



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



**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE MEMBRANAS DE MICRO/NANO FILTRAÇÃO COM O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE ÁGUAS SALOBRAS DA COMUNIDADE DE URUÇU EM SÃO JOÃO DO CARIRI – PB.**

**FRANCISCO RUBENS MACEDO DE QUEIROZ**

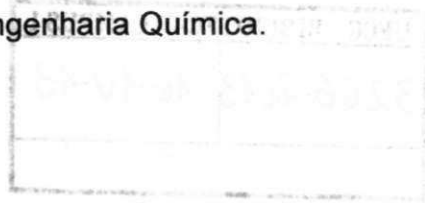
**ORIENTADOR: Prof. Kepler Borges França (Ph.D)**

**Campina Grande, Setembro de 2012**

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE MEMBRANAS DE MICRO/NANO FILTRAÇÃO COM O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE ÁGUAS SALOBRAS DA COMUNIDADE DE URUÇU EM SÃO JOÃO DO CARIRI – PB.**

**FRANCISCO RUBENS MACEDO DE QUEIROZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.



Área de Concentração: Recurso Regionais e Meio Ambiente  
Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França (Ph.D).

Campina Grande, Setembro de 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

Q384a Queiroz, Francisco Rubens Macedo de.

Avaliação e comparação do desempenho de um sistema de membranas de micro/nano filtração com o sistema de osmose inversa para diferentes níveis de concentração de sais de águas salobras da comunidade de Uruçu em São João do Cariri-PB / Francisco Rubens Macedo de Queiroz. - Campina Grande, 2012.

148f.: il., color.

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

Orientador: Prof. Ph.D Kepler Borges França.

Referências.

1. Processos de Membrana. 2. Membrana de Microfiltração. 3. Membrana de Nanofiltração. 4. Água Salobra. I. Título.

CDU 66.081(043)

**AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE MEMBRANAS DE MICRO/NANO FILTRAÇÃO COM O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE SAIS DE ÁGUAS SALOBRAS DA COMUNIDADE DE URUÇU EM SÃO JOÃO DO CARIRI – PB.**

**FRANCISCO RUBENS MACEDO DE QUEIROZ**

**Dissertação Aprovada em:**

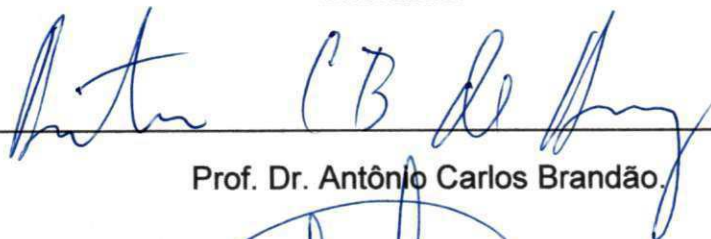
**BANCA EXAMINADORA:**



---

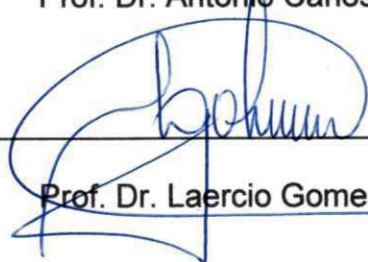
Prof. Kepler B. França (Ph.D).

Orientador



---

Prof. Dr. Antônio Carlos Brandão.



---

Prof. Dr. Laercio Gomes de Oliveira.

Campina Grande, Setembro de 2012



Feliz são aqueles que realizam  
seus sonhos! Mas sonhos estão  
aí para serem sonhados e  
realizados.

Queiroz, F. R. M. de

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me proporcionar mais uma conquista na vida, pois sem Deus não teria conseguido realizar o meu sonho de ser mestre.

A minha mãe Josefa Maria de Macedo Queiroz e minha esposa Antônia Cruz Santana de Queiroz, por sempre acreditarem em mim e por me incentivarem nos meus estudos.

Ao meu pai José Wilson de Freitas Queiroz que não mais se encontra comigo, mas que deve está orgulhoso por eu ter realizado este sonho.

Aos meus irmãos Francisco Kleber de Macedo Queiroz, Francisca Ailsa Macedo de Queiroz, por estarem sempre ao meu lado incentivado para realização dessa conquista.

Ao Prof. Kepler Borges França (Ph.D) pelo ensino, pela sua exigência e perfeição nos objetivo que se tem a fazer.

Ao meus amigos Valéria Kelly, José Theódulo, Rodrigo Vieira, Maniza Sofia, Raniere Henrique, Emilly Laysa, João Utemberg e Rafael Felipe, pessoas que me ajudaram e participaram da minha vida no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES).

Ao programa CAPES por proporcionar os recursos necessários na manutenção do meu mestrado.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFCG.

## RESUMO:

O processo de membranas no tratamento de água vem sendo uma das alternativas na produção de água potável para beneficiar as comunidades nas regiões Semi-árido do Nordeste brasileiro. O presente trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de um sistema de tratamento de águas com membranas de microfiltração (MF) e nanofiltração (NF), visando avaliar seu potencial de dessalinização e comparar a qualidade do seu permeado com o do sistema de osmose inversa. O sistema contará com dois elementos de membranas, sendo um de nanofiltração modelo NF90 – 4040 da *Dow Chemical Company – Filmtec*, com área de 7,6 m<sup>2</sup> e o outro por uma membrana de microfiltração na forma de fibras ocas com dimensão de 0,95 mm de diâmetro e 14 m<sup>2</sup> de área, de capacidade de produção de 500 L/h e 250 L/h, respectivamente. O uso de um sistema de pré-tratamento bem escolhido é um elemento chave para evitar incrustações em nanofiltração. Entre as diferentes possibilidades para sistemas de pré-tratamento, microfiltração surge como a mais compatível com a (NF). O estudo foi executado em oito partes com uma duração de 2 h para cada experimento em um intervalo de 10 em 10 min, coletando as amostras da alimentação, concentrado e permeado do sistema. A título de comparação do desempenho com o sistema de osmose inversa, foi escolhido uma água salobra de poço, com um TDS igual a 2479,7 mg/L, a qual vem sendo dessalinizada por um sistema de osmose inversa localiza na comunidade de Uruçu no município de São João do Cariri – PB. Os perfis de concentrações de sais do sistemas de micro – nanofiltração e de osmose inversa foi feita através das análises físico-químicas, obtendo em média uma taxa de rejeição de cálcio de 82,74% no permeado do sistema de micro – nanofiltração e para osmose inversa a taxa de rejeição de 99%. Observou-se que a limpeza química é uma das etapas de manutenção que procura manter a produção e a qualidade do permeado dentro dos padrões de qualidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Membrana de microfiltração, membrana de nanofiltração, água salobra.

## ABSTRACT

The membranes processing during water treatment has been one of the alternatives for production of drinkable water for the benefit of communities in semi-arid regions of Northeastern Brazil. The objective of this work is studying the performance of a system of water treatment with membranes of microfiltration (MF) and nanofiltration (NF), in order to access their desalination potential and to compare their permeated quality with that of the reverse osmosis system. The system will contain two membranes elements, one of those is a *Dow Chemical Company – Filmtec* model NF90 – 4040 with an area of 7,6 m<sup>2</sup>, and the other is composed of a microfiltration membrane made of hollow fibers with measures of diameter 0,95 mm and area of 14 m<sup>2</sup>, whose capacity of production are of 500 L/h and 250 L/h, respectively. The use of a well-chosen pre-treatment system is a key element to prevent incrustations in nanofiltration. Among the different possibilities of pre-treatment systems, microfiltration arises as the most compatible with (NF). The study was carried out in eight parts with a 2 h duration for each part at intervals of 10 minutes when were collected samples of the feeding, concentrated and permeated from the system. As an instance of comparison with the reverse osmosis system, a salty water well was chosen, with a 2479,7 mg/L TDS, has been being desalinated by a reverse osmosis system located at the village of Uruçu, in São João do Cariri – PB. The salt concentration profiles of the micro – nanofiltration and reverse osmosis systems were done through physico-chemical analysis reaching an average rejection rate for calcium of 82,74% in the micro – nanofiltration system and a rejection rate of 99% for reverse osmosis. It was observed that the chemical purity is a maintenance step which is searched for keeping the quality and production of the permeated within the acceptable established standards.

**Key – Words:** microfiltration membranes, nanofiltration membranes, salty water.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I .....	16
1.1 Introdução .....	16
1.2 OBJETIVO .....	22
1.2.1 – Objetivo Geral .....	22
1.2.2 – Objetivos Específicos .....	22
CAPÍTULO II .....	23
2. Fundamentos Teóricos .....	23
2.1 Microfiltração .....	24
2.2. Ultrafiltração .....	27
2.2.1 Aplicações da Ultrafiltração .....	29
2.3 Nanofiltração .....	29
2.3.1 Produção de água com membranas de nanofiltração .....	31
2.4 Osmose inversa (OI) .....	33
2.4 Aplicações das membranas ao tratamento de água para consumo humano .....	36
2.5 Desinfecção Química .....	40
2.6 Incrustações .....	43
2.6.1 Indicadores de Incrustações .....	44
2.6.2 Índice de densidade de sedimentos .....	47
2.6.3 Índice de saturação de Langelier .....	49
2.7 Pré – tratamento .....	52
2.8 Limpeza Química de Membranas .....	54
2.9 Principais variáveis no processo de dessalinização .....	55
2.9.1 Recuperação do sistema .....	55
2.9.2 Taxa de rejeição de sais .....	56
2.9.3 Passagem de sais .....	56
2.9.4 Pressão osmótica de uma solução iônica .....	57
2.9.5 Fluxo do permeado e do concentrado .....	58
2.9.6 Análises físico-químicas da água .....	60
2.9.7 Parâmetros físicos .....	61
2.9.7.1 Cor .....	61

2.9.7.2 Turbidez .....	61
2.9.7.3 Condutividade elétrica .....	61
2.9.8 Parâmetros Químicos .....	62
2.9.8.1 pH .....	62
2.9.8.2 Dureza em cálcio e magnésio .....	62
2.9.8.3 Cloreto .....	63
2.9.8.4 Alcalinidade.....	63
2.9.8.5 Sílica .....	64
2.9.8.6 Ferro total.....	64
2.9.8.7 Sulfato .....	64
2.9.8.8 Nitrogênio.....	65
2.9.8.9 Amônia.....	65
2.9.8.10 Alumínio .....	65
2.9.8.11 Sódio e Potássio .....	66
2.10 Qualidade da água e análises físico-químicas .....	66
2.11 Dessalinizador da Comunidade de Uruçu – São João do Cariri - PB.....	68
CAPÍTULO III .....	69
3. Materiais e Métodos .....	69
3.1 Descrição do Sistema de Micro e Nano Filtração .....	69
3.2 Reagente químicos utilizados.....	73
3.3 Instrumentação.....	74
3.4 Diagrama de bloco do sistema .....	75
3.5 Procedimento Experimental.....	75
3.6 Métodos Analíticos .....	77
3.6.1 Parâmetros físicos .....	77
3.6.1.1 Cor .....	77
3.6.1.2 Turbidez.....	77
3.6.1.3 Condutividade elétrica .....	78
3.6.2 Parâmetros Químicos .....	78
3.6.2.1 pH .....	78
3.6.2.2 Dureza em cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) .....	78
3.6.2.3 Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ).....	79
3.6.2.4 Alcalinidade.....	79
3.6.2.5 Sílica .....	80

3.6.2.6 Ferro total.....	80
3.6.2.7 Sulfato.....	81
3.6.2.8 Nitrato.....	81
3.6.2.9 Nitrito.....	81
3.6.2.10 Amônia.....	82
3.6.2.11 Alumínio.....	82
3.6.2.12 Sódio e potássio.....	82
3.7 Índice de Densidade de Sedimentos e Índice de Saturação de Langelier.....	83
3.8 Taxa de Rejeição de Sais, Passagem de Sais e Recuperação do Sistema.....	84
3.10 Balanço de massa do sistema.....	84
CAPÍTULO IV.....	87
<b>4. Resultados e Discussão</b> .....	<b>87</b>
4.1 Análises de Pressões.....	88
4.2 Análises das Vazões.....	91
4.3 Análises da Taxa de Rejeição de Sais (TRS).....	93
4.4 O estudo do comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas. .....	96
4.5 O estudo do comportamento da temperatura do sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas. ....	97
4.6 O estudo do comportamento da pressão osmótica da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração. ....	98
4.7 O estudo do comportamento do coeficiente de transferência de massa da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração. ....	99
4.8 Balanço de massa das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.....	101
4.9 Determinação Índice de Densidade de Sedimentos (IDS).....	101
4.10 Limpeza Química do sistema de micro e nanofiltração.....	102
CAPÍTULO V.....	108
5. Conclusões.....	108
CAPÍTULO VI.....	110
6. Perspectivas.....	110
CAPÍTULO VII.....	111
<b>7. Principais Referência Bibliográfica</b> .....	<b>111</b>
ANEXOS.....	115
ANEXO A. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.....	116



ANEXO B. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS VAZÕES DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA. ....	119
ANEXO C. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS TAXAS DE REJEIÇÕES DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA. ....	122
ANEXO D. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO pH E DA TEMPERATURA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO . ....	126
ANEXO E. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO OSMÓTICA E DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO . ....	129
ANEXO F. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO. ....	132
ANEXO G. RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA. ....	134
ANEXO H. METODOLOGIA SOBRE A LIMPEZA QUÍMICA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO. ....	138
ANEXO I. VALORES DOS RESULTADOS SOBRE A LIMPEZA QUÍMICA NO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO. ....	141
ANEXO J. LAUDO TÉCNICO DAS MEMBRANAS DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO. ....	144

## Índice de Figuras

Figura 01. Classificação das membranas quanto à morfologia.	19
Figura 02. Representação da seção transversal das diferentes morfologias de membranas sintéticas.	19
Figura 03. Processo de separação por membranas – força motriz e transporte em membranas porosas e densas.	20
Figura 04. Representação esquemática do processo de separação por membranas.	22
Figura 05. Principais características das técnicas de separação com membranas que utilizam diferença de pressão.	25
Figura 06. Características básicas da ultrafiltração.	30
Figura 07. Módulo de membrana espiral.	33
Figura 08. Fluxo Osmótico.	36
Figura 09. Equilíbrio Osmótico.	36
Figura 10. Osmose Inversa.	36
Figura 11. Membrana espiral de osmose inversa.	37
Figura 12. Substâncias com potencial de danificar membranas.	46
Figura 13. Micrografia ótica de óxido de ferro e cristais de sulfeto de cálcio hidratado (250x).	47
Figura 14. Eletro-micrografia de sílica (5.000 x).	47
Figura 15. Eletro-micrografia de argila (5.000 x).	48
Figura 16. Eletro-micrografia de cristais de sulfato de cálcio.	48
Figura 17. Eletro-micrografia de quatro componentes (argila, óxido de ferro, sílica e cristais de sulfato de cálcio e miliporos de filtro (250 x).	48
Figura 18. Equipamento básico para medida do IDS49	49
Figura 19. Sistema composto por microfiltração seguida de nanofiltração.	72
Figura 20. Tanque de alimentação.	73
Figura 21. Tanque do permeado.	73
Figura 22. Bomba da alimentação do sistema.	73
Figura 23. Bomba da retrolavagem do sistema.	73
Figura 24. Bomba da alimentação da nanofiltração.	74
Figura 25. Módulo do filtro de polipropileno expandido.	74
Figura 26. Módulo do filtro do tipo Car Block.	74
Figura 27. Módulo de membrana de microfiltração.	74
Figura 28. Módulo de membrana de nanofiltração.	74
Figura 29. Manômetros do sistema.	75
Figura 30. Diagrama de blocos do sistema de micro/nanofiltração LABDES.	77
Figura 31. Fluxograma do processo.	88
Figura 32. Comportamento das pressões do sistema de micro/nanofiltração.	90
Figura 33. Comportamento das pressões do sistema de osmose inversa.	91
Figura 34. Comparação das pressões dos dois sistemas.	92

Figura 35. Comportamento das vazões do sistema de micro/nanofiltração.	93
Figura 36. Comportamento das vazões do sistema de osmose inversa.	94
Figura 37. Comparação das vazões dos dois sistemas.	95
Figura 38. Taxa de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração.	96
Figura 39. Taxa de rejeição de sais do sistema de osmose inversa.	96
Figura 40. Comparação das taxas de rejeição de sais dos dois sistemas.	97
Figura 41. Comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração.	98
Figura 42. Comportamento da temperatura do sistema de micro/nanofiltração.	99
Figura 43. Comportamento da pressão osmótica do sistema.	101
Figura 44. Comportamento do coef.de transferência de massa do sistema	102
Figura 45. Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH na alimentação da membrana de microfiltração.	104
Figura 46. Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH no concentrado da membrana de microfiltração.	105
Figura 47. Comportamento da limpeza química com a solução de $H_8C_5O_7$ na alimentação da membrana de microfiltração.	106
Figura 48. Comportamento da limpeza química com a solução de $H_8C_5O_7$ no concentrado da membrana de microfiltração.	106
Figura 49. Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH na alimentação da membrana de nanofiltração.	107
Figura 50. Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH no concentrado da membrana de nanofiltração.	107
Figura 51. Comportamento da limpeza química com a solução de $H_8C_5O_7$ na alimentação da membrana de nanofiltração.	108
Figura 52. Comportamento da limpeza química com a solução de $H_8C_5O_7$ no concentrado da membrana de nanofiltração.	109

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1. Porosidade de membranas e pressões de operação usuais em PSM.	9
Tabela 2. Apresentação das vantagens e desvantagens dos tipos de desinfetantes mais utilizados.	21
Tabela 3. Compostos que oferecem risco para a formação de precipitado	31
Tabela 4. Constantes de conversão de condutividade para concentração.	43

## Simbologia

<b>C<sub>a</sub></b>	concentração da alimentação (mg/L)
<b>C<sub>c</sub></b>	concentração do concentrado (mg/L)
<b>C<sub>p</sub></b>	concentração do permeado (mg/L)
<b>cm</b>	centímetros
<b>I</b>	força iônica
<b>K<sub>a</sub></b>	condutividade elétrica da alimentação (mS/cm)
<b>K<sub>c</sub></b>	condutividade elétrica do concentrado (mS/cm)
<b>K<sub>p</sub></b>	condutividade elétrica do permeado (mS/cm)
<b>pH</b>	potencial hidrogeniônico
<b>pH<sub>c</sub></b>	potencial hidrogeniônico do concentrado
<b>pH<sub>p</sub></b>	potencial hidrogeniônico do permeado
<b>pH<sub>s</sub></b>	potencial hidrogeniônico de saturação
<b>r</b>	recuperação do Sistema (%)
<b>uT</b>	unidade de tubidez
<b>uH</b>	unidade de cor
<b>mg/L</b>	miligrama por Litro
<b>kgf/cm<sup>2</sup></b>	kilograma força por centímetros quadrados
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	metros cúbicos por hora
<b>mS</b>	milisiemens
<b>μs</b>	microsiemens
<b>MF</b>	membrana de microfiltração
<b>NF</b>	membrana de nanofiltração
<b>OI</b>	osmose inversa
<b>[MF]<sub>A</sub></b>	concentração da alimentação da membrana de microfiltração (mg/L)
<b>[MF]<sub>C</sub></b>	concentração do concentrado da membrana de microfiltração(mg/L)
<b>[MF]<sub>P</sub></b>	concentração do permeado da membrana de microfiltração (mg/L)
<b>[NF]<sub>A</sub></b>	concentração da alimentação da membrana da nanofiltração (mg/L)
<b>[NF]<sub>C</sub></b>	concentração da alimentação da membrana da nanofiltração (mg/L)
<b>[NF]<sub>P</sub></b>	concentração da alimentação da membrana da nanofiltração (mg/L)

## CAPÍTULO I

### 1.1 Introdução

O avanço tecnológico ocorrido ao longo das últimas décadas colocou no mercado processos alternativos de tratamento de água como, por exemplo, os processos de separação por membranas, que inclui a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração, a osmose inversa e a eletrodialise.

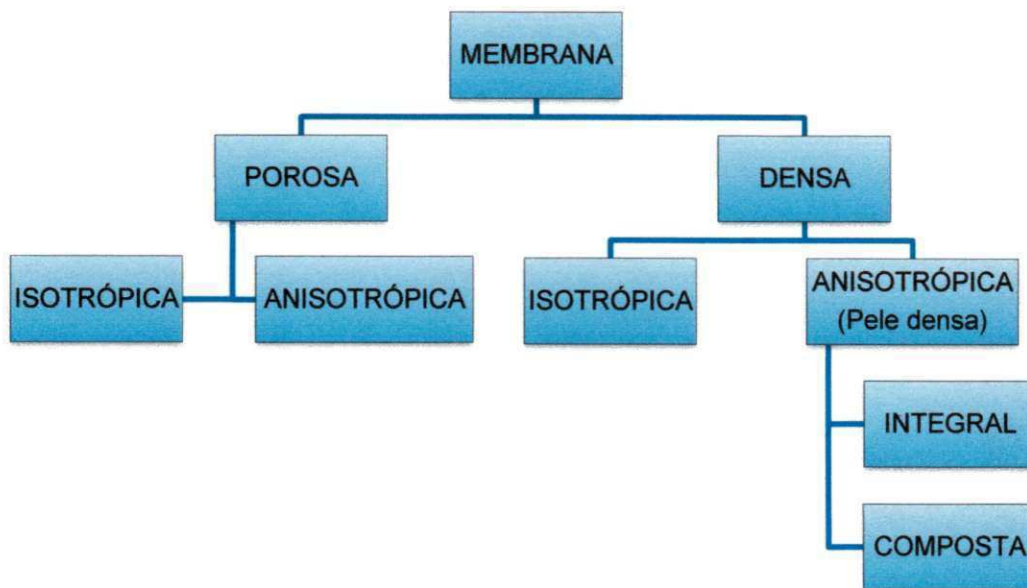
Atualmente, em decorrência da degradação dos recursos hídricos e a dificuldade de manter a água potável por meio das tecnologias de tratamento convencional, a utilização dos processos de separação por membranas passa a ser a opção de tratamento para a produção de água potável. Isto já é observado em vários países da Europa, dos Estados Unidos e na China, além de outros países, onde as pesquisas e estudos sobre esta tecnologia têm avançado muito (JACANGELO; TRUSSELL; WATSON, 1997).

A partir do início da década de 1970, em adição aos processos clássicos de separação como destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente, cristalização e outros, surge uma nova classe de processos que utilizam membranas sintéticas como barreira seletiva. As membranas sintéticas surgem como uma tentativa de se imitar as membranas naturais, em particular quanto as suas características únicas de seletividade e permeabilidade (HABERT, *et al.*, 2006).

As membranas sintéticas comerciais, em sua grande maioria, são preparadas a partir de materiais poliméricos com características químicas e físicas as mais variadas. Membranas de materiais inorgânicos são produzidas há mais de 20 anos, mas só recentemente começam a disputar o mercado com as membranas poliméricas. As membranas inorgânicas apresentam uma vida útil maior e facilidade de limpeza, mas são bem mais caras que as poliméricas (HABERT, *et al.*, 2006).

De uma maneira geral, as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas, de acordo com a Figura 01 a seguir:

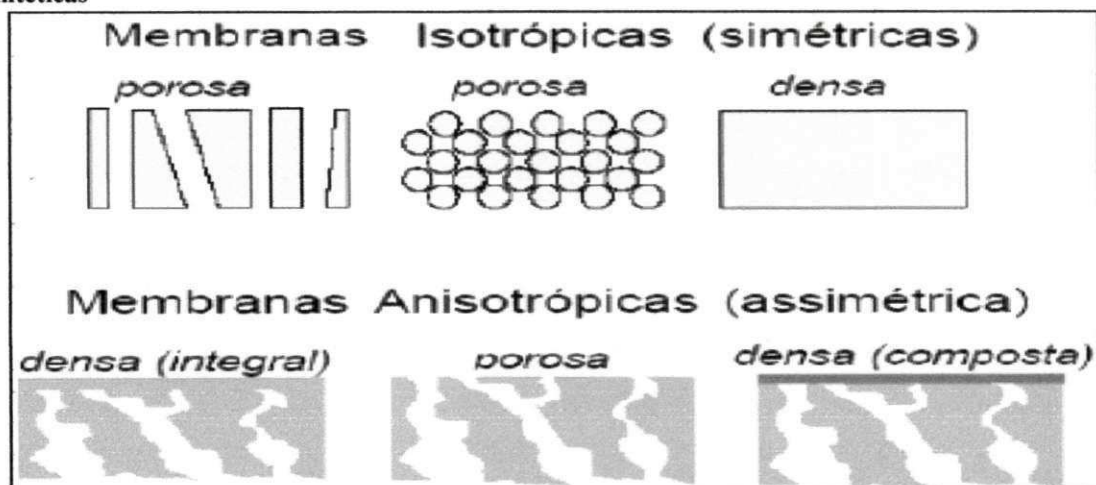
**Figura 01: Classificação das membranas quanto à morfologia**



Fonte: LABDES/2012

Tanto as membranas densas como as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura (HABERT, *et al.*, 2006), como mostra a Figura 02.

**Figura 02 – Representação da seção transversal das diferentes morfologias de membranas sintéticas**



Fonte: Habert, *et al.* (2006)

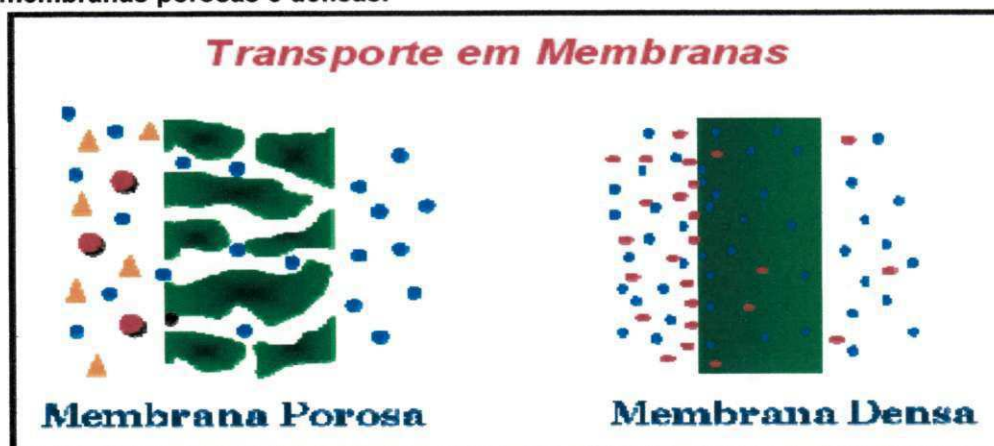


As membranas anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina de aproximadamente  $1\mu\text{m}$ , mais fechadas (com poros ou não), chamada de pele, suportada em uma estrutura porosa. Quando ambas as regiões são constituídas de um único material a membrana é do tipo anisotrópica integral. Caso materiais diferentes sejam empregados no preparo de cada região a membrana será do tipo anisotrópica composta (HABERT, *et al.*, 2006).

Para que ocorra o transporte de uma espécie através de uma membrana é necessária a existência de força motriz agindo sobre a mesma. Os processos comerciais de separação com membrana utilizam como força motriz o gradiente de potencial químico e/ou o gradiente de potencial elétrico. Como os processos com membranas são, em sua grande maioria, atérmicos, o gradiente de potencial químico pode ser expresso, apenas, em termos do gradiente de pressão ou concentração (ou pressão parcial).

Em função da morfologia da membrana e do tipo de força motriz empregada, o transporte das diferentes espécies através da membrana pode ocorrer tanto pelo mecanismo de convecção como pelo mecanismo de difusão. A morfologia da membrana define, também, os princípios em que se baseiam a sua capacidade seletiva, a qual pode ser vista no esquema da Figura 03 (HABERT, *et al.*, 2006).

**Figura 03 – Processo de separação por membranas – força motriz e transporte em membranas porosas e densas.**



Fonte: Habert, *et al.* (2006).

O processo de separação por membranas, comparada com o tratamento convencional utilizados nas estações de tratamento de água, oferece uma série de vantagens:

- Qualidade superior da água tratada, através da remoção de macromoléculas, bactérias e vírus, designadamente de microrganismos resistentes aos tratamentos químicos como cloração;
- Sistemas mais compactos e modular, portanto facilmente adaptável às variações de qualidade e quantidade de água a tratar;
- Fácil controle de operação e manutenção;
- Menor utilização de produtos químicos, como sulfato de alumínio (coagulante) e poliacrilamida (floculante) que podem originar efeitos nefastos na saúde pública;
- Menor produção de lamas (NAKATSUKA et AL., 1996)

Os processos de separação por membranas tiveram um grande avanço nas últimas décadas devido ao estímulo do desenvolvimento de novas membranas com melhor seletividade, menor resistência ao transporte e melhores propriedades mecânicas, químicas e térmicas. A eletrodialise e a osmose inversa são processos de separação por membranas que começaram a ser utilizados a partir da década de 60 na produção de água potável e, atualmente, vêm sendo utilizados em muitas outras aplicações.

A tecnologia de separação por membranas envolve a utilização de membranas sintéticas, porosas ou semipermeáveis, orgânicas ou inorgânicas e em configuração adequada, para separar de um fluido partículas sólidas de pequeno diâmetro, bactérias, vírus, moléculas orgânicas, compostos iônicos de baixo peso molecular e até gases.

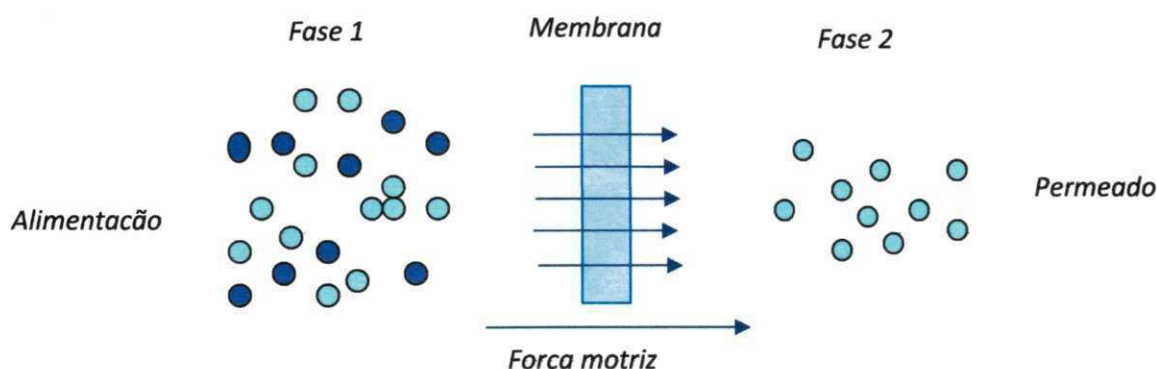
O que difere cada um destes processos é a capacidade de separação de o tipo de contaminante e a intensidade da força motriz utilizada para promover a separação, além da forma de separação do contaminante.

Na microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) e osmose inversa (OI), a pressão hidráulica é utilizada para promover a separação entre a água e os contaminantes e é a água que atravessa a membrana. Já no processo de eletrodialise, a separação é obtida por uma diferença de potencial elétrico aplicado entre as membranas e neste caso são os contaminantes que atravessam a membrana.

Uma membrana pode ser definida como um filme fino sólido que separa duas soluções e que atua como barreira seletiva para transporte de componentes destas soluções, quando aplicada algum tipo de força externa, como mostra a Figura 03. Essa força pode ser pressão, sucção ou potencial elétrico. Após a passagem pela membrana o líquido é denominado permeado. Nos processos de separação de membranas não ocorre transformação química ou biológica de componentes durante a filtração (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que seletivamente transfere massa entre essas fases. A membrana tem assim a capacidade de transportar determinados componentes mais eficazmente, retendo outros que fazem parte da mistura de alimentação. É, portanto uma barreira permeável e seletiva ou uma interface entre duas fases. A Figura 04 apresenta um esquema da separação por membranas.

**Figura 04: Representação esquemática do processo de separação por membranas (Adaptado de Mulder, 1997).**



Fonte: COPPER/UFRJ – Programa de Engenharia Química.

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

Os processos que utilizam a tecnologia de membranas e o gradiente de pressão com força motriz são conhecidos como: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI).

Embora recentes, os processos de separação com membranas têm encontrado um rápido desenvolvimento. A principal característica desses processos, está relacionada ao fato da maioria das separações ocorrerem sem mudança de fase, sendo, portanto, energeticamente mais vantajosos, quando comparadas com os processos térmicos tradicionais. Além disso, são processos que apresentam um baixo custo energético e um produto final de alta qualidade (Habert et al., 1997).

## **1.2 OBJETIVO**

### **1.2.1 – Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o desempenho de um sistema de purificação de águas composto com membranas de micro e nanofiltração, através de balanços de massas de cada elemento de membranas, fazendo uso de diferentes níveis de concentrações de sais.

### **1.2.2 – Objetivos Específicos**

1.2.2.1 – Estudar o índice de densidade de sedimento para fins de estimar a formação do “fouling” (incrustações) de natureza orgânicas e inorgânicas;

1.2.2.2 – Estudar a variação dos gradientes de concentração dos componentes presentes nas águas, antes e após as membranas, visando às análises de variáveis como: pressão, vazão, temperatura, recuperação e etc;

1.2.2.3 – Analisar as águas salobras de poços de diferentes concentrações, visando estudar o potencial máximo de extração de sais durante o processo de membranas;

1.2.2.4 – Desenvolver um balanço iônico para as membranas de microfiltração e nanofiltração;

1.2.2.5 – Em função do desempenho do sistema estudar o momento mais adequado da limpeza química e seus efeitos.



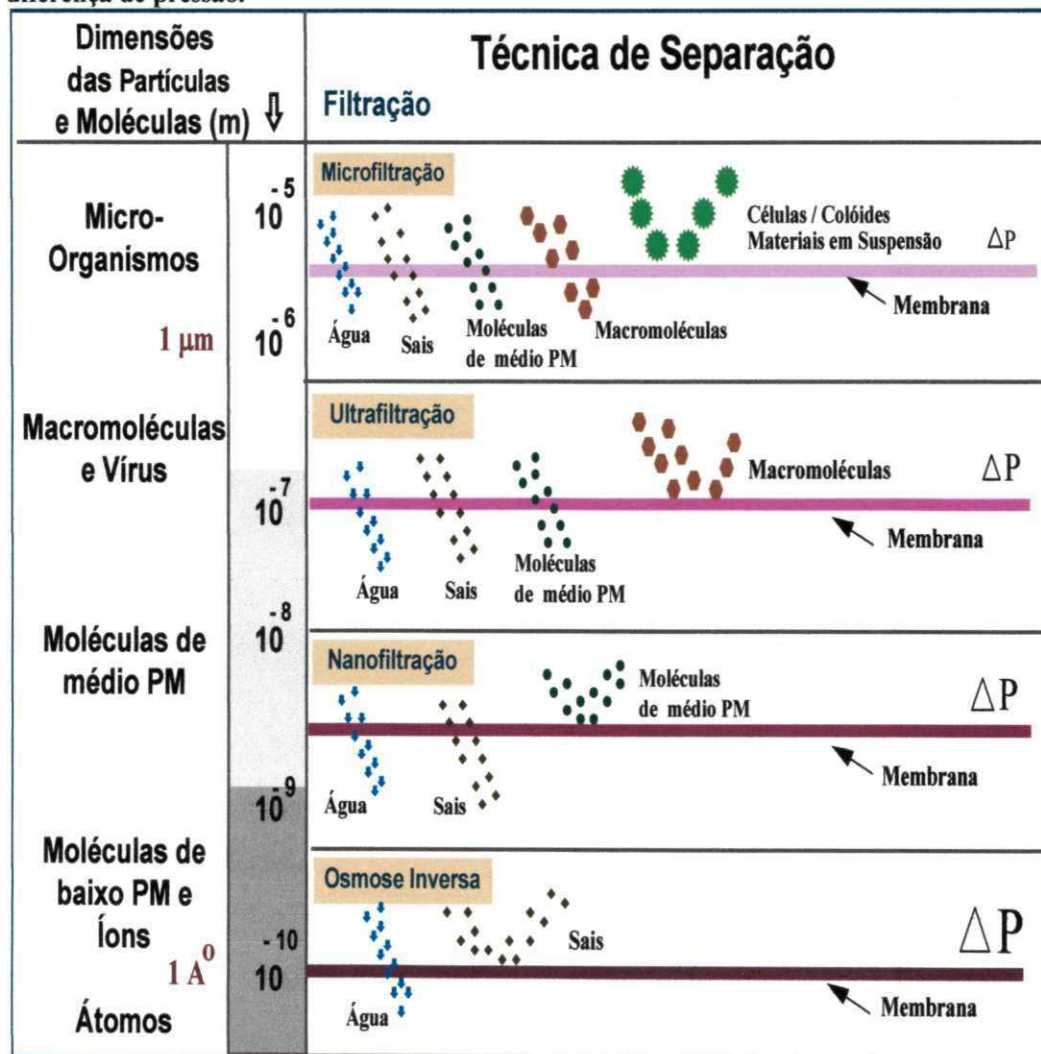
## CAPÍTULO II

### 2. Fundamentos Teóricos

Os processos de separação por membranas como transporte de uma dada espécie, ocorrem devido a 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.

Na Figura 05 são apresentadas as principais características dos processos com membranas que utilizam a diferença de pressão como força motriz.

Figura 05 – Principais características das técnicas de separação com membranas que utilizam diferença de pressão.



Fonte: São como força motriz (Habert et al., 1997).

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

A classificação da porosidade e pressão de operação das membranas citadas acima é representada na Tabela 1.0.

**Tabela 1.0 – Porosidade de membranas e pressões de operação usuais em PSM.**

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

Fonte: HABERT et al., 1997

## 2.1 Microfiltração

A tecnologia convencional de tratamento de água geralmente envolve coagulação com sais de ferro ou alumínio, sedimentação, filtração e desinfecção final com cloro. O tratamento mínimo consiste da combinação de filtração/desinfecção.

O objetivo primordial deste tratamento é a remoção de organismos patogênicos. Como objetivos secundários, que dependem da qualidade da água bruta, pode também ser citados a remoção de odores, de compostos que afetam o gosto da água tratada, e de compostos que podem formar precipitados nas superfícies dos sistemas de distribuição (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).



Filtros convencionais utilizados no tratamento de água remove material particulado e coloidal por vários mecanismos diferentes como: retenção física, adsorção química ou física, sedimentação, floculação, etc. esses filtros não representam barreira absolutas para partículas, sua eficiência é limitada devido ao acúmulo de matérias no seu interior, que deve ser removido periodicamente em ciclos de retrolavagem, e pela formação de canais de fluxo preferencial nos bancos de areia ou areia/antracito. De modo geral, as membranas de microfiltração e de ultrafiltração tem uma eficiência superior na remoção de partículas do que filtros convencionais.

Na produção de água, sistemas de microfiltração são utilizados para remoção de material particulado e coloidal das águas brutas. As membranas filtrantes oferecem as seguintes vantagens (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- Não há necessidades de produtos químicos no tratamento da água bruta;
- Mecanismo de filtração é por exclusão física de partículas com tamanho maior que a porosidade das membranas;
- Qualidade constante da água tratada, independente de variações da qualidade da água de alimentação;
- Plantas compactas e automatizadas
- Possibilidade de aumentar a produção das plantas por mais de 50% durante curtos intervalos de tempo sem afetar a qualidade da água produzida.

A microfiltração é o processo de separação com membranas mais próximas da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$ , sendo, indicado para a retenção de materiais em suspensão, microrganismos e emulsão.

Como as membranas de microfiltração são relativamente abertas, as pressões transmembrana empregadas como força motriz para o transporte são pequenas, não ultrapassando 3 bar. Na microfiltração o solvente e todo o material solúvel permeiam a membrana. Apenas o material em suspensão é retido.

Os contaminantes mais importantes removidos por essas membranas são (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- Contaminantes biológicos:
  - Protozoários (Cryptosporidium, Giárdia, Microsporidium);
  - Algas e cianofíceas (Microcystis)
  - Bactérias;
  - Vírus.
  
- Contaminantes abióticos:
  - Turbidez;
  - Óxido de ferro e manganês particulados;
  - Sílica particulada.

Na prática porém, o permeado nunca é uma solução estéril, ou seja, sempre contém microrganismos, mesmo que em baixo número. Como a sua operação não ocorre sob condições de assepsia, a retenção total da microbiota da água bruta criará condições para o estabelecimento de outra microbiota no permeado, que utilizará os componentes orgânicos que atravessaram a membrana como fonte de carbono e energia.

A maioria dos microrganismos encontrada no permeado é originária de biofilmes microbianos que se formam nas superfícies das membranas e da tubulação em contato com o permeado. A desinfecção do permeado é imprescindível para garantir a qualidade microbiológica do produto (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A classe de contaminantes abióticos engloba todas as substâncias ou partículas não-biológicas que devem ser removidas no processo de tratamento. As águas superficiais contêm freqüentemente contaminantes dissolvidos que devem ser removidos durante a potabilização.

Estes contaminantes são:

- Carbono orgânico dissolvido de baixo peso molecular;
- Substâncias solúveis que dão cor inaceitável para os padrões de consumo;
- Metais pesados reduzidos;
- Sais de cálcio e magnésio, que aumentam a dureza da água.

## 2.2. Ultrafiltração

A ultrafiltração é um processo de separação por membrana utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de ultrafiltração apresentam poros na faixa entre 1 e 100 nm, portanto mais fechadas do que as membranas de microfiltração. Soluções contendo solutos numa ampla faixa de peso molecular ( $10^3 - 10^6$  Daltons) podem ser tratadas por este processo. Como os poros das membranas de ultrafiltração são menores, é necessário uma maior força motriz para se obter fluxos permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente. Por este motivo as diferenças de pressão transmembrana variam na faixa de 2 a 10 bar. Na Figura 06 são apresentadas as características básicas do processo de ultrafiltração.

Tendo em vista que as membranas de ultrafiltração apresentam uma distribuição de tamanho de poros elas podem reter de maneira distinta, solutos de pesos moleculares diferentes. O coeficiente de rejeição,  $R$ , de uma membrana para um dado soluto é definido pela relação:

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_0} \quad (1.0)$$

onde  $C_P$  e  $C_0$  representam a concentração do soluto no permeado e na alimentação, respectivamente. Por este motivo as membranas de ultrafiltração são caracterizadas através da chamada curva de corte, que relaciona o coeficiente de rejeição em função do peso molecular do soluto.

Figura 06 – Características Básicas da Ultrafiltração



Fonte : COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia química.

As membranas de ultrafiltração normalmente são especificadas através de seu peso molecular de corte ou "cutt off". O "cutt off" de uma membrana é definido como sendo o valor do peso molecular para o qual a membrana apresenta um coeficiente de rejeição de 95%.

Assim uma membrana de corte 15.000 (por exemplo: membrana B na Figura 06) é aquela capaz de rejeitar 95% das moléculas presentes em uma solução de um soluto de peso molecular 15.000 Daltons. Os fluxos permeados em UF estão, em geral, na faixa de 150 a 250 L/h.m<sup>2</sup>.

Fluxos permeados bem menores podem ser obtidos em função do nível de polarização de concentração e de "fouling "a que fica submetida a membrana, em função da natureza da solução a ser tratada e das condições de operação do sistema.

### **2.2.1 Aplicações da Ultrafiltração**

As principais aplicações da UF são a clarificação, concentração de solutos e fracionamento de solutos. A separação é eficiente quando existe pelo menos uma diferença de 10 vezes no tamanho das espécies. A UF é largamente utilizada na indústria de alimentos, bebidas e laticínios, assim como em aplicações na biotecnologia e na área médica. Alguns exemplos são apresentados a seguir:

- Recuperação de Tintas Coloidais Utilizadas na Pintura de Veículos
- Recuperação de Proteínas do Soro de Queijo
- Produção de Queijo
- Recuperação da Goma na Indústria Têxtil
- Concentração de Gelatina
- Recuperação de Óleos
- Substituir a Microfiltração.

### **2.3 Nanofiltração**

Como a *Reverse Osmosis*, (Osmose Reversa) o mecanismo de transferência de massa na nanofiltração é a difusão. Embora geralmente muito similar em termos químicos da membrana, a Nanofiltração permite a difusão de certas soluções iônicas (tais como: sódio e cloretos), predominantemente íons monovalentes, bem como água. Espécies iônicas maiores, incluindo íons bivalentes e multivalentes, e moléculas mais complexas são amplamente retidas.

Uma vez que os íons monovalentes são difundidos através da membrana de nanofiltração com água, a diferença da pressão osmótica entre as soluções de cada lado da membrana não é tão grande e isto resulta em uma pressão de operação menor na Nanofiltração comparada com a Osmose Reversa.

O processo de nanofiltração é usado no tratamento de água e perda de água, no qual inclui a remoção de materiais orgânicos, metais pesados e não-metálicos, íons inorgânicos, para contaminação de águas e afluentes industriais.

Na possibilidade do tratamento de água, usa-se principalmente a nanofiltração para remoção de componentes orgânicos e inorgânicos de peso molecular acima de 300 Daltons.

Uma série de limitações nas operações destes processos na deteriorização progressiva da membrana de nanofiltração pelo *fouling* e concentração polarizada, diminuindo o fluxo do permeado, fatores na qual afeta em geral a economia do processo.

A performance do fluxo do permeado corresponde a várias condições de operações e portanto um importante aspecto para eficiência e rentável desempenho do processo.

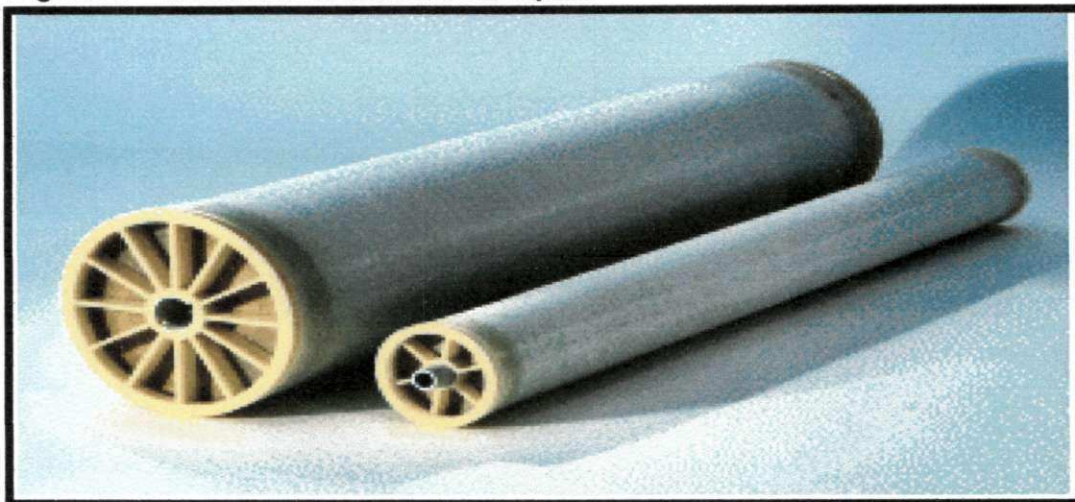
Algumas aplicações típicas da Nanofiltração são:

- Dessalinização de alimentos, lácteos e produto ou co-produtos da indústria de bebidas;
- Dessalinização parcial do soro, permeado ou retentado de UF como exigido;
- Dessalinização de corantes e abrilhantadores óticos;
- Purificação dos químicos usados em *clean-in-place* (CIP);
- Redução ou alteração de cor em produtos alimentícios;
- Concentração de alimentos, lácteos e produtos ou co-produtos da indústria de bebidas;
- Concentração de co-produtos de fermentação.



O processo de dessalinização ocorre pelo uso de elementos de membranas em escala industrial do tipo espiral. Nela, a dessalinização ocorre através do fluxo cruzado. Um exemplo desse tipo de módulo pode ser observado na Figura 07.

**Figura 07 – Módulos de membrana em espiral**



Fonte: TORAY® MEMBRANE EUROPE, 2008.

### **2.3.1 Produção de água com membranas de nanofiltração**

A nanofiltração compreende um processo de membranas especial, no qual as partículas rejeitadas situam-se na faixa de 1 nanômetro. Este processo atua no setor entre a UF e a OI. Todas as moléculas orgânicas com elevada massa molar são rejeitadas.

Além disso, os sais dissolvidos constituídos por ânions monovalentes têm taxas de rejeição da ordem de 20 a 80%, enquanto que os constituídos por ânions bivalentes possuem taxas de rejeição da ordem de 90 a 98%.

Algumas das aplicações típicas incluem a remoção de compostos orgânicos de águas superficiais, remoção de dureza de águas tratadas e redução de sólidos totais dissolvidos, especialmente em aplicações de tratamento de efluentes industriais (Habert et al., 1997).



A nanofiltração é uma tecnologia análoga à osmose inversa. Os poros das membranas de nanofiltração são maiores do que das membranas de osmose inversa e conseqüentemente, a pressão de operação é mais baixa.

No mercado de membranas filtrantes, a nanofiltração compete com a osmose inversa de baixa pressão. Os requerimentos de pré-tratamento da água bruta são os mesmos da osmose inversa (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A nanofiltração é utilizada para a remoção dos seguintes contaminantes moleculares ou iônicos (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- Íons divalentes e trivalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.);
- Pesticidas;
- Matéria orgânica dissolvida.

As membranas de nanofiltração também rejeitam íons monovalentes, mas com coeficientes de rejeição entre 30% e 85%, muito inferiores aos das membranas de osmose inversa, tanto que a nanofiltração não é considerada uma tecnologia de dessalinização. No saneamento básico a nanofiltração é empregada para (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- Redução de dureza;
- Remoção de cor;
- Tratamento de água bruta poluída com contaminantes orgânicos;
- Remoção de poluentes inorgânicos como: arsênio, cobre e cádmio.

Os mecanismos de rejeição de íons e moléculas de baixo peso molecular por membrana de osmose inversa e nanofiltração ainda são objeto de muita controvérsia. Na prática, verifica-se que a rejeição de íons nestas duas membranas, depende essencialmente do tamanho do íon (somatório das dimensões do átomo ionizado) e da(s) camada(s) de hidratação (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A rejeição teórica de íons nesses dois tipos de membranas deveria seguir a série, que classifica íons segundo o tamanho:

- Para cátions –  $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+} > Ra^{2+} > Li^{1+} > Na^{1+} > NH_4^{1+} > Cs^{1+}$  (Schneider e Tsutiya, 2001);
- Para ânions –  $SO_4^{2+} > Cl^{1-} > Br^{1-} > I^{1-}$  (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A dureza nas águas é causada pela presença de sais de cálcio e magnésio. A redução de dureza em águas de consumo visa melhorar a utilidade do insumo para usos não potáveis, como: redução do consumo de sabões e detergentes; redução da formação de precipitados em utensílios domésticos, na rede de distribuição de água e aquecedores de água e aumento da vida útil de produtos têxteis.

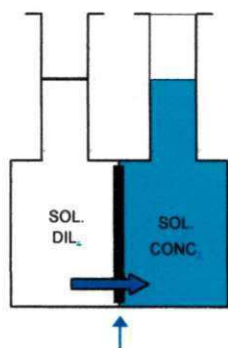
A tecnologia da nanofiltração para remoção de dureza está se expandindo rapidamente. Entre as opções de tecnologias de abrandamento, a nanofiltração é a única alternativa que permite a remoção simultânea da dureza e de praticamente todos os outros contaminantes coloidais, biológicos e químicos da água sem o emprego maciço de produtos químicos (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

## 2.4 Osmose inversa (OI)

O fenômeno da osmose é de fundamental importância na natureza, já que o transporte seletivo através de membranas é essencial à vida. A osmose natural, vital para os sistemas biológicos, envolve a ação da água quando duas soluções, de concentrações diferentes, são separadas por uma membrana semi-permeável. A água pura flui, através da membrana, da solução menos concentrada em direção a mais concentrada, até que as duas soluções atinjam o equilíbrio. Este fato define a pressão osmótica oferecida pela membrana entre as duas soluções através da diferença de nível das colunas das soluções, conforme mostram as Figuras 08, 09 e 10.

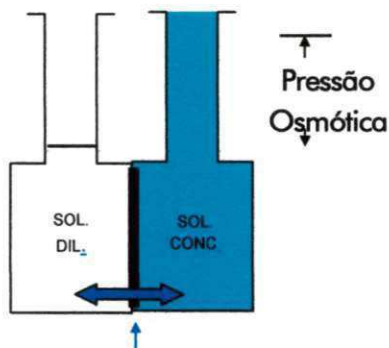
A osmose inversa ocorre quando uma pressão superior à pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada. Quando isso ocorre, se obtém água pura a partir de uma solução salina por meio de uma membrana semi-permeável, como mostra a Figura 10. Em processo de grande escala o fenômeno ocorre com auxílio de uma bomba de alta pressão e sob fluxo contínuo, passando por um permeado (vaso de pressão) onde fica situada a membrana.

Figura 08: Fluxo Osmótico



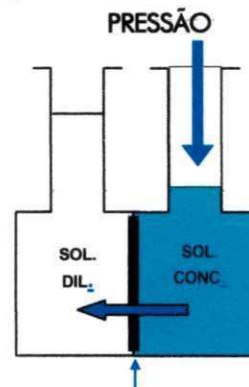
Membrana semi-permeável

Figura 09: Equilíbrio Osmótico



Membrana semi-permeável

Figura 10: Osmose Inversa

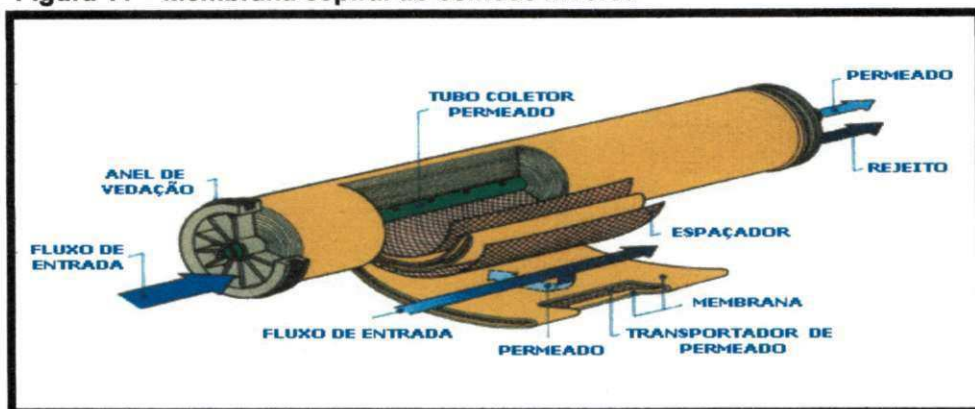


Membrana semi-permeável

A osmose inversa é um processo de separação com membranas utilizadas quando deseja reter solutos de baixo peso molecular tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. A diferença entre OI e UF está no tamanho do soluto retido.

As exigências sobre uma membrana conveniente para a osmose inversa são severas. Por exemplo, algumas das propriedades da membrana importantes na economia do processo de dessalinização, são: seletividade da membrana em relação à água, preferivelmente aos íons, o que determina o número de estágios pressurizados necessário à produção de água potável; taxa de permeação da água por unidade de gradiente de pressão, o que determina as dimensões do equipamento pela taxa de produção unitária de água potável e a durabilidade da membrana, que determina o número de vezes que a membrana deve ser substituída. A Figura 11 mostra um exemplo de membrana espiral.

**Figura 11 – Membrana espiral de osmose inversa**



Fonte: GAUWBERGEN, 1997

Por este motivo as membranas de OI devem ser mais fechadas apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação. Por esta razão pressão mais elevadas do que utilizam em UF são necessárias nos processos de OI.

Na verdade as membranas de OI apresentam características intermediárias entre as membranas porosas usadas em MF e UF e as membranas densas empregadas em per vaporação e permeação de gases. O nome Osmose Inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado é no sentido contrário do fluxo osmótico normal.

A OI é um fenômeno conhecido dos cientistas desde o fim do século XIX, passou a ser aplicado em processos industriais na década de 60. Desde a década de 80 o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicações deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido (SOUSA, 2003).

A osmose inversa é utilizada para a obtenção de água com alto grau de qualidade, inclusive água para abastecimento a partir de água salina ou salobra, já que possibilita a remoção de sais dissolvidos ou moléculas inorgânicas, bem como moléculas orgânicas.

A taxa de rejeição de sais inorgânicos pode variar de 95% a mais de 99%, dependendo do tipo de membrana utilizada, concentração de sais dissolvidos na corrente processada, tipo de substâncias envolvidas e condições operacionais do sistema.

Sistemas de osmose inversa possibilitam o tratamento de águas com uma concentração de sais dissolvidos variando de 5,0 mg/L até 34.000 mg/L (WAGNER, 2001).

A dessalinização via osmose inversa já se encontra consolidada no mundo. Em alguns lugares da Arábia Saudita ainda é utilizado o processo térmico para dessalinização de águas, mas estes vêm sendo substituídos pelos os processos de membranas.

Essa mudança se deve ao fato de que os sistemas com membranas serem mais leves, modulares, ocupam menor espaço, são de fácil manuseio e manutenção, tem menor consumo de energia e o custo do produto inferior (AMJAD, 1993).

## **2.4 Aplicações das membranas ao tratamento de água para consumo humano.**

A tecnologia de membranas vem aumentando a importância no tratamento de águas superficiais e subterrâneas, nos últimos anos. Por um lado, o aumento das exigências legais em termos de qualidade das águas, as quais não são totalmente atingidas pelos processos convencionais de tratamento, e por outro a diminuição da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, originam a necessidade de aumento da eficiência dos processos de tratamento (JACANGELO; TRUSSELL; WATSON, 1997).

Ainda hoje, a tecnologia mais amplamente utilizada para tratamento de água para abastecimento é o sistema convencional, contemplando as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

Contudo, nos países desenvolvidos, como Estados Unidos da América, Canadá e Inglaterra, com a crescente preocupação com os subprodutos da desinfecção e com microrganismos específicos, novas tecnologias passaram a ser consideradas, dentre as quais os processos de separação por membranas.

O estabelecimento, nos Estados Unidos da América, da norma sobre tratamento aprimorado de água de superfície, identificou os processos de separação por membranas, microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa, como opções de tratamento para atingir os níveis exigidos para remoção de *Cryptosporidium*.

Atualmente, as normas nacionais e internacionais de potabilidade de água, estabelecem limites de concentração para os subprodutos da desinfecção na água para abastecimento público, como trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (AHA).

Neste caso, os processos de separação por membranas, principalmente a UF, NF e a OI, podem remover da água, antes da etapa de desinfecção, os precursores dos THMs e AHA, ou seja, a matéria orgânica natural, além de outros compostos orgânicos sintéticos (JACANGELO; TRUSSELL; WATSON, 1997).

Hillis et al.,(1998), referem que meados dos anos 80, a utilização da tecnologia de membranas, designadamente MF e UF, para produção de água para consumo humano aumentou significativamente. Isto se deve, à necessidade de uma água para consumo humano de boa qualidade, independente das características da água do manancial.

Em, 2002 Amal e colaboradores desenvolveram um estudo sobre o projeto e a construção de sistemas de potabilização de água por membranas, com aplicação em países em desenvolvimento. Neste estudo, foi avaliado o desempenho de um sistema de ultrafiltração com membrana enrolada em espiral, para tratamento de água para abastecimento, com foco na qualidade microbiológica da água produzida.

A unidade foi operada por um período de 300 horas, obtendo-se um desempenho satisfatório em relação à produção e qualidade da água. A vazão média do permeado foi de 239,5 L/h, com a unidade operando com uma pressão hidráulica de 400 a 450 kPa, enquanto a eficiência de microrganismos foi de 100%.

No Brasil, por meio do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB, 2006), foi desenvolvida uma pesquisa sobre tratamento de água de abastecimento por processo de ultrafiltração, utilizando-se membrana enrolada em espiral.

Neste estudo, implantaram e operaram uma unidade piloto de ultrafiltração no reservatório Guarapiranga, manancial utilizado para produção de água potável para, aproximadamente, seis milhões de pessoas e que apresenta problemas de qualidade com sinais de eutrofização. Com a implantação do processo de ultrafiltração com mais de seis mil horas de operação contínua, obteve-se uma água tratada com elevado grau de qualidade, inclusive com a remoção de matéria orgânica, alcançando a redução de 80,39% de COT e a eficiência para remoção de microrganismos também merece ser destacada, tendo sido obtida uma eficiência de 100% para coliformes totais e *Escherichia coli*.

Além da questão associada ao desempenho operacional do sistema de ultrafiltração, também foi feito um estudo econômico pelo (PROSAB, 2006) para comparar os processos convencional, convencional com unidade de carvão ativado e o sistema de membrana de ultrafiltração.

Neste estudo comparativo, ficou evidenciado que o sistema de ultrafiltração apresenta grande potencial para utilização em sistemas de tratamento de água, ressaltando-se que, embora o sistema convencional apresente o menor custo de produção de água (R\$ 0,20/m<sup>3</sup>), ele apresenta limitações para atender aos desafios atuais, exigindo a utilização de técnicas complementares de tratamento.

Com isto o custo de tratamento do processo de ultrafiltração se equipara àquele que combina o sistema convencional com carvão ativado (R\$ 0,40/m<sup>3</sup>), porém esses custos podem ser reduzidos drasticamente quando as membranas forem de produção nacional (PROSAB, 2006).

A tecnologia de membranas também tem sido muito utilizada na remoção de *Giárdia* e *Cryptosporidium* e apontada como uma solução de tratamento, uma vez que estes microrganismos formam cistos resistentes à cloração.

Os cistos destes protozoários têm entre 3 a 14  $\mu\text{m}$ . Jacangelo et al., 1997, referem que atualmente é aceito pela comunidade dos EUA que a MF e UF, se bem implantada e operadas, podem remover totalmente a maioria das bactérias e cistos de protozoários.

Segundo Chorus & Bartram (1999), os processos de separação por membranas, particularmente a MF e UF, são efetivos na remoção de cianobactérias e toxinas intracelulares.

As membranas de microfiltração tipo oca utilizadas para pré-tratamento físico em sistemas de dessalinização de osmose inversa apresentam bom desempenho na retenção de bactérias do grupo coliformes, as quais quando utilizadas em sistemas de abastecimento de água para consumo para remoção de bactérias e protozoários também mostra-se bastante eficiente (Ferreira, et al; 2007).

Estudos realizados à escala laboratorial, com módulos de UF e MF demonstraram eficiência de remoção, superior a 98%. Nestas experiências as microcistinas encontradas no permeado foram significativamente menos do que as do tanque de alimentação, sugerindo-se que a membrana de UF utilizada teria propriedades de rejeição ou capacidade de adsorção de microcistinas.

Boa remoção de toxinas solúveis foi conseguida com membranas de baixo cut – off moleculares como as de NF.

Hillis (1997) verificou a eficiência de MF na remoção de bactérias com tamanhos de  $1\mu\text{m}$  e a ausência de partículas com tamanhos entre 2 - 5  $\mu\text{m}$  no permeado da MF, concluindo que é evidente a eficiência dos processos de membranas na remoção de cistos *Cryptosporidium* (4 - 6  $\mu\text{m}$ ). Demonstraram que a MF tem capacidade para remover microrganismos patogênicos, como *Cryptosporidium*, para os níveis exigidos na legislação, mesmo em condições de operações adversas, como elevado fluxo e pressão transmembrana.



Avaliaram o desempenho da microfiltração e Ultrafiltração na remoção de microrganismos como *E.coli*, *D.subtilis* e colifagos MS2, de dimensões semelhantes aos vírus, mas não tóxicos para os humanos.

Os resultados revelaram que a MF e a UF são eficientes na remoção de *E.coli*, *D. Subtilis*, conseguindo uma redução superior a 6 ordens de grandeza. No entanto, a remoção dos colifagos MS2 é muito inferior na MF em relação à UF.

Van Der Hoek et al., (2000) avaliaram como alternativa ao tratamento convencional um sistema de osmose inversa, em combinação com os sistemas de pré-tratamento existentes na ETA, para extensão da capacidade de produção de água.

Os resultados mostraram uma redução nos custos de operação em termos de reagentes químicos adicionados ao processo e uma redução dos impactos ambientais, sem perda da produtividade.

## 2.5 Desinfecção Química

A desinfecção tem por finalidade a destruição de microrganismos patogênicos presentes na água (bactérias, protozoários, vírus e vermes). Dentre os desinfetantes químicos mais freqüentemente utilizados, devem ser destacadas algumas vantagens e desvantagens, conforme descrito na Tabela 02.

Muito embora o cloro apresente algumas limitações como desinfetante no tratamento da água para consumo humano, por seus atributos positivos continua, sendo de longe, o mais utilizado.

Por ser o desinfetante de aplicação quase universal no Brasil, alguns aspectos relacionados aos princípios e aos mecanismos da cloração merecem ser enfatizados:

- A ação desinfetante do cloro livre é bem mais eficiente que a do cloro combinado; a ação desinfetante das formas de cloro livre e combinado diminui bastante em pH > 8,0.

- Teores de cloro residual livre de 0,2 mg/L são adequados e suficientes para a inativação de bactérias.
- Fontes de água que sejam aceitáveis para consumo humano mediante somente desinfecção devem cumprir os mesmos requisitos que às águas submetidas ao tratamento convencional, ou seja, a água bruta não deve apresentar demanda de cloro elevada, e a turbidez deve ser inferior a 1,0 UT.
- Cistos e oocistos de protozoários são muito resistentes à ação do cloro e não são inativados com as doses usualmente praticadas no tratamento da água. Neste caso, a filtração assume um papel fundamental de remoção dos organismos patogênicos.
- A cloração pode gerar subprodutos tóxicos, principalmente os trihalometanos (THMs). O valor máximo permitido pela legislação brasileira é de 100 µg/L; porém, a OMS ressalta que o cumprimento desse limite nunca deve vir em prejuízo dos padrões microbiológicos (PROSAB, 2006).

**Tabela 02 – Apresentação das vantagens e desvantagens dos tipos de desinfetantes mais utilizados.**

Desinfetante	Vantagens	Desvantagens
Cloro	1) elevada eficiência na inativação de bactérias e vírus; 2) efeito residual relativamente estável; 3) Baixo custo; 4) Manuseio relativamente simples; 5) grande disponibilidade no mercado.	1) limitada eficiência na inativação de cistos de protozoários e ovos de helmintos; 2) na presença de matéria orgânica pode formar compostos cancerígenos, como trihalometanos; 3) em doses elevadas pode produzir forte odor e sabor; 4) alguns subprodutos como clorofenóis provocam também odor e sabor;
Dióxido de Cloro	1) desinfetante mais potente, inclusive na inativação de cistos de protozoários; 2) não forma trihalometanos (THM); 3) eficiência estável em ampla faixa de pH.	1) na presença de matéria orgânica em excesso pode formar subprodutos tóxicos (clorito); 2) residuais desinfetantes menos estáveis; 3) em doses elevadas produz sabor e odor.
Ozônio	1) desinfetante mais potente, inclusive na inativação de cistos de protozoários; 2) menor risco de formação de subprodutos tóxicos; 3) não provoca odor e sabor;	1) pode formar outros subprodutos tóxicos (bromatos); 2) não apresenta poder residual; 3) técnicas de aplicação mais sofisticadas.

Fonte: adaptado de Reiff e Witt (1995).

## 2.6 Incrustações

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

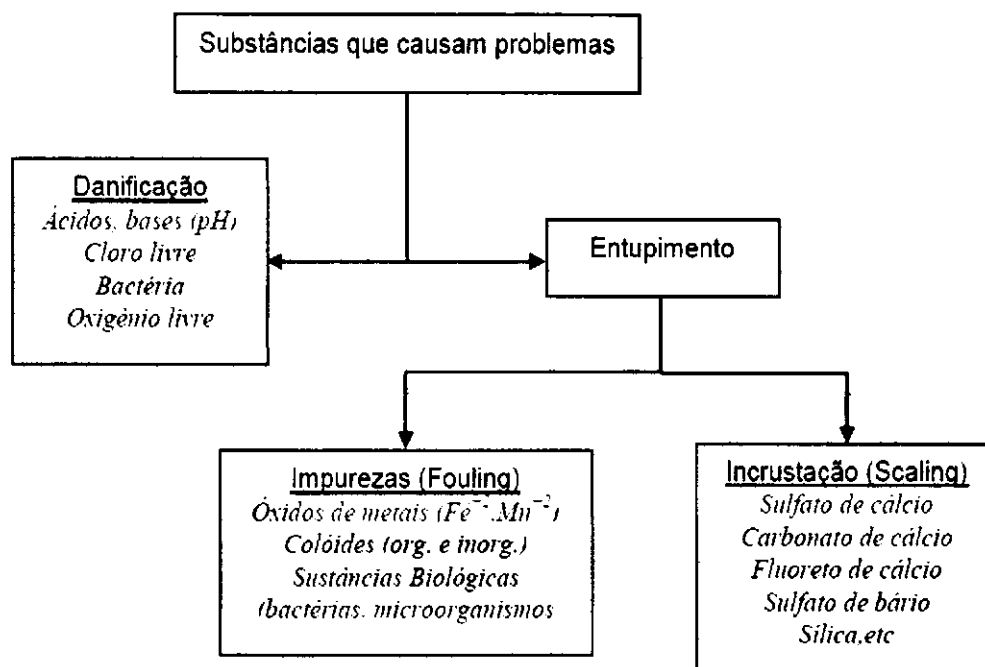
As incrustações podem ser entendidas como todo o material em suspensão na água e que se deposita na superfície da membrana. Podem ser classificadas por quatro categorias: depósitos inorgânicos (*scaling*), colóides (*fouling coloidal*), sólidos em suspensão e material biológico (*biofouling*) (AMJAD, 1993).

Os colóides podem ser de origem mineral ou orgânica, e tendem a coalescer e se aglomerar na área próxima a superfície da membrana depositando-se nela. Os sólidos em suspensão são partículas maiores de origem diversas e que tem tendência a se depositar na superfície da membrana.

O depósito orgânico de origem biológica é constituído por fungos e bactérias e apresentam maiores problemas porque estão presentes em praticamente todas as águas (SOUSA, 2001).

A Figura 12 mostra algumas substâncias conhecidas que afetam o desempenho de membranas, cujas concentrações devem ser controladas durante o processo de dessalinização.

**Figura 12 – Substâncias com potencial de danificar membranas**



Fonte: LABDES/2012

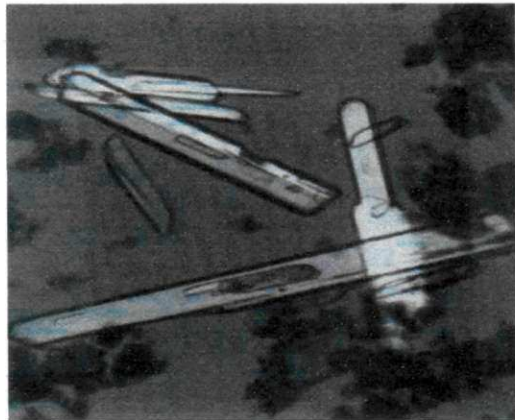
### 2.6.1 Indicadores de Incrustações

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

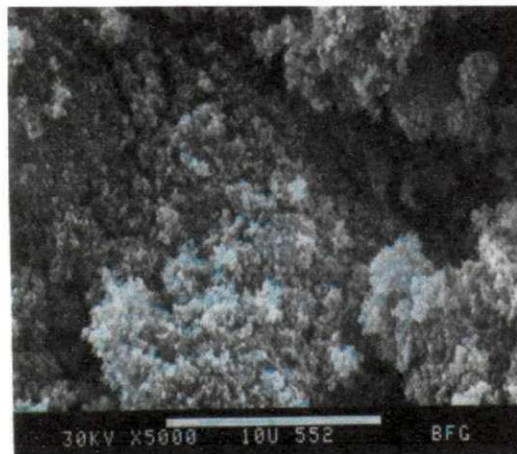
A superfície da membrana pode incrustar (*fouling*) através de materiais coloidais, orgânicos, óxidos de metais ou hidroxilas, desenvolvimento de microorganismos, e por precipitação (*scaling*) de sais solúveis a partir do concentrado. Os materiais coloidais são usualmente argilas muito finas; as orgânicas são as do tipo óleos hidrocarbonetos/graxas, ácidos húmico e tânico; os óxidos de metais e as hidroxilas são geralmente formados por ferro, manganês e alumínio (Matsuura and Sourirajan 2001; Amjad 1993).

A fonte dos sedimentos ou dos colóides nas águas de alimentação de sistema de OI é variada e incluem frequentemente as bactérias, a argila, sílica coloidal, e os produtos da corrosão a partir ferro. Produtos químicos usados na clarificação de águas como alumínio, cloreto férrico, polieletrólitos catiônicos também podem causar sujeira nas membranas e não são removidos com filtração (Filmtec, 2008). As Figuras 13 a 17 ilustram os exemplos de depósitos que se encontram normalmente nas superfícies das membranas.

**Figura 13 - Micrografia ótica de óxido de ferro e cristais de sulfeto de cálcio hidratado (250 x).**



**Figura 14 – Eletromicrografia de sílica (5.000 x).**

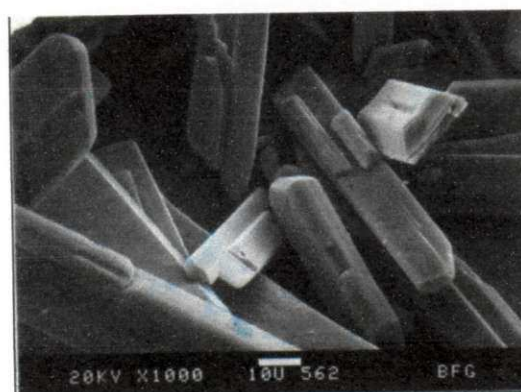


Fotos do livro: Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications – Ed. Zahid Amjad – Van Nostrand Reinhold – 1993.

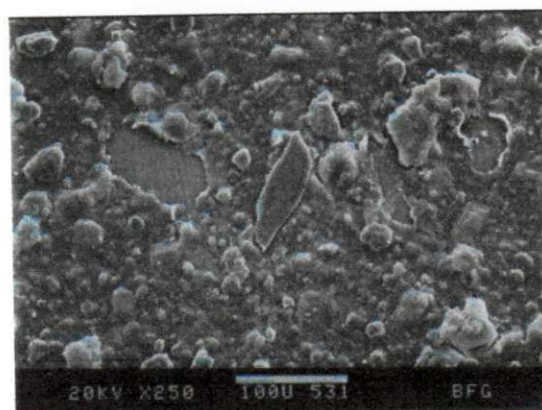
**Figura 15 – Eletromicrografia de argila (5.000 x).**



**Figura 16 – Eletromicrografia de cristais de sulfato de cálcio.**



**Figura 17 – Eletromicrografia de quatro componentes (argila, óxido de ferro, sílica e cristais de sulfato de cálcio miliporos de filtro (250 x).**



Fotos do livro: Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications – Ed. Zahid Amjad – Van Nostrand Reinhold – 1993.

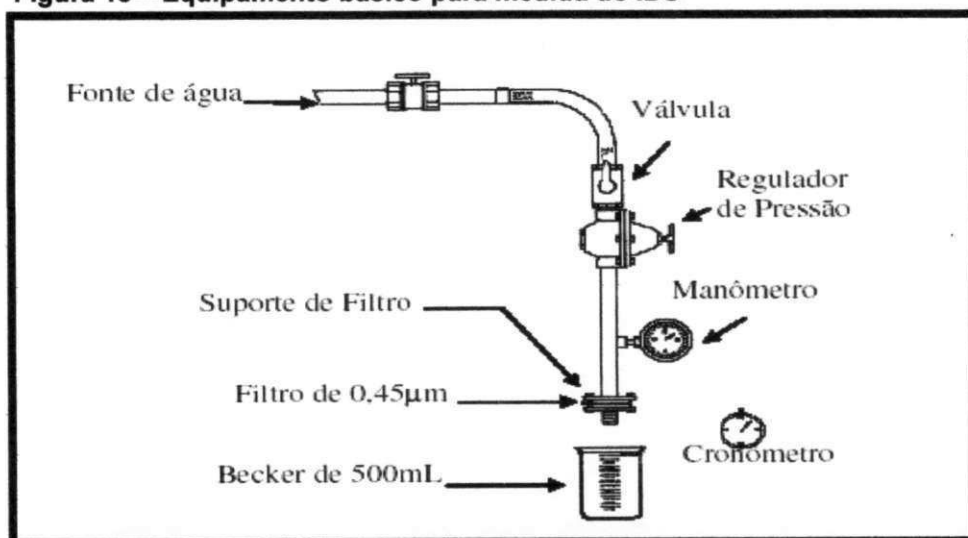
A presença de sólidos suspensos na água, como lama, sedimentos argilosos e outros, tendem a causar um entupimento espesso e pegajoso na superfície da membrana. As incrustações de minérios usualmente consistem de carbonato de cálcio, sulfato de cálcio e sulfato de bário (Matsuura and Sourirajan 2001; Amjad 1993).

### 2.6.2. Índice de densidade de sedimentos

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos ou através de análises físico-químicas. O Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) é um dos testes mais utilizados. O equipamento básico, conforme mostra a Figura 6 consiste de um sistema de filtração frontal.

Valores próximos a 1,0 são indicadores de um IDS com pouca matéria particulada na água, enquanto IDS igual ou maior do que 5,0 implicam dizer que o pré-tratamento físico não comporta toda a demanda exigida para que o dessalinizador funcione de forma correta. E valores médios próximos a três indica uma faixa aceitável para medidas de IDS Figura 18.

Figura 18 – Equipamento básico para medida do IDS



Fonte: TAYLOR et al., 1996.



O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo ( $t_1$ ) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL de permeado, o segundo intervalo de tempo ( $t_2$ ) varia de 5, 10 ou 15 minutos, o qual é intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 mL de permeado e o início da coleta dos segundos 500 mL de permeado.

O terceiro intervalo de tempo ( $t_3$ ) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o ( $t_3$ ) é 15 minutos. O IDS é determinado através da equação (TAYLOR e JACOBS, 1996):

$$\text{IDS} = \frac{100 \left[ 1 - \left( \frac{t_1}{t_3} \right) \right]}{t_2} \quad (1.1)$$

Onde:

- **IDS < 1 – Água de boa qualidade;**
- **1 < IDS < 3 – Água de qualidade intermediária;**
- **3 < IDS < 5 – Água de baixa qualidade;**
- **IDS > 5 – Água de péssima qualidade.**

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

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

Existem várias técnicas disponíveis para levar o IDS requerido, fazendo uso de sistemas de filtros multi-meios ou combinação com coagulantes.

### **2.6.3 Índice de saturação de Langelier**

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

Em algumas situações a injeção ácida no pré-tratamento pode ser minimizada ou eliminada por abrandadores para reduzir a dureza (cálcio + magnésio) ou por adição de inibidores poliméricos orgânicos que tem a função de retardar a precipitação.

Normalmente, a escala de potencial destes materiais pode ser estimada pelas suas constantes de solubilidades na corrente do concentrado e podem ser retardados pela adição de inibidores ou pela redução da recuperação do sistema.

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

A avaliação do risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com STD até 10.000 mg/L é avaliado através do valor do ISL, enquanto que, o Índice de Estabilidade de Stiff e Davis (S&DSI) é utilizado em águas de salinidade altas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Os dois índices são calculados pela Equação 2.5, 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.

$$\text{ISL, S \& DSI} = \text{pH}_c - \text{pH}_s \quad (1.2)$$

Onde ISL é o índice de Saturação de Langelier, S&DSI: Índice de Estabilidade de Stiff e Davis;  $\text{pH}_c$ : pH do concentrado;  $\text{pH}_s$ : pH no qual o concentrado fica saturado com  $\text{CaCO}_3$ .

O  $\text{pH}_s$  é calculado pelas seguintes equações (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

$$\text{ILS: } \text{pH}_s = \text{pCa} + \text{palc} + C(\text{STD}) \quad (1.3)$$

$$\text{S \& DSI: } \text{pH}_s = \text{pCa} + \text{palc} + K(I) \quad (1.4)$$

Onde,  $\text{pCa}$  e  $\text{palc}$  são os logaritmos negativos da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e da alcalinidade (na forma de  $\text{CaCO}_3$ ), respectivamente. O fator de correção C é calculado a partir da concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), enquanto que o fator de correção K é determinado a partir da força iônica (I) da solução.

Os fatores de correção C e K podem ser obtidos a partir de gráficos com base no cálculo das concentrações dos componentes no concentrado ou na superfície da membrana. O  $\text{pH}_s$  também pode ser calculado através da equação 2.5 (MINDLER e EPSTEIN, 1986):

$$\text{pH}_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (1.5)$$

onde:

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

$$B = -13,12 \cdot \log[ t_c + 273,15 ] + 34,55$$

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

$$D = \log[Alcalinidade \text{ como } CaCO_3]$$

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

Valores de ISL negativos indicam que não há potencial de precipitação do carbonato de cálcio. Poderá ocorrer, precipitação para valores de índice cada vez mais positivos, o potencial de precipitação aumenta (NING e NETWIG, 2002).

Para valores de ISL iguais a zero, não haverá potencial de precipitação do carbonato de cálcio, mas pequenas variações de concentrado e temperatura podem mudar o índice (AMJAD, 1992).

Para evitar a precipitação do carbonato de cálcio, os índices ISL e S&DSI da água de alimentação devem ser negativos. Quando é feita correção de pH ou adição de anti-incrustante, os valores de ISL e S&DSI devem ficar abaixo dos valores estipulados para esses tratamentos, geralmente entre 1 e 1,5 (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

O ISL e o S&DSI são usados por alguns fabricantes de membranas da OI para auxiliar o uso de produtos químicos no pré-tratamento da água de alimentação (NING e NETWING, 2002).

É importante ressaltar que o potencial de formação de precipitado químico na superfície da membrana não é condicionado somente pela

composição química da água bruta. O uso de cloreto férrico ou sais de alumínio na etapa de coagulação em processos de pré-tratamento pode comprometer seriamente o fluxo das membranas de OI ou de NF pela formação de precipitados químicos (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

## **2.7 Pré – tratamento**

O pré-tratamento tem o papel de evitar incrustações de micropoluentes e de substâncias de ordem orgânica e inorgânica nas superfícies das membranas.

O tipo de pré-tratamento a ser utilizado irá depender da qualidade da água de alimentação, e esta é definida em termos de concentração de partículas suspensas e níveis de saturação de sais solúveis dispersos no meio. Alguns dos sais mais conhecidos são: sulfato de cálcio, fosfato de cálcio, fluoreto de cálcio, sulfato de bário e de estrôncio e sílica (SUDAK, 1990)

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

No pré-tratamento, há dois parâmetros que devem ser medidos, monitorados ou controlados, porque eles influenciam diretamente o desempenho da OI.

Um parâmetro é o potencial de incrustação de cálcio, que envolve cálculos através do Índice de Saturação de Langelier (ISL). O segundo parâmetro é o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS), que envolve também, caracterizar o potencial de incrustação da água de alimentação (MINDLER & EPSTEIN, 1986).

O pré-tratamento é a chave do sucesso do desempenho de um sistema de dessalinização, pelo fato de ser um ponto muito importante no processo não deve ser estimado de forma qualitativa qualquer. O objetivo do pré-tratamento é *proteger* o sistema de membranas na remoção de materiais suspensos e coloides, evitar a proliferação biológica, a formação de incrustações de sais em geral.

Os fabricantes de membranas, projetistas e montadores de sistemas de dessalinização e/ou engenheiros consultores devem consultar sobre o pré-tratamento requerido para uma água específica de alimentação, tipo de membrana e configuração. A Tabela 03 apresenta os compostos que contribuem na formação de incrustações na superfície de membranas.

**Tabela 03 – Compostos que oferecem risco para a formação de precipitados na superfície de membranas de OI e NF (Schneider & Tsutiya, 2001).**

Composto	Tipo de precipitado	Comentário	Controle
Cálcio	Carbonatos, fluoretos, sulfatos e hidróxidos	Principal fator limitante do rendimento de sistema de OI, junto com sílica.	Remoção por pré-tratamento ou controle através de inibidores de cristalização
Magnésio	Silicatos, carbonatos e hidróxidos		
Estrôncio	Carbonatos, sulfatos		
Bário	Carbonatos, sulfatos		
Alumínio	hidróxidos		
Manganês	Hidróxidos e óxidos		
Ferro	Hidróxidos e óxidos		
Sílica	SiO <sub>2</sub> supersaturado polimeriza e pode formar um gel na superfície da membrana. SiO <sub>2</sub> polimerizado na solução pode formar colóides.	Concentração máxima permissível: 150ppm. Junto com cálcio, um dos principais fatores que limitam o rendimento de sistema de OI.	Remoção por pré-tratamento. A remoção de precipitados de sílica é difícil e depende do emprego de produtos altamente tóxicos.
Bicarbonato	Carbonatos	Pode ser convertido em carbonatos se o pH subir muito durante o processo	Controle do pH para evitar formação de carbonatos
Carbonato	Sais insolúveis com metais		Controle do pH
Hidróxido	Sais insolúveis com metais		Controle do pH
Fosfato	Sais insolúveis com metais		Remoção de cátions por pré-tratamento
Sulfato	Sais insolúveis com metais		Remoção de cátions por pré-tratamento
Gás sulfídrico	Grânulos de enxofre	Pode ser convertido em enxofre em muitos sistemas aquáticos	Oxidação na etapa de pré-tratamento

Fonte: Schneider & Tsutiya, 2001

## 2.8 Limpeza Química de Membranas

O pré-tratamento em um sistema de membranas não é tudo. Um programa de limpeza química integraliza a operação do sistema. As impurezas (fouling) ocorrem lentamente, tornando-se imperceptível ao desempenho do sistema.

O fato de vários tipos de minúsculas incrustações se depositarem em função do tempo, provoca uma degradação e diminuição do desempenho da membrana. Eventualmente, a remoção destas impurezas se torna irreversível levando a substituição dos elementos de membranas.

Os problemas de incrustação podem surgir em função de vários tipos de fatores, mecânicos ou químicos. Quando uma membrana diminui seu desempenho, é importante procurar identificar a origem da causa do problema, antes tornar qualquer iniciativa precipitada.

As técnicas mecânicas de remoção de impurezas de membranas se resumem em vários tipos de ação como: *flushing* com alta velocidade, limpeza com esponja (depende do tipo de membrana), jato de ar, etc. Quando isso não funciona, tem-se que partir para remoção química, a qual se usa reagente químico com uma combinação mecânica.

Os reagentes mais comuns são os seguintes:

- Ácido forte (clorídrico, sulfúrico, fosfórico) e ácidos orgânicos complexantes (cítrico, oxálico, glucônico), são usados para dissolver óxidos metálicos, hidróxidos metálicos e carbonatos;
- Hidróxidos de sódio a temperatura ambiente ou aquecido é utilizado para remover matéria orgânica;
- Oxidantes (hipoclorito de sódio, peróxido de hidrogênio, ácido peracético) são usados para oxidar macromoléculas orgânicas;

- Sufactante e detergentes, normalmente são combinados com quelões (como por exemplo: ácido etilenodiaminotetracético), são usados para baixar a tensão superficial com objetivo de formar complexo de metais;
- Bisulfito de sódio é usado para conservar as membranas contra a formação de bactérias.

## 2.9 Principais variáveis no processo de dessalinização

### 2.9.1 Recuperação do sistema

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

A recuperação de um sistema pode ser definida de acordo com a Equação 2.6 (TAYLOR e JACOBS, 1996).

$$r(\%) = \left[ \left( \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right) \right] * 100 \quad (1.6)$$

Onde:

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

A recuperação máxima em qualquer instalação de OI, depende dos sais presentes na água de alimentação e de sua tendência a se precipitar na superfície da membrana.



Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente do rejeito, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana (DOW LATIN AMERICA, 1996).

### 2.9.2 Taxa de rejeição de sais

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

$$\mathbf{TRS (\%)} = \frac{C_a - C_p}{C_a} * 100 = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) * 100 \quad (1.7)$$

onde:

TRS: taxa de rejeição de sais (%);

$C_a$ : é a concentração de alimentação (mg/L);

$C_p$ : é a concentração do permeado (mg/L).

### 2.9.3 Passagem de sais

É oposta a rejeição de sais e representa à percentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, ela é calculada de acordo com a Equação 2.8 (BRANDT et al., 1993).

$$\mathbf{PS(\%)} = \frac{C_p}{C_a} * 100 \quad (1.8)$$

#### 2.9.4 Pressão osmótica de uma solução iônica.

A pressão osmótica é uma pressão mecânica que se deve exercer sobre a solução, para impedir a passagem do solvente puro para solução, através de uma membrana semi-permeável. O efeito osmótico é também mais acentuado nas soluções iônicas do que nas soluções moleculares. A pressão osmótica que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução, e da espécie de íons presente.

Quanto maior for a concentração da solução, maior será a pressão osmótica dessa solução (Brant et AL.; 1993). O efeito osmótico depende do aumento de partículas devido à dissociação iônica.

A pressão osmótica é calculada pela equação de Van't Hoff.

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (1.9)$$

Onde:

$\pi$  - pressão osmótica (kgf/cm<sup>2</sup>);

$v_i$  - carga elétrica do íon  $i$ ;

$c_i$  - concentração molar (mol/L);

$R$  - constante universal dos gases perfeitos (kgf.L/cm<sup>2</sup>.mol.K);

$T$  - temperatura absoluta da solução (K).

Esta equação é usada para soluções diluídas, entretanto no processo de osmose inversa tem-se que aplicar uma pressão superior à pressão osmótica na membrana para que haja produção do permeado. A pressão osmótica é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação, o aumento do nível de recuperação do sistema faz com que, mais água é convertida em produto. Isto induz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumento de concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado, possibilitando precipitação na superfície da membrana.

### 2.9.5 Fluxo do permeado e do concentrado

Na osmose inversa como na membrana de nanofiltração os sais dissolvidos e moleculares orgânicos retidas na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima à superfície considerada.

Este aumento de concentração causa aumento no valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo de permeado. O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é inversamente proporcional à área da membrana e proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica (Taylon, 1996), é dado pela equação:

$$J_w = K_w * (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (1.10)$$

Onde:

- $J_w$  – taxa de fluxo de permeado ( $L/cm^2 \cdot min$ );
- $K_w$  – coeficiente de transferência de massa do solvente ( $L/cm^2 \cdot min$ );
- $\Delta P$  – gradiente de pressão aplicada ( $kgf/cm^2$ );
- $\Delta \pi$  – gradiente de pressão osmótica ( $kgf/cm^2$ );
- $Q_p$  – vazão do permeado ( $L/min$ );
- $A$  – área de permeação da membrana ( $cm^2$ ).

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou à diferença de potencial químico e independe da pressão aplicada ao sistema (Taylon, 1996). Logo, o fluxo do concentrado pode ser representado por:

$$J_s = K_s * \Delta C = \frac{Q_p * C_p}{A} \quad (1.11)$$

Onde:

- $J_s$  – fluxo mássico do soluto ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ );
- $K_s$  – coeficiente de transferência de massa do soluto ( $\text{cm}/\text{min}$ );
- $\Delta C$  – gradiente de concentração ( $\text{mg}/\text{L}$ );
- $Q_p$  – vazão do permeado ( $\text{L}/\text{min}$ );
- $C_p$  – concentração do permeado ( $\text{mg}/\text{L}$ ).

Neste caso, sabendo que  $\Delta P$ ,  $\Delta \pi$  e  $\Delta C$  são dados por:

$$\Delta P = \left( \frac{P_a + P_c}{2} \right) - P_p \quad (1.12)$$

$$\Delta \pi = \left( \frac{\pi_a + \pi_c}{2} \right) - \pi_p \quad (1.13)$$

$$\Delta C = \left( \frac{C_a + C_c}{2} \right) - C_p \quad (1.14)$$

Onde:

- $P_a$ ,  $P_c$  e  $P_p$  são as pressões da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente;
- $\pi_a$ ,  $\pi_c$  e  $\pi_p$  são as pressões osmóticas da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente;
- $C_a$ ,  $C_c$  e  $C_p$  são as concentrações da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

Temos que  $\Delta \pi$  pode ser dado por:

$$\Delta \pi = \left[ \left( \frac{\text{TDS}_a + \text{TDS}_c}{2} \right) - \text{TDS}_p \right] * 7,033 * 10^{-4} \quad (1.15)$$

Onde:

- $\Delta\pi$  – gradiente de pressão osmótica ( $\text{kgf/cm}^2$ );
- $\text{TDS}_a$  – sólidos totais dissolvidos na corrente da alimentação;
- $\text{TDS}_c$  – sólidos totais dissolvidos na corrente do concentrado;
- $\text{TDS}_p$  – sólidos totais dissolvidos na corrente do permeado.

O TDS é dado em  $\text{mg/L}$  e  $\Delta\pi$  é dado em  $\text{kgf/cm}^2$ . O fator de conversão é  $7,033 \cdot 10^{-4}$ , converte a pressão em  $\text{kgf/cm}^2$ .

### 2.9.6 Análises físico-químicas da água

A qualidade de uma água é definida por sua composição química e física sendo avaliada por um conjunto de parâmetros determinados por uma série de análises físicas e químicas.

A análise da água de alimentação serve para caracterizar contaminantes chaves presentes na água para sistema de Osmose Inversa (AMJAD, 1993). 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 sistema, além de indicar o tempo necessário para limpeza química.

A qualidade da água dessalinizada através de processos com membranas, devem responder as características físico-químicas indicadas pela *Portaria 518/2004 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).

## **2.9.7 Parâmetros físicos**

### **2.9.7.1 Cor**

Teoricamente a água pura é incolor. Mas a presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão altera a sua cor, dependendo da quantidade e da natureza do material presente.

Normalmente, a cor na água é devida a ácidos húmicos e taninos, originados da decomposição de vegetais, sem representar riscos à saúde. Também pode ser resultado da combinação com o ferro ou manganês e lançamentos de diversos tipos de resíduos industriais (LIBÂNIO, 2008).

### **2.9.7.2 Turbidez**

A turbidez é uma característica da água devida à presença de partículas suspensas na água com tamanhos variando, desde suspensões grosseiras aos colóides, dependendo do grau de turbulência.

A presença dessas partículas provoca a dispersão e absorção da luz, dando a água uma aparência nebulosa, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa (CETESB, 2010).

### **2.9.7.3 Condutividade elétrica**

A condutividade elétrica de uma amostra é a medida de sua capacidade de conduzir corrente elétrica sendo dependente do número e do tipo de espécies iônicas nela dispersas.

De fato, a concentração total, a mobilidade, a valência das espécies e a temperatura da solução têm grande importância na determinação da condutividade de uma amostra líquida.

Comumente, a condutividade é determinada à temperatura de 25°C. As células de condutividade podem ser do tipo eletrodo platinizado ou do tipo eletrodo não platinizado (APHA, AWWA, WPCF, 1998).

## **2.9.8 Parâmetros Químicos**

### **2.9.8.1 pH**

O potencial hidrogeniônico (pH) consiste na concentração de íons  $H^+$  nas águas e representa a intensidade nas condições ácidas ou alcalinas do ambiente aquático. É determinado em escala logarítmica  $pH = -\log[H^+]$  compreendido no intervalo de 0 a 14. A determinação do pH é uma das grandezas mais comuns e importantes no contexto da química da água.

No campo de abastecimento de água o pH intervém na coagulação química, controle de corrosão, abrandamento e desinfecção. O padrão de potabilidade, em vigor no Brasil, preconiza uma faixa de pH entre 6,5 e 8,5 (LIBÂNIO, 2008).

### **2.9.8.2 Dureza em cálcio e magnésio**

Águas duras são aquelas que exigem consideráveis quantidades de sabão para produzir espuma de modo que, no passado, a dureza de uma água era considerada como uma medida da sua capacidade de precipitar sabão.

Dureza é um parâmetro característico da qualidade de águas de abastecimento industrial e doméstico, sendo que do ponto de vista da

potabilização, são admitidos valores máximos relativamente altos, típicos de águas duras e muito duras. A dureza é devida a presença de cátions metálicos divalentes como cálcio e magnésio (APHA, AWWA, WPCF, 1998).

#### **2.9.8.3 Cloreto**

O íon cloreto é um dos principais íons inorgânicos presentes nas águas em geral. Na água potável, o gosto salgado produzido pela concentração de cloreto varia dependendo da composição química da água.

Algumas águas contendo 250 mg/L de cloreto podem ter um gosto salgado se o cátion for o sódio. No Brasil o valor Máximo permissível fixado pelo Padrão de Potabilidade de Água para consumo humano, é de 250 mg/L (APHA, AWWA, WPCF, 1998).

#### **2.9.8.4 Alcalinidade**

A alcalinidade de uma água é a sua capacidade de neutralização de ácidos e equivale à soma de todas as bases tituláveis. A alcalinidade é a medida de uma propriedade da água associada à sua capacidade de tamponação e só pode ser interpretada em função de substâncias específicas, quando a composição química da amostra analisada é conhecida.

Em águas superficiais a alcalinidade total é principalmente devida a carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos e geralmente seu valor é aceito como uma indicação da concentração desses constituintes (APHA, AWWA, WPCF, 1998).



### 2.9.8.5 Sílica

Encontram-se altas concentrações de sílica em muitos poços devido à percolação da água pelo solo. Nas águas naturais a sílica é comumente classificada como reativa ou não reativa.

A reatividade se refere à formação de compostos coloridos com íons de molibdato, que são mensurados colorimetricamente (NING, 2002).

### 2.9.8.6 Ferro total

O ferro está presente na forma insolúvel ( $\text{Fe}^{3+}$ ) numa grande quantidade de tipos de solos. Na ausência de oxigênio dissolvido (ex: água subterrânea), ele se apresenta na forma solúvel ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

Caso a água contendo as formas reduzidas seja exposta ao ar atmosférico (ex: na torneira do consumidor), o ferro volta à sua forma insolúvel ( $\text{Fe}^{3+}$ ), o que pode causar cor na água, além de manchar roupas durante a lavagem.

Em certas concentrações, podem causar sabor e odor (mas, nessas concentrações, ocorre a rejeição do consumidor, devido à cor). Na água subterrânea são mais propensas a apresentar teores mais elevados (CETESB, 2010).

### 2.9.8.7 Sulfato

O íon sulfato quando presente na água, dependendo da concentração além de outras propriedades laxativas mais acentuadas que outros sais, associados a íons de cálcio e magnésio, promove dureza permanente e pode ser um indicador de poluição de uma das fases de decomposição da matéria orgânica, no ciclo do enxofre (CETESB, 2010).

#### **2.9.8.8 Nitrogênio**

Dentro do ciclo do nitrogênio na biosfera, este se alterna entre várias formas e estados de oxidação. No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas: 1- nitrogênio molecular ( $N_2$ ), 2 - nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão), 3 - nitrito ( $NO^{2-}$ ) e nitrato ( $NO^{3-}$ ).

Águas com concentrações de nitratos predominantes indicam uma poluição remota, porque os nitratos são produtos finais da oxidação do nitrogênio. O nitrato está associado a doenças que afetam o sistema respiratório como a metahemoglobinemia (síndrome do bebê azul) (VON SPERLING, 2005).

#### **2.9.8.9 Amônia**

A Amônia está presente naturalmente em águas superficiais e residuárias. Essa concentração é geralmente pequena em águas subterrâneas, porque ela adere a partículas de solo ou argila, e não escapa facilmente das mesmas. Ela é originada principalmente da desaminação de compostos contendo nitrogênio orgânico e pela hidrólise da uréia (APHA, AWWA, WPCF, 1998).

#### **2.9.8.10 Alumínio**

Embora o metabolismo do alumínio pelo organismo humano não seja bem conhecido e alguns trabalhos sugerem sua associação com o mal de Alzheimer, até então seus efeitos tóxicos não são comprovados. Ademais, o alumínio é um elemento abundante na natureza e a exposição humana pelo consumo de água é relativamente reduzida.

Portanto, apesar de sua larga utilização no tratamento de água, as evidências disponíveis sugerem a manutenção de valores máximos permissíveis referentes apenas a aceitação para consumo: concentrações acima 0,20 mg/L podem provocar depósitos de flocos de alumínio em sistemas de distribuição e acentuar a contaminação por ferro provenientes das tubulações (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011).

#### **2.9.8.11 Sódio e Potássio**

Devido ao fato do íon sódio ser mono valente ele forma sais relativamente solúveis com a maioria dos ânions, entre eles, o bicarbonato, sulfato e cloreto. É muito abundante na natureza, encontrado no sal marinho e no mineral halita. No teste de chama arde na cor amarela. Na sua forma metálica é muito reativo, se oxida com o ar, reage violentamente com a água e é muito corrosivo quando entra em contato com a pele.

O potássio é um elemento químico essencial para o homem, encontrado em muitas hortaliças, e essencial para o crescimento das plantas. Empregado em células fotoelétricas. Não é provável estar presente em quantidades apreciáveis na água (APHA, AWWA, WPCF, 1998).

Através de dados da quantidade e qualidade da água da alimentação, da recuperação do sistema e da qualidade da água do permeado, foi possível realizar um balanço de massa do sistema de dessalinização.

### **2.10 Qualidade da água e análises físico-químicas.**

A qualidade das águas do afluente e dos efluentes do sistema de dessalinização é monitorada através de análises físico-químicas. Sabendo-se que a água foi dessalinizada a sua qualidade é geralmente estimada através de aparelhos como condutivímetro e pH-metro.

A condutividade indicará, de maneira aproximada, a concentração de sais da água. De acordo com a Filmtec (2008) e Filho (1983), a concentração de sais por ser estimada em mg/L, através do produto da condutividade elétrica com um fator de conversão. A Tabela 04 mostra as constantes que devem ser utilizadas de acordo com a condutividade elétrica.

**Tabela 04 – Constantes de conversão de condutividade para concentração.**

<b>Condutividade k (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	<b>Fator de conversão (<math>\text{mg}\cdot\text{cm}/\mu\text{S}\cdot\text{L}</math>)</b>
$k < 10$	0,50
$10 \geq k \leq 800$	0,55
$800 > k \leq 4.000$	0,65
$4.000 > k \leq 10.000$	0,75
$K > 10.000$	0,79

Fonte: Tabela adaptada de Filmtec (2008) e Filho (1983).

Na prática os resultados obtidos na conversão da condutividade para concentração apresenta uma aproximação, apresenta desvio de acordo com os tipos de sais e outras substâncias que estejam eventualmente dissolvidas na amostras. É importante salientar que nenhum resultado é tão próximo da realidade do que as análises físico-químicas.

A água dessalinizada através do processo de dessalinização com membranas, devem obedecer aos parâmetros físico-químicos estabelecido pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

## **2.11 Dessalinizador da Comunidade de Uruçu – São João do Cariri - PB.**

O dessalinizador de Uruçu tem por objetivo, gerar água potável e de boa qualidade para a comunidade, utilizando o concentrado gerado pelo processo para alimentação de peixes em tanques, para cultivo de hortaliças através de hidroponia e servir de meio de cultivo de Spirolina.

Considerando que a água concentrada gerada pelo dessalinizador de Uruçu, possui uma elevada concentração de sais dissolvidos, a aplicação direta de cultivo de hortaliças seria inviável. Assim, ocorre uma diluição do concentrado para sua ideal aplicação.

No presente trabalho foi inserido um sistema misto de membranas de micro e nano filtração utilizando a água do poço da Comunidade de Uruçu – São João do Cariri, com o intuito de observar o comportamento do sistema em relação ao sistema de osmose inversa existente na comunidade.

## CAPÍTULO III

### 3. Materiais e Métodos

Neste capítulo encontra-se a descrição do equipamento, materiais e métodos utilizados para a realização deste trabalho.

#### 3.1 Descrição do Sistema de Micro e Nano Filtração

O sistema utilizado no experimento no LABDES para o estudo é demonstrado na Figura 19, composto pelos seguintes itens:

**Figura 19 – Sistema composto por Microfiltração seguida de Nanofiltração.**



Fonte: LABDES/2012.



O sistema apresenta uma estrutura metálica composta por um tanque de 240 litros de água de alimentação conforme a Figura 20, outro tanque de 30 litros par a captação da água permeada do sistema conforme a Figura 21;

**Figura 20 – Tanque de alimentação.**



Fonte: LABDES/2012.

**Figura 21 – Tanque do permeado.**



Fonte: LABDES/2012.

Apresenta uma bomba de baixa pressão modelo CAM-W4C da DANCOR com potência de 1/2 CV, para alimentação do sistema, conforme demonstrado na Figura 22, e uma outra bomba de baixa pressão modelo CAM-W4C da DANCOR com potência de 1/4 CV, para retro lavagem do sistema conforme a Figura 23;

**Figura 22 – Bomba de alimentação do sistema.**



Fonte: LABDES/2012.

**Figura 23 – Bomba da retro lavagem do sistema.**



Fonte: LABDES/2012.

Possui uma Bomba multiestágios, de alta pressão modelo Booster da DANCOR com potência de 3/4 CV, para alimentação do elemento de nanofiltração (Figura 24).

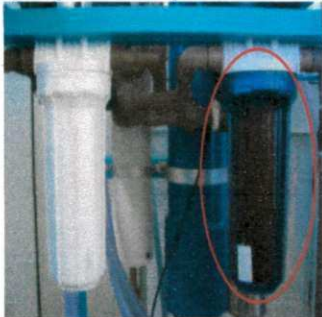
**Figura 24 – Bomba da alimentação da nanofiltração.**



Fonte: LABDES/2012.

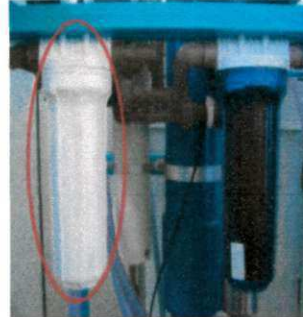
O sistema apresenta um pré-tratamento físico composto por um filtro de polipropileno expandido com taxa de filtração de 5  $\mu\text{m}$ , Figura 25, e um filtro do tipo Carbon Block, Figura 26, para pós-tratamento físico;

**Figura 25 – Módulo do filtro de polipropileno expandido.**



Fonte: LABDES/2012.

**Figura 26 – Módulo do filtro do tipo Car Block.**



Fonte: LABDES/2012.

Uma membrana de microfiltração na forma de fibras ocas com dimensão de 6" de diâmetro e 14  $\text{m}^2$  de área, desenvolvida pela PAN, Figura 27, e uma membrana de nanofiltração modelo NF90 – 4040 da Dow Chemical Company – Filmtec, com área de 7,6 $\text{m}^2$ , Figura 28. Entretanto os laudos técnicos de cada membranas se encontra em ANEXO J.



**Figura 27 – Módulo de membrana membranas de microfiltração**



Fonte: LABDES/2012.

**Figura 28 – Módulo de membrana de nanofiltração.**



Fonte: LABDES/2012

O sistema também apresenta 6 manômetros conforme a Figura 29, onde 4 apresentam faixa de leitura de (0,0 a 4,0) Kgf/cm<sup>2</sup>, 2 apresentam faixa de leitura de (0,0 a 20,0) Kgf/cm<sup>2</sup> e 3 rotâmetros sendo que 1 apresenta uma faixa de leitura de (9 a 20) L/min, 2 apresentam uma faixa de leitura de (4 a 10) L/min;

**Figura 29 - Manômetros do Sistema.**



Fonte: LABDES/2012.

### 3.2 Reagente químicos utilizados

Os reagentes utilizados nas análises físico-químicas nas águas produzida no sistema misto de micro e nano filtração.

- EDTA 0,025N;
- Hidróxido de Sódio 1N;
- Indicador Murexida;
- Solução Tampão pH = 10 → Hidróxido de Amônio PA + Cloreto de Amônio PA;
- Indicador de Eriocromo;
- Nitrato de Prata 0,05N;
- Indicador de Cromato de Potássio;
- Fenolftaleína;
- Ácido Sulfúrico 0,02N;
- Indicador de Alaranjado de Metila 0,1%;
- Ácido Ascórbico;
- Solução Tampão → Ácido Acético 1N + Acetato de Sódio PA;
- Solução de Eriocromo cianina R;
- Cloreto de Bário PA;
- Solução A → Nitrato de Potássio PA + Cloreto de Magnésio Hexahidratado PA + Acetato de Sódio Trihidratado PA + Ácido Acético PA;
- Solução B → Nitrato de Potássio PA + Cloreto de Magnésio Hexahidratado PA + Acetato de Sódio Trihidratado PA + Ácido Acético PA + Sulfato de Sódio PA;
- Solução padrão de Sódio e Potássio;
- Persulfato de Amônio;
- Reagentes Colorimétricos;
- Substrato cromogênico–colilert;
- Tiosulfato de sódio a 10 %.

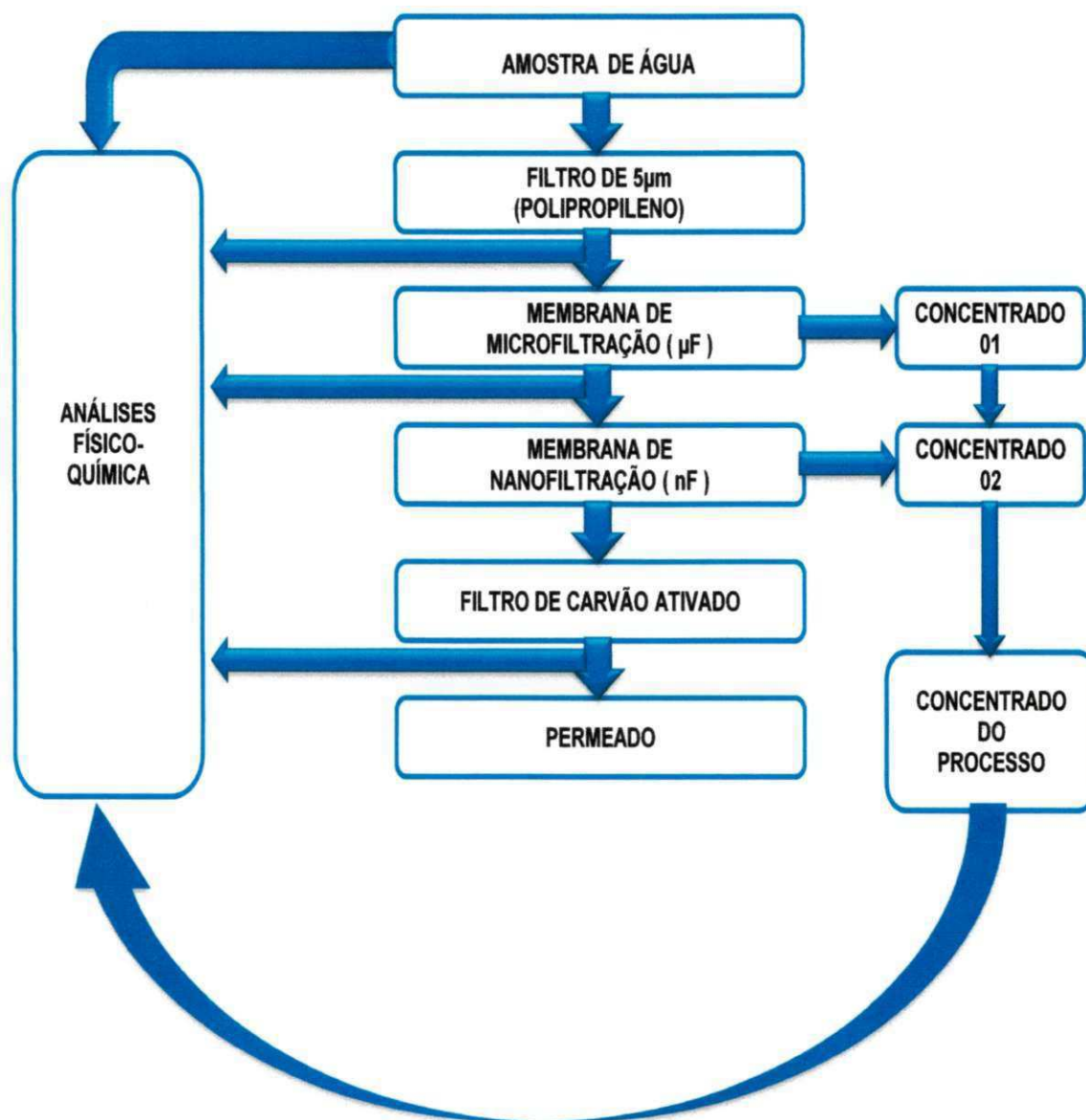
### **3.3 Instrumentação**

- Condutivímetro-600 da ANALYSER;
- pHmetro Digital PG 2000 da GEHAKA;
- 2100 P Turbidímetro da HACH;
- Smart Colorímetro LaMotte da PoliControl;
- Cronômetro da EXTECH INSTRUMENTS;
- Agitador de Tubos AP56 da PHOENIX;
- Espectrofotômetro SP-220 da BIOSPECTRO;
- Fotômetro de Chama 910 da ANALYSER;
- Balança Analítica HR-200 da A&D Company Limited;
- Capela Q-216-22EX da QUIMIS®;
- Pipetus®-Akku da HIRSCHMANN® LABORGERATE;
- Akku-Drive® Titration 20/50mL da HIRSCHMANN® LABORGERATE;
- Banho Maria da MARCONI EQUIPAMENTOS PARA LABORATÓRIO;
- Estufa Orion® 515 A da FANEM® SÃO PAULO – BRASIL;
- Estufa de Cultura Orion® 502 da FANEM® SÃO PAULO – BRASIL;
- Agitador Magnético Modelo 752 da FISATOM;
- Manta Aquecedora Modelo 752A da FISATOM;
- Nessler Quanti 200 da PoliControl;
- Bomba à Vácuo Modelo 820 da FISATOM;
- Autoclave Vertical da PHOENIX;
- Gabinete com lâmpada ultravioleta da OITTON série: 0102.

### 3.4 Diagrama de bloco do sistema

A Figura 30 apresenta um quadro geral o sistema misto de membranas de micro e nano filtração usada no processo de dessalinização da água da comunidade de Uruçu – São João do Cariri – PB durante o experimento o LABDES.

Figura 30 – Diagrama de blocos do sistema de micro/nanofiltração utilizado no LABDES.



### 3.5 Procedimento Experimental

A metodologia usada no desenvolvimento deste trabalho, foi da seguinte maneira:

Após a instalação do sistema de membranas de micro e nanofiltração, foi observado que no sistema havia um filtro comum antes da entrada de alimentação da membrana de microfiltração, uma saída do concentrado da membrana de microfiltração e o permeado da membrana de microfiltração é a alimentação da membrana de nanofiltração. No sistema há também um concentrado da membrana de nanofiltração e um permeado da membrana de nanofiltração. Com estas observações, encheu-se a alimentação do sistema com uma amostra de água obtida na região de Uruçu no município de São João do Cariri – PB em um período não sazonal, sabendo que condutividade da amostra de água é de 2.200 ms.

Daí iniciou-se o experimento, dividido em seis bateladas, duração de duas horas cada, sendo duas com água inatura. Em cada batelada foi feito um “*looping*” no sistema para coletas de amostras de água a cada 10 minutos, para determinar as seguintes variáveis: condutividade, pressão, pH, vazão e temperatura, até completar do tempo de duas horas. Toda corrente de concentrado das membranas de microfiltração e de nanofiltração e o permeado da membrana de nanofiltração, volta para alimentação do sistema.

No final de cada batelada, foi coletada a amostra de água em seis pontos determinado no sistema: alimentação do sistema (Pré-Filtro), alimentação da membrana de microfiltração (Pós-Filtro), concentrado da membrana de microfiltração, permeado da membrana de microfiltração, concentrado da membrana de nanofiltração e o permeado da membrana de nanofiltração. Através de método analíticos determinou-se as concentrações de sais das amostras de águas em cada ponto de coleta do sistema.

## **3.6 Métodos Analíticos**

Os procedimentos analíticos realizados no LABDES para análise das amostras de água tomaram como referência os métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 1998.

### **3.6.1 Parâmetros físicos**

#### **3.6.1.1 Cor**

Para medições de cor foi utilizado um colorímetro com disco de cor, onde existe um tubo de ensaio para a prova em branco com água destilada em paralelo com o tubo de ensaio com a amostra a ser comparada com a água destilada que é um referencial marcando cor igual a zero. O alcance deste aparelho é de 0 a 250 Unidade Hazen (mg Pt-Co/L). De acordo com a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde o valor máximo permissível para cor em amostras de água é de 15(mg Pt-Co/L).

#### **3.6.1.2 Turbidez**

As análises para as determinações de turbidez foram feitas em um turbidímetro, onde a amostra a ser analisada é colocada nas cubetas, o alcance deste equipamento varia entre 0 e 1000 UT (unidade de turbidez). Os padrões permissíveis da portaria 518 para potabilidade humana recomendam águas com turbidez até 5 UT.

### **3.6.1.3 Condutividade elétrica**

O método baseia-se na utilização instrumental do condutivímetro, inicialmente o equipamento foi calibrado com a solução de KCl 1412  $\mu\text{MHO/cm}$  25°C em seguida foi lavada a célula com água deionizada e retirado o excesso de água com papel absorvente e por fim foram medidas as condutividades elétricas das amostras.

## **3.6.2 Parâmetros Químicos**

### **3.6.2.1 pH**

Realizado pelo método potenciométrico. Antes do uso o eletrodo foi lavado com água deionizada e o excesso absorvido com papel absorvente em seguida foi feita a calibração do equipamento com soluções tampões pH 7.0 e 4.0, a calibração termina em torno do 95%, deve-se enxaguar com água deionizada antes de imergir o eletrodo nas soluções e por fim mediu-se o pH das amostras. O pHmetro utilizado foi digital PG 2000 GEHAKA.

### **3.6.2.2 Dureza em cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )**

Feitas a partir do método titulométrico de complexação do EDTA. Na análise do cálcio utilizou-se soluções de: EDTA (0,025 N), NaOH (1N) e como indicador a murexida. Inicialmente tomou-se 25 mL das amostras, introduziu-se 1 mL do NaOH 1N, para ajustar o pH entre 12 e 13, em seguida adicionou-se o indicador de murexida obtendo uma coloração róseo claro e após titular lentamente com o EDTA 0,025 N obteve-se uma mudança na coloração de róseo para lilás.

Na determinação do magnésio utilizou-se soluções de EDTA (0,025N), solução tampão pH 10 e como indicador o negro de eriocromo-T. Tomou-se

25 mL das amostras adicionadas de 2 mL da solução tampão pH 10 e uma pequena porção do indicador de eriocromo aparecendo a coloração vinho, com a titulação do EDTA 0,025 N o ponto final indicou uma mudança de cor do vinho para azul.

O volume gasto de EDTA utilizado na determinação de magnésio deve ser o volume total gasto na titulação menos o volume de EDTA gasto na determinação do cálcio, pois o indicador de eriocromo indica a presença de cálcio+magnésio.

### **3.6.2.3 Cloreto (Cl<sup>-</sup>)**

Foi realizado pelo método argentimétrico (método de Mohr), onde durante a titulação os íons cloretos são precipitados na forma de cloreto de prata utilizando cromato de potássio como indicador do ponto final da reação. Na execução do método tomou-se alíquotas de 25 mL, ajustou-se o pH para que fique em torno de 6,5 a 10, introduziu-se 3 gotas da solução indicadora de cromato de potássio, onde foi titulada em seguida sob agitação constante com a solução padrão de nitrato de prata.

### **3.6.2.4 Alcalinidade**

Para a determinação dos componentes da alcalinidade foi utilizado o método titulométrico de neutralização utilizado como titulante o ácido sulfúrico 0,02 N e como indicador para carbonatos, a fenolftaleína e para bicarbonatos o alaranjado de metila, inicialmente tomou-se alíquotas de 25 mL das amostras e adicionou-se 3 gotas da fenolftaleína, com a aparição da cor rosa o ponto final da titulação foi observado com o descoloramento do indicador. Nesta mesma solução adicionou-se 3 gotas do alaranjado de metila e o ponto final foi observado pela mudança de coloração de amarelo para laranja avermelhado.



### 3.6.2.5 Sílica

A sílica foi avaliada por análises colorimétricas. A um pH de aproximadamente 1,2 o molibdato de amônio reage com silicato e qualquer fosfato presente, produzindo ácido molibdosilícico e ácido molibdofosfórico. Adicionou-se ácido oxálico para eliminar o ácido molibdofosfórico, restando o ácido molibdosilícico de cor amarelada, cuja intensidade corresponde à concentração de sílica na amostra. Os reagentes descritos acima correspondem ao SI-S1 e SI-S2, reagentes utilizados na execução do método onde: adicionou-se 20 gotas do SI-S1 em 10 mL da amostra numa cubeta do Smart Colorímetro agitar e aguardar 5 minutos posteriormente 4 gotas do SI-S2 agitar, aguardar 1 minuto e realizar a leitura.

### 3.6.2.6 Ferro total

Método realizado por análises colorimétricas tem como princípio a formação de um complexo róseo entre os sais de ferro (II) com ferro espectral. Os cátions de ferro (III) são reduzidos no meio reacional, apresentando resposta igual aos cátions de ferro (II). O pH ideal da reação é de 3,0 a 7,5, tornando-se inconveniente leituras em soluções com  $\text{pH} \gg 8,0$ .

Em soluções mais ácidas é necessária a adição de mais uma gota do reagente colorimétrico para que o desenvolvimento da reação seja satisfatório. Colocar numa cubeta do Colorímetro 10 mL da amostra, adicionar 2 gotas do reagente FE-S1 na cubeta com a amostra, agitar levemente e aguardar 5 minutos até que a leitura seja realizada.

### 3.6.2.7 Sulfato

O sulfato foi determinado pelo método espectrofotométrico. O comprimento de onda utilizado foi 420 nm, a solução tampão acética "A" serviu para amostras com concentrações de sulfatos elevadas necessitando de diluições e a solução acética "B" serviu para amostras com concentrações de sulfato baixíssimas, uma vez que a solução "B" possui uma pequena quantidade de sulfato.

Tomou-se 50 mL das amostras e sob agitação durante um minuto, adicionamos 10 mL da solução acética com aproximadamente 0,5 g de cloreto de bário, em seguida transferiu-se uma porção para uma cubeta e realizou-se a leitura da absorbância, procedeu-se do mesmo modo para a prova em branco.

### 3.6.2.8 Nitrato

O método se baseia na redução de nitrato presente na amostra a nitrito. O nitrito é então determinado pela formação de um azo corante, por copulação entre ácido sulfanílico diazotado e dicloridrato de N-(1 naftyl)-etilenodiamina, em um pH entre 2,0 e 2,5. Foi transferido 10 mL de amostra na cubeta onde adicionou-se: 4 gotas de NTA-S1 com agitação, 2 gotas de NTA-S2 e aguardamos 5 minutos para adicionar 5 gotas de NTA-S3 agitando e esperando 5 minutos, por fim foram adicionados 4 gotas do NTA-S4 com vigorosa agitação após 15 minutos foi feita a leitura no Smart colorímetro.

### 3.6.2.9 Nitrito

Assim como acontece com o nitrato, o nitrito é determinado pela formação de um azo corante, por copulação entre ácido sulfanílico diazotado e dicloridrato de N-(1 naftyl)-etilenodiamina, em um pH entre 2,0 e 2,5.

Como o ácido sulfanílico diazotado é gerado no meio por reação entre o ácido sulfanílico adicionado e o nitrito presente na amostra, a intensidade da coloração final depende da concentração de nitrito na amostra.

#### 3.6.2.10 Amônia

O método colorimétrico baseia-se na reação entre o cátion  $\text{NH}_4^+$  e o complexo  $(\text{HgI}_4)^{2-}$ :  $\text{NH}_4^{1+} + 2(\text{HgI}_4)^{2-} + 4\text{OH}^{1-} \rightarrow \text{HgO} \cdot \text{Hg}(\text{NH}_2)\text{I} \downarrow + 7\text{I}^{1-} + 3\text{H}_2\text{O}$ , o amidiodeto básico de mercúrio formado leva a uma coloração entre amarela e marrom, consoante a concentração de amônia envolvida. Com o passar do tempo o composto agrega em cristais e precipita. O procedimento da análise foi 10 mL das amostras e 4 gotas do reagente AM-S1 com espera de 30 minutos antes da leitura. Proceder da mesma forma para a prova em branco.

#### 3.6.2.11 Alumínio

A metodologia empregada para as determinações de alumínio foi a colorimétrica, com a ajuda de pipetas volumétricas transferiu-se 5 mL para a cubeta do Smart, adicionou 0,2 mL de ácido sulfúrico 1 mL da solução de eriocromo cianina 0,02 N sob agitação, 0,2 mL da solução de ácido ascórbico, 2 mL da solução tampão de acetato de sódio e ácido acético e foi aguardado 10 minutos para a leitura no Smart Colorímetro.

#### 3.6.2.12 Sódio e potássio

A técnica de fotometria de chama foi a empregada para realizar as determinações de sódio e potássio nesse caso, as amostras contendo esses cátions metálicos são inseridas em uma chama e analisada pela quantidade de radiação emitida pelas espécies iônicas excitadas.. Para calibração do

equipamento foi colocada no atomizador a solução de calibração que contém as concentrações de  $\text{Na}^+$  140 meq/L e  $\text{K}^+$  5 meq/L e a amostra referencial, água deionizada com condutividade elétrica em torno de 0,5  $\mu\text{MHO/cm}$ . Após estabilização da calibração foram feitas as leituras das amostras.

### **3.7 Índice de Densidade de Sedimentos e Índice de Saturação de Langelier**

Para a determinação do Índice de Densidade de Sedimentos foi utilizado um equipamento básico de medição do IDS sob uma pressão de 2,1  $\text{kgf/cm}^2$  que posteriormente atravessa a membrana com porosidade de 0,45  $\mu$  para serem calculados os três tempos: o primeiro intervalo ( $t_1$ ) foi o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL de permeado, o segundo intervalo de tempo ( $t_2$ ) foi de 15 minutos, o qual é intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 mL de permeado e o início da coleta dos segundos 500 mL de permeado.

O terceiro intervalo de tempo ( $t_3$ ) foi o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o  $t_3$  é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação 1.0 encontrada no item 2.6.2.

Os testes e análises foram feitos em cada batelada realizada no sistema de micro e nano filtração com intuito de acompanhar suas variações em função do tempo e melhor avaliar os procedimentos de limpeza química quando necessário. O procedimento para realização do Índice de Saturação de Langelier foi feito a partir das análises físico-químicas das amostras da água coletadas para procedimento analítico onde foram avaliadas as concentrações de carbonato de cálcio para obtenção do referido Índice de acordo com as Equações: 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 encontradas na seção 2.6.3 deste trabalho.

### 3.8 Taxa de Rejeição de Sais, Passagem de Sais e Recuperação do Sistema

Para realização da Taxa de Rejeição de Sais e Passagem de Sais foram utilizadas as concentrações das espécies químicas da corrente de alimentação e da água produzida conforme escrito nas seções 2.9.2 Equação 1.7 e 2.9.3 Equação 1.8 respectivamente. Os laudos físico-químicos estão no **ANEXO C**. A recuperação do sistema foi obtida através do monitoramento das vazões lidas pelos rotâmetros do dessalinizador nas correntes da alimentação, concentrado e permeado conforme visto no item 2.9.1 Equação 1.6. Os dados do monitoramento destas variáveis encontram-se no **ANEXO B**. Já os fluxos do permeado e do concentrado de água produzida conforme escrito nas seções 2.9.5 Equação 1.10 e 2.9.5 Equação 1.11 respectivamente. O resultado das análises físico-química encontra-se em **ANEXO G** os valores das análises físico-química do sistema de micro e nanofiltração e do sistema de osmose inversa.

### 3.10 Balanço de massa do sistema

O balanço é importante para futuras comparações com os dados reais gerados pelo sistema em operação e para a avaliação da água. Com base no sistema de dessalinização foi possível desenvolver a seguinte equação:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (1.16)$$

Um balanço de massa, também chamado um balanço material, é uma aplicação do princípio da conservação da massa para a análise de sistemas físicos. Pela medição de material entrando e deixando um sistema os fluxos de massa podem ser identificados, os quais podem ser desconhecidos, ou difíceis de serem conhecidos sem esta técnica.

A exata lei de conservação usada na análise do sistema depende do contexto do problema, mas tudo é resolvido pela conservação da massa que matéria não pode desaparecer ou ser criada espontaneamente.

Para o sistema de micro e nanofiltração temos balanços separadamente para cada membrana, sendo que o somatório dos balanços de massa destas duas membranas obedece à Equação 1.16, daí foi possível desenvolver as seguintes equações:

Para membrana de microfiltração temos:

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (1.17)$$

Para membrana de nanofiltração temos:

$$Q_{p1} C_{p1} = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c2} C_{c2} \quad (1.18)$$

Substituindo a Equação 2.16 na Equação 2.15 daí obtemos o somatório da equação do balanço de massa do sistema 2.15.

$$Q_a C_a = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c1} C_{c1} + Q_{c2} C_{c2} \quad (1.19)$$

Onde:

$$\bullet \quad Q_{p2} C_{p2} = Q_p C_p \quad (1.20)$$

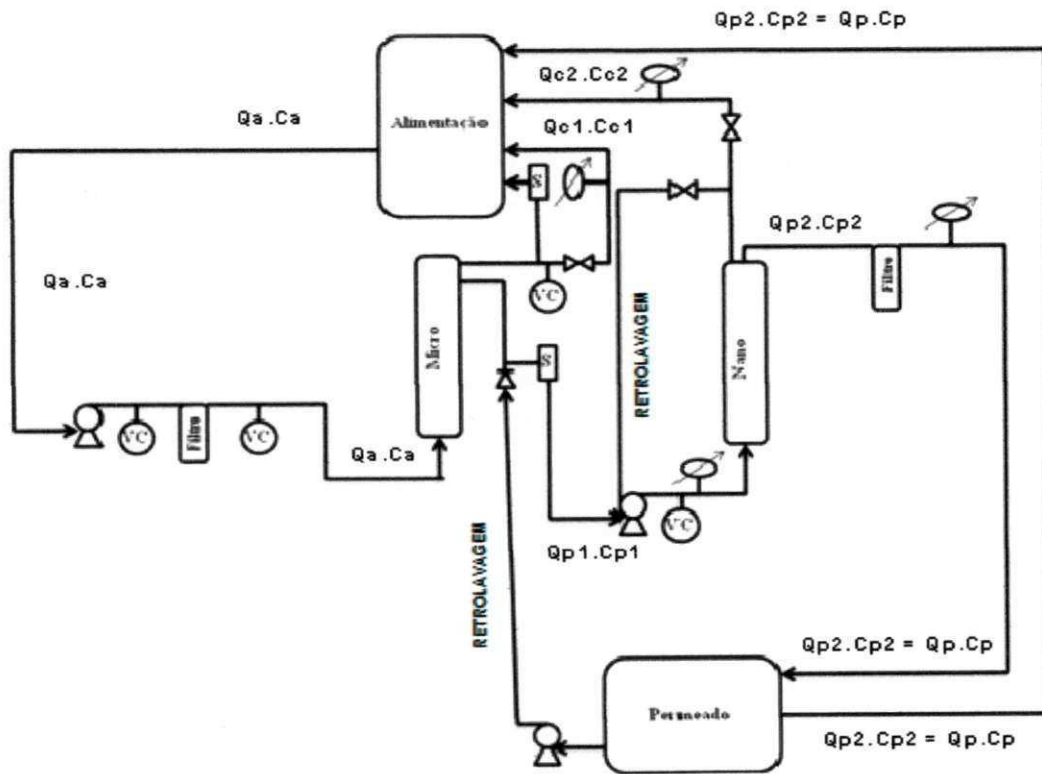
$$\bullet \quad Q_{c1} C_{c1} + Q_{c2} C_{c2} = Q_c C_c \quad (1.21)$$

Daí temos a equação 2.15:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (1.22)$$

Estes balanços de massa podem ser observados no fluxograma do sistema de micro e nanofiltração da Figura 31.

**Figura 31 – Fluxograma do sistema de micro e nanofiltração**



## CAPÍTULO IV

### 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados parciais obtidos a partir do fluxograma do projeto exposto no capítulo anterior:

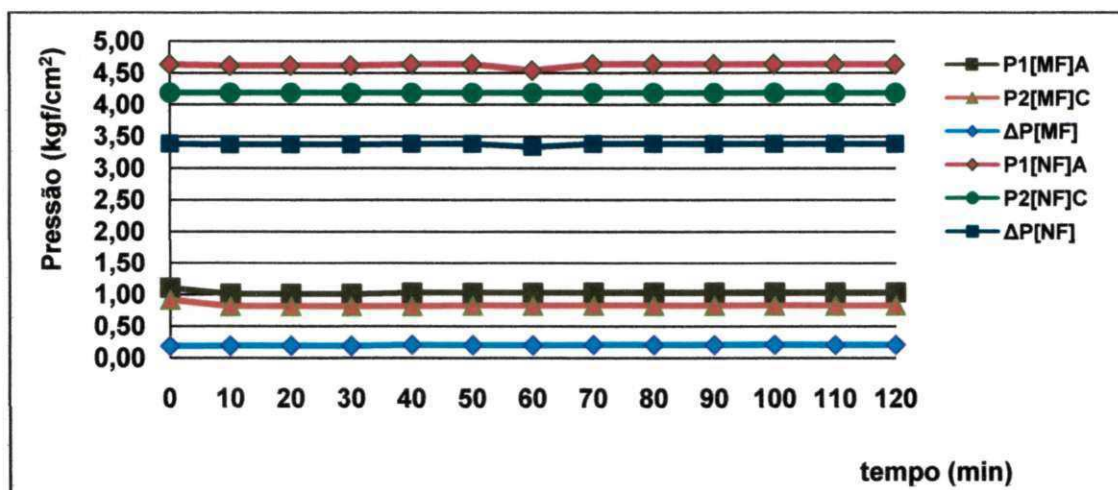
- Análises de pressões e vazões da água da comunidade de Uruçu no sistema de micro e nanofiltração comparando com o sistema de osmose inversa situada na mesma comunidade;
- A partir das análises, foi estudado o comportamento da capacidade de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração, comparando com o sistema de osmose inversa;
- O estudo da recuperação do sistema de micro e nanofiltração comparando com sistema de osmose inversa.
- O estudo do comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas;
- Observar a variação da temperatura do sistema de micro e nanofiltração durante as seis bateladas;
- Calcular da pressão osmótica do sistema de micro e nanofiltração após as seis bateladas;
- Calcular o coeficiente de transferência de massa do solvente (permeado) e do soluto (concentrado) do sistema de micro e nanofiltração após as seis bateladas;
- Calculo do balanço de massa do sistema de micro e nanofiltração;
- Determinação do SDI do sistema de micro e nanofiltração;
- Limpeza química do sistema de micro e nanofiltração.



#### 4.1 Análises de Pressões

A Figura 32 mostra o comportamento da média de pressão das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração da água de Uruçu no LABDES, ou seja, as médias das pressões de alimentação, médias pressões do permeado, médias das pressões do concentrado e com suas médias das variações de pressões de cada elemento de membrana do sistema.

Figura 32 – Comportamento das pressões do sistema de micro e nanofiltração.



Observa-se com o tempo de operação do sistema, que as pressões necessárias para produzir água desejada na membrana de microfiltração um comportamento de baixa variação.

E que as pressões do sistema permanecem constantes, a não ser uma pequena variação no início da operação do processo, mas mesmo assim não houve mais variação durante o tempo de operação do sistema.

Na membrana de microfiltração pressão média de alimentação foi de  $1,03 \text{ kgf/cm}^2$  enquanto as pressões médias do concentrado, do permeado e o  $\Delta P$  são:  $0,83 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $4,62 \text{ kgf/cm}^2$  e  $0,2 \text{ kgf/cm}^2$  respectivamente.

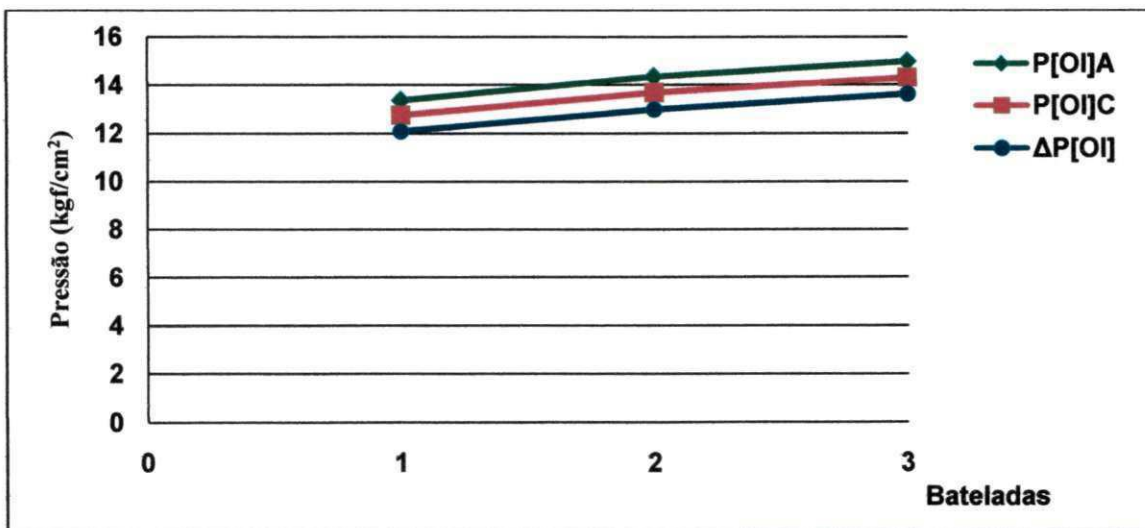
A membrana de nanofiltração com o tempo de operação do sistema, na produção de água desejada, apresenta uma maior variação na pressão em relação à membrana de microfiltração.

Na membrana de nanofiltração a pressão média da alimentação foi de  $4,62 \text{ kgf/cm}^2$  enquanto as pressões médias do concentrado, do permeado e o  $\Delta P$  são:  $4,19 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1,03 \text{ kgf/cm}^2$  e  $3,38 \text{ kgf/cm}^2$  respectivamente.

Esses resultados indicam que mesmo com as variações de pressão, o sistema apresenta uma produção de uma água boa. Os resultados das pressões médias estão em **ANEXO A**.

A Figura 33 mostra o comportamento da média de pressão de três bateladas do sistema de osmose inversa da comunidade de Uruçu, ou seja, pressões de alimentação, de saída e sua variação de pressão.

Figura 33 – Comportamento das pressões do sistema de Osmose Inversa.



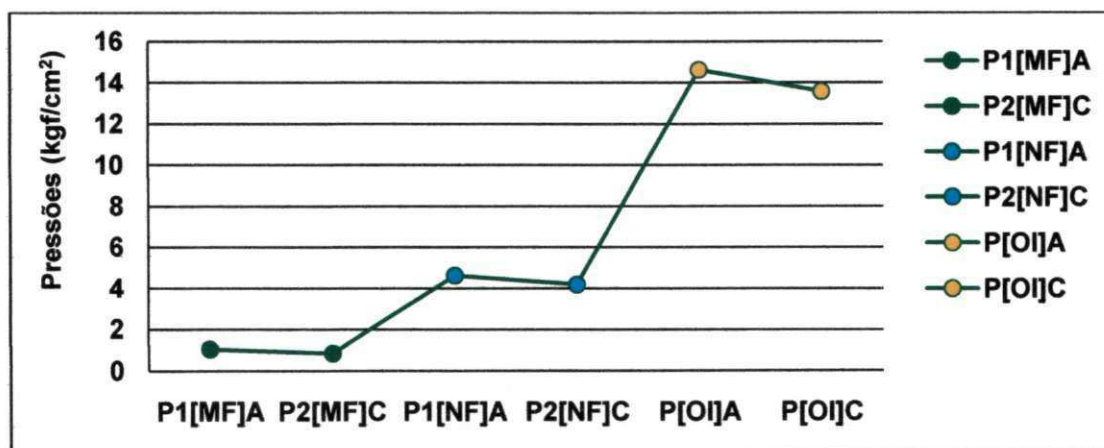
Observa-se que a média das pressões das três bateladas do sistema de osmose inversa, apresenta um aumento de pressão a cada batelada. E a pressão de entrada no sistema aumenta, na produção de água desejada. Entretanto a pressão de saída (concentrado) de cada batelada também ocorreu um aumento, mas em comparação a média da alimentação é menor.

Este comportamento se dá devido ao aumento na produção de água desejável no sistema para o abastecimento da comunidade de Uruçu. Com aumento das incrustações nas membranas do sistema durante o processo, é preciso aumentar a pressão na alimentação para produzir água desejável.

Portanto na membrana de osmose inversa a pressão média da alimentação é de  $14,62 \text{ kgf/cm}^2$ , enquanto a pressão média da saída e o  $\Delta P$  são:  $13,59 \text{ kgf/cm}^2$  e  $12,9 \text{ kgf/cm}^2$  respectivamente. Os resultados estão em **ANEXO A**.

A Figura 34 mostra a comparação das pressões médias dos dois sistemas que operam com a mesma água da comunidade de Uruçu. O sistema de micro e nanofiltração é representado pela média de pressão de seis bateladas, já o sistema de osmose inversa é representado pela média de pressão de três bateladas.

**Figura 34 – Comparação das pressões do sistema de micro e nanofiltração e osmose inversa.**



Observa-se que as três membranas apresentam o mesmo comportamento, com a pressão da alimentação maior do que a pressão do concentrado.

Este comportamento ocorre devido a maior barreira (resistência) à passagem de sais ocasionada pela diminuição do diâmetro dos poros de cada membrana, e por apresentar incrustações durante o tempo de operação do sistema.



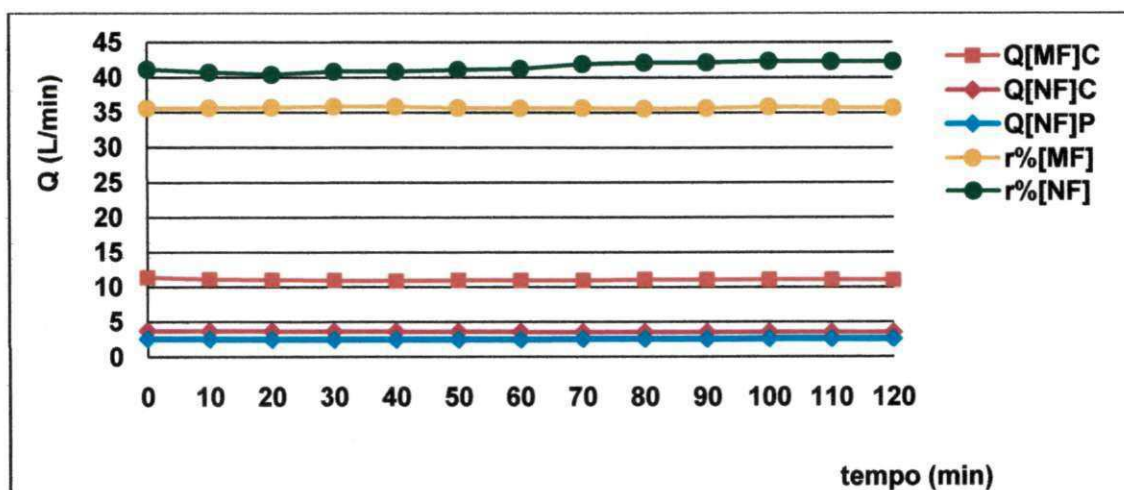
Na membrana de microfiltração observa-se que os valores apresentados são muito menores devido à pressão de operação ser menor do que as outras duas membranas.

Entretanto o sistema de micro e nanofiltração apresenta uma boa produção de água desejável próximo ao do sistema de osmose inversa, e por o sistema ser operado com menores pressões em relação ao sistema de osmose inversa ocorrendo um menor consumo de energia. Os resultados das médias de pressão estão em **ANEXO A**.

#### 4.2 Análises das Vazões.

A Figura 35 mostra o comportamento das vazões e a recuperação médias das seis bateladas ocorrida no sistema de micro e nanofiltração.

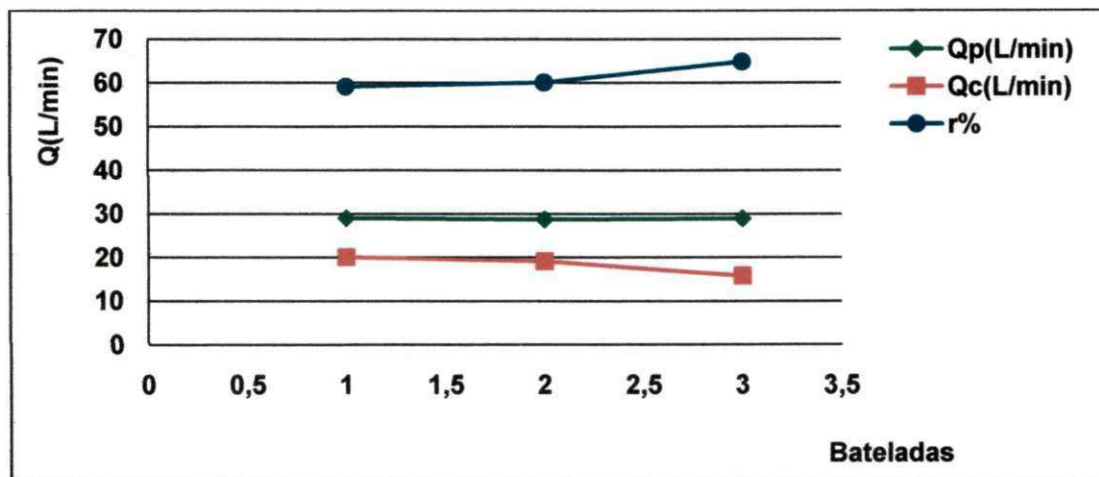
Figura 35 – Comportamento das vazões no sistema de micro e nanofiltração.



Observa-se que com o tempo de operação do sistema, as vazões do sistema se mantêm constantes. Entretanto a maior recuperação de água boa no sistema ocorre na membrana de nanofiltração, devido ao diâmetro dos poros da membrana de nanofiltração ser menor que o da membrana de microfiltração, e por isso apresentar uma rejeição de ânions bivalentes entre de 90% a 96% (Schneider e Tsutiya, 2001). A média da recuperação do sistema é de 41,48 %. Os resultados estão em **ANEXO B**.

A Figura 36 mostra o comportamento das vazões e a recuperação de três bateladas ocorrida no sistema de osmose inversa.

Figura 36 – Comportamento das vazões do sistema de osmose inversa.

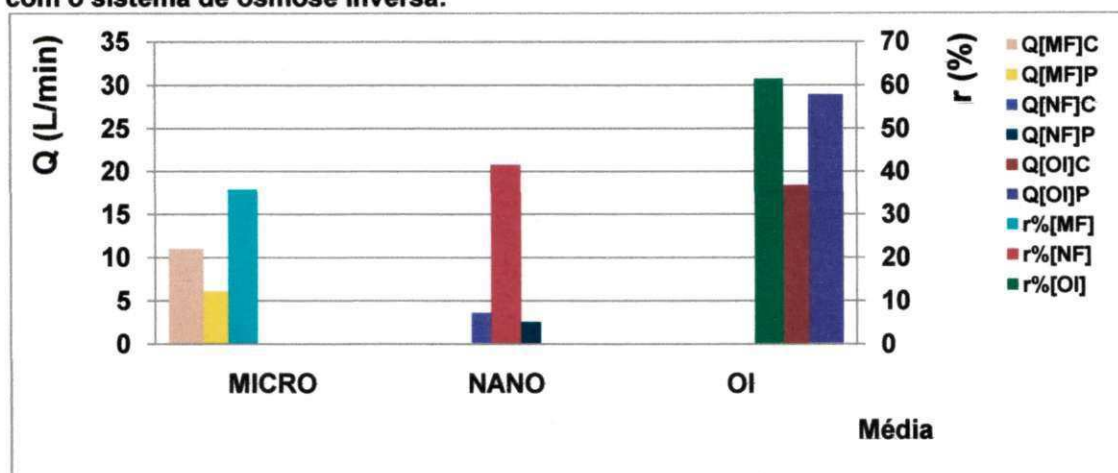


Observa-se que as vazões do sistema se mantêm constantes em cada batelada, no entanto a maior recuperação de água boa no sistema é da terceira batelada.

Este fato ocorre com o aumento da pressão do sistema, para ocasionar uma maior produção de água desejada. Sendo que nesta obtenção de água desejada, obtêm uma recuperação de 64,87% no sistema. Os resultados estão em **ANEXO B**.

A Figura 37 mostra a comparação da média das recuperações dos sistemas de micro e nanofiltração com o de osmose inversa.

Figura 37 – Comparação da média das recuperações do sistema de micro e nanofiltração com o sistema de osmose inversa.



Observa-se que com o tempo de operação do sistema, as vazões do sistema se mantêm constantes para cada sistema. Entretanto a maior recuperação de água boa nesses processos de membranas é da membrana de osmose inversa, um dos fatores que ocasiona esta maior recuperação é o seu diâmetro e por trabalhar com pressões mais elevadas. A osmose inversa apresentar uma recuperação de água boa desejável entorno de 64,87%. Os resultados estão em **ANEXO B**.

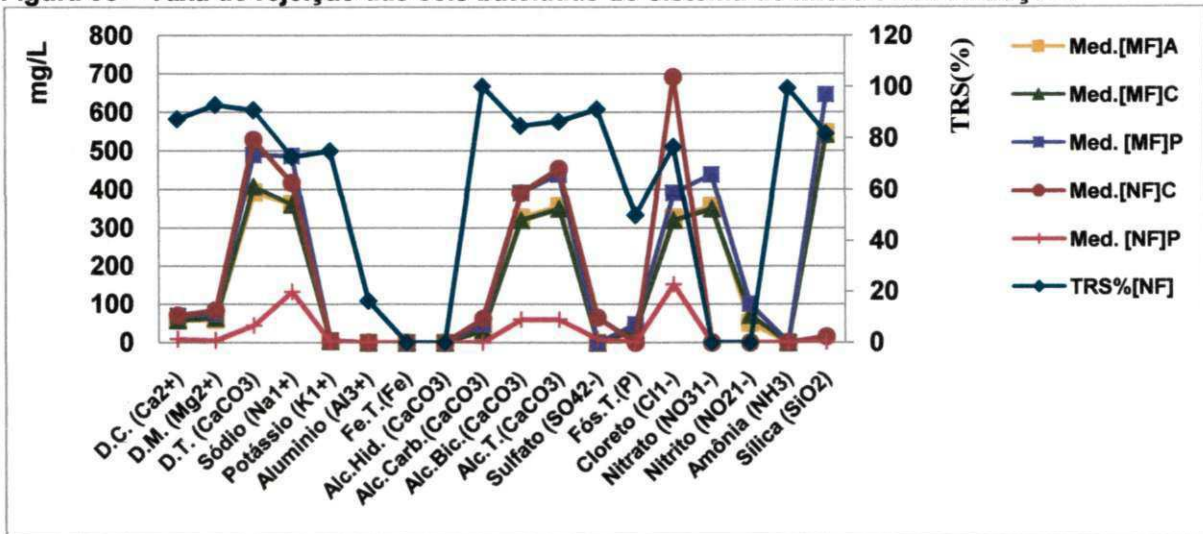
#### 4.3 Análises da Taxa de Rejeição de Sais (TRS)

Com base nos dados das análises físico-química na obtenção das concentrações de sais em cada batelada ocorrida tanto no sistema micro e nanofiltração como no sistema de osmose inversa, determinou-se a taxa de rejeição de sais de cada sistema, daí comparou-se estas taxas.

A Figura 38 representa a média das seis bateladas das taxas de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração.



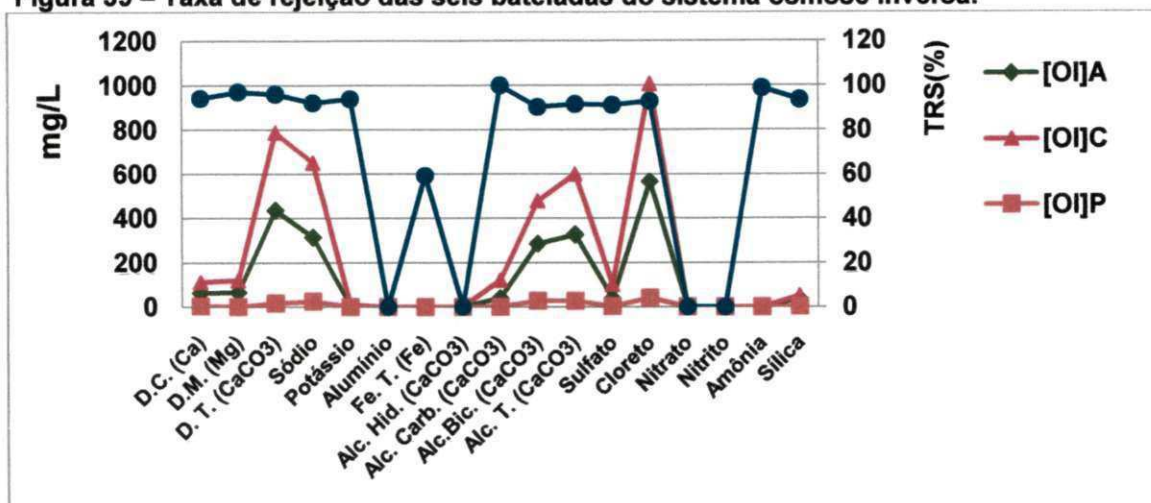
Figura 38 – Taxa de rejeição das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.



Pode-se observar através da Figura 39 que a taxa de rejeição para alguns sais do sistema de micro e nanofiltração obteve valores próximo do desejado de 100%, como exemplo o da amônia que é entorno de 99,40% segundo o cálculo feito pela equação 1.7. Entretanto observa-se que para alguns sais a taxa de rejeição foi muito baixa como, por exemplo, é o cloreto que é entorno de 76,52% segundo o cálculo feito pela equação 1.7. Os outros valores das taxas de rejeição de sais se encontram através de uma tabela em **ANEXO C**.

A Figura 39 representa média das três bateladas da taxa de rejeição de sais do sistema de osmose inversa.

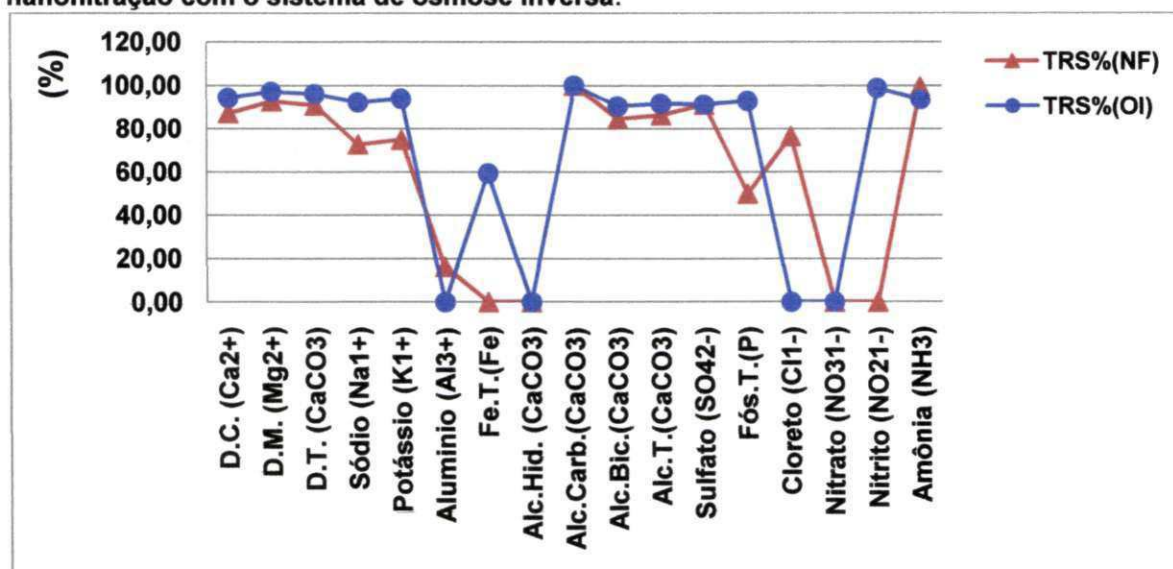
Figura 39 – Taxa de rejeição das seis bateladas do sistema osmose inversa.



A taxa de rejeição de sais sistema de osmose inversa é representada pela média de três bateladas através da Figura 40 mostrando a eficiência do sistema em relação à extração de sais. Pode-se observar como, por exemplo, a taxa de rejeição de sais do cloreto, que é entorno de 92,87% segundo o cálculo feito pela equação 1.7. Os outros valores das taxas de rejeição de sais se encontram através de uma tabela em **ANEXO C**.

A Figura 40 representa a comparação da taxa de rejeição de sais da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração com a taxa de rejeição de sais de três bateladas do sistema de osmose inversa.

Figura 40 – Comparação das taxas de rejeição de Sais do sistema de micro e nanofiltração com o sistema de osmose inversa.



Observa-se, com as análises de concentrações de sais do sistema de micro e nanofiltração e do sistema de osmose inversa, alguns sais ocorre uma taxa de rejeição próxima ou igual na comparação dos sistemas.

Entretanto pode-se citar como exemplo alcalinidade em carbonatos a amônia, e etc... Assim mostra-se que o sistema de micro e nanofiltração apresenta um comportamento bom na retira de sais de águas salobras. Os resultados estão em **ANEXO C**.

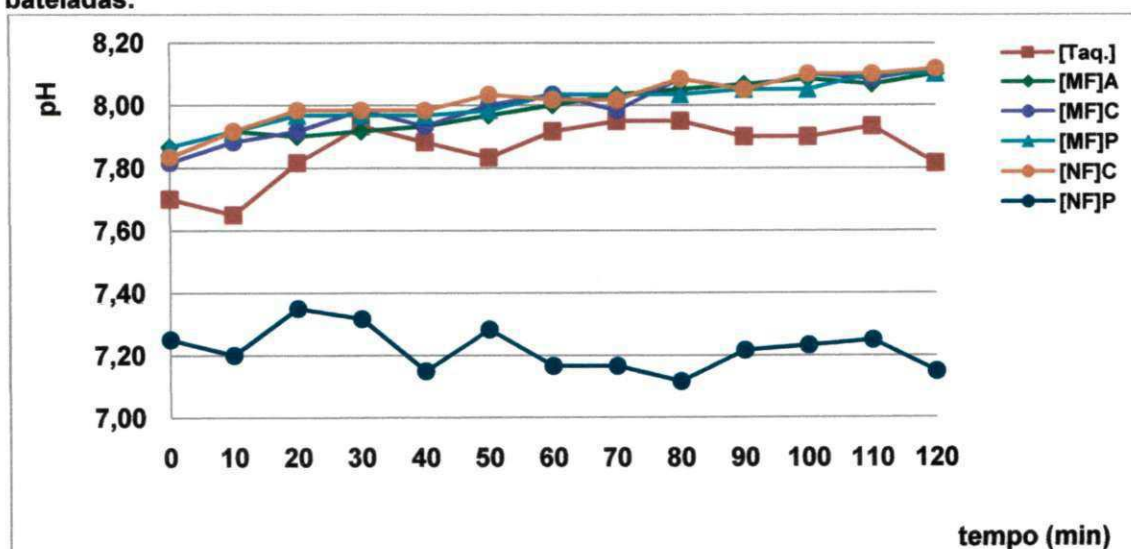


#### 4.4 O estudo do comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas.

O estudo do comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração, foi realizado através da amostra de água coletada na região de Uruçu no município de São João do Cariri – PB. Dentro dos muitos aspectos analíticos, o conceitos de acidez, basicidade e pH, é necessário controlar o pH de uma amostra de água em situações onde íons  $H^+$  estão sendo gerados ou consumidos no processo.

A Figura 41 mostra o desempenho do pH média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

Figura 41 – Comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração após seis bateladas.



O padrão de potabilidade em vigor no Brasil, preconiza uma faixa de pH entre 6,5 e 8,5 (LIBÂNIO, 2008), entretanto Figura 42 pode-se observar o comportamento do permeado no decorrer do tempo permanece dentro dos padrões de potabilidade em vigor no Brasil, com uma média de pH = 7,22.

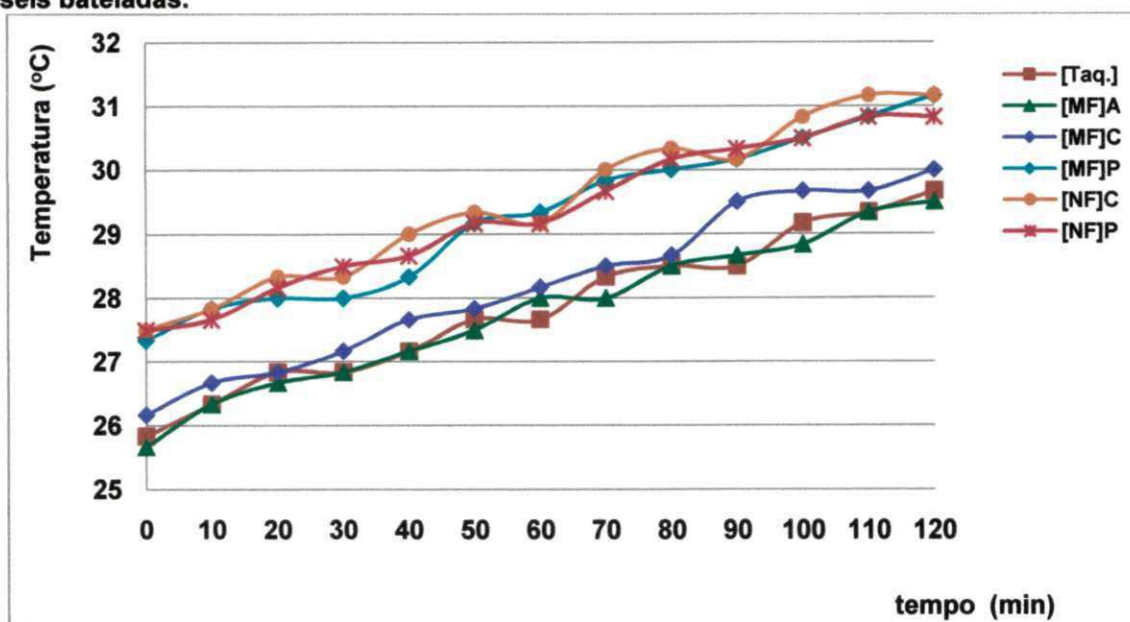
Entretanto com a mostra de água de concentração média de 1.459,77mg/L de Sólidos Totais Dissolvidos, o sistema de micro e nanofiltração através do potencial hidrogeniônico mostra a viabilidade do sistema. Os dados da amostragem da Figura 41 está em **ANEXO D**.

#### 4.5 O estudo do comportamento da temperatura do sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas.

O estudo do comportamento da temperatura do sistema de micro e nanofiltração foi realizada através da amostra de água coletada na região de Uruçu no município de São João do Cariri – PB. Dentro dos aspectos térmicos, o controle da temperatura é de essencial importância para o processo de separação através de membranas poliméricas. Sendo que, para cada tipo de membrana polimérica há uma faixa de temperatura ideal, com exemplo membrana de osmose inversa de polimérica com a temperatura inferior a 70°C.

A Figura 42 mostra o desempenho da temperatura média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

Figura 42 – Comportamento da temperatura do sistema de micro e nanofiltração após seis bateladas.



Analisando a Figura 43 da média das temperaturas das seis bateladas realizada no sistema de micro e nanofiltração, observa-se que durante as duas horas de duração para cada batelada o sistema mostra um aumento de temperatura nos seis pontos analisados.

E que este aumento de temperatura é devido a transferência de calor do sistema de bombas existente no sistema de micro e nanofiltração.

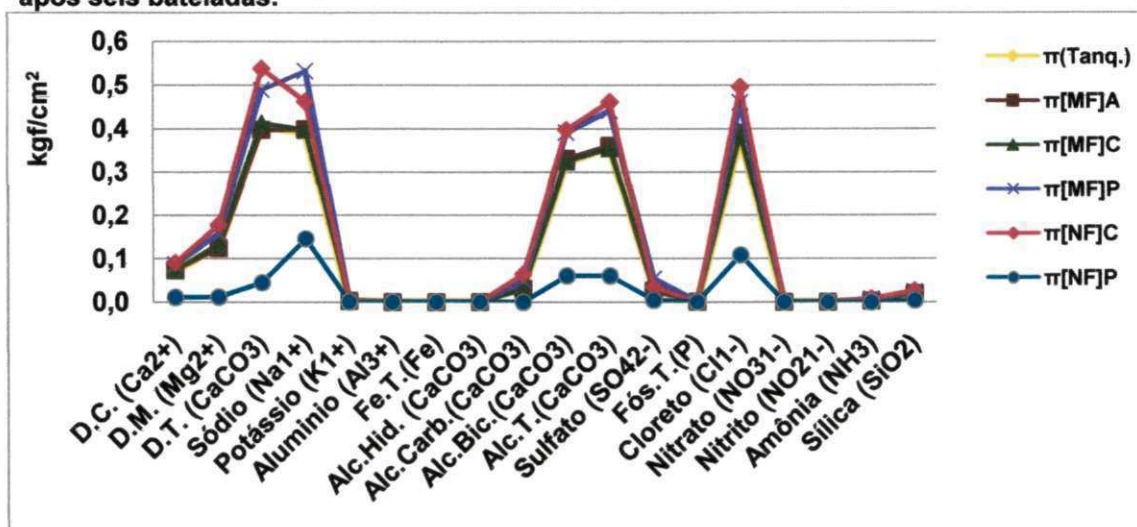
Para o permeado observa-se que teve um aumento de temperatura média de 27,50°C para 29,32°C, com este aumento desta temperatura favorece uma melhor recuperação de água boa. Entretanto com aumento da temperatura ha uma diminuição na viscosidade da água e daí favorece uma melhor permeação. Este aumento de temperatura não ultrapassa o valor mínimo para membranas poliméricas que é de 40°C (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Os valores de cada temperatura média das seis bateladas encontram-se em ANEXO D.

#### **4.6 O estudo do comportamento da pressão osmótica da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.**

A pressão osmótica depende da concentração de solutos dissolvidos na solução, temperatura da solução e do tipo de íons presentes nesta solução. No sistema de membrana de micro e nanofiltração estudada através da amostra de água da localidade de Uruçu no município de São João do Cariri-PB, foi estudado o comportamento da pressão osmótica nos seis pontos de coletas do sistema.

Na Figura 43 mostra o comportamento da pressão osmótica de cada espécie química da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

Figura 43 – Comportamento da pressão osmótica do sistema de micro e nanofiltração após seis bateladas.



Analisando a Figura 44 pode-se observar o comportamento de cada íon existente para cada ponto de coleta feita no sistema de micro e nanofiltração após a média das seis bateladas realizada. Entretanto observa-se que para alguns sais como exemplo o sal sódio a sua pressão osmótica chega próximo de  $0,6 \text{ kgf/cm}^2$ , isto indica que para estes sais ocorreu um aumento de concentração na corrente do concentrado. Daí reduz o volume de água rejeitada no sistema. Os resultados obtidos nesta Figura 39 foram calculados pela equação 1.9, e os valores destes resultados estar em **ANEXO E**.

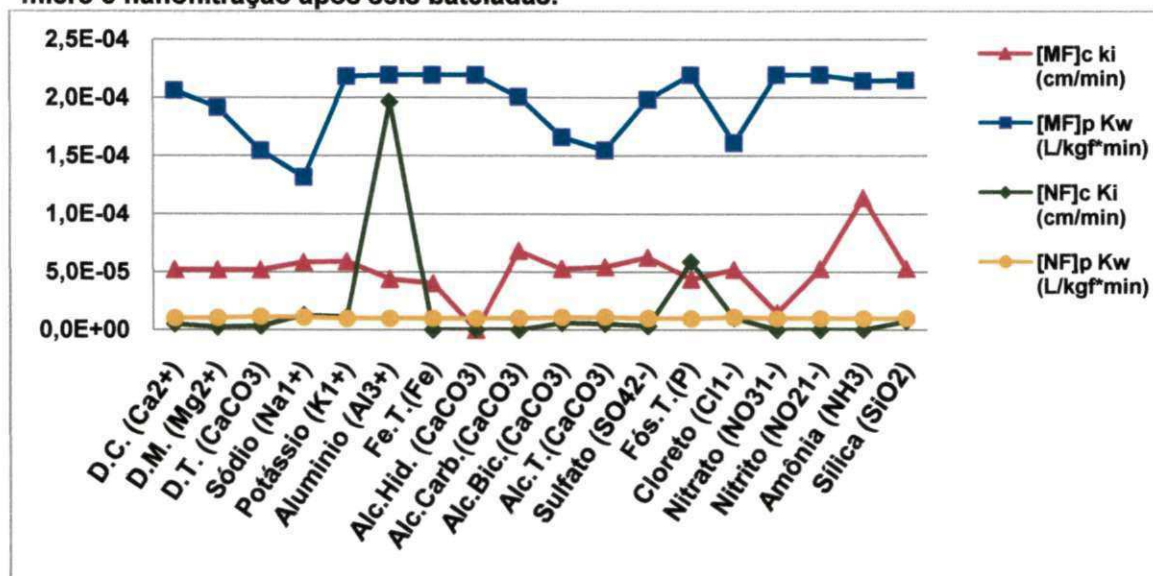
#### 4.7 O estudo do comportamento do coeficiente de transferência de massa da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

As membranas podem ser consideradas, do ponto de vista físico, como finas folhas separando duas fases macroscópicas e controlando a transferência de massa entre elas. Os mecanismos de transferência de massa em membranas dependem do tipo de membranas e da natureza da força motriz utilizada, é o que ocorre neste sistema por possuir dois tipos de membranas, uma de microfiltração e outra de nanofiltração. Entretanto ambas as membranas foi calculadas os coeficientes de transferência de massa para o permeado e para o concentrado usando respectivamente as equações 1.10 e 1.11.



Na Figura 44 mostra o comportamento do coeficiente de transferência de massa de cada espécie química da média das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

Figura 44 – Comportamento do coeficiente de transferência de massa do sistema de micro e nanofiltração após seis bateladas.



Observando a Figura 44 pode-se analisar o comportamento do coeficiente de transferência de massa do permeado (Kw) e do concentrado (Ki) de cada membrana do sistema de micro e nanofiltração. Observa-se que os valores dos coeficientes de massa dos sais no permeado da micro e bastante elevada em relação ao da membrana de nanofiltração. Embora o comportamento do coeficiente de transferência de massa do permeado da membrana de nanofiltração e quase zero com uma pressão média de alimentação de 4,62 kgf/cm<sup>2</sup>. Daí o sistema mostra a sua viabilidade para águas salobras de concentração média de 1.459,77 mg/L de Sólidos Totais Dissolvidos na alimentação.

Os resultados obtidos que geraram a Figura 40 estão em **ANEXO E**.

#### **4.8 Balanço de massa das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.**

Através de dados da quantidade e qualidade da água de alimentação, dos concentrados, dos permeado e da recuperação do sistema de micro e nanofiltração, foi possível realizar o balanço de massa para cada espécie química determinando as suas quantidades existente em cada ponto de coleta do sistema.

O balanço é importante para as futuras comparações com os dados reais gerados pelo sistema em operação e para a avaliação da água. Com base na Figura 31, foi possível desenvolver os seguintes balanços de massa no sistema de micro e nanofiltração usando respectivamente as seguintes equações 1.17, 1.18, 1.19, 1.20, 1.21 e 1.22. Os resultados encontra-se em **ANEXO F**.

#### **4.9 Determinação Índice de Densidade de Sedimentos (IDS).**

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos ou através de análises físico-químicas. O Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) é um dos testes mais utilizados para verificar a qualidade da água que passa pelas membranas. Entretanto o sistema de micro e nanofiltração após as seis bateladas realizada com a mostra de água de Uruçu, foi analisado o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) com um valor encontrado de 0,67 segundo a equação 1.1. Através dos indicadores referidos na seção 2.8.2 valor do IDS do sistema de micro e nanofiltração comprava que o sistema é viável para águas salobras.

#### 4.10 Limpeza Química do sistema de micro e nanofiltração.

O sistema de micro e nanofiltração após as seis batelada realizada com a mostra de água de Uruçu foi feita uma pré-lavagem nas membranas utilizando água dessalinizada. Em seguida realizou-se a limpeza de cada membrana do sistema com uma solução de NaOH com pH = 10 e com uma solução de  $H_8C_5O_7$  com pH = 3. A metodologia aplicada à limpeza química no sistema de micro e nanofiltração se baseia no trabalho de França (2004) e se encontra em **ANEXO G**.

Portanto na membrana de microfiltração pode-se observar o comportamento da limpeza química com solução de NaOH pH = 10 da alimentação da membrana através da Figura 45 e do concentrado através da Figura 46.

**Figura 45 – Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH de pH = 10 na alimentação da membrana de microfiltração.**

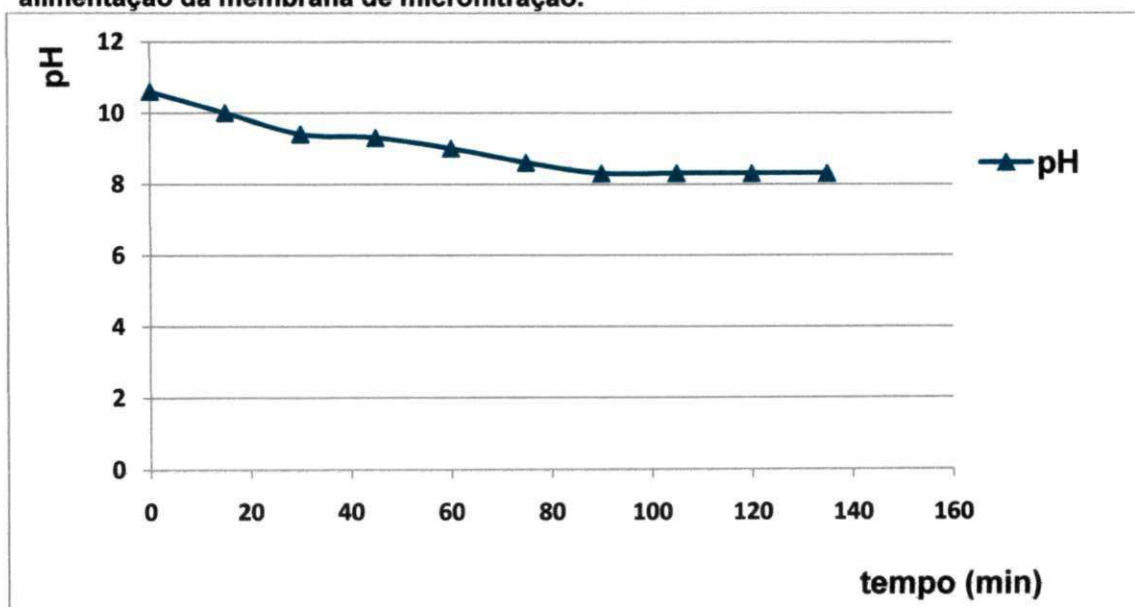
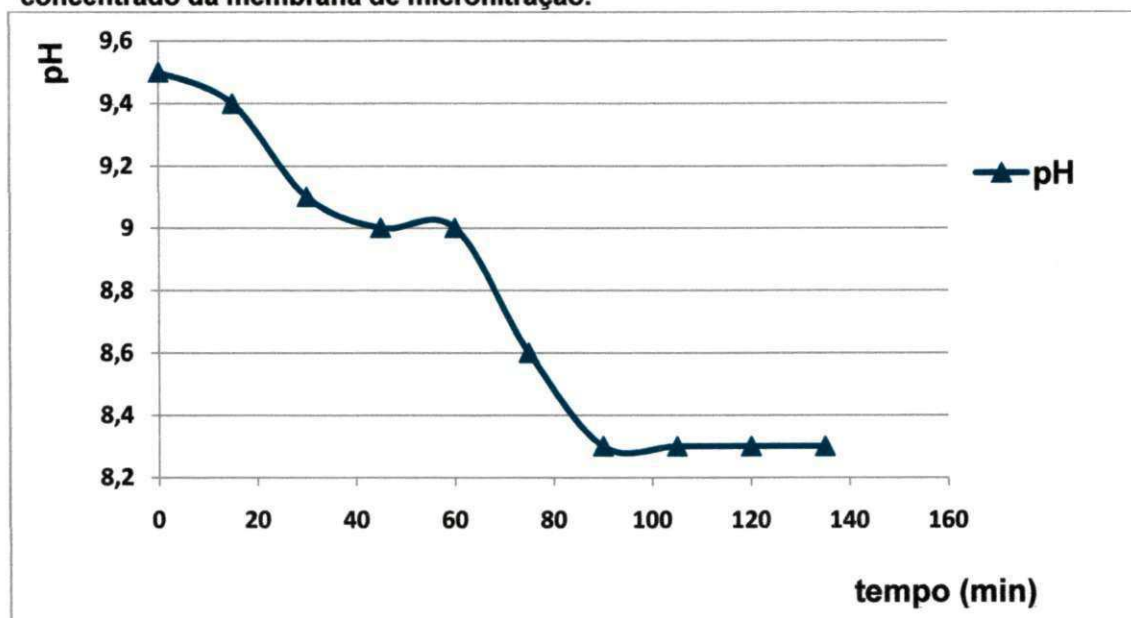


Figura 46 – Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH de pH = 10 no concentrado da membrana de microfiltração.



Analisando o comportamento da limpeza química na alimentação através da Figura 45 e do concentrado através da Figura 46 da membrana de microfiltração, ocorreu uma estabilização do pH = 8,3 aproximadamente indicando a remoção dos microorganismos existentes daí evitando a formação de *fouling* na superfície da membrana.

Já na limpeza química com a solução de  $H_8C_5O_7$  com pH = 3 na membrana de microfiltração pode-se observar a alimentação da membrana através da Figura 47 e do concentrado através da Figura 48.



Figura 47 – Comportamento da limpeza química com a solução  $H_8C_5O_7$  de pH =3 na alimentação da membrana de microfiltração.

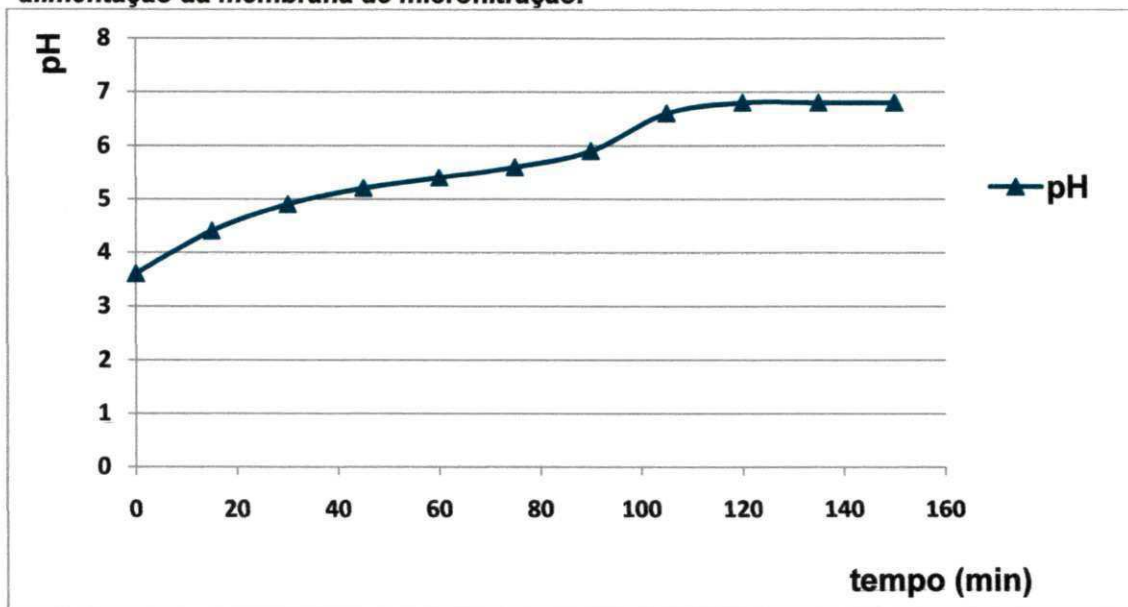
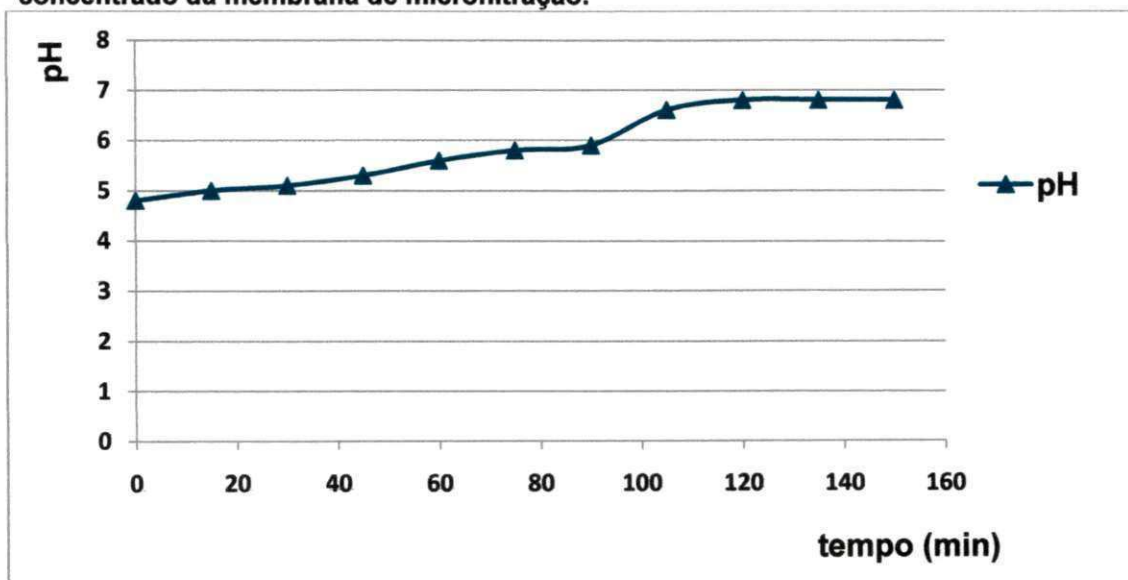


Figura 48 – Comportamento do da limpeza química com a solução  $H_8C_5O_7$  de pH =3 no concentrado da membrana de microfiltração.



Analisando o comportamento da limpeza química na alimentação através da Figura 47 e do concentrado através da Figura 48 da membrana de microfiltração, ocorreu uma estabilização do pH = 6,8 aproximadamente indicando a remoção dos sais existentes daí evitando a formação de *Scaling* na superfície da membrana.

Portanto na membrana de nanofiltração pode-se observar o comportamento da limpeza química com solução de NaOH pH = 10 da alimentação da membrana através da Figura 49 e do concentrado através da Figura 50.

Figura 49 – Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH de pH = 10 na alimentação da membrana de nanofiltração.

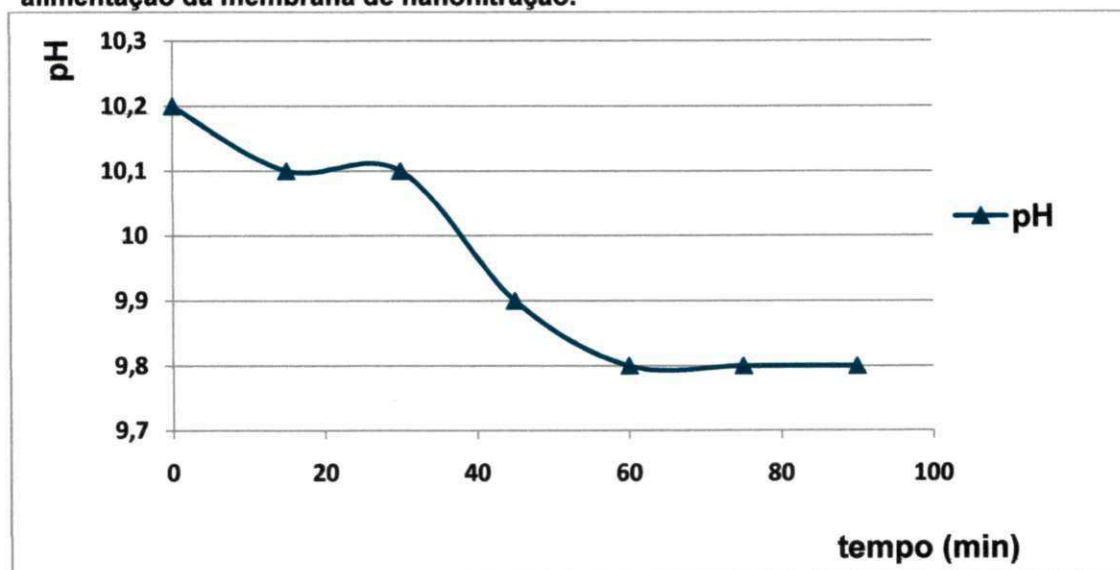
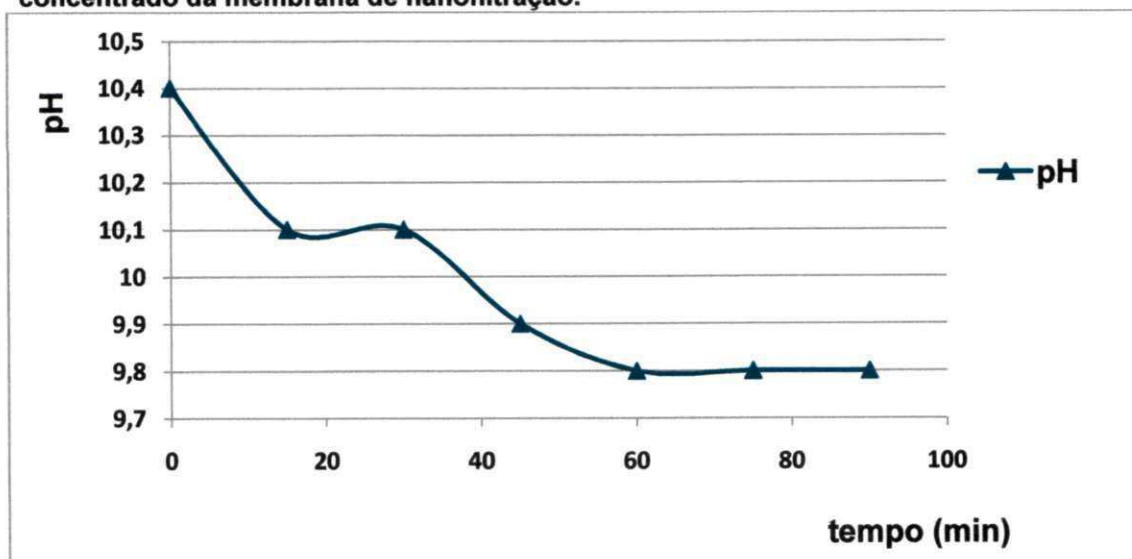


Figura 50 – Comportamento da limpeza química com a solução de NaOH de pH = 10 do concentrado da membrana de nanofiltração.



Analisando o comportamento da limpeza química na alimentação através da Figura 49 e do concentrado através da Figura 50 da membrana de nanofiltração, ocorreu uma estabilização do pH = 9,8 aproximadamente indicando a remoção dos microorganismos existentes daí evitando a formação de *fouling* na superfície da membrana.

Já na limpeza química com a solução de  $H_8C_5O_7$  com pH = 3 na membrana de nanofiltração pode-se observar a alimentação da membrana através da Figura 51 e do concentrado através da Figura 52.

Figura 51 – Comportamento da limpeza química com a solução  $H_8C_5O_7$  de pH =3 na alimentação da membrana de nanofiltração.

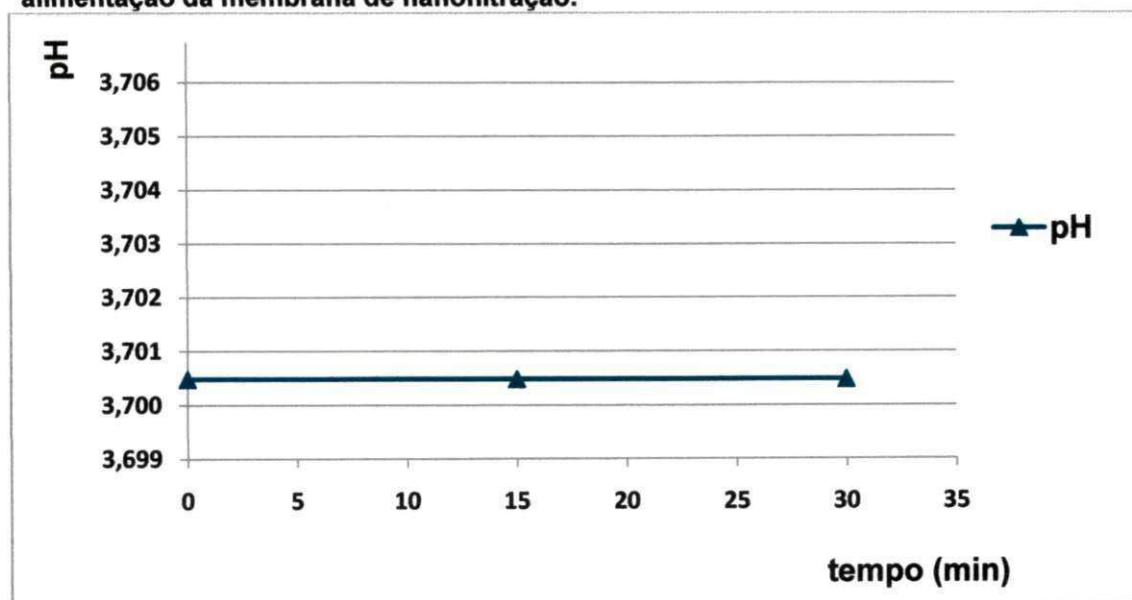
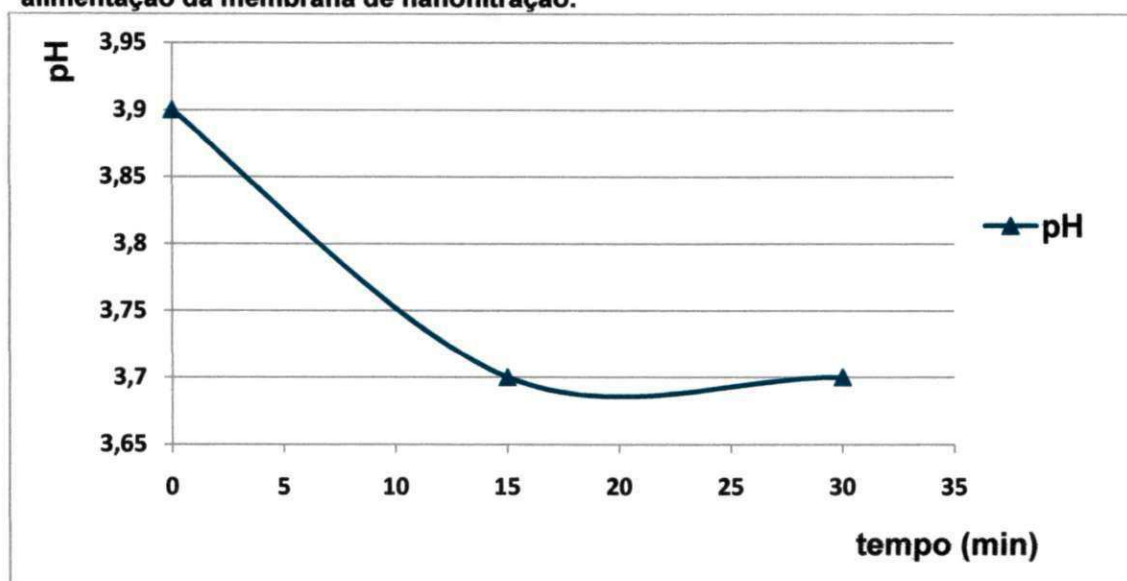


Figura 52 – Comportamento do da limpeza química com a solução  $H_8C_5O_7$  de pH =3 na alimentação da membrana de nanofiltração.



Analisando o comportamento da limpeza química na alimentação através da Figura 51 e do concentrado através da Figura 52 da membrana de nanofiltração, ocorreu uma estabilização do pH = 3,7 aproximadamente indicando a remoção dos sais existentes daí evitando a formação de *Scaling* na superfície da membrana.

Os valores que geraram as figuras sobre a limpeza química nas membranas de micro e nanofiltração esta em **ANEXO H**.

## CAPÍTULO V.

### 5. Conclusões

Observando os resultados de pressões, vazões e da taxa de rejeições de sais, o valor do pH, da temperatura, das pressões osmótica da transferência de massa e do SDI do sistema de micro e nanofiltração pode-se tirar as seguintes conclusões:

- As pressões dos dois sistemas se mantêm constante durante o tempo de operação, ocasionando uma produção desejada de água;
- As vazões dos dois sistemas se mantêm constante durante o tempo de operação do sistema, porém uma maior produção de água desejada ocorre no sistema de osmose inversa;
- A maior recuperação de água boa no sistema é da membrana de osmose inversa, em torno de 64,87%, já no sistema de micro e nanofiltração a recuperação é de 41,48%;
- As taxas de rejeições dos dois sistemas para alguns sais se aproximam, isto mostra que o sistema de micro e nanofiltração é viável na remoção de sais;
- Observa o comportamento do permeado no decorrer do tempo permanece dentro dos padrões de potabilidade em vigor no Brasil segundo a portaria 2914/2011 do ministério da saúde, com uma média de  $\text{pH} = 7,22$ ;
- Entretanto com aumento da temperatura ha uma diminuição na viscosidade da água e daí favorece uma melhor permeação no sistema de micro e nanofiltração;
- A pressão osmótica para alguns sais como exemplo o sal sódio chega próximo de  $0,6 \text{ kgf/cm}^2$ , isto indica que para estes sais ocorreu um aumento de concentração na corrente do concentrado. Daí reduz o volume de água rejeitada no sistema;

- Para águas salobras de concentração média de 1.459,77 mg/L de Sólidos Totais Dissolvidos na alimentação, o comportamento do coeficiente de transferência de massa do permeado da membrana de nanofiltração é quase zero;
- Entretanto o sistema de micro e nanofiltração após as seis bateladas realizada com a mostra de água de Uruçu, foi analisado o Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) com um valor encontrado de 0,67 comprovando que o sistema é viável para águas salobras transformando esta água salobra em água potável.

## **CAPITULO VI**

### **6. Perspectivas**

Em função dos dados obtidos a partir deste trabalho as seguintes perspectivas visam melhorar a qualidade dos dados do sistema de micro e nanofiltração:

- Aplicar o sistema para outras fontes de águas salobras;
- Estudar o sistema de micro e nanofiltração através do processo de simulação;
- Comparar dos resultados da simulação do sistema com o resultado preliminares do sistema;
- Comprara os resultados obtidos no sistema com o custo par melhor aplicação;

## CAPITULO VII

### 7. Principais Referência Bibliográfica

AMJAD, Z. (Ed.) *Reverse Osmosis: membrane technology, water chemistry, and industrial applications*. Van Nostrand Reinhold, 1993.512 p.

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.

ARNAL, J. M. *Desing and construction of water potabilization membrane facility and its application to the third world countries: preliminary tests*. *Desalination*, v. 145, p. 305 – 308, 2002.

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.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria nº 2914/11*, 12 de dezembro de 2011. 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. Brasília, 2914/11.

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

CETESB -. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>> Acesso em: 08/04/2010.

CHORUS, I.; BARTHAM, J. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. London: E & FN Spon, 1999. 416 p.



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

FERREIRA, W. B.; PEREIRA, M. L. F.; SILVA, S. K.; CARTAXO, J. M.; SILVA, J. N.; CIRNE, M. I.; FRANÇA, K. B. Pré-tratamento com membranas de microfiltração na dessalinização. VI Congresso Ibero-Americano em Ciências e Tecnologia de Membrana, realizado no Centro de Convenções Raimundo Asfora, 08 a 11 de julho de 2007.

FILHO, D. F. S. Tecnologia de tratamento de água – água para indústria. 2ª Ed. Livraria Nobel S.A., 1983, p. 99-115.

FILMTEC, *Filmtec reverse osmosis membranes technical manual*, Dow Chemical Company, 2008.

FRANÇA, K.B. *Limpeza Química de Sistema de Dessalinização via OI*. Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2004.

GAUWBERGEN, D. V. & BAEYENS, J., *Macroscopic fluid flow conditions in spiral-wound membrane elements*, *Dessalination*, 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.

HABERT, A. C., BORGES, C. P. e NÓBREGA, R., *Processos de separação com membranas*, Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 2006.

HILLIS, P. Full scale application of membrane microfiltration in North West Water. Huntington stage 4, provision of an 80 Mld plant. *Dessalination*, v. 113, p. 267-272, 1997.

HILLIS, P. et al. Effects of backwash conditions on out-to-in membrane microfiltration. *Dessalination*, v. 118, p. 197- 204, 1998.

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.

JACANGELO, J. G.; TRUSSELL, R. R; WATSON, M. Role of membrane technology in drinking water treatment in the United States. *Desalination*, v.113, p. 119 - 127, 1997.

MATSUURA, T. Progress in membrane science and technology for seawater desalination a review. *Desalination*, 134, p. 47-54, April 2001.

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

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

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

NAKATSUKA, S.; NAKATE, I.; MIYANO, T. *Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fibber membranes*. *Desalination*, v. 106, p. 55 – 61, 1996.

PEREIRA, R.B & Santos, J.A., *Projeto de dessalinizador por osmose inversa, IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1997*.

PRINCE, M., *Water from the ground*, *New Scientist*, n° 42, Fev. 1991.

PROSAB.; REDES COOPERATIVA DE PESQUISAS.; *Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminates orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano*, Rio de Janeiro.; ABES.; 2006

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

SILVA, S.K. *Sistema de Dessalinização da comunidade de Uruçu – São João do Cariri – PB: Análises, Monitoramento e Avaliação de um Misturador para o*

*uso do Concentrado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

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

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

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, Editor by Leonore S. Clesceri, Arnold E. Greenderg, Andrew D. Eaton, 20<sup>th</sup> Edition, 1998.

STRANTZ, J.W., *Predicting CaCO<sub>3</sub> scaling in seawater RO systems*. Technical Proceedings, vol 1, 10<sup>th</sup> Annual Conference and Trade Fair of the Water Supply Improvement Association, 25-29 July, Hawaii, 1982.

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

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

VAN DER HOEK, J.P.; HOFMAN, J.A.M.H.; BONNÉ, P.A.C.; NEDERLOF, M.M. & VROUWENELDER, H.S. RO treatment: selection of a pretreatment scheme based on fouling characteristics and operating conditions based on environmental impact. *Desalination* 127:89-101(2000).

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

WAGNER, J.; *Membrane Filtration handbook – Pratical tips and hits. Second Edition.*; Osmonics Filtration and Separation Group .; Minnetonka, 2001.

**ANEXOS**

**ANEXO A. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
DAS PRESSÕES DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO  
E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.**

O resultado da Figura 32 mostra o comportamento da média das pressões das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração da água de Uruçu no LABDES, ou seja, pressões de alimentação, pressão do permeado, pressão do concentrado e com suas variações de pressões de cada elemento de membrana do sistema.

**Quadro 01 - Comportamento das pressões do sistema de micro e nanofiltração.**

<b>Média das pressões das seis bateladas do sistema de Micro e Nanofiltração da água de Uruçu.</b>						
<b>Tempo (min.)</b>	<b>Memb. de Microfiltração</b>			<b>Memb. de Nanofiltração</b>		
	<b>P<sub>1</sub>[MF]<sub>A</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>[MF]<sub>C</sub></b>	<b>ΔP(MF)</b>	<b>P<sub>1</sub>[NF]<sub>A</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>[NF]<sub>C</sub></b>	<b>ΔP[NF]</b>
<b>0</b>	1,11	0,92	0,19	4,63	4,19	3,38
<b>10</b>	1,01	0,82	0,19	4,62	4,19	3,37
<b>20</b>	1,01	0,82	0,19	4,62	4,19	3,37
<b>30</b>	1,01	0,82	0,19	4,62	4,19	3,37
<b>40</b>	1,03	0,82	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>50</b>	1,03	0,83	0,20	4,63	4,19	3,38
<b>60</b>	1,03	0,83	0,20	4,54	4,19	3,34
<b>70</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>80</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>90</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>100</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>110</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>120</b>	1,04	0,83	0,21	4,63	4,19	3,38
<b>MÉDIA</b>	1,03	0,83	0,20	4,62	4,19	3,38

O resultado da Figura 33 mostra o comportamento da média de pressão de três bateladas do sistema de osmose inversa da comunidade de Uruçu, ou seja, pressões de alimentação, de saída e sua variação de pressão.

**Quadro 02 - Comportamento das pressões do sistema de osmose inversa.**

<b>MÉDIA DAS PRESSÕES DAS TRÊS BATELADAS DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA (OI).</b>			
	<b>PA(kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>PC(kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ΔP (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1º BAT.</b>	13,37	12,76	12,09
<b>2º BAT.</b>	14,35	13,68	12,98
<b>3º BAT.</b>	14,99	14,31	13,62
<b>MÉDIA</b>	14,24	13,58	12,90

O resultado da Figura 34 mostra a comparação das pressões médias dos dois sistemas que operam com a mesma água da comunidade de Uruçu, sendo que o sistema de micro e nanofiltração com a média de pressão de seis bateladas que o mesmo foi instalado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) e o outro sistema de osmose inversa com a média de pressão de três bateladas, o mesmo foi instalado na comunidade de Uruçu – PB.

**Quadro 03 - Comparação das pressões do sistema de micro e nanofiltração e o sistema de osmose inversa.**

<b>ANÁLISES DAS MÉDIAS DE PRESSÕES(kgf/cm<sup>2</sup>) DOS SISTEMAS DE MICRO/NANO E O DE OI.</b>									
<b>MEMB.</b>	<b>P1[MF]<sub>A</sub></b>	<b>P2[MF]<sub>C</sub></b>	<b>P1[NF]<sub>A</sub></b>	<b>P2[NF]<sub>C</sub></b>	<b>P[OI]<sub>A</sub></b>	<b>P[OI]<sub>C</sub></b>	<b>ΔP[MF]</b>	<b>ΔP[NF]</b>	<b>ΔP[OI]</b>
<b>MICRO</b>	1,03	0,83	0	0	0	0	0,2	0	0
<b>NANO</b>	0	0	4,62	4,19	0	0	0	3,38	0
<b>OI</b>	0	0	0	0	14,62	13,58	0	0	12,9

**ANEXO B. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
DAS VAZÕES DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E  
DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.**



O resultados da Figura 35 mostra o comportamento das vazões médias das seis bateladas ocorrida no sistema de micro e nanofiltração

**Quadro 04 – Comportamento das vazões e comparações do sistema de micro e nanofiltração.**

<b>SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO</b>					
<b>MÉDIA DAS SEIS BATELADAS</b>					
<b>Tempo (min.)</b>	<b>Q[MF]<sub>c</sub></b>	<b>Q[NF]<sub>c</sub></b>	<b>Q[NF]<sub>p</sub></b>	<b>r%(MF)</b>	<b>r%(NF)</b>
<b>0</b>	11,37	3,70	2,58	35,60	41,11
<b>10</b>	11,17	3,67	2,52	35,64	40,70
<b>20</b>	11,07	3,67	2,48	35,72	40,38
<b>30</b>	10,95	3,62	2,50	35,84	40,87
<b>40</b>	10,93	3,62	2,50	35,87	40,87
<b>50</b>	10,97	3,58	2,50	35,68	41,10
<b>60</b>	10,97	3,57	2,50	35,62	41,21
<b>70</b>	10,97	3,53	2,55	35,68	41,92
<b>80</b>	11,05	3,53	2,57	35,57	42,08
<b>90</b>	11,05	3,55	2,58	35,69	42,12
<b>100</b>	11,05	3,57	2,62	35,88	42,32
<b>110</b>	11,05	3,55	2,60	35,76	42,28
<b>120</b>	11,07	3,55	2,60	35,72	42,28
<b>MÉDIA</b>	<b>11,05</b>	<b>3,59</b>	<b>2,55</b>	<b>35,71</b>	<b>41,48</b>

O resultado da Figura 36 mostra o comportamento das vazões de três bateladas ocorrida no sistema de osmose inversa.

**Quadro 05 - Comportamento das vazões e recuperações do sistema de osmose inversa.**

<b>ÁGUA DE URUÇU</b>			
<b>MÉDIA DAS TRÊS BATELADAS DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA OI.</b>			
	<b>Qp(L/min)</b>	<b>Qc(L/min)</b>	<b>r%</b>
<b>1</b>	29,05	20,11	59,11
<b>2</b>	28,74	19,15	60,06
<b>3</b>	28,96	15,76	64,87
<b>MÉDIA</b>	<b>28,92</b>	<b>18,34</b>	<b>61,35</b>

O resultado Figura 37 mostra a comparação da média das recuperações dos sistemas de micro e nanofiltração com o de osmose inversa.

**Quadro 06 – Comparação das vazões e recuperações do sistema de micro e nanofiltração e o sistema osmose inversa.**

<b>ANÁLISES DAS MÉDIAS DAS VAZÕES(L/min) DOS SISTEMAS DE MICRO/NANO E O DE OI.</b>									
	<b>Q[MF]<sub>c</sub></b>	<b>Q[MF]<sub>p</sub></b>	<b>Q[NF]<sub>c</sub></b>	<b>Q[NF]<sub>p</sub></b>	<b>Q[OI]<sub>p</sub></b>	<b>Q[OI]<sub>c</sub></b>	<b>r%[MF]</b>	<b>r%[NF]</b>	<b>r%[OI]</b>
<b>MICRO</b>	11,05	6,14	0	0	0	0	35,71	0	0
<b>NANO</b>	0	0	3,59	2,55	0	0	0	41,48	0
<b>OI</b>	0	0	0	0	28,92	18,34	0	0	61,35

**ANEXO C. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
DAS TAXAS DE REJEIÇÕES DO SISTEMA DE MICRO E  
NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.**

O resultado da Figura 38 representa das taxas de rejeição de sais das seis bateladas do sistema de micro e nanofiltração.

**Quadro 07 – Comportamento da taxa de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração.**

Microfiltração				Nanofiltração			
Componentes	Med.[MF] <sub>A</sub>	Med.[MF] <sub>C</sub>	Med. [MF] <sub>P</sub>	Med.[NF] <sub>A</sub>	Med.[NF] <sub>C</sub>	Med. [NF] <sub>P</sub>	TRS%[NF]
D.C. (Ca <sup>2+</sup> )	58,67	57,73	70,17	68,17	71,22	8,70	87,24
D.M. (Mg <sup>2+</sup> )	59,00	63,13	75,12	74,52	84,03	5,38	92,78
D.T. (CaCO <sub>3</sub> )	392,47	407,27	488,38	480,88	528,18	44,25	90,80
Sódio (Na <sup>1+</sup> )	362,37	360,80	486,52	480,70	417,33	131,60	72,62
Potássio (K <sup>1+</sup> )	4,50	4,48	6,08	6,03	5,25	1,52	74,86
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	0,08	0,08	0,08	0,07	0,13	0,06	16,28
Fe.T.(Fe)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00
Alc.Hid. (CaCO <sub>3</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alc.Carb.(CaCO <sub>3</sub> )	30,07	31,53	47,27	48,93	62,80	0,00	100,00
Alc.Bic.(CaCO <sub>3</sub> )	326,23	319,80	390,33	384,50	390,37	59,27	84,59
Alc.T.(CaCO <sub>3</sub> )	356,30	349,83	437,60	433,43	453,17	59,27	86,33
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0,00	0,00	0,00	100,83	64,67	8,93	91,14
Fós.T.(P)	30,07	31,53	47,27	0,40	0,40	0,20	50,00
Cloreto (Cl <sup>1-</sup> )	326,23	319,80	390,33	642,62	691,78	150,88	76,52
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> )	356,30	349,83	437,60	0,01	0,00	0,16	0,00
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>1-</sup> )	50,45	70,73	100,68	0,01	0,01	0,02	0,00
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,38	0,37	0,42	0,84	0,93	0,01	99,40
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	547,38	541,25	645,27	14,15	15,72	2,60	81,63
ISL (Índeci de Saturação de Langelier)	1,01	0,89	0,98	1,03	0,92	-1,21	
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.512,93	1.508,17	1.877,40	1.853,97	1.985,18	382,17	79,39



O resultado da Figura 39 representa das taxas de rejeição de sais das três bateladas do sistema de osmose inversa.

**Quadro 08 – Comportamento da taxa de rejeição de sais do sistema de osmose inversa.**

<b>A MÉDIA DOS ULTIMOS TRÊS MESES DO ANO DE 2011 DAS CONCENTRAÇÕES DE SAIS MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA DA ÁGUA DE URUÇU - PB</b>				
<b>COMPONENTES</b>	<b>ALIMENTAÇÃO</b>	<b>CONCENTRADO</b>	<b>PERMEADO</b>	<b>TRS%</b>
D.C. (Ca)	63,13	112,37	3,62	94,26
D.M. (Mg)	66,13	121,55	1,95	97,06
D. T. (CaCO <sub>3</sub> )	433,39	787,39	17,17	96,04
Sódio	313,54	650,12	24,53	92,18
Potássio	4,19	9,16	0,26	93,91
Alumínio	0,00	0,00	0,01	0,00
Fe. T. (Fe)	0,03	0,07	0,01	59,26
Alc. Hid. (CaCO <sub>3</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00
Alc. Carb. (CaCO <sub>3</sub> )	40,89	121,82	0,00	100,00
Alc.Bic. (CaCO <sub>3</sub> )	284,98	477,87	27,51	90,35
Alc. T. (CaCO <sub>3</sub> )	325,87	599,69	27,51	91,56
Sulfato	39,07	102,17	3,43	91,23
Cloreto	565,24	1.007,65	40,31	92,87
Nitrato	0,02	0,05	0,09	0,00
Nitrito	0,01	0,01	0,00	0,00
Amônia	0,39	0,69	0,00	98,85
Silica	35,81	51,17	2,26	93,70
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,52	1,16	-3,07	
Sólidos Totais Dissolvidos, mg/L	1.459,77	2.711,11	110,04	92,46

O resultado da Figura 40 representa a comparação das taxas de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração com o sistema de osmose inversa.

**Quadro 09 – Comparação da taxa de rejeição de sais do sistema de micro e nanofiltração e o sistema de osmose inversa.**

<b>Comparação das taxas de rejeição de sais das membranas de NF e OI</b>		
<b>COMPONENTES</b>	<b>TRS% (NF)</b>	<b>TRS% (OI)</b>
D.C. (Ca <sup>2+</sup> )	87,24	94,26
D.M. (Mg <sup>2+</sup> )	92,78	97,06
D.T. (CaCO <sub>3</sub> )	90,80	96,04
Sódio (Na <sup>1+</sup> )	72,62	92,18
Potássio (K <sup>1+</sup> )	74,86	93,91
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	16,28	0,00
Fe.T.(Fe)	0,00	59,26
Alc.Hid. (CaCO <sub>3</sub> )	0,00	0,00
Alc.Carb.(CaCO <sub>3</sub> )	100,00	100,00
Alc.Bic.(CaCO <sub>3</sub> )	84,59	90,35
Alc.T.(CaCO <sub>3</sub> )	86,33	91,56
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	91,14	91,23
Fós.T.(P)	50,00	92,87
Cloreto (Cl <sup>1-</sup> )	76,52	0,00
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> )	0,00	0,00
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>1-</sup> )	0,00	98,85
Amônia (NH <sub>3</sub> )	99,40	93,70
Silica (SiO <sub>2</sub> )	81,63	92,46

**ANEXO D. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO  
pH E DA TEMPERATURA DO SISTEMA DE MICRO E  
NANOFILTRAÇÃO .**

O resultado da Figura 41 da média das seis bateladas do pH do sistema de micro e nanofiltração.

**Quadro 10 – Comportamento do pH do sistema de micro e nanofiltração.**

<b>MÉDIA DAS SEIS BATELADAS DO pH DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO.</b>						
<b>TEMPO (min)</b>	<b>[Taq.]</b>	<b>[MF]<sub>A</sub></b>	<b>[MF]<sub>C</sub></b>	<b>[MF]<sub>P</sub></b>	<b>[NF]<sub>C</sub></b>	<b>[NF]<sub>P</sub></b>
0	7,70	7,87	7,82	7,87	7,83	7,25
10	7,65	7,92	7,88	7,92	7,92	7,20
20	7,82	7,90	7,92	7,97	7,98	7,35
30	7,93	7,92	7,98	7,97	7,98	7,32
40	7,88	7,93	7,93	7,97	7,98	7,15
50	7,83	7,97	8,00	7,98	8,03	7,28
60	7,92	8,00	8,03	8,03	8,02	7,17
70	7,95	8,03	7,98	8,03	8,02	7,17
80	7,95	8,05	8,08	8,03	8,08	7,12
90	7,90	8,07	8,05	8,05	8,05	7,22
100	7,90	8,08	8,10	8,05	8,10	7,23
110	7,93	8,07	8,08	8,10	8,10	7,25
120	7,82	8,10	8,12	8,10	8,12	7,15
<b>MÉDIA</b>	<b>7,86</b>	<b>7,99</b>	<b>8,00</b>	<b>8,01</b>	<b>8,02</b>	<b>7,22</b>



O resultado da Figura 42 da temperatura da média das seis bateladas sistema de micro e nanofiltração.

**Quadro 11 – Comportamento da temperatura do sistema de micro e nanofiltração.**

<b>MÉDIA</b>						
<b>TEMPERATURA(°C)</b>						
<b>TEMPO (min)</b>	<b>[Taq.]</b>	<b>[MF]<sub>A</sub></b>	<b>[MF]<sub>c</sub></b>	<b>[MF]<sub>P</sub></b>	<b>[NF]<sub>c</sub></b>	<b>[NF]<sub>P</sub></b>
<b>0</b>	25,83	25,67	26,17	27,33	27,50	27,50
<b>10</b>	26,33	26,33	26,67	27,83	27,83	27,67
<b>20</b>	26,83	26,67	26,83	28,00	28,33	28,17
<b>30</b>	26,83	26,83	27,17	28,00	28,33	28,50
<b>40</b>	27,17	27,17	27,67	28,33	29,00	28,67
<b>50</b>	27,67	27,50	27,83	29,17	29,33	29,17
<b>60</b>	27,67	28,00	28,17	29,33	29,17	29,17
<b>70</b>	28,33	28,00	28,50	29,83	30,00	29,67
<b>80</b>	28,50	28,50	28,67	30,00	30,33	30,17
<b>90</b>	28,50	28,67	29,50	30,17	30,17	30,33
<b>100</b>	29,17	28,83	29,67	30,50	30,83	30,50
<b>110</b>	29,33	29,33	29,67	30,83	31,17	30,83
<b>120</b>	29,67	29,50	30,00	31,17	31,17	30,83
<b>MÉDIA</b>	<b>27,83</b>	<b>27,77</b>	<b>28,19</b>	<b>29,27</b>	<b>29,47</b>	<b>29,32</b>

**ANEXO E. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO OSMÓTICA E DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO .**



O resultado da Figura 43 da pressão osmótica da média das seis bateladas sistema de micro e nanofiltração.

Quadro 12 – Comportamento da pressão osmótica da média da seis bateladas.

Média das Pressões Osmóticas das Seis Bateladas																					
PARAMETROS	v <sub>i</sub>	PM	R	C <sub>i</sub> (mol/L) Tanq.	T(K) Tanq.	C <sub>i</sub> (mol/L) [MF] <sub>A</sub>	T(K) [MF] <sub>A</sub>	C <sub>i</sub> (mol/L) [MF] <sub>C</sub>	T(K) [MF] <sub>C</sub>	C <sub>i</sub> (mol/L) [MF] <sub>F</sub>	T(K) [MF] <sub>F</sub>	C <sub>i</sub> (mol/L) [NF] <sub>C</sub>	T(K) [NF] <sub>C</sub>	C <sub>i</sub> (mol/L) [NF] <sub>F</sub>	T(K) [NF] <sub>F</sub>	π(Tanq.) kgf/cm <sup>2</sup>	π[MF] <sub>A</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	π[MF] <sub>C</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	π[MF] <sub>F</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	π[NF] <sub>C</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	π[NF] <sub>F</sub> kgf/cm <sup>2</sup>
D.C. (Ca <sup>2+</sup> )	2	40	0,08	0,00146	298,88	0,00147	298,84	0,00144	299,23	0,00170	300,30	0,00178	300,56	0,00022	300,47	0,074	0,074	0,073	0,087	0,091	0,011
D.M. (Mg <sup>2+</sup> )	2	24	0,08	0,00255	298,88	0,00246	298,84	0,00263	299,23	0,00310	300,30	0,00350	300,56	0,00022	300,47	0,129	0,124	0,133	0,158	0,178	0,011
D.T. (CaCO <sub>3</sub> )	4	100	0,08	0,00401	298,88	0,00392	298,84	0,00407	299,23	0,00481	300,30	0,00528	300,56	0,00044	300,47	0,406	0,397	0,413	0,489	0,538	0,045
Sódio (Na <sup>+</sup> )	1	23	0,08	0,01552	298,88	0,01576	298,84	0,01569	299,23	0,02090	300,30	0,01814	300,56	0,00572	300,47	0,393	0,399	0,398	0,532	0,462	0,146
Potássio (K <sup>+</sup> )	1	39	0,08	0,00011	298,88	0,00012	298,84	0,00011	299,23	0,00015	300,30	0,00013	300,56	0,00004	300,47	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,001
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	3	27	0,08	0,00000	298,88	0,00000	298,84	0,00000	299,23	0,00000	300,30	0,00000	300,56	0,00000	300,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe.T.(Fe)	2	55,9	0,08	0,00000	298,88	0,00000	298,84	0,00000	299,23	0,00000	300,30	0,00000	300,56	0,00000	300,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Alc.Hid.(CaCO <sub>3</sub> )	4	100	0,08	0,00000	298,88	0,00000	298,84	0,00000	299,23	0,00000	300,30	0,00000	300,56	0,00000	300,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Alc.Carb.(CaCO <sub>3</sub> )	4	100	0,08	0,00034	298,88	0,00030	298,84	0,00032	299,23	0,00049	300,30	0,00063	300,56	0,00000	300,47	0,034	0,030	0,032	0,050	0,064	0,000
Alc.Bic.(CaCO <sub>3</sub> )	4	100	0,08	0,00319	298,88	0,00326	298,84	0,00320	299,23	0,00385	300,30	0,00390	300,56	0,00059	300,47	0,323	0,330	0,324	0,391	0,398	0,060
Alc.T.(CaCO <sub>3</sub> )	4	100	0,08	0,00353	298,88	0,00356	298,84	0,00350	299,23	0,00433	300,30	0,00453	300,56	0,00059	300,47	0,357	0,361	0,355	0,441	0,462	0,060
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	2	96	0,08	0,00057	298,88	0,00053	298,84	0,00074	299,23	0,00105	300,30	0,00067	300,56	0,00009	300,47	0,029	0,027	0,037	0,053	0,034	0,005
Fós.T.(P)	3	31	0,08	0,00001	298,88	0,00001	298,84	0,00001	299,23	0,00001	300,30	0,00001	300,56	0,00001	300,47	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	1	35,5	0,08	0,01514	298,88	0,01542	298,84	0,01525	299,23	0,01810	300,30	0,01949	300,56	0,00425	300,47	0,383	0,390	0,387	0,461	0,496	0,108
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1	62	0,08	0,00000	298,88	0,00000	298,84	0,00000	299,23	0,00000	300,30	0,00000	300,56	0,00000	300,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	1	46	0,08	0,00000	298,88	0,00000	298,84	0,00000	299,23	0,00000	300,30	0,00000	300,56	0,00000	300,47	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Amônia (NH <sub>3</sub> )	6	17	0,08	0,00002	298,88	0,00002	298,84	0,00002	299,23	0,00005	300,30	0,00005	300,56	0,00000	300,47	0,003	0,003	0,003	0,007	0,008	0,000
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	4	60	0,08	0,00020	298,88	0,00020	298,84	0,00020	299,23	0,00024	300,30	0,00026	300,56	0,00004	300,47	0,020	0,020	0,020	0,024	0,027	0,004



O resultado da Figura 44 do coeficiente de transferência de massa da média das seis bateladas sistema de micro e nanofiltração.

Quadro 13 – Comportamento do coeficiente de transferência de massa da média das seis bateladas.

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO SOLUTO DA MÉDIA DAS SEIS BATELADAS DA ÁGUA DE URUÇU																				
PARAMETROS	Microfiltração	Nanofiltração	MICROFILTRAÇÃO							NANOFILTRAÇÃO							[MF] <sub>c</sub>	[MF] <sub>p</sub>	[NF] <sub>c</sub>	[NF] <sub>p</sub>
			CONCENTRADO		PERMEADO		$\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta \pi$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta C$ (mg/L)	CONCENTRADO		PERMEADO		$\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta \pi$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\Delta C$ (mg/L)				
	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	C(mg/L)	Q(L/min)	C(mg/L)	Q(L/min)				C(mg/L)	Q(L/min)	C(mg/L)	Q(L/min)				K <sub>i</sub> (cm/min) Soluto	K <sub>w</sub> (L/kgf*min) Solvente	K <sub>i</sub> (cm/min) Soluto	K <sub>w</sub> (L/kgf*min) Solvente
D.C. (Ca <sup>2+</sup> )	140000	76000	57,73	11,05	68,17	6,14	0,2	-0,013	57,73	71,22	3,59	8,70	2,55	3,38	0,078	59,47	5,178E-05	2,059E-04	4,909E-06	1,016E-05
D.M. (Mg <sup>2+</sup> )	140000	76000	63,13	11,05	74,52	6,14	0,2	-0,029	63,13	84,03	3,59	5,38	2,55	3,38	0,157	69,13	5,176E-05	1,915E-04	2,613E-06	1,041E-05
D.T. (CaCO <sub>3</sub> )	140000	76000	407,27	11,05	480,88	6,14	0,2	-0,084	407,27	528,18	3,59	44,25	2,55	3,38	0,469	436,63	5,178E-05	1,543E-04	3,400E-06	1,152E-05
Sódio (Na <sup>+</sup> )	140000	76000	360,80	11,05	480,70	6,14	0,2	-0,133	360,80	417,33	3,59	131,60	2,55	3,38	0,351	349,10	5,843E-05	1,315E-04	1,265E-05	1,108E-05
Potássio (K <sup>+</sup> )	140000	76000	4,48	11,05	6,03	6,14	0,2	-0,001	4,48	5,25	3,59	1,52	2,55	3,38	0,003	4,52	5,902E-05	2,182E-04	1,127E-05	9,935E-06
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	140000	76000	0,08	11,05	0,08	6,14	0,2	0,000	0,08	0,13	3,59	0,07	2,55	3,38	0,000	0,01	4,386E-05	2,193E-04	1,965E-04	9,927E-06
Fe.T.(Fe)	140000	76000	0,02	11,05	0,02	6,14	0,2	0,000	0,02	0,03	3,59	0,00	2,55	3,38	0,000	0,02	4,020E-05	2,193E-04	0,000E+00	9,927E-06
Alc.Hid. (CaCO <sub>3</sub> )	140000	76000	0,00	11,05	0,00	6,14	0,2	0,000	0,00	0,00	3,59	0,00	2,55	3,38	0,000	0,00	0,000E+00	2,193E-04	0,000E+00	9,927E-06
Alc.Carb.(CaCO <sub>3</sub> )	140000	76000	31,53	11,05	48,93	6,14	0,2	-0,019	31,53	62,80	3,59	0,00	2,55	3,38	0,057	48,93	6,806E-05	2,006E-04	0,000E+00	1,010E-05
Alc.Bic.(CaCO <sub>3</sub> )	140000	76000	319,80	11,05	384,50	6,14	0,2	-0,064	319,80	390,37	3,59	59,27	2,55	3,38	0,334	325,23	5,273E-05	1,662E-04	6,114E-06	1,102E-05
Alc.T.(CaCO <sub>3</sub> )	140000	76000	349,83	11,05	433,43	6,14	0,2	-0,083	349,83	453,17	3,59	59,27	2,55	3,38	0,391	374,17	5,434E-05	1,548E-04	5,315E-06	1,123E-05
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	140000	76000	70,73	11,05	100,83	6,14	0,2	-0,021	70,73	64,67	3,59	8,93	2,55	3,38	0,039	91,90	6,252E-05	1,980E-04	3,262E-06	1,004E-05
Fós.T.(P)	140000	76000	0,37	11,05	0,37	6,14	0,2	0,000	0,37	0,40	3,59	0,23	2,55	3,38	0,000	0,13	4,386E-05	2,193E-04	5,872E-05	9,928E-06
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	140000	76000	541,25	11,05	642,62	6,14	0,2	-0,072	541,25	691,78	3,59	150,88	2,55	3,38	0,370	491,73	5,207E-05	1,612E-04	1,030E-05	1,115E-05
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	140000	76000	0,02	11,05	0,01	6,14	0,2	0,000	0,02	0,00	3,59	0,00	2,55	3,38	0,000	0,01	1,462E-05	2,193E-04	0,000E+00	9,927E-06
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	140000	76000	0,01	11,05	0,01	6,14	0,2	0,000	0,01	0,01	3,59	0,00	2,55	3,38	0,000	0,01	5,263E-05	2,193E-04	0,000E+00	9,927E-06
Amônia (NH <sub>3</sub> )	140000	76000	0,32	11,05	0,84	6,14	0,2	-0,005	0,32	0,93	3,59	0,01	2,55	3,38	0,008	0,83	1,138E-04	2,144E-04	2,021E-07	9,950E-06
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	140000	76000	11,75	11,05	14,15	6,14	0,2	-0,004	11,75	15,72	3,59	2,60	2,55	3,38	0,021	11,55	5,282E-05	2,149E-04	7,553E-06	9,989E-06



**ANEXO F. DADOS DA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO  
BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE MICRO E  
NANOFILTRAÇÃO.**

Os resultados obtidos no balanço de massa referente ao tópico 4.8. A Tabela 17 mostra os resultados das quantidades medias dos sais obtidos a partir do balanço de massa em cada ponto específico coletados no sistema de micro e nanofiltração das seis bateladas. As vazões usadas para a obtenção da Tabela 17, foi usado os valores da Tabela 8.

**Quadro 14 – Resultado do balanço de massa do sistema de micro e nanofiltração.**

Microfiltração				Nanofiltração		
Componentes	Med.[MF] <sub>A</sub>	Med.[MF] <sub>C</sub>	Med. [MF] <sub>P</sub>	Med.[NF] <sub>C</sub>	Med. [NF] <sub>P</sub>	TRS%[NF]
D.C. (Ca <sup>2+</sup> )	58,67	57,73	70,17	71,22	8,70	87,24
D.M. (Mg <sup>2+</sup> )	59,00	63,13	75,12	84,03	5,38	92,78
D.T. (CaCO <sub>3</sub> )	392,47	407,27	488,38	528,18	44,25	90,80
Sódio (Na <sup>+</sup> )	362,37	360,80	486,52	417,33	131,60	72,62
Potássio (K <sup>+</sup> )	4,50	4,48	6,08	5,25	1,52	74,86
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	0,08	0,08	0,08	0,13	0,06	16,28
Fe.T.(Fe)	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00
Alc.Hid. (CaCO <sub>3</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alc.Carb.(CaCO <sub>3</sub> )	30,07	31,53	47,27	62,80	0,00	100,00
Alc.Bic.(CaCO <sub>3</sub> )	326,23	319,80	390,33	390,37	59,27	84,59
Alc.T.(CaCO <sub>3</sub> )	356,30	349,83	437,60	453,17	59,27	86,33
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0,00	0,00	0,00	64,67	8,93	91,14
Fós.T.(P)	30,07	31,53	47,27	0,40	0,20	50,00
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	326,23	319,80	390,33	691,78	150,88	76,52
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	356,30	349,83	437,60	0,00	0,16	0,00
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	50,45	70,73	100,68	0,01	0,02	0,00
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,38	0,37	0,42	0,93	0,01	99,40
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	547,38	541,25	645,27	15,72	2,60	81,63
ISL (Índeci de Saturação de Langelier)	1,01	0,89	0,98	0,92	-1,21	
Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) a 180°C	1.512,93	1.508,17	1.877,40	1.985,18	382,17	79,39

**ANEXO G. RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO E DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.**



<b>Laudo N°.: 03 - SD/2010</b>	Data da Coleta: 23/11/2011
Interessado: LABDES/UFCG	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 23/11/2011
Localidade: URUÇU	Tipo de Recipiente: Garrafa Plástica
Procedência: POÇO	Data da Análise: 23/11/2011

### RESULTADO DAS ANÁLISES DA MÉDIA DAS SEIS BATELADAS DA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	<b>2.363,33</b>	<b>2.353,33</b>	<b>3.121,67</b>	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,29	8,20	8,19	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,32	0,38	0,33	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,00	5,83	4,17	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	58,67	57,73	70,17	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	59,00	63,13	75,12	---
<b>Dureza Total, mg/L <math>\text{CaCO}_3</math></b>	<b>392,47</b>	<b>407,27</b>	<b>488,38</b>	<b>500,0</b>
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	362,37	360,80	486,52	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	4,50	4,48	6,08	---
Alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), mg/L	0,08	0,08	0,08	0,2
Ferro Total, mg/L	0,02	0,02	0,02	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,00	0,00	0,00	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	30,07	31,53	47,27	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	326,23	319,80	390,33	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	356,30	349,83	437,60	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	0,00	0,00	0,00	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	326,23	319,80	390,33	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	356,30	349,83	437,60	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	50,45	70,73	100,68	1,0
Amônia ( $\text{NH}_3$ ), mg/L	0,38	0,37	0,42	1,3
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	547,38	541,25	645,27	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,01	0,89	0,98	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C,	1.512,93	1.508,17	1.877,40	1.000,0

<b>Laudo N°.: 03 - SD/2010</b>	Data da Coleta: 23/11/2011
Interessado: LABDES/UFCG	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 23/11/2011
Localidade: URUÇU	Tipo de Recipiente: Garrafa Plástica
Procedência: POÇO	Data da Análise: 23/11/2011

### RESULTADO DAS ANÁLISES DA MÉDIA DAS SEIS BATELADAS DA MEMBRANA DE NANOFILTRAÇÃO

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	<b>3.121,67</b>	<b>3.118,00</b>	<b>590</b>	---
<b>Potencial Hidrogeniônico, pH</b>	8,19	8,06	7,66	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,33	0,43	0,51	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	4,17	8,33	0,00	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	68,17	71,22	8,70	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	74,52	84,03	5,38	---
<b>Dureza Total, mg/L <math>\text{CaCO}_3</math></b>	<b>480,88</b>	<b>528,18</b>	<b>44,25</b>	<b>500,0</b>
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	480,70	417,33	131,60	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	6,03	5,25	1,52	---
Alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), mg/L	0,07	0,13	0,06	0,2
Ferro Total, mg/L	0,02	0,03	0,02	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,00	0,00	0,00	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	48,93	62,80	0,00	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	384,50	390,37	59,27	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	433,43	453,17	59,27	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	100,83	64,67	8,93	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	642,62	691,78	150,88	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,01	0,00	0,16	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,01	0,01	0,02	1,0
Amônia ( $\text{NH}_3$ ), mg/L	0,84	0,93	0,01	1,3
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	14,15	15,72	2,60	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,03	0,92	-1,21	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C,	<b>1.853,97</b>	<b>1.985,18</b>	<b>382,17</b>	<b>1.000,0</b>



<b>Laudo N°.: 03 - SD/2010</b>	Data da Coleta: 20/10/2011
Interessado: LABDES/UFCG	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: São João do Cariri	Data da Entrega da Amostra: 20/10/2011
Localidade: URUÇU	Tipo de Recipiente: Garrafa Plástica
Procedência: POÇO	Data da Análise: 20/10/2011

### RESULTADO DAS ANÁLISES DA MÉDIA DAS TRÊS BATELADAS DA MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	<b>2.471,11</b>	<b>4.158,89</b>	<b>142,92</b>	---
<b>Potencial Hidrogeniônico, pH</b>	7,86	7,97	6,72	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,63	1,52	0,23	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	2,22	3,89	0,00	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	63,13	112,37	3,62	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	66,13	121,55	1,95	---
<b>Dureza Total, mg/L <math>\text{CaCO}_3</math></b>	<b>433,39</b>	<b>787,39</b>	<b>17,17</b>	<b>500,0</b>
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	313,54	650,12	24,53	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	4,19	9,16	0,26	---
Alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), mg/L	0,00	0,00	0,01	0,2
Ferro Total, mg/L	0,03	0,07	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,00	0,00	0,00	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	40,89	121,82	0,00	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	284,98	477,87	27,51	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	325,87	599,69	27,51	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^{--}$	39,07	102,17	3,43	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	565,24	1.007,65	40,31	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,02	0,05	0,09	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,01	0,01	0,00	1,0
Amônia ( $\text{NH}_3$ ), mg/L	0,39	0,69	0,00	1,3
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	35,81	51,17	2,26	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	0,52	1,16	-3,07	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C,	<b>1.459,77</b>	<b>2.711,11</b>	<b>110,04</b>	<b>1.000,0</b>

**ANEXO H. METODOLOGIA SOBRE A LIMPEZA QUÍMICA DO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO.**

Esta limpeza estabelece a remoção de eventuais microrganismos e sais inorgânicos que estabelece a remoção destas impurezas sobre a superfície das membranas através da aplicação da solução básica de **NaOH (pH = 10)** e da solução de ácido cítrico **H<sub>3</sub>C<sub>5</sub>O<sub>7</sub> (pH = 3)**.

A primeira membrana a ter ocorrido à limpeza química foi a de microfiltração e em seguida a membrana de nanofiltração, esta limpeza teve duas fases, uma com uma solução básica e a outra com solução ácida. Estas etapas ocorreram da seguinte maneira:

### SOLUÇÃO BÁSICA

- Preparou uma solução de 100 litros de solução básica de **NaOH (pH = 10,6)** em um reator de mistura;
- Conectou-se a membrana ao reator de mistura para dar início à limpeza química;
- Deixou-se circular a solução de NaOH no elemento de membrana no tempo de 1 minuto para que se ocasione a retirada do restante de água que o sistema continha no seu interior;
- Em seguida, conectou-se a saída do concentrado da membrana com o reator de mistura para dá início ao processo de limpeza com NaOH;
- Dano início ao processo, coletando dados como condutividade, pH e temperatura do reator e do concentrado da membrana no tempo 0 min e, em seguida a cada 15 minutos;
- Quando o pH do reator (alimentação da membrana) igualou-se ao pH do concentrado da membrana ocorreu repetição destes valores no tempo de 1:30 min, 1:45 min, 2:00 horas e 2:15 min, finalizou o processo de limpeza com a solução de NaOH;
- Logo em seguida a membrana foi deixada de molho em torno de 1 hora, logo após o tempo de molho ocorreu o enxágüe da mesma pra da inicio a limpeza química com a solução ácida;

## SOLUÇÃO ÁCIDA

- Preparou uma solução de 100 litros de solução ácida de cítrico  $H_8C_5O_7$  (pH = 3) em um reator de mistura;
- Conectou-se a membrana de membrana ao reator de mistura para dar início à limpeza química;
- Deixou-se circular a solução de Ácido Cítrico no elemento de membrana no tempo de 1 minuto para que se ocasiona a retirada do restante de água que o sistema continha após o enxágüe ocorrido anteriormente no seu interior;
- Em seguida, conectou-se a saída do concentrado da membrana com o reator de mistura para dá início ao processo de limpeza com Ácido Cítrico;
- Dano início ao processo, coletou dados como condutividade, pH e temperatura do reator e do concentrado da membrana no tempo 0 min e, em seguida a cada 15 minutos;
- Quando o pH do reator (alimentação da membrana) igualou-se ao pH do concentrado da microfiltração ocorreu uma repetição destes valores no tempo de 1:30 min, 1:45 min, 2:00 horas, finalizou o processo de limpeza com a solução de Ácido Cítrico;
- Logo em seguida a membrana foi deixada de molho em torno de 1 hora, logo após o tempo de molho ocorreu o enxágüe da mesma.



**ANEXO I. VALORES DOS RESULTADOS SOBRE A LIMPEZA QUÍMICA NO SISTEMA DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO.**

Os resultados das Figuras 45, 46, 47 e 48 obtidos sobre a limpeza química da membrana de microfiltração através das soluções de NaOH e de  $H_8C_5O_7$ .

**Quadro 15 – Comportamento da limpeza química na membrana de microfiltração através da solução NaOH.**

ALIMENTAÇÃO				CONCENTRADO			
TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu$ s)	pH	Temperatura ( $^{\circ}$ C)	TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE E ( $\mu$ s)	pH	Temperatura ( $^{\circ}$ C)
0	373	10,60	24	0	305	9,40	24
15	299	10,00	24	15	310	9,50	25
30	314	9,40	25	30	296	9,10	25
45	300	9,30	25	45	306	9,00	26
60	296	9,00	26	60	321	9,00	26
75	307	8,60	26	75	287	8,60	26
90	294	8,30	26	90	305	8,30	26
105	305	8,30	27	105	307	8,30	27
120	312	8,30	27	120	325	8,30	27
135	326	8,30	28	135	327	8,30	28

**Quadro 16 – Comportamento da limpeza química na membrana de microfiltração através da solução  $H_8C_5O_7$ .**

ALIMENTAÇÃO				CONCENTRADO			
TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu$ s)	pH	Temperatura ( $^{\circ}$ C)	TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu$ s)	pH	Temperatura ( $^{\circ}$ C)
0	358	3,60	23	0	290	4,80	24
15	286	4,40	24	15	285	5,00	24
30	280	4,90	24	30	291	5,10	24
45	294	5,20	25	45	265	5,30	25
60	302	5,40	25	60	298	5,60	25
75	298	5,60	25	75	281	5,80	25
90	279	5,90	25	90	276	5,90	26
105	280	6,60	24	105	289	6,60	24
120	271	6,80	24	120	282	6,80	25
135	297	6,80	25	135	302	6,80	25
150	291	6,80	25	150	276	6,80	25

Os resultados das Figuras 49, 50, 51 e 52 obtidos sobre a limpeza química da membrana de nanofiltração através das soluções de NaOH e de  $H_8C_5O_7$ .

**Quadro 17 – Comportamento da limpeza química na membrana de nanofiltração através da solução NaOH.**

ALIMENTAÇÃO				CONCENTRADO			
TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu s$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu s$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
0	330	10,20	28	0	330	10,40	28
15	342	10,10	32	15	347	10,10	32
30	355	10,10	36	30	356	10,10	36
45	361	9,90	39	45	357	9,90	40
60	364	9,80	38	60	367	9,80	39
75	369	9,80	38	75	364	9,80	38
90	364	9,80	38	90	363	9,80	37

**Quadro 18 – Comportamento da limpeza química na membrana de nanofiltração através da solução  $H_8C_5O_7$ .**

ALIMENTAÇÃO				CONCENTRADO			
TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu s$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	TEMPO (min)	CONDUTIVIDADE ( $\mu s$ )	pH	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
0	289	3,70	25	0	298	3,90	25
15	323	3,70	29	15	313	3,70	29
30	328	3,70	33	30	332	3,70	33

**ANEXO J. LAUDO TÉCNICO DAS MEMBRANAS DE MICRO E NANOFILTRAÇÃO.**

## Módulo de Microfiltração: Alimentação Lateral

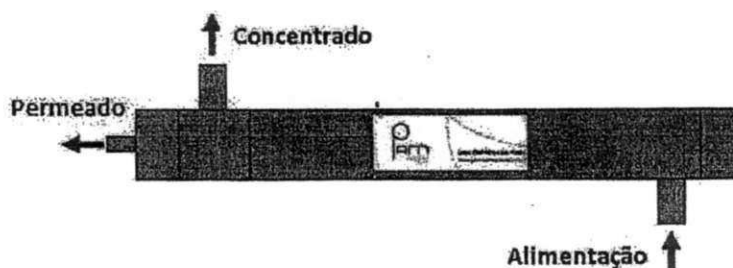
O módulo de microfiltração fabricado pela PAM Membranas Seletivas Ltda. é confeccionado com membranas de alta tecnologia de fabricação própria. Estas são produzidas com rigoroso sistema de qualidade.

A microfiltração é um método eficiente para esterilização de fluidos, pois remove 99,99% dos microorganismos (vírus e bactérias) e sólidos suspensos do fluido a ser processado. O principal mecanismo de separação com membranas de microfiltração é a exclusão por tamanho molecular. A estrutura assimétrica da membrana faz com que moléculas maiores que o poro da membrana sejam rejeitadas pela mesma, enquanto as menores passarão pela membrana permanecendo na corrente de permeado. Por proporcionar uma filtração superficial, as membranas de microfiltração da Pam Membranas Seletivas possuem baixa incrustação e conseqüentemente alto fluxo, o que permite a fabricação de equipamentos compactos de alta eficiência.

### Propriedades Típicas da Membrana

Geometria	Cilíndrica do tipo fibra oca
Material	Polieterimida (PEI)
Camada Seletiva	Externa
Diâmetro Externo (mm)	0,95
Tamanho de Poro ( $\mu\text{m}$ )	0,40
Limites de pH	2 – 13

### Esquema do Módulo de Microfiltração



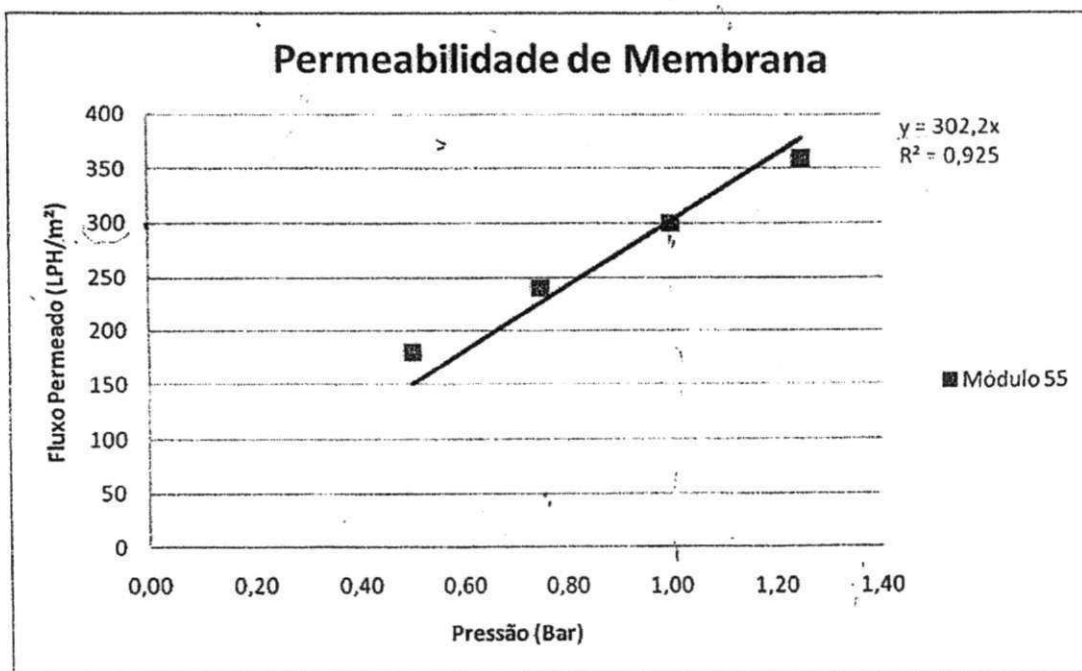
Material de Construção	PVC
Conexão	BSP Fêmea de 1/2"
Sentido Filtração	Fora para dentro da Fibra
Pressurização	Carcaça
Pressão de Operação	Depende do fluido a ser tratado
Pressão máxima de operação ( $\text{kgf/cm}^2$ )	5,0
Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}\text{C}$ )	55



### Propriedades do Módulo:

Identificação	0055
Processo	Microfiltração
Comprimento útil (mm)	420
Diâmetro externo (mm)	50
Empacotamento (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	800
Área de Filtração (m <sup>2</sup> )	0,5
Permeabilidade (LPH/m <sup>2</sup> .Bar)	

### Determinação da Permeabilidade Hidráulica:



Os resultados aqui expressos retratam nossos resultados de ensaios realizados sob condições controladas, utilizando água previamente microfiltrada.

Este documento foi emitido eletronicamente pela garantia da qualidade, portanto não necessita ser assinado.

**Flávio Souza**  
Garantia da Qualidade

Rua Paulo Emídio Barbosa, 485 QD 6A  
Parque Tecnológico Edifício MP, Módulo 1  
Ilha do Fundão | Cidade-Universitária  
Rio de Janeiro | RJ | CEP: 21.941-615  
Tel: [21] 3733 1980 | Fax: [21] 2590 4334  
pam@pam-membranas.com.br  
www.pam-membranas.com.br



## Módulo de Membrana - Limpeza

A limpeza dos módulos laterais de microfiltração e ultrafiltração é realizada da mesma maneira. Esta limpeza pode ser física ou química.

A limpeza física consiste em remover a sujeira do módulo utilizando água limpa para tal. Esta remoção pode ser feita a partir de uma lavagem pela carcaça ou retrolavagem.

### Lavagem pela carcaça:

- Fechar a saída de permeado com um plug (BSP 1/2");
- Abrir completamente a saída de concentrado;
- Circular água pelo módulo, até que se obtenha a limpeza no grau desejado.

### Retrolavagem:

- Utilizar água microfiltrada ou ultrafiltrada (utilizar o próprio módulo para gerá-la);
- Injetar água pela saída de permeado do módulo;
- Fechar a saída de concentrado do módulo com um plug (BSP 1/2");
- Descartar a água que sairá pela alimentação do módulo.

**Importante:** A utilização água que não tenha sido gerada pelo módulo, ou recircular a água durante esta operação, pode fazer com que seja acumulado material no interior da fibra, inutilizando o módulo de membrana.

A limpeza química consiste em utilizar produtos químicos para auxiliar na remoção dos materiais incrustados na membrana. Deixar o módulo imerso na solução pelos tempos recomendados. Efetuar enxágüe do módulo executando operação de lavagem pela carcaça ou retrolavagem com água.

**Limpeza oxidante – Hipoclorito (de 500 a 1000 mg/L):** Utilizar quando a membrana estiver contaminada com matéria orgânica. Por ser um oxidante forte, esta solução não deve ser utilizada por um período superior a 2 horas para evitar danos à membrana.

**Limpeza ácida – Ácido Cítrico (pH = 3,0):** Utilizar quando a membrana estiver contaminada com material inorgânico. Tempo de contato: até 24 horas.

**Limpeza Alcalina – Hidróxido de Sódio (soda caustica) (pH = 10):** Utilizar quando o depósito tiver muita sílica, ácidos graxos e/ou microorganismos resistentes. Tempo de contato: 24 horas.

**Importante:** É recomendado realizar o procedimento de limpeza física antes dos procedimentos de limpeza química.

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



## FILMTEC™ NF90-4040 Membranes

FILMTEC NF90 Nanofiltration Elements for Commercial Systems

### Features

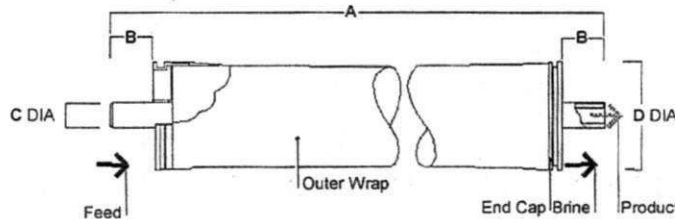
The FILMTEC™ NF90 membrane elements provide high productivity performance while removing a high percentage of salts, nitrate, iron and organic compounds such as pesticides, herbicides and THM precursors. The low net driving pressure of the NF90 membrane allows the removal of these compounds at low operating pressures.

### Product Specifications

Product	Part Number	Active Area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (m <sup>3</sup> /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
NF90-2540	149982	28 (2.6)	70 (4.8)	680 (2.6)	>97.0
NF90-4040	149983	82 (7.6)	70 (4.8)	2,000 (7.6)	>97.0

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 2,000 ppm MgSO<sub>4</sub>, 77°F (25°C) and 15% recovery at the pressure specified above.
2. Permeate flows for individual NF90-2540 elements may vary by -20% / +30%. NF90-4040 individual elements may vary -15% / +50%.
3. Developmental products available for sale.

Figure 1



FilmTec sells coupler part number 89055 for use in multiple element housings. Each coupler includes two 2-210 EPR o-rings, FilmTec part number 89255

Product	Dimensions – Inches (mm)			
	A	B	C	D
NF90-2540	40.0 (1,016)	1.19 (30)	0.75 (19)	2.4 (61)
NF90-4040	40.0 (1,016)	1.05 (27)	0.75 (19)	3.9 (99)

1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element systems.
  2. NF90-2540 has a tape outer wrap. NF90-4040 has a fiberglass outer wrap.
- 1 inch = 25.4 mm

### Operating Limits

• Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
• Maximum Operating Temperature	113°F (45°C)
• Maximum Operating Pressure	600 psi (41 bar)
• Maximum Feed Flow Rate - 4040 elements	16 gpm (3.6 m <sup>3</sup> /hr)
- 2540 elements	6 gpm (1.4 m <sup>3</sup> /hr)
• Maximum Pressure Drop - tape wrapped	13 psig (0.9 bar)
- fibreglassed	15 psig (1.0 bar)
• pH Range, Continuous Operation <sup>a</sup>	2 – 11
• pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.) <sup>b</sup>	1 – 12
• Maximum Feed Silt Density Index	SDI 5
• Free Chlorine Tolerance <sup>c</sup>	<0.1 ppm

<sup>a</sup> Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

<sup>b</sup> Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010 for NF90.

<sup>c</sup> 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.