mg.L ⁻¹	---	35,5	41,3	2,63	0,16	0,01
Alumínio (Al ³⁺), mg.L ⁻¹	0,2	0,42	0,56	0,19	0,08	0,01
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,04	0,08	0,01	0	0
Alcalinidade em Hidróxidos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,07	0,07	0,03	0,01	0
Alcalinidade em Carbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,07	0,07	0,07	0,01	0
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	66,75	72	23,75	5,55	0
Alcalinidade Total, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	66,89	72,14	23,81	5,57	0
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg.L ⁻¹	250	123,6	154,8	17,62	1,85	0,1
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	---	0,4	0,5	0	0	0
Cloreto (Cl ⁻), mg.L ⁻¹	250	178	180	75,2	13,48	1,3
Nitrato (NO ₃ -), mg.L ⁻¹	10	0,62	0,62	0,31	0,14	0,03
Nitrito (NO ₂ -), mg.L ⁻¹	1,5	0,61	0,68	0,3	0,13	0,03

Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,3	0,74	0,85	0,29	0,11	0,01
Silica (SiO ₂), mg.L ⁻¹	---	6,15	7,8	2,91	0,8	0,13
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	≤ 0	-0,92	-1,4	-2,35	-5,01	-5,62
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.000,0	1.133,50	1.355,80	189,7	17,4	12,8

VMP* – Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 1469/00).

Tabela B5: Parâmetros físico-químicos de um sistema composto de membrana-resina no período de incrustação das membranas para uma pressão de 8,2 kgf.cm⁻² (amostras analisadas em 01/12/2011).

PARÂMETROS	VMP*	ALI.	MEMBRANAS		COLUNA1	COLUNA2
			[OI] _c	[OI] _p	[RES.] _p	[RES.] _p
Condutividade Elétrica, µmho.cm ⁻¹ a 25°C	---	690	760	450	16	12
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,0 a 9,5	4	5	3,6	3,4	3,1
Turbidez, (uT)	5,0	4	5	3,6	3,4	3,1
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co.L ⁻¹)	15,0	10	10	0	0	0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	115	115,4	63,2	56	52
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg.L ⁻¹	---	20	25,5	13,1	8	6
Dureza Total (CaCO ₃), mg.L ⁻¹	500	256	258	212,5	187,5	163
Sódio (Na ⁺), mg.L ⁻¹	200	2.636,40	2.799,70	76,4	12,7	12,2
Potássio (K ⁺), mg.L ⁻¹	---	231,8	333,2	12,1	4,7	4,5
Alumínio (Al ³⁺), mg.L ⁻¹	0,2	1,6	1,98	0,87	0,64	0,52
Ferro total, mg.L ⁻¹	0,3	0,08	0,09	0,04	0,02	0,02
Alcalinidade em Hidróxidos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,08	0,5	0,03	0,01	0,01
Alcalinidade em Carbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	0,09	0,45	0,03	0,02	0,02
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	220	240	118	72	65,6
Alcalinidade Total, mg.L ⁻¹ (CaCO ₃)	---	220,17	240,95	118,06	72,03	65,63
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg.L ⁻¹	250	1.745,20	1.791,50	240,5	13,9	12
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	---	1,8	2,5	1,2	1	1
Cloreto (Cl ⁻), mg.L ⁻¹	250	450	473,4	248,5	234,3	221,5
Nitrato (NO ₃ ⁻), mg.L ⁻¹	10	6	6,31	3,1	2,21	2,19
Nitrito (NO ₂ ⁻), mg.L ⁻¹	1,5	5	6,13	0,03	0,01	0,01
Amônia (NH ₃), mg.L ⁻¹	1,3	1,5	1,89	0,64	0,36	0,28
Silica (SiO ₂), mg.L ⁻¹	---	10	10,8	5,6	3,2	3

ISL (Índice de Saturação de Langelier)	≤ 0	1,19	1,37	0,4	0,05	0,04
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.000,00	5.128,00	5.487,60	808	429,5	401,7

VMP* – Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 1469/00).

ANEXO III

Dados Experimentais

O anexo III refere-se ao monitoramento de dados experimentais, da condutividade elétrica e do pH em função do tempo, antes e após a limpeza química das membranas de um sistema composto de membrana-resina referentes ao sistema de dessalinização do LABDES, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – PB.

Tabela C1: Monitoramento da condutividade elétrica e do pH de um sistema híbrido, membrana-resina, antes da limpeza química, para uma pressão de 6,2 kgf.cm⁻² (dados analisados em 23/09/2011).

TEMPO (min)	ALIMENTAÇÃO		CONCENTRADO		PERMEADO		COLUNA 1		COLUNA 2	
	k(μs.cm ⁻¹)	pH								
0	721	7,52	839	7,8	189	6,72	1,2	5,8	0,8	5,4
10	722	7,52	840	7,81	189	6,73	1,2	5,81	0,8	5,4
20	722	7,53	840	7,82	190	6,74	1,21	5,81	0,81	5,45
30	723	7,53	840	7,82	190	6,76	1,21	5,82	0,81	5,45
40	723	7,54	840	7,82	190	6,78	1,21	5,82	0,81	5,45

Tabela C2: Monitoramento da condutividade elétrica e do pH de um sistema híbrido, membrana-resina, após a limpeza química, para uma pressão de 6,2 kgf.cm⁻² (dados analisados em 28/10/2011).

TEMPO (min)	ALIMENTAÇÃO		CONCENTRADO		PERMEADO		COLUNA 1		COLUNA 2	
	k(μs.cm ⁻¹)	pH								
0	725	7,4	760	7,6	188	6,8	1,1	5,6	0,5	5,3
10	727	7,46	760	7,65	188,1	6,85	1,1	5,65	0,51	5,35
20	727	7,46	761	7,68	188,6	6,86	1,1	5,66	0,51	5,36
30	727	7,48	762	7,68	188,6	6,87	1,12	5,67	0,51	5,38
40	727	7,48	762,7	7,69	189	6,88	1,12	5,68	0,52	5,4

Tabela C3: Monitoramento da condutividade elétrica e do pH de um sistema híbrido, membrana-resina, no período de saturação das membranas, para uma pressão de 8,2 kgf.cm⁻² (dados analisados em 01/12/2011).

TEMPO (min)	ALIMENTAÇÃO		CONCENTRADO		PERMEADO		COLUNA 1		COLUNA 2	
	k(μs.cm ⁻¹)	pH								
0	690	8,8	70	8,9	450	8,6	16	6,2	12	6,1
10	691	8,8	761	8,9	450	8,7	16	6,3	12	6,1
20	691	8,9	762	9	451	8,5	16,1	6,3	12	6,1
30	692	8,9	764	9	451	8,5	16,1	6,3	13	6,2
40	692	8,9	764	9	451	8,5	16,1	6,4	13	6,2

ANEXO IV

- **Dados técnicos das membranas**

Operating Limits

- Membrane Type Polyamide Thin-Film Composite
- Maximum Operating Temperature 113°F (45°C)
- Maximum Operating Pressure 600 psig (41 bar)
- Maximum Pressure Drop 13 psig (0.9 bar)
- pH Range, Continuous Operation^a 2 - 11
- pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)^b 1 - 13
- Maximum Feed Silt Density Index (SDI) 5
- Free Chlorine Tolerance^c <0.1 ppm

^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.

^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

Important Information

Proper start-up of reverse osmosis water treatment systems is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage due to overfeeding or hydraulic shock. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved.

Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, loading of the membrane elements, instrument calibration and other system checks should be completed.

Please refer to the application information literature entitled "Start-Up Sequence" (Form No. 609-02077) for more information.

Operation Guidelines

Avoid any abrupt pressure or cross-flow variations on the spiral elements during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. During start-up, a gradual change from a standstill to operating state is recommended as follows:

- Feed pressure should be increased gradually over a 30-60 second time frame.
- Cross-flow velocity at set operating point should be achieved gradually over 15-20 seconds.
- Permeate obtained from first hour of operation should be discarded.

General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- If operating limits and guidelines given in this bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Maximum pressure drop across an entire pressure vessel (housing) is 30 psi (2.1 bar).
- Avoid static permeate-side backpressure at all times.

FILMTEC™ Membranes
For more information contact:
info@lenntech.com
www.lenntech.com
Tel. +31-15-261.09.00
Fax. +31-15-261.62.89

Notice: The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Notice: No freedom from any patent owned by Seller or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.





FILMTEC™ TW30-2514 Membranes
 FILMTEC Small Commercial Elements

Features

FILMTEC™ reverse osmosis (RO) elements offer the highest quality water for small commercial systems purifying less than one gallon per minute (0.2 m³/d) of RO water.

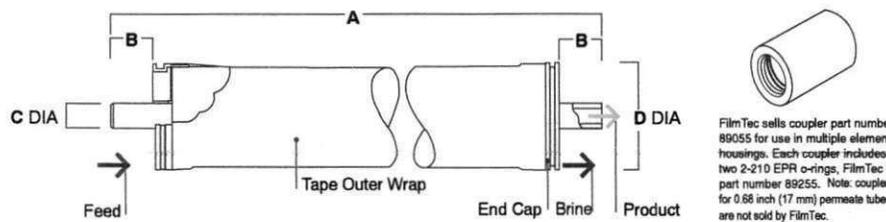
- FILMTEC membranes are available in a variety of sizes to meet a wide range of space requirements.
- FILMTEC XLE extra low energy elements operate at the lowest pressure in the industry, resulting in lower energy costs and enabling system builders to use lower cost components.
- In addition to the highest quality water and the lowest energy costs, FILMTEC membranes also deliver savings by providing the industry's longest lasting and most reliable performance.

Product Specifications

Product	Part Number	Active Area ft ² (m ²)	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
TW30-2026	80635	7 (0.7)	225 (15.5)	220 (0.83)	99.5
TW30-2514	80639	7 (0.7)	225 (15.5)	200 (0.76)	99.5
TW30-2521	80641	13 (1.2)	225 (15.5)	325 (1.23)	99.5
XLE-2521	154530	13 (1.2)	100 (6.9)	365 (1.38)	99.0
TW30-4014	80605	20 (1.9)	225 (15.5)	525 (1.99)	99.5
TW30-4021	80608	36 (3.3)	225 (15.5)	900 (3.41)	99.5
XLE-4021	154540	36 (3.3)	100 (6.9)	1,025 (3.88)	99.0

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: TW30 elements are tested on a 2,000 ppm NaCl feed stream, XLE performance based on a 500 ppm NaCl feed stream, pressure specified above, 77°F (25°C) and the following recovery rates: TW30-2026 – 10%, TW30-2521, XLE-2521, TW30-4021, XLE-4021 – 8%, TW30-2514, TW30-4014 – 5%.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.
3. For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.

Figure 1



Product	Maximum Feed Flow Rate gpm (m ³ /h)	Dimensions – Inches (mm)			
		A	B	C	D
TW30-2026 ¹	5 (1.1)	26.0 (660)	1.18 (30)	0.68 (17)	1.8 (46)
TW30-2514	6 (1.4)	14.0 (356)	1.19 (30)	0.75 (19)	2.4 (61)
TW30-2521	6 (1.4)	21.0 (533)	1.19 (30)	0.75 (19)	2.4 (61)
XLE-2521	6 (1.4)	21.0 (533)	1.19 (30)	0.75 (19)	2.4 (61)
TW30-4014	14 (3.2)	14.0 (356)	1.05 (27)	0.75 (19)	3.9 (99)
TW30-4021	14 (3.2)	21.0 (533)	1.05 (27)	0.75 (19)	3.9 (99)
XLE-4021	14 (3.2)	21.0 (533)	1.05 (27)	0.75 (19)	3.9 (99)

1. TW30-2026 has double o-rings on each end of the permeate tube. Couplers for 0.68 inch (17 mm) permeate tubes are not sold by FilmTec. 1 inch = 25.4 mm
2. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element systems.
3. TW30-2026 elements fit nominal 2.0 inch pressure vessels. TW30-2514, TW30-2521 and XLE-2521 elements fit nominal 2.5 inch I.D. pressure vessels. TW30-4014, TW30-4021, and XLE-4021 elements fit nominal 4 inch I.D. pressure vessels.