



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CAMPUS CARAÚBAS
CURSO BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANDERSON GOMES BEZERRA

**ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO POR OSMOSE REVERSA NA
PURIFICAÇÃO DA ÁGUA**

CARAÚBAS - RN

2018

ANDERSON GOMES BEZERRA

**ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO POR OSMOSE REVERSA NA
PURIFICAÇÃO DA ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Ciência e
Tecnologia da Universidade Federal Rural
do Semi-Árido (UFERSA), Campus
Caraúbas, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Orientador: Drº Ricardo Neves Bedoya.

CARAÚBAS - RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B574e Bezerra, Anderson Gomes.
Estudo da tecnologia de filtração por osmose reversa na purificação da água / Anderson Gomes Bezerra. - 2018.
58 f. : il.

Orientador: Ricardo Neves Bedoya.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2018.

1. Osmose Reversa. 2. Membranas. 3. Filtração. 4. Dessalinização. I. Bedoya, Ricardo Neves, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

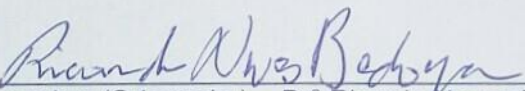
ANDERSON GOMES BEZERRA

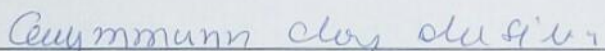
**ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO POR OSMOSE REVERSA NA
PURIFICAÇÃO DA ÁGUA**

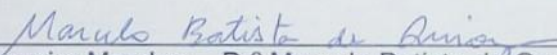
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Ciência e
Tecnologia da Universidade Federal Rural
do Semi-Árido (UFERSA), Campus
Caraúbas, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

AVALIADO EM: 13 / 09 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:


Primeiro membro (Orientador) – Drº Ricardo Neves Bedoya
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.


Segundo Membro – Drª Gúymmann Da Silva
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.


Terceiro Membro – Drº Marcelo Batista de Queiroz
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.

CARAÚBAS - RN

2018

*Aos meus pais, José Gomes Sobrinho e
Antônia de Fátima Bezerra, por todo amor
e ensinamentos da vida.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Gomes Sobrinho e Antônia de Fátima Bezerra, e aos meus irmãos Lilian Gomes Bezerra e Karlmarx Gomes Bezerra, meus agradecimentos pelo carinho e pela fé que depositaram em mim.

A minha família, pelo apoio moral.

Ao Dr. Ricardo Neves Bedoya, por ter construído este trabalho comigo, além de ter aberto muitas portas para a progressão da minha vida acadêmica. Enfim, por ter sido um professor amigo.

Aos meus amigos, Gustavo Tavares, Danilo Araújo, Gustavo Krause, Weskley Rondinelly, Felipe Menezes e outros, pela lucidez e sabedoria adquirida ao longo da nossa convivência.

Aos meus professores: Bedoya, Daniel, Hudson, Zenner, Marcelo, Edna, Guymmann e outros, pela sabedoria, e, sobretudo, por me inspirarem a viver minha profissão.

“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente.”

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Nos últimos anos, no âmbito internacional, os sistemas de dessalinização por membrana, mais especificamente a osmose reversa vem ganhando bastante evidencia como um método extremamente eficaz para realizar a purificação da água. Sendo atualmente o método mais utilizado para tal finalidade. Este processo é aplicado em vários setores industriais, e também para realizar a dessalinização de água contendo índices elevados de sais dissolvidos, para obtenção de água ultrapura para o consumo. Uma das vantagens da osmose reversa em relação as outras tecnologias de tratamento de água se dá devido ao seu mecanismo simples de funcionamento. O Brasil, apesar de ser um país privilegiado em recursos naturais e de possuir uma imensa quantidade de reservas hídricas, existem regiões que sofrem bastante com o problema da escassez de água. O objetivo deste trabalho é apresentar os aspectos fundamentais a respeito da tecnologia de filtração de água por osmose reversa através de uma pesquisa bibliográfica abordando as principais tecnologias por trás desses sistemas, tais como os materiais utilizados para a produção das membranas de filtração e as configurações de tratamento mais utilizadas, abordando os princípios básicos de funcionamentos de cada uma delas.

PALAVRAS-CHAVES: Osmose Reversa, Membranas, Filtração, Dessalinização.

ABSTRACT

In recent years, at the international level, membrane desalination systems, more specifically reverse osmosis has been gaining a lot of evidence as an extremely effective method to carry out water purification. It is currently the most widely used method for this purpose. This process is applied in several industrial sectors, and also to perform the desalination of water containing high levels of dissolved salts, to obtain ultrapure water for consumption. One of the advantages of reverse osmosis in relation to other water treatment technologies is due to its simple mechanism of operation. Brazil, despite being a privileged country in natural resources and possessing an immense amount of water reserves, there are regions that suffer greatly from the problem of water scarcity. The objective of this work is to present the fundamental aspects regarding reverse osmosis water filtration technology through a bibliographical research addressing the main technologies behind such systems, such as the materials used for the production of filtration membranes and the configurations of treatment, addressing the basic principles of operation of each one of them.

KEY-WORDS: Reverse Osmosis, Membranes, Filtration, Desalination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de filtração convencional.	16
Figura 2: Sistema de filtração tangencial (Crossflow filtration).	17
Figura 3: Espectro de filtração.	18
Figura 4: partículas rejeitadas.	19
Figura 5: Comparação do poro das membranas de osmose reversa com os principais contaminantes da água.	19
Figura 6: Tanque antes do processo de osmose.	21
Figura 7: Tanque após o processo de osmose.	22
Figura 8: Princípio básico da osmose reversa.	22
Figura 9: imagem de MEV da superfície do filme fino de acetato de celulose.	24
Figura 10: Evolução da eficiência Energética das membranas de OR.	27
Figura 11: Custo por metro cúbico de água filtrada.	28
Figura 12: Estrutura química da celulose.	29
Figura 13: Estrutura química do acetato de celulose.	30
Figura 14: Imagem de MEV da seção transversal de uma membrana de acetato de celulose.	31
Figura 15: Síntese da poliamida.	33
Figura 16: Síntese da membrana de Poliamida aromática de ligações cruzadas.	34
Figura 17: Imagem de MEV da seção transversal da membrana de poliamida de ligações cruzadas.	34
Figura 18: Utilização dos módulos de placa plana em sistemas de biorreatores.	37
Figura 19: Ilustração esquemática de um módulo em espiral.	38
Figura 20: Filme de fibra oca.	39
Figura 21: Seção transversal de uma fibra oca.	39
Figura 22: Módulo de fibra oca.	40
Figura 23: Módulo tubular.	41
Figura 24: Sistema típico de osmose reversa.	42
Figura 25: Módulo degradado devido ao processo de Fouling.	43
Figura 26: Formação de biofouling.	44
Figura 27: Processos de coagulação e floculação.	46
Figura 28 Estações de tratamento de osmose reversa.	50

Figura 29: Usina de SWRO de Sydney.	50
Figura 30: Usina de SWRO de Gold Coast.	51
Figura 31: Sistema de captura de água do mar em Fernando de Noronha.	52
Figura 32: Equipamento de pré-tratamento e processo de dessalinização de Fernando de Noronha.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução da performance das membranas de OR até o final dos anos 90.	25
Tabela 2: Custo relativo das membranas de OR.	26
Tabela 3: Principais propriedades das membranas de AC.	32
Tabela 4: Principais propriedades das membranas de poliamida aromática nano compósita.	35
Tabela 5: Pré-tratamento mecânico.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. PROCESSOS DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANA.	16
3. OSMOSE NATURAL E O MECANISMO BÁSICO DA OSMOSE REVERSA.	21
4. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO.	24
5. PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS NAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA.	29
5.1. MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSE	29
5.2. MEMBRANAS DE POLIAMIDA E NANOCOMPOSITOS.	32
6. MÓDULOS DE MEMBRANAS.	36
6.1. MÓDULO DE PLACA PLANA (PLATE AND FRAME).....	36
6.2. MÓDULO DE ELEMENTO EM ESPIRAL.....	37
6.3. MÓDULO DE FIBRA OCA.	39
6.4. MÓDULO TUBULAR.....	40
7. PRÉ-TRATAMENTO.....	43
7.1. PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO.....	45
7.2. TRATAMENTO QUÍMICO (OU LAVAGEM QUÍMICA).....	46
8. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA OSMOSE REVERSA.	48
8.1. INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.....	48
8.2. INDÚSTRIAS FARMACÊUTICA.	48
8.3. AGRICULTURA.....	49
8.4. DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR PARA OBTENÇÃO DE ÁGUA ULTRAPURA PARA CONSUMO.	49
8.5. ÁGUAS SALOBRAS.....	53
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	54
10. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual a escassez de água potável é um problema crítico. E o estudo de métodos para realizar a purificação da água vem ganhando bastante evidência, devido à preocupação com a sua escassez no planeta em um futuro não muito distante (GRADY; YOUNOS, 2014). Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) a água potável pode ser definida como aquela que não contem agentes químicos ou biológicos prejudiciais à saúde humana.

Ainda de acordo com a ONU, cerca de 14% da população mundial (que representa cerca de 1,1 bilhões de pessoas) sofrerá com a falta de água, até 2025 (RINCON, 2018). Entretanto, a situação atual já é preocupante, pois estima-se que quase 800 milhões de pessoas (que representa cerca de um decimo da população mundial) são abastecidos por águas contaminadas ou provindas diretamente da fonte, sem passarem por nenhum tipo de tratamento.

Diante deste cenário a dessalinização da água do mar passa a ser vista como uma medida extremamente necessária e também como uma forma para garantir a segurança mundial de água potável para a população no futuro. Nas últimas décadas surgirão várias novas tecnologias para realizar a remoção de sais e contaminantes orgânicos e inorgânicos, entretanto, o emprego de grande parte desses novos métodos esbarra em algumas limitações, tais como: possuir uma baixa eficiência e baixa capacidade de purificação, ou ainda por serem economicamente inviáveis.

A partir da década de 1960, a filtração dos sais e impurezas da água através de tecnologias baseadas em membranas, mais especificamente a osmose reversa (OR) vem ganhando evidência como um método eficaz para tornar a água dos oceanos e reservas de águas salobras potáveis, pois as recentes descobertas de novas tecnologias possibilitaram reduzir os custos de fabricação e operação, ao mesmo tempo aumentando a eficiência de retenção de sais, isso fez o seu emprego crescer bastante (KUCERA, 2015).

Atualmente a filtração por membrana domina o mercado da dessalinização, sendo a osmose reversa a técnica mais utilizada. Além de ser aplicada para a obtenção de água potável, ela também é amplamente utilizada em todo o mundo em várias áreas industriais (agricultura, alimentícias, farmacêuticas, por exemplo) e ainda em pequenas estações de reuso (reaproveitamento) de água contaminada, mas em menor escala (DHAKAL, 2017).

Este trabalho tem como objetivo apresentar os aspectos fundamentais a respeito da técnica de filtração por osmose reversa. Abordando os principais materiais utilizados na síntese das membranas, os principais módulos (espiral, tubular, placa plana e fibra oca) e também algumas das principais aplicações deste processo.

2. PROCESSOS DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANA.

As membranas podem ser caracterizadas como “barreiras” de pouca espessura que controlam seletivamente a passagem de massa entre dois ambientes.

Uma membrana pode ser definida a nível macroscópico como uma barreira fina, situada entre duas fases, ou meios, que permite que um ou mais constituintes passem seletivamente de um meio para o outro na presença de uma força motriz apropriada [...]. (PURKAIT; SINGH, 2018).

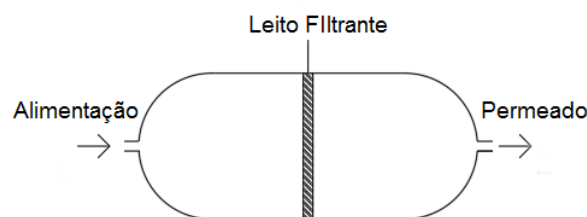
Os sistemas de filtração por membrana são processos de purificação seletiva de correntes fluidas (líquidas ou gasosas) sem haver mudança de fase. Nesses sistemas, as membranas funcionam como barreiras de poros bem definidos e homogêneos para os contaminantes existentes na corrente fluida (FLUID SEPARATION, 1987).

As membranas artificiais e compósitas apresentam uma elevada capacidade de retenção de sólidos dissolvido e ao mesmo tempo um elevado fluxo de permeado, pois foram desenvolvidas a partir da combinação de outros materiais para apresentarem tais características. A poliamida, por exemplo, é um polímero sintético que apresenta tais características (KUCERA, 2015).

Atualmente existem várias tecnologias de filtração por membrana, que são definidas e classificadas de acordo com o tamanho das partículas que elas são capazes de remover de uma corrente fluida (FLUID SEPARATION, 1987).

A filtração convencional (ou macro filtração) é geralmente utilizada para remoção da maior parte dos sólidos suspensos presentes na água. Exemplos típicos desse processo são os filtros de carvão ativado. Neste caso, toda corrente fluída atravessa o leito filtrante (a membrana), gerando uma única corrente de saída, a Figura 1 ilustra este processo (FLUID SEPARATION, 1987).

Figura 1: Sistema de filtração convencional.

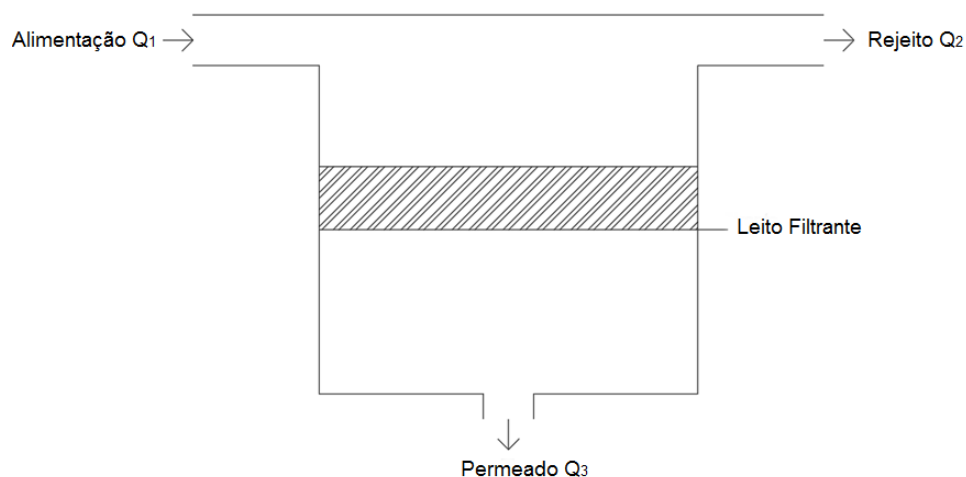


Fonte: Adaptado de Fluid Separation (1987).

Entretanto para realizar a remoção de partículas menores e sais dissolvidos (ou seja, micropartículas ou nano partículas) é necessário utilizar um método de separação que utilize o processo denominado “crossflow filtration” (FLUID SEPARATION, 1987).

A crossflow filtration (filtração por escoamento tangencial) é um processo no qual há a utilização de uma corrente fluida de alimentação pressurizada, fluindo paralelamente a superfície da membrana. Neste caso, “[...] uma parte da corrente atravessa a membrana (permeado), deixando para trás partículas e sais dissolvidos que permanecem na corrente remanescente (rejeito) [...]” (FLUID SEPARATION, 1987). O processo de crossflow filtration está ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Sistema de filtração tangencial (Crossflow filtration).



Fonte: Adaptado de Fluid Separation (1987).

A grande vantagem deste sistema é que graças ao fluxo de corrente contínuo de água, as partículas rejeitadas não se acumulam na superfície da membrana. Este processo possui uma corrente inicial de alimentação Q1 que posteriormente se divide em duas correntes de saída Q2 (rejeito) e Q3 (permeado). O permeado consiste na água filtrada (ou purificada) e o rejeito equivale a parte da corrente não filtrada que carrega os contaminantes. Dentre os principais processos de separação por membrana que utilizam a crossflow filtration temos: A microfiltração, a nano filtração e a osmose reversa (FLUID SEPARATION, 1987).

A microfiltração é capaz de remover partículas na faixa de até 0,1 micrometro, suas principais aplicações são: remoção de bactérias, materiais floculados e sólidos

A nano filtração permite a remoção de todos os contaminantes até a faixa de 1 nanômetro, o que inclui macromoléculas orgânicas (por exemplo, as proteínas), coloides. Permite ainda a separação de alguns sais dissolvidos, como o cálcio, magnésio, sulfetos e carbonatos (KUCERA, 2015).

Por fim, temos a osmose reversa que apresenta o nível mais elevado dos processos de filtração. Tal processo é capaz de reter partículas de até 0,0001 micrometros (1 Angstrom), permitindo assim, que as moléculas de água passem livremente, entretanto barrando os sais dissolvidos, contaminantes biológicos (como vírus e bactérias) e moléculas inorgânicas (por exemplo, a sílica). O nível de rejeição de sais dissolvidos pode atingir cerca de 99,85%. (KUCERA, 2015).

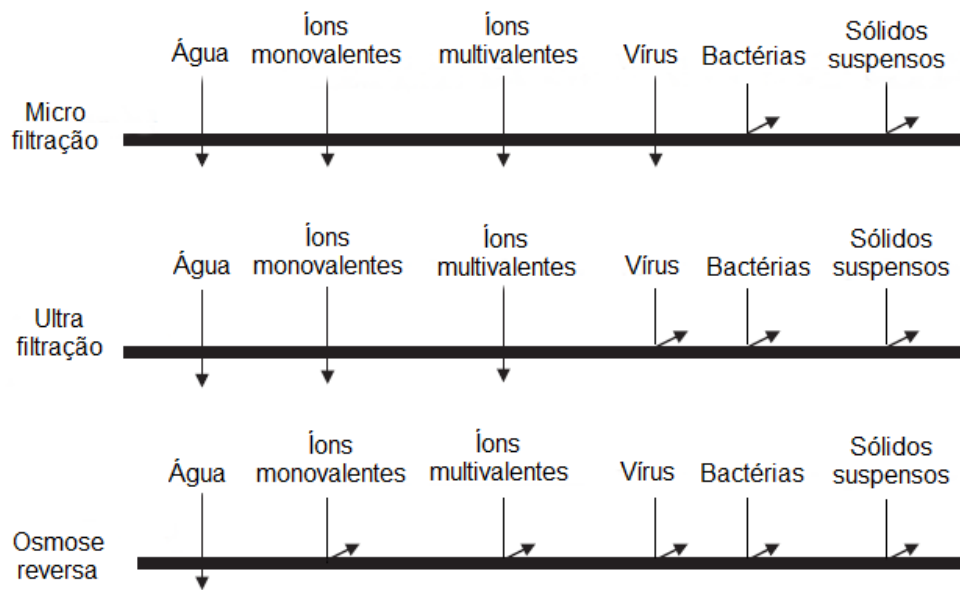
Embora possa ser utilizada em muitos líquidos, a principal aplicação da osmose reversa é na filtração da água do mar e águas salobras para o abastecimento de regiões que possuem com altos índices de escassez de água. A Osmose reversa também é aplicada em processos industriais, na agricultura e em pequenas estações de reuso. Atualmente já existem eletrodomésticos (filtros) e estações de tratamento móvel que utilizam essa tecnologia.

As Figuras 3 e 4 ilustram respectivamente, o espectro de filtração e as partículas rejeitadas pelos principais métodos de filtração por membrana. A partir delas pode-se obter uma melhor percepção a respeito da capacidade de filtração proporcionada por cada um dos processos citados anteriormente.

Figura 3: Espectro de filtração.

0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	50	100
Micro	Micro	Micro	Micro	Micro	Micro	Micro	Micro
Átomos	Moléculas	Vírus	Bactérias		Pólen	Cabelo humano	Areia
Sólidos dissolvidos		Sólidos suspensos					
		Colóides		Sólidos sedimentados			
					Filtração multimédia		
		Micro filtração					
		Ultra filtração					
		Nano filtração					
Osmose reversa							

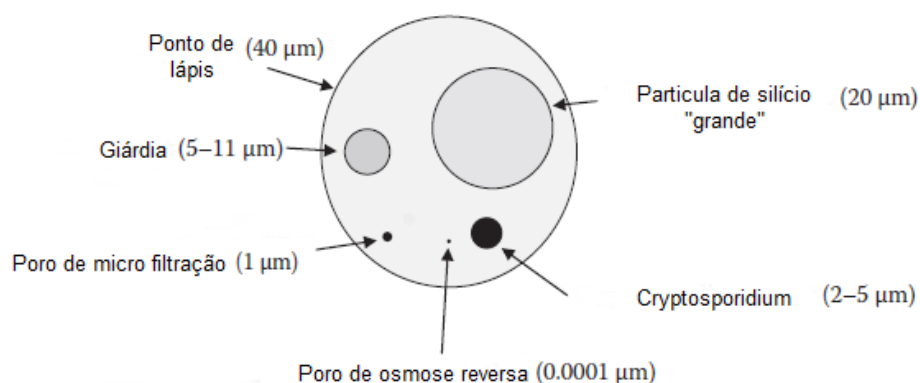
Fonte: Adaptado de Spellman (2015).

Figura 4: partículas rejeitadas.

Fonte: Adaptado de Spellman (2015).

Como observado nas Figuras 3 e 4, as membranas de osmose reversa possuem a maior capacidade de filtração entre as principais tecnologias disponíveis, sendo impermeável aos vírus, bactérias e até mesmo a alguns íons (SPELLMAN, 2015). Devido a essa poderosa capacidade de filtração a ela também é denominada como “filtração molecular”.

A Figura 5 ilustra uma comparação a nível microscópico da representação do tamanho do poro das membranas de osmose reversa em relação a alguns dos principais contaminantes encontrados na água (SPELLMAN, 2015).

Figura 5: Comparação do poro das membranas de osmose reversa com os principais contaminantes da água.

Fonte: Adaptado de Spellman (2015).

A partir da Figura 5, pode-se observar inicialmente que o círculo maior representa um ponto feito por um lápis (40 μm), em seguida, no interior do ponto há varias partículas menores, tais como: uma partícula “grande” de silício (20 μm), a giárdia, que é protozoário microscópico, causador de infecções (5 - 11 μm), a partícula de cryptosporidium (2-5 μm) que também é um protozoário (causador da crptosporidíase). Por fim, tem-se o poro das membranas de microfiltração (1 μm) e ao seu lado o poro minúsculo das membranas de OR (0,0001 μm), aproximadamente dez mil vezes menor que os poros apresentas nas membranas de microfiltração. Este contraste criado pela ilustração realça ainda mais a capacidade de filtração dessa tecnologia (SPELLMAN, 2015).

3. OSMOSE NATURAL E O MECANISMO BÁSICO DA OSMOSE REVERSA.

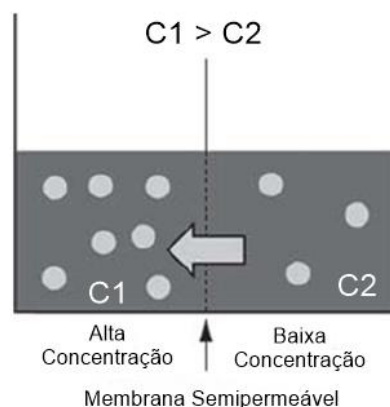
A princípio, para compreender o funcionamento dos sistemas de osmose reversa, é necessário previamente entender alguns conceitos básicos, porém, fundamentais para o seu funcionamento. Por isso, é necessário compreender como funciona o processo natural de osmose.

A osmose é um processo natural, onde a água flui através de uma membrana semipermeável de uma solução com uma baixa concentração de sólidos dissolvidos para uma solução com uma alta concentração de sólidos dissolvidos (KUCERA, 2015).

Para ilustrar este processo tem-se a Figura 6, que representa um tanque contendo dois compartimentos e entre eles encontra-se uma membrana semipermeável, isto é, que permite apenas a passagem da água e alguns íons, sendo impermeável a todos os outros sólidos dissolvidos (KUCERA, 2015).

Inicialmente, um compartimento do tanque possui uma solução com uma alta concentração de sólidos dissolvidos (C1) enquanto o outro apresenta uma solução de baixa concentração (C2). Dadas estas condições, o processo natural de osmose se inicia, fazendo com que a água permeie através da membrana da solução menos concentrada para a solução mais concentrada (KUCERA, 2015).

Figura 6: Tanque antes do processo de osmose.

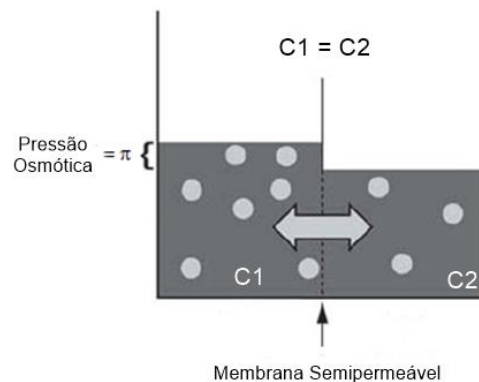


Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

O fluxo de água continuará até que as soluções atinjam o equilíbrio químico, ou seja, concentrações iguais. Neste ponto o nível da solução anteriormente mais concentrada, estará acima do nível da solução anteriormente menos concentrada, e

a diferença de nível entre as colunas da solução é denominada pressão osmótica, que é comumente representada pela letra grega pi (π) (KUCERA, 2015). A Figura 7 ilustra este processo.

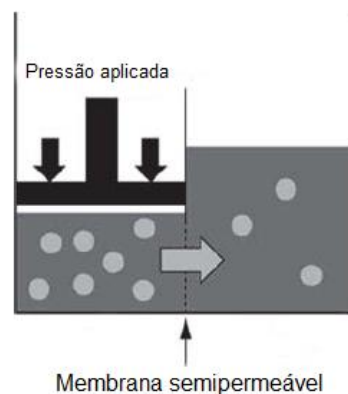
Figura 7: Tanque após o processo de osmose.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

O princípio básico da osmose reversa é o processo pelo qual se aplica uma pressão maior que a pressão osmótica, no compartimento que agora contém a lâmina de água mais elevada (antes continha a solução de maior concentração). Esta pressão força a água a passar através da membrana em direção inversa à da osmose natural. A água agora flui da solução mais concentrada para a solução menos concentrada. Fazendo com que somente “água relativamente pura” passe através da membrana, enquanto os sólidos dissolvidos, contaminantes biológicos e outras pequenas partículas são retidos (KUCERA, 2015). O processo descrito está ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Princípio básico da osmose reversa.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

Um fator importante a ser considerado é que a pressão osmótica é função da concentração de sólidos dissolvidos. Sendo diretamente proporcional a quantidade destes sólidos, ou seja, a pressão necessária para a filtração de um determinado volume “ V ” de uma solução com baixa concentração, será menor que a pressão necessária para filtrar esse mesmo volume “ V ” em uma solução de alta concentração. Um exemplo prático encontra-se na filtração de águas salobras onde as pressões aplicadas são bem inferiores as pressões necessárias para filtração da água do mar (GRADY; YOUNOS, 2014).

Com isso, podemos definir a osmose reversa como um tipo de filtração por membrana que utiliza pressão (que deve ser capaz de vencer a pressão osmótica, ou seja, $P_{apl.} > \pi$) para forçar a passagem da água carregada de contaminantes através de uma membrana semipermeável, em direção oposta a osmose natural de forma a realizar a filtração. (GRADY; YOUNOS, 2014).

4. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO.

Um dos primeiros registros documentados a respeito de estudos sobre membranas semipermeáveis ocorreu em 1748, quando Jean-Antoine Nollet (conhecido como Abbe Nollet) observou o fenômeno de osmose, porém somente mais de dois séculos depois, em 1959, C.E. Reid e E.J. Breton (pesquisadores da universidade da Florida) demonstraram a capacidade da utilização de membranas semipermeáveis no processo de dessalinização da água, através de um estudo, utilizando o método de tentativa e erro (KUCERA, 2015).

Os testes eram focados em filmes poliméricos pertencentes ao grupo hidrófilo (que possuem afinidade com a água, ou seja, possuem boa capacidade absorção). Foi observado que um filme de acetato de celulose (Figura 9), apresentou níveis de rejeição de cloretos acima de 96%, para pressões inferiores a 3.103,2 MPa (450 Psi), com isso, exibindo propriedades para aplicações práticas, mas melhorias no fluxo e durabilidade ainda eram requeridos para obter viabilidade comercial (KUCERA, 2015).

Figura 9: imagem de MEV da superfície do filme fino de acetato de celulose.



Fonte: Ismail; Matsuura (2018).

Na década de 1960, o Dr. Hassler's efforts, Sidney loeb e srinnivasa Sourirajan na Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA) desenvolveram a primeira membrana de acetato de celulose assimétrica, este novo material aprimorou significativamente o fluxo de água, tornando-as assim comercialmente viáveis. Outro

marco importante da década de 1960 ocorreu em 1967, com o desenvolvimento do primeiro módulo de fibra oca, desenvolvido pela empresa DuPont. No ano seguinte foi desenvolvido o primeiro módulo prático de filtração em espiral com multicamadas, que promoveu uma melhora considerável ao fluxo da osmose reversa, minimizando as quedas de pressão sofridas pela água ao permear a membrana em espiral até chegar ao tubo coletor (KUCERA, 2015).

No final da década de 1960 e início de 1970, pesquisadores seguindo a liderança de Loeb e Sourirajan, conseguiram um rápido progresso no desenvolvimento de novos materiais. Inicialmente surgiram as membranas de poliamida aromática, que apresentaram pressões de operação menores e níveis de retenção de sólidos dissolvidos mais elevados em relação às membranas de acetato de celulose até então utilizada, chegando a aproximadamente 99% rejeição de sais, com isso as membranas de acetato de celulose e poliamida passaram a ser o padrão industrial (KUCERA, 2015).

Até o final da década de 1990, a tecnologia de osmose reversa continuou se desenvolvendo rapidamente, sempre buscando aumentar ainda mais o fluxo de água que permeia através da membrana e reduzir sua pressão de operação. A Tabela 1 descreve esse desenvolvimento com mais detalhes.

Tabela 1: Evolução da performance das membranas de OR até o final dos anos 90.

Ano	Pressão (MPa)	Fluxo Relativo	Rejeição (%)	Material da Membrana
1970	3,000	1,0	97,0	Acetato de Celulose
1980	2,000	1,9	99,0	Compósito de poliamida reticulada
1987	1,517	3,0	99,7	Compósito Aromático de poliamida reticulada
1988	1,000	4,2	99,7	Compósito Aromático de poliamida reticulada
1996	0,760	5,6	99,7	Compósito Aromático de poliamida reticulada
1999	0,517	8,0	99,7	Compósito Aromático de poliamida reticulada

Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

Observando-se a Tabela 1, é perceptível o aumento de performance significativo que a osmose reversa obteve entre as décadas de 1970 e 1990, em aproximadamente 30 anos, as pressões de operações foram reduzidas em quase 6 vezes, na década de 1970 as pressões de operação se encontravam em torno de 3,0 MPa, ao final da década de 1990 a pressão necessária para realizar a filtração era de apenas 0,517 MPa. Outro ponto que obteve um grande avanço foi fluxo relativo de água que permeia a membrana, que foi elevado em 8 vezes, em relação ao fluxo inicial. O índice de rejeição de sais também se elevou, partindo de 97% para 99,7% (KUCERA, 2015).

O custo relativo (percentual) da membrana também sofreu um declínio, como podemos observar na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Custo relativo das membranas de OR.

Ano	Custo Relativo
1980	1
1985	0,65
1990	0,34
1995	0,19
2000	0,14

Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

Com os novos avanços obtidos nas tecnologias dos materiais das membranas a partir dos anos 2000, principalmente em relação a nanotecnologia, tornou-se possível a criação das membranas nanocompósitas. Estas novas membranas foram desenvolvidas com um tipo de nanopartícula de zeólita (constituem um grupo de minerais que possuem uma característica porosa), dispersa dentro do filme fino de poliamida, pelo Dr. Eric M.V. Hoek e sua equipe. A estrutura da nova membrana nanocompósita melhorou as principais características de desempenho: rugosidade, hidrofobicidade, carga de superfície e adesão de vírus e bactérias. Ao longo de linhas semelhantes, outros pesquisadores têm voltado seus estudos para as membranas de

nano compósitas. Algumas delas passaram a apresentar uma rejeição de 99,85% de sais (KUCERA, 2015).

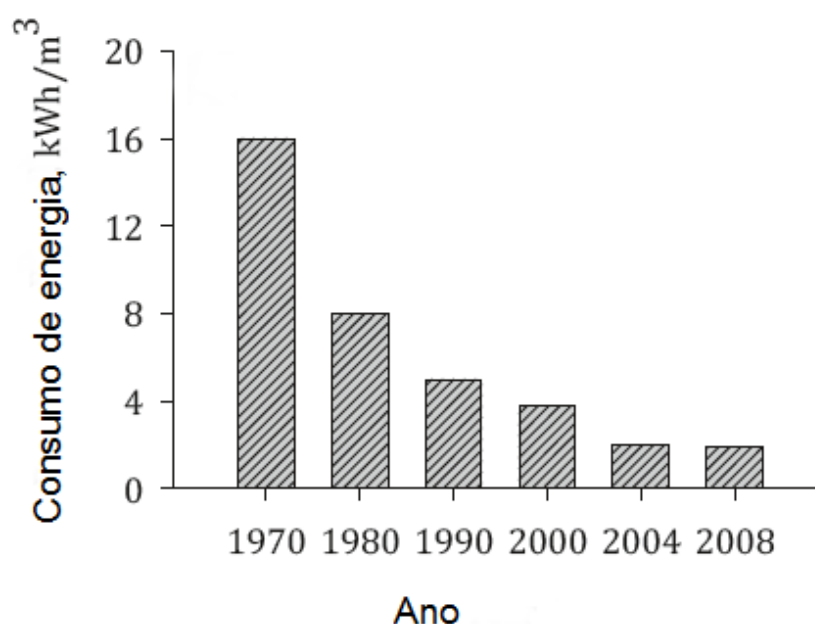
Outro fator importante que obteve uma melhora acentuada foi a eficiência ao que diz respeito ao consumo de energia elétrica, para cada metro cúbico de água filtrada.

Para realizar a filtração de 1 m³ de água na década de 1970 era necessário o emprego de 16 KW, após os avanços obtidos ao longo das décadas este consumo foi reduzido de tal forma que no ano de 2008, para filtrar o mesmo 1 m³, era necessário apenas 2 KW (DHAKAL, 2017). A melhoria da eficiência energética das membranas de osmose reversa está ilustrada no gráfico da Figura 10.

Esta melhora considerável nos aspectos relacionados ao desempenho teve seus resultados refletidos diretamente na viabilidade econômica das membranas. Os custos (incluindo gastos com energia elétrica, manutenção e CAPEX, que em termos simples está relacionado as despesas de aquisição das membranas) foram reduzidos de \$ 1,6/m³ para \$ 0,6/m³ de 1982 para 2010 (DHAKAL, 2017).

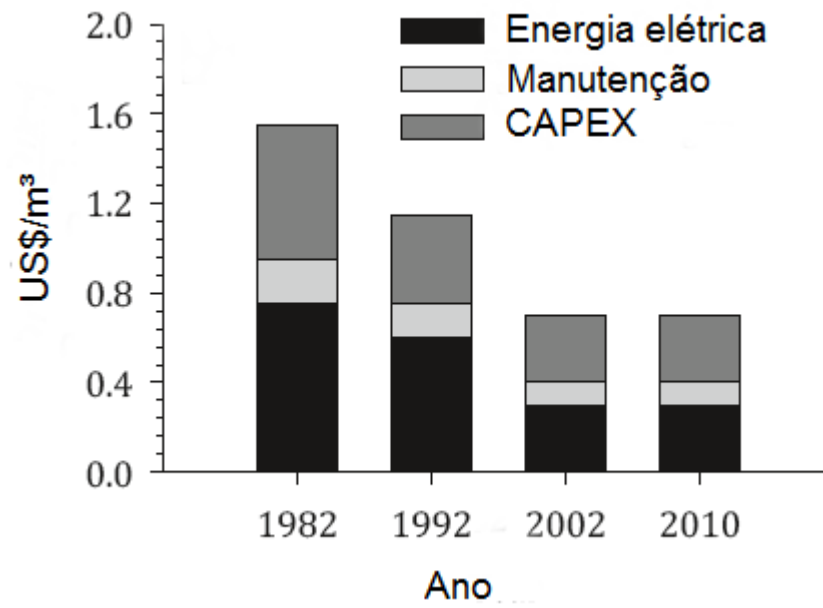
O custo de operação dos sistemas de OR para cada metro cubico de água filtrado está ilustrado no gráfico da Figura 11. Isso fez com que o mercado da dessalinização fosse dominado por tecnologias que tem como base a filtração por membranas semipermeáveis (DHAKAL, 2017).

Figura 10: Evolução da eficiência Energética das membranas de OR.



Fonte: Adaptado de Dhakal (2017).

Figura 11: Custo por metro cúbico de água filtrada.



Fonte: Adaptado de Dhakal (2017).

5. PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS NAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA.

O desempenho dos sistemas de filtração por osmose reversa está diretamente relacionado ao material do qual a membrana é composta, pois para se obter uma filtração eficaz, o material que compões a membrana deve apresentar um conjunto de características consideradas “ideais”. Características essas que estão relacionadas com a natureza química e a estrutura da membrana, estes fatores são determinantes para as propriedades de rejeição e fluidez do sistema.

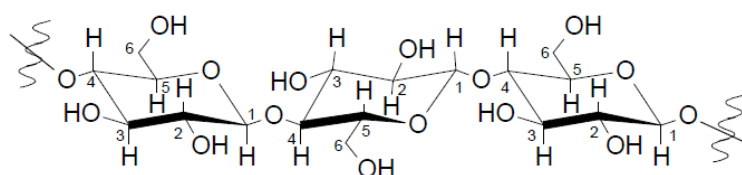
Idealmente, as membranas devem apresentar alta taxa de permeabilidade para as moléculas de água e alta capacidade de rejeição de contaminantes, além de alta resistência e durabilidade. Atualmente a maioria das membranas utilizadas no sistema de OR apresentam estas características (KUCERA, 2015). Mas ao que diz respeito a resistência e durabilidade, alguns cuidados devem ser tomados, como por exemplo, realizar uma remoção prévia de parte dos contaminantes que se encontram presentes na água, utilizando algum tipo de pré-tratamento.

Os materiais mais comumente utilizado para a fabricação das membranas são os polímeros. Os principais são o acetato de celulose, a poliamida e os seus derivados. Esses polímeros diferem em alguns aspectos, incluindo desempenho, propriedades físicas, estrutura e a forma como são obtidos (SPELLMAN, 2015).

5.1. MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSE

A celulose é um polímero natural e linear formado por uma cadeia constituída por unidades de glicose unidas entre si por ligações glicosídicas. Cada unidade de glicose contém três grupos hidroxilas livres, ligados aos carbonos 2, 3 e 6, respectivamente (MEIRELES, 2007). A Figura 12 ilustra a molécula de celulose.

Figura 12: Estrutura química da celulose.

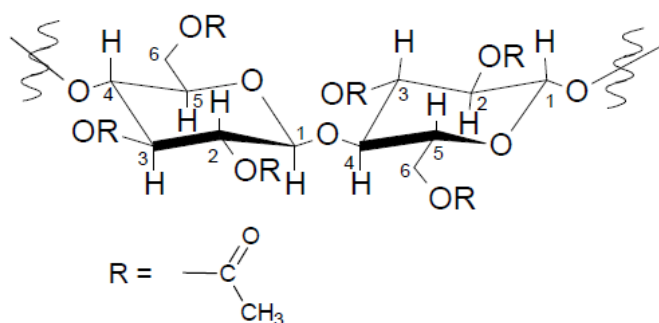


Fonte: Meireles (2007).

Devido aos grupos hidroxilas, as macromoléculas de celulose tendem a formar ligações de hidrogênio as quais são extremamente importantes para suas características químicas e físicas, pois elas proporcionam uma significativa rigidez e ainda possibilitam a formação da fibra vegetal (MEIRELES, 2007).

O acetato de celulose (AC) é um derivado da celulose que é produzido pela substituição dos grupos hidroxila das unidades de glicose por grupos acetila. Podendo ser obtida através de reações com ácido acético e anidrido acético, na presença de ácido sulfúrico ou perclórico como catalisador (MEIRELES, 2007). A estrutura química das membranas de acetato de celulose está ilustrada na Figura 13.

Figura 13: Estrutura química do acetato de celulose.

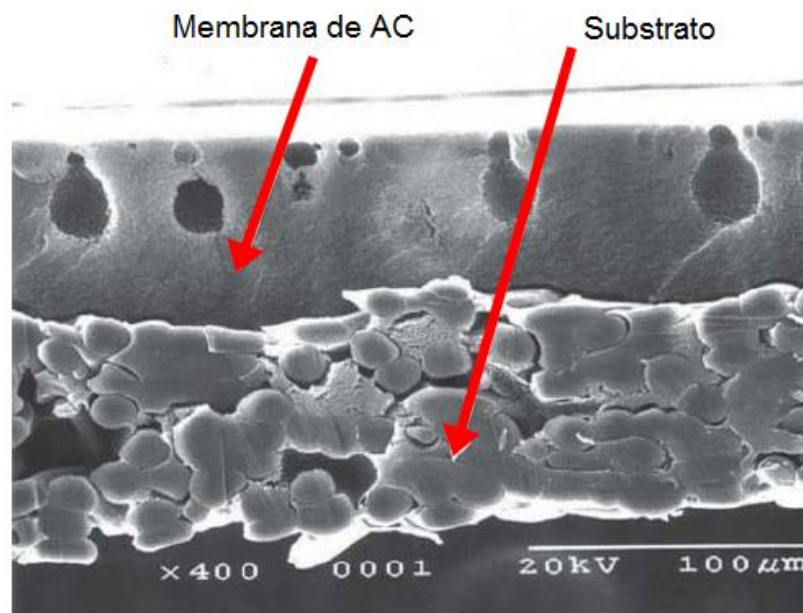


Fonte: Meireles (2007).

Como mencionado anteriormente, o acetato de celulose é atualmente um dos principais materiais utilizados para produção das membranas de osmose reversa. Isso se dá pelas características apresentadas pelo material, que proporcionam uma filtração eficaz das impurezas presentes na água (KUCERA, 2015).

A Figura 14 mostra uma seção transversal de uma membrana de AC. Ela apresenta uma estrutura assimétrica ou anisotrópica (varia de acordo com a direção), com uma camada de rejeição de soluto no topo de um substrato micro poroso.

Figura 14: Imagem de MEV da seção transversal de uma membrana de acetato de celulose.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

As principais características desse material são: possuir carga neutra na superfície, que é relativamente lisa o que oferece proteção contra incrustações; possuir resistência relativa ao cloro maior que as membranas de poliamida (cerca de 1 ppm). A rejeição de sais pode variar um pouco, mas de maneira geral elas apresentam altos índices, pois na sua estrutura há um volume relativamente alto de pequenos vazios (KUCERA, 2015). A membrana de AC é bastante fina, sua espessura é de aproximadamente 100 micros (SPELLMAN, 2015).

Apesar de serem bastante utilizadas, este material apresenta algumas limitações, tais como: temperatura limite de operação relativamente baixa, cerca de 35°C. Temperaturas acima desse ponto podem provocar o seu recozimento, resultando assim em um material muito mais denso, dificultando a passagem de água. Outro fator limitante é o pH de operação, que deve estar compreendido entre no intervalo de 4 - 6, ou seja, as membranas de AC devem operar em uma faixa de pH pequena e restrita. A pressão de operação é outro fator que pode variar, para uma membrana AC a pressão de operação para aplicações em águas salobras é relativamente alta (KUCERA, 2015).

A Tabela 3 apresenta um resumo geral a respeito das principais características apresentadas pelas membranas de AC.

Tabela 3: Principais propriedades das membranas de AC.

Propriedade	Valores para membranas de AC
Tipo de membrana	Homogênea Assimétrica
Rejeição de sais (%)	~ 95
Rejeição de sílica (%)	~ 85
Limitação de pH	4 - 6
Pressões de operação (águas salobras)	1,379 - 2,758 MPa
Tolerância de temperatura	Até 35°C
Carga superficial	Neutra
Tolerância ao cloro	Até 1 ppm
Tolerância ao Fouling	Boa tolerância
Rugosidade Superficial	Lisa

Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

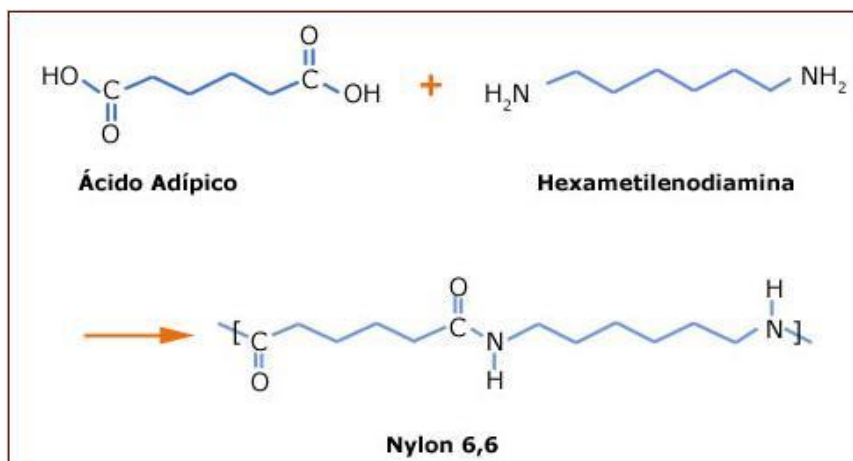
De maneira geral, sob condições controladas, as membranas de acetato de celulose apresentam altos índices de rejeição de sais, elevada resistência a incrustação e uma boa tolerância ao cloro, isso faz com que esse material seja um dos mais frequentemente utilizados para a construção de membranas de OR (KUCERA, 2015).

5.2. MEMBRANAS DE POLIAMIDA E NANOCOMPOSITOS.

A poliamida é um polímero termoplástico sintético composto por segmentos de polietileno ($\text{CH}_2\text{-CH}_2$)_n, separados por unidades de peptídeos (NH-CO), estas unidades possibilitam a ligação de hidrogênio com a cadeia do polímero. (HERMES, 1996).

Ela é produzida a partir de quatro elementos básicos, o carbono (C), nitrogênio (N), oxigênio (O) e hidrogênio (H). Estes elementos são combinados através de processos químicos especiais, que dão origem a alguns compostos tais como ácido adípico, hexametenodiamina, caprolactama, dentre outros, que são combinados de forma a sofrerem reações químicas, e formarem as macromoléculas que formam a poliamida. A Figura 15 ilustra este processo.

Figura 15: Síntese da poliamida.



Fonte: Farias (2018).

As membranas sintéticas foram desenvolvidas com a finalidade de melhorar o desempenho dos sistemas de osmose reversa (KUCERA, 2015). Pois, mesmo as membranas de acetato de celulose, que apresentam características apropriadas para as operações de filtração, possuem algumas limitações.

Não há nenhuma fibra natural que pode ser usada para fabricar material filtrante apropriado para todas as situações. Em termos de suas propriedades químicas, físicas e mecânicas, um meio filtrante de sucesso deve ser adaptado para atender os requisitos específicos de um determinado sistema de filtragem (CERON, 2010).

De forma que para reduzir tais limitações seria necessário sintetizar novos materiais que tivessem a capacidade de se adequar a um maior número de situações, como por exemplo, maiores variações de temperatura e pH.

As membranas mais utilizadas atualmente são constituídas por materiais compósitos, isto é, um material “[...] multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem” (CALLISTER, 2002).

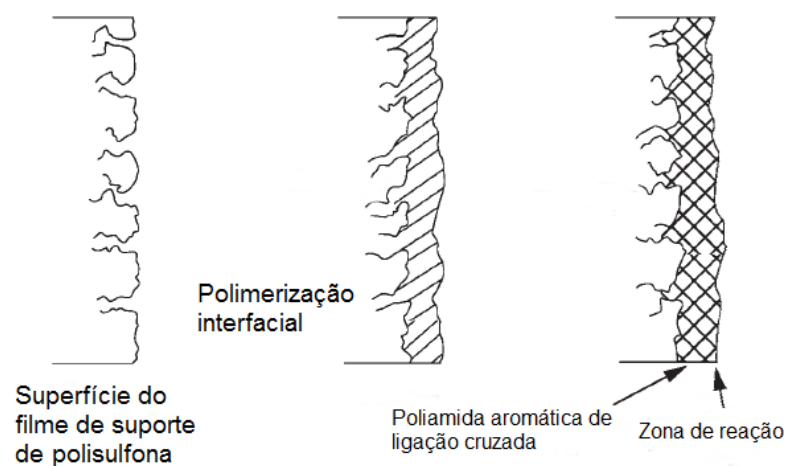
A membrana de poliamida aromática de ligações cruzadas (ou compósito de poliamida reticulada) é a mais utilizada dentre todos os tipos de membranas. Essas membranas são geralmente formadas usando polimerização interfacial, neste caso, a polimerização se dá na interface de dois solventes (KUCERA, 2015).

Para a fabricação das membranas compósitas geralmente usa-se como substrato a polisulfona, que consiste em um material polimérico muito fino e micro poroso. O substrato é então exposto a monómeros que são conhecidos por terem

elevada permeabilidade à água, mas baixa permeabilidade a sais, tais como a amina (KUCERA, 2015).

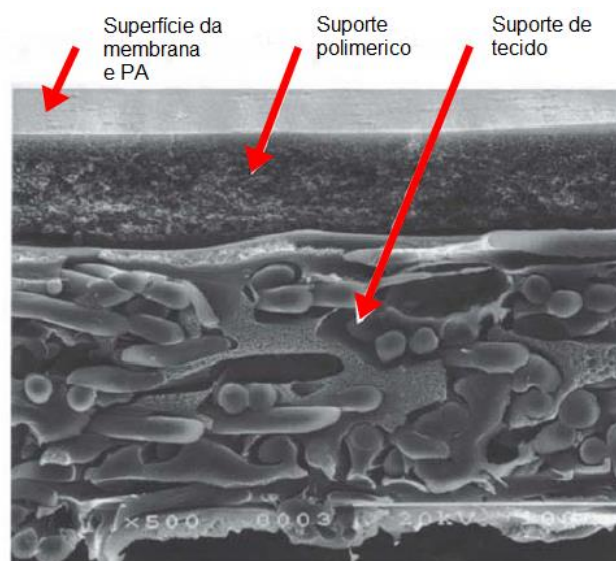
A amina é imersa em um solvente imiscível em água contendo um reagente. Daí acontece a reação na interface da água e do solvente orgânico, para formar um filme fino altamente reticulado. Este fino filme é formado no topo do substrato. As Figuras 16 e 17 ilustram o processo de sintetização e a sua seção transversal.

Figura 16: Síntese da membrana de Poliamida aromática de ligações cruzadas.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

Figura 17: Imagem de MEV da seção transversal da membrana de poliamida de ligações cruzadas.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

As principais características desse material são: Possuir uma taxa de rejeição de sais e sílica relativamente superior as membranas de AC, não são biodegradáveis, podem tolerar temperaturas operacionais mais altas do que as membranas AC (podendo chegar a cerca de 45°), possuem pH operacional compreendido entre a faixa de 2 a 11, podendo conter pequenas variações dependendo do fabricante, pressões de operação inferiores as membranas de AC devido a PA possuir uma estrutura extremante porosa, o que possibilita um maior fluxo de água (KUCERA, 2015).

Contudo, mesmo sendo um material manipulado para possuir características ideais para a filtração, a membrana de PA apresenta suas limitações. São elas: possui superfície áspera o que possibilita o surgimento de áreas onde pode ocorrer o acumulo de incrustações, a carga superficial da membrana é negativa, que acaba atraindo íons de carga positiva (cátions), que se não forem removidos previamente durante o processo de pré-tratamento podem ocasionar sérios problemas, possuem baixa resistência ao cloro e outros oxidantes. A Tabela 4 apresenta um resumo geral a respeito das principais características apresentadas pelas membranas de PA (KUCERA, 2015).

Tabela 4: Principais propriedades das membranas de poliamida aromática nano compósita.

Propriedade	Valores para membranas de AC
Tipo de membrana	Homogênea assimétrica, compósita de filme fino
Rejeição de sais (%)	~ 98+
Rejeição de sílica (%)	~ 96+
Limitação de pH	2 - 11
Pressões de operação (águas salobras)	1,0 - 2,75 MPa
Tolerância de temperatura	Até 45°C
Carga superficial	Negativa (aniônica)
Tolerância ao cloro	< 0,02 ppm
Tolerância ao Fouling	Tolerância moderada
Rugosidade Superficial	Rugosa (áspera)

Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

6. MÓDULOS DE MEMBRANAS.

Segundo Spellman (2015) os módulos podem ser definidos como os alojamentos que contem a membrana. Entretanto, de acordo com Kucera (2015) eles têm uma função muito mais relevante do que somente servirem como alojamento:

Para aplicações industriais as membranas de osmose reversa são tipicamente modularizadas usando configurações que possibilitam armazenar uma grande quantidade de área de membrana em um volume relativamente pequeno. Isso torna o sistema de OR mais econômico e o uso desses sistemas requerem uma menor área de ocupação, e as membranas poderão ser substituídas em módulos menores, em vez de todo o sistema (KUCERA, 2015).

Ou seja, os módulos de membranas são configurações utilizadas para tornar os sistemas de filtração mais compactos, de forma que poderão possuir um volume elevado de membranas ocupando uma área relativamente pequena. Além disso, eles também proporcionam propriedades funcionais e econômicas, pois caso o sistema apresente algum problema de funcionamento basta realizar a substituição do módulo defeituoso, não sendo necessária a substituição completa do sistema, possuindo assim uma importância significativa nos custos de operação e manutenção (KUCERA, 2015).

Os módulos de membranas são tipicamente encontrados em quatro modelos usuais: o de placa plana (Plate of frame), o tubular, o de fibra oca e o em espiral. Os aspectos mais relevantes de cada um deles serão abordados em seguida (SPELLMAN, 2015).

6.1. MÓDULO DE PLACA PLANA (PLATE AND FRAME).

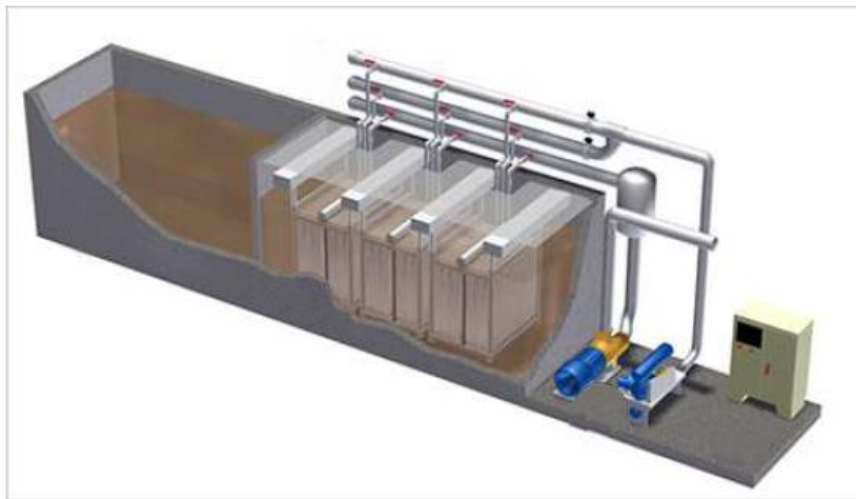
O módulo de placa plana foi uma das primeiras configurações desenvolvidas. Este modelo consiste em placas delgadas (ou seja, placas de pouca espessura) recobertas em ambas as faces por uma camada formada por membranas (FLUID SEPARATION, 1987). Normalmente são colocadas duas membranas por placa (KUCERA, 2015). Neste sistema a água flui através das membranas de uma camada para a outra, deixando para trás a maior parte dos seus contaminantes, os suportes que dão sustentação as placas formam um canal de fluxo.

Segundo Spellman (2015) esta configuração é considerada ineficiente devido à baixa relação entre volume de membranas por área, e, portanto, raramente é utilizada quando se deseja obter água potável.

De modo geral, destinam-se, ao tratamento de efluentes (resíduos provenientes das indústrias, dos esgotos e das redes pluviais) onde há presença de matéria orgânica e de micro-organismos (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A Figura 18, ilustra um sistema de Biorreatores de Membranas que utiliza os módulos de placa plana para filtração dos contaminantes da água.

Figura 18: Utilização dos módulos de placa plana em sistemas de biorreatores.



Fonte: Adaptado de Souza (2014).

Segundo Kucera (2015), estes módulos podem apresentar falhas devido à existência de “áreas mortas”, onde o fluxo tangencial não é alto o suficiente para limpar a superfície da membrana. Para realizar a limpeza das placas e obter uma melhor remoção das incrustações a maneira mais adequada seria fazer isso de forma manual. Além de apresentar estes problemas operacionais estes módulos são relativamente caros.

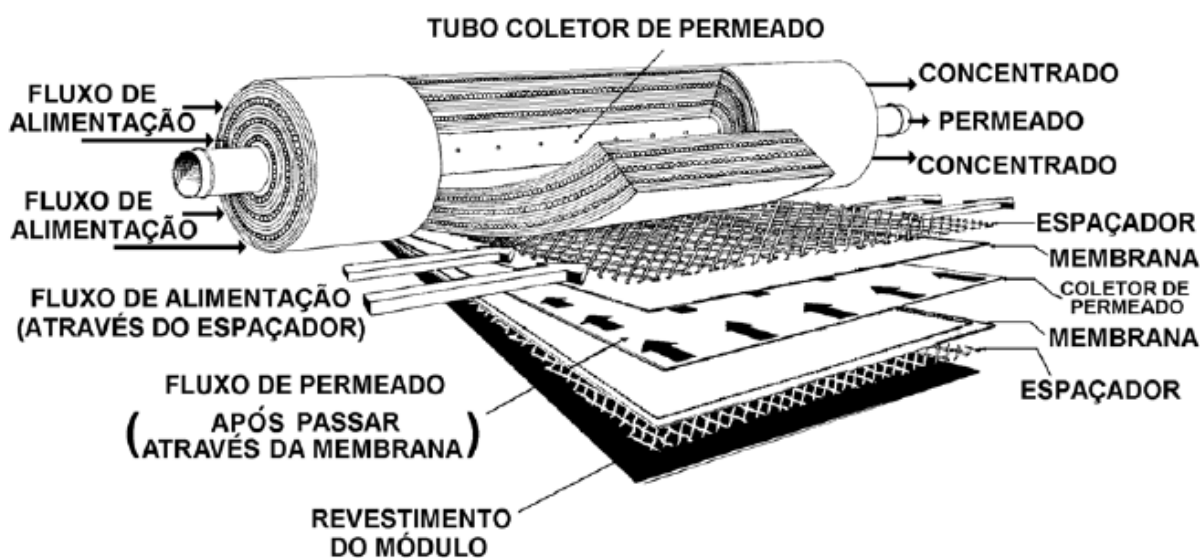
6.2. MÓDULO DE ELEMENTO EM ESPIRAL.

Um módulo em espiral é um arranjo constituído por uma envoltória de membranas enroladas em torno de um tubo central perfurado. Essa envoltória de membranas é dividida em camadas denominadas de “folhas” (KUCERA, 2015). Uma

folha é constituída por duas membranas com três extremidades coladas, formando uma espécie de “envelope”, separada entre si por uma malha. A extremidade aberta é colada no tubo central o qual fornece passagem a água filtrada através dos furos (BRYNE, 1995). O material que separa as membranas é denominado espaçador, o qual provê o canal permeado entre as membranas. Os espaçadores mais utilizados são constituídos de materiais poliméricos, por exemplo, fibras de nylon (KUCERA, 2015).

Um único módulo enrolado em espiral contendo, por exemplo, 8 polegadas de diâmetro (aproximadamente 200 mm) pode acomodar até aproximadamente 20 folhas (SPELLMAN, 2015). Este módulo encontra-se ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Ilustração esquemática de um módulo em espiral.



Fonte: Silva (2001).

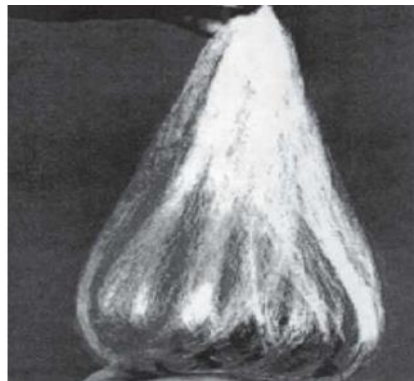
De uma forma simplificada a filtração neste módulo acontece da seguinte forma: a água de alimentação entra nos canais do espaçador e flui entre as membranas de forma a fazer um caminho paralelo ao tubo central. À medida que a água flui através da envoltória, uma porção penetra através da membrana, deixando para trás quaisquer contaminantes dissolvidos e particulados que são rejeitados pela membrana semipermeáveis. Esse tipo de módulo pode ser usado em série através do uso de um adaptador interconector de anéis circulares, de modo que a solução de

alimentação possa fluir por um grande número de módulos. Este modelo é o mais utilizado para obtenção de água ultrapura para consumo (KUCERA, 2015).

6.3. MÓDULO DE FIBRA OCA.

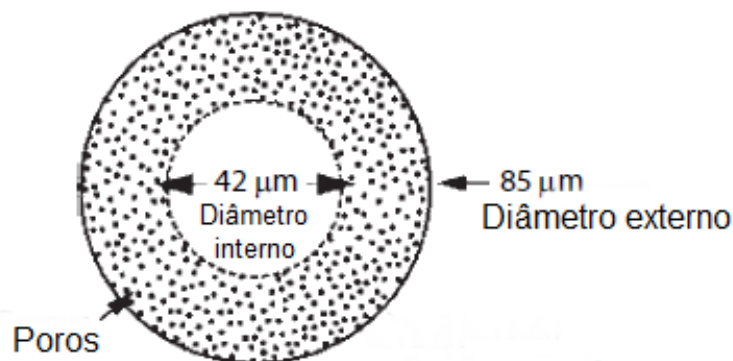
Estes módulos são compostos por fibras extrusadas e ocas. As fibras ilustradas na Figura 20 possuem entre 0,1 a 1 metro de espessura, e diâmetros pequenos (diâmetro externo de cerca de 85 micros e diâmetro interno em torno de 42 micros). Se assemelhando bastante ao cabelo humano (SPELLMAN, 2015). A Figura 21 ilustra a seção transversal de uma fibra.

Figura 20: Filme de fibra oca.



Fonte: Kucera (2015).

Figura 21: Seção transversal de uma fibra oca.

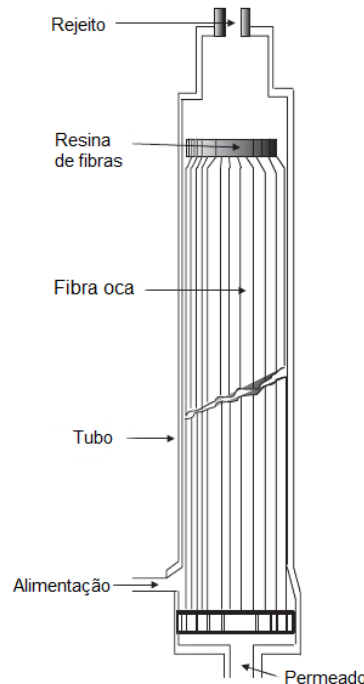


Fonte: Kucera (2015).

Estas fibras podem ser utilizadas em vários arranjos diferentes, no entanto o mais comum é serem utilizadas em agrupamentos longitudinais, envasadas em uma

resina em ambas as extremidades e encapsuladas em um tubo resistente a pressão que é incluído como parte do módulo de fibra oca (SPELLMAN, 2015). A Figura 22 ilustra esta configuração.

Figura 22: Módulo de fibra oca.



Fonte: Spellman (2015).

Segundo Kucera (2015), estes módulos são relativamente difíceis de limpar, pois apresentam várias áreas "mortas" entre as fibras ocas. Nessas áreas o fluxo não é tão elevado. Por este motivo é extremamente necessário a execução de um pré-tratamento para obter uma água de alimentação de alta qualidade, não os submetendo a águas com alto teor de sólidos.

6.4. MÓDULO TUBULAR.

Segundo Spellman (2015) “os módulos tubulares são essencialmente uma versão maior e mais rígida das membranas de fibra oca”. Eles podem apresentar uma elevada resistência a incrustações se operados com um fluxo de alimentação turbulento. Esta maior resistência se dá porque estes módulos possuem canais de fluxo maiores do que os encontrados nos módulos de fibra oca e espiral (SPELLMAN, 2015).

Figura 23: Módulo tubular.



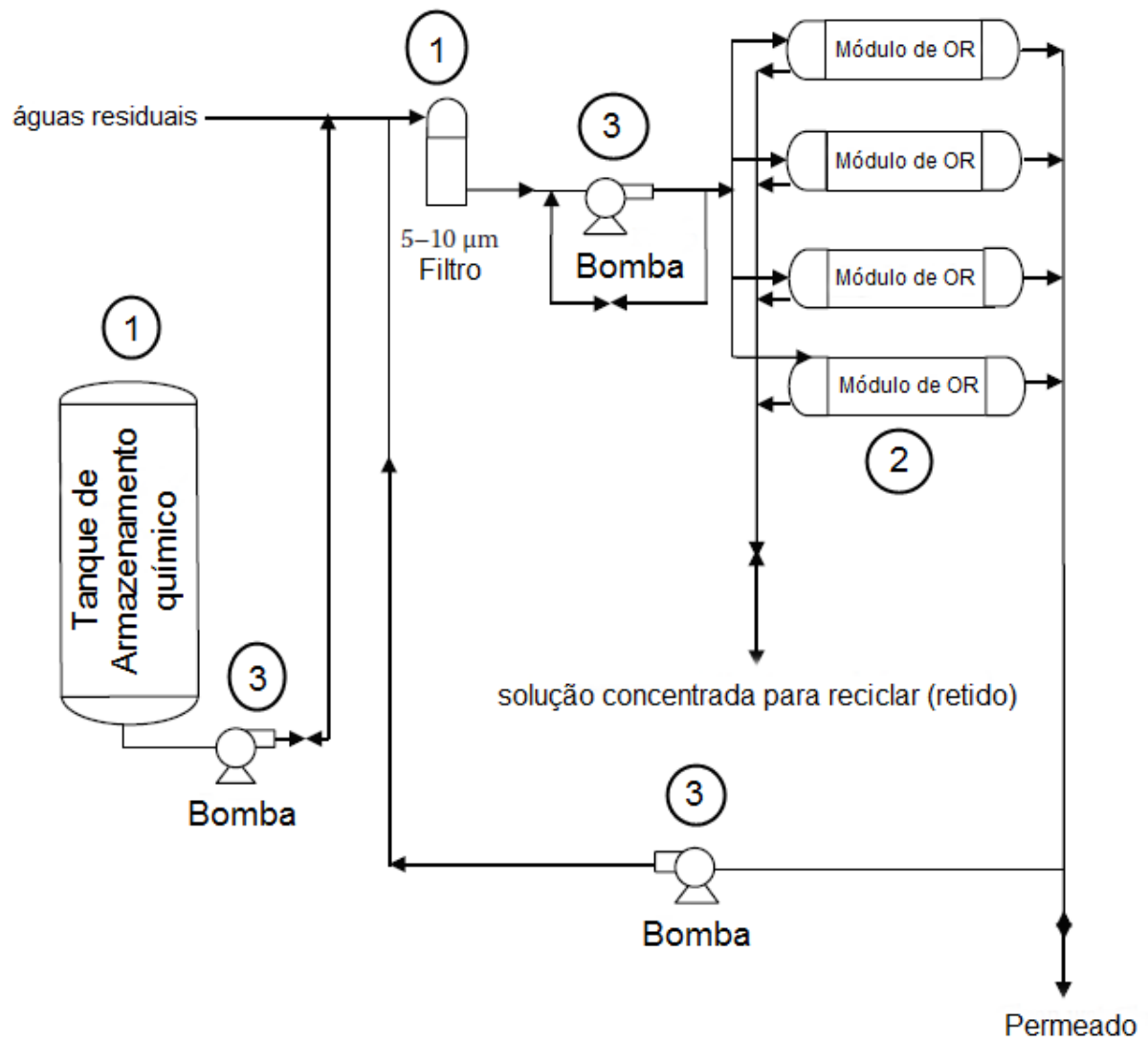
Fonte: Osmosis inversa (2018).

A filtração com este módulo funciona de maneira bastante simples. Nele a alimentação pressurizada faz com que a água escoe da parte interna do tubo (onde se encontram as membranas) até a parte externa onde é recolhido por dutos ou recipientes apropriados (FLUID SEPARATION, 1987).

Apesar de apresentarem uma alta capacidade de rejeição eles possuem algumas desvantagens, como: a necessidade de altas energias para bombear grandes volumes de água, isso causa um aumento considerável nos custos de operação (SPEELMAN, 2015). Eles são utilizados geralmente para aplicações onde há um alto teor de sólidos dissolvidos, tipicamente encontrado em indústrias alimentícias.

A Figura 24 ilustra um sistema típico de OR, que está dividido em subsistemas. Neste caso, tem-se o subsistema de pré-tratamento (1), onde optou-se pela utilização de um pré-tratamento misto, que consiste em realizar a lavagem química e em seguida submeter a água desinfetada previamente a algum processo de filtração. O sistema de filtração por OR é formado por quatro módulos em paralelo (2). Por fim, tem-se ainda o sistema de bombeamento, responsável por manter o fluxo de água constante (3). Esta configuração representa um sistema típico de filtração por OR. Dependendo de sua finalidade alguns sistemas podem conter ainda um subsistema de pós-tratamento (KUCERA, 2015).

Figura 24: Sistema típico de osmose reversa.



Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

7. PRÉ-TRATAMENTO.

Atualmente a tecnologia de filtração por membrana, particularmente a osmose reversa, corresponde à tecnologia de dessalinização mais utilizada no mundo (GRADY; YOUNOS, 2014). Elas podem ser aplicadas em diversas áreas industriais, além de ser a tecnologia mais utilizada para realizar a dessalinização da água do mar. Isto ocorre devido à sua elevada capacidade de filtração (algumas das principais aplicações serão discutidas no tópico 8).

O desempenho e a operação bem-sucedida desses sistemas dependem diretamente da qualidade da água que o alimenta (KUCERA, 2015). Diante disso, é extremamente importante realizar algum processo de pré-tratamento, ou seja, é necessário uma remoção prévia de parte dos sólidos, matéria orgânica e outros compostos que estão presentes na água de alimentação (LOPES, et al 2006). Estes constituintes influenciam diretamente no desempenho da membrana, podendo causar o surgimento de incrustações, a comatação ou até mesmo a degradação acelerada da membrana, reduzindo bastante sua vida útil. Os tipos de incrustação são categorizados como: inorgânicas (“fouling”) e orgânicas (“biofouling”).

O fenômeno denominado “fouling” ilustrado na Figura 25 consiste no depósito de sólidos suspensos, metais, sílica e coloides na superfície da membrana (KUCERA, 2015). Este fenômeno pode causar o aumento das pressões de operação, em virtude da maior resistência da água em atravessar a membrana devido à obstrução dos seus poros (LOPES, et al 2006).

Figura 25: Módulo degradado devido ao processo de Fouling.



Fonte: Lenntech (2018).

O acúmulo de metais, (tais como: o ferro, manganês e alumínio) é extremamente indesejado, pois pode acarretar inúmeros problemas ao desempenho da membrana haja vista que eles atuam como catalisadores, acelerando o processo de oxidação.

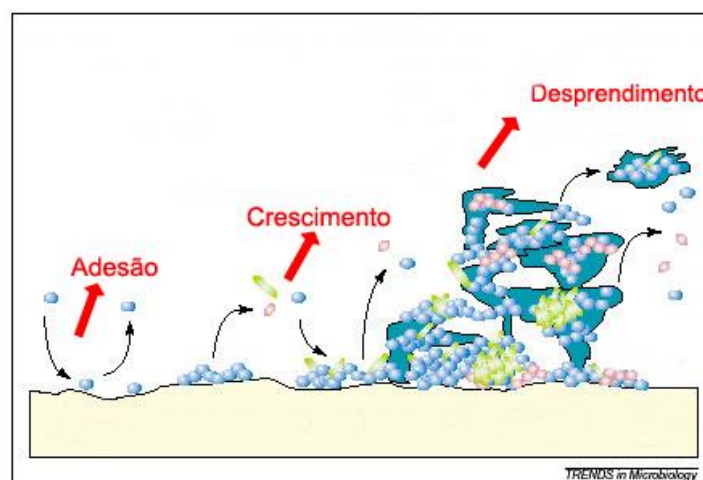
O problema mais preocupante na operação dos sistemas de osmose reversa é o fenômeno denominado “biofouling”, que consiste no acúmulo de microrganismos (bactérias, algas, fungos e vírus) na superfície da membrana. Este fenômeno é extremamente indesejado e preocupante, pois diferentemente do “fouling” decorrente de partículas inorgânicas, no “biofouling” as partículas acumuladas possuem a capacidade de se reproduzir de maneira exponencial (KUCERA, 2015).

Assim como citado por Lopes et al (2006) “A principal diferença entre os microrganismos e partículas não vivas, é a habilidade dos microrganismos de se reproduzir, e formar um biofilme na superfície da membrana.”.

Este acúmulo de microrganismos reduz rapidamente o desempenho das membranas, devido a formação de um biofilme, podendo causar o aumento da pressão diferencial no canal de alimentação e redução de fluxo de permeado.

Em casos extremos, acontece o entupimento completo do canal de alimentação devido a ocorrência de um biofilme. Este problema também pode acontecer do lado do permeado da membrana, pois estes contaminantes tem uma grande capacidade de aderência, ocasionando assim a contaminação da água tratada (LOPES, et al 2006). A Figura 26 ilustra o fenômeno de formação do biofouling.

Figura 26: Formação de biofouling.



Fonte: Adaptado de Lopes, et al (2006).

Outro fenômeno indesejado é o “scaling” que consiste no depósito de sais insolúveis na superfície da membrana. Este depósito pode causar a obstrução parcial dos poros e servir como superfície de suporte para facilitar a fixação do biofouling (FLUID SEPARATION, 1987).

Por fim, tendo em vista que uma unidade de osmose reversa está sujeita a constantes problemas de origem orgânico ou inorgânica, a realização de um pré-tratamento é essencial para minimizar tais problemas e a escolha de um pré-tratamento apropriado bem como uma manutenção adequada é preponderante para se obter eficiência e prolongar a vida útil da membrana (SPELLMAN, 2015).

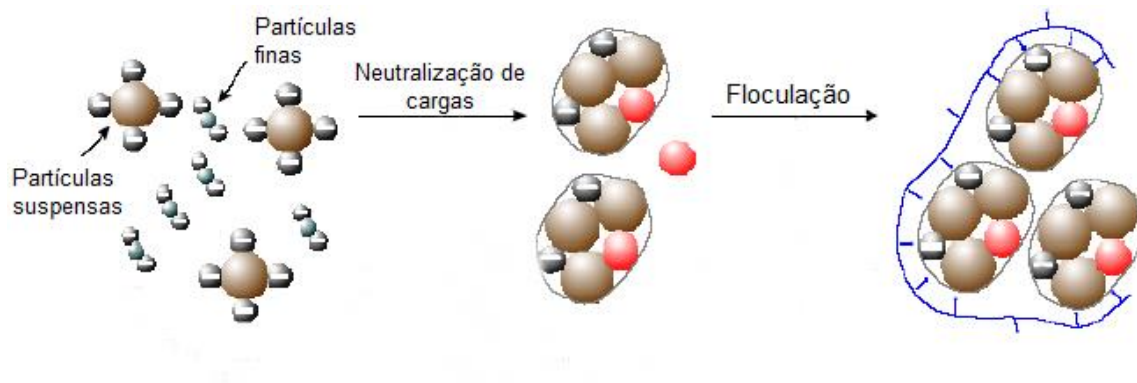
Segundo Spellman (2015) o pré-tratamento pode ser definido como “[...] qualquer processo físico, químico ou mecânico usado antes dos principais processos de tratamento de água.”. O tipo de pré-tratamento utilizado depende diretamente de sua finalidade específica.

7.1. PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO.

O pré-tratamento mecânico (ou convencional) envolve técnicas físicas para reduzir a turbidez ocasionada devido à grande quantidade de sólidos suspensos, partículas finas como silte e metais presentes na água de abastecimento do sistema de osmose reversa (KUCERA, 2015).

O pré-tratamento mecânico consiste na aplicação de um coagulante, que tem a função de neutralizar as suspensões coloidais, ou seja, eliminar as cargas eletrostáticas negativas presentes na superfície da partícula, com a finalidade de diminuir a repulsão entre elas. Em seguida ocorre o processo de floculação que consiste na formação de um aglomerado de partículas sólidas neutralizadas na coagulação, nessa etapa têm o surgimento dos “flocos”. Com isso, as partículas vão aumentando de peso e tamanho ocorrendo assim à sedimentação das partículas maiores (CACHEIRA, et al., 2012). O processo descrito está ilustrado na Figura 27.

Por fim as partículas são submetidas à passagem por filtros, que podem ser de diversos tipos e materiais. A Tabela 5 ilustra os principais tipos de pré-tratamento e as espécies a que se destinam.

Figura 27: Processos de coagulação e floculação.

Fonte: Adaptado de Cacheira, et al., (2012).

Tabela 5: Pré-tratamento mecânico.

Tipo de pré-tratamento mecânico	Espécies destinadas
Clarificação	Sólidos suspensos, Coloides, Matéria orgânica, Silte.
Filtração multimídia	Turbidez, Sólidos suspensos (entre 2 - 10 micros), Silte.
Filtração de alta eficiência	Sólidos suspensos (até 0,25 micros).
filtros de metal	Ferro, Manganês, Sulfato de Hidrogênio.
Radiação UV	Matéria orgânica e micróbios.

Fonte: Adaptado de Kucera (2015).

O método convencional possui algumas desvantagens, tais como a necessidade de áreas de instalação superiores à de sistemas mais modernos, altos custos de funcionamento e baixa eficiência para a remoção de microrganismos (KUCERA, 2015).

7.2. TRATAMENTO QUÍMICO (OU LAVAGEM QUÍMICA).

O pré-tratamento químico é direcionado para a remoção prévia de bactérias, em larga escala e agentes oxidantes. Este processo consiste na introdução de elementos químicos na corrente de alimentação, com a finalidade de eliminar os contaminantes biológicos. Os oxidantes químicos são os mais utilizados para desinfetar

os sistemas de osmose reversa. O cloro é o desinfetante mais utilizado em águas salobras devido sua facilidade de uso e sua eficiência para desinfecção residual (eliminar os micróbios). Para água do mar o uso do bromo é predominante (KUCERA, 2015).

A lavagem química permite a remoção de diversos componentes da água, tais como: matéria orgânica, bactérias e metais oxidáveis. Além de possibilitar o controle do fenômeno de “biofouling”, entretanto, essas substâncias químicas também são danosas aos sistemas de osmose reversa, pois agredem a camada polimérica das membranas. Por este motivo esses elementos devem ser removidos da corrente antes que cheguem ao sistema de filtração (LOPES, et al 2006).

8. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA OSMOSE REVERSA.

Atualmente os processos de tratamento de água por membrana possuem uma gama muita alta de aplicações, sendo a principal delas a dessalinização da água do mar (e de poços contendo águas salobras) para consumo. Estes processos também são muito utilizados nas indústrias, tendo em vista que a água serve como matéria-prima em quase todos os processos industriais e que após passarem por tais processos ela é contaminada e necessita ser tratada, para em seguida ser despejada de volta para a natureza, sem causar a degradação (DHAKAL, 2017). As principais áreas de aplicação das membranas serão abordadas em seguida.

8.1. INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.

Os processos de filtração por membranas (microfiltração, ultra filtração e osmose reversa) são bastante utilizados no tratamento de águas residuais de indústrias alimentícias, por exemplo: a do queijo, suco de frutas, cerveja e vinho. Pois durante os processos de fabricação, a água é contaminada com impurezas, tais como o soro de leite na produção de queijo, matéria orgânica na produção de suco e microrganismos (por exemplo, levedura) da indústria de cerveja e vinho (PURKAIT; SINGH, 2018).

As indústrias de alimentos e bebidas são grandes consumidoras de água, as indústrias das bebidas, em particular, apresentam um consumo muito elevado, cerca de 10 - 12 toneladas de água por tonelada de produto.

Tais impurezas são separadas dos produtos por meio de filtração. O permeado é assim um produto claro livre das impurezas. Assim, o problema do descarte das águas residuais é resolvido (PURKAIT; SINGH, 2018).

8.2. INDÚSTRIAS FARMACÊUTICA.

Os produtos farmacêuticos usam bactérias, vírus e outros microrganismos causadores de doenças para a produção e teste dos seus produtos. A descarga direta dos resíduos produzidos por estas indústrias pode afetar diretamente a fauna e a flora se as águas residuais não forem tratadas de forma eficaz antes de ser descarregada no meio ambiente (PURKAIT; SINGH, 2018).

Os processos de filtração por membrana tornam seguro descarregar os resíduos no ambiente devido à sua capacidade de reter partículas de níveis micro e nano. Assim, os processos de membrana desempenham um papel vital no bom funcionamento das indústrias farmacêuticas (PURKAIT; SINGH, 2018).

8.3. AGRICULTURA.

O setor agrícola, responsável pelo abastecimento mundial de alimentos (frutas, grãos, legumes, etc.) é sem sombra de dúvidas uma das atividades mais importantes para a sobrevivência do ser humano. Esta atividade também representa um dos setores mais importantes para a economia da maioria das regiões do planeta (JONES, et al. 2015).

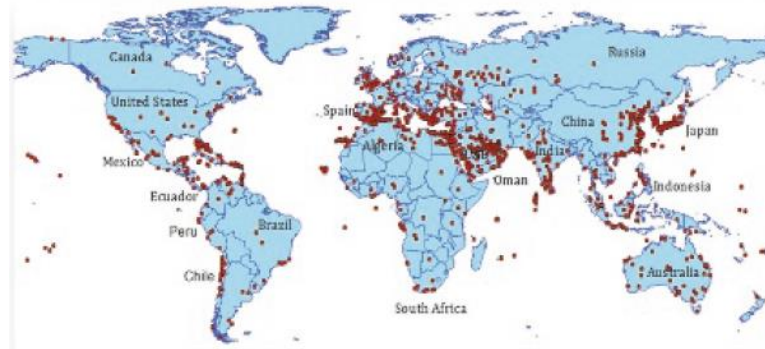
O setor agrícola é o que mais utiliza água no mundo, segundo a ONU o consumo chega a cerca de 70% do consumo total (no Brasil, representa 72%). Como resultado deste elevado consumo de água, surge a necessidade de obter novas fontes de abastecimento, para complementar esta enorme demanda. Por isto esse setor é o que apresenta o maior percentual de uso de água residual reciclada (JONES, et al. 2015).

É importante destacar que a utilização de águas residuais sem tratamento na irrigação pode causar sérios riscos, pois elas são provenientes do uso doméstico, ou seja, foram consumidas e devolvidas para a natureza sem nenhum tipo de tratamento (JONES, et al. 2015).

8.4. DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR PARA OBTENÇÃO DE ÁGUA ULTRAPURA PARA CONSUMO.

Atualmente a dessalinização da água do mar é vista como solução para suprir o abastecimento de água, e segundo a ONU será essencial num futuro não muito distante. Este processo está sendo cada vez mais aplicado para resolver os problemas de escassez de água em várias regiões do mundo. A osmose reversa (OR) é o processo mais utilizado para esta finalidade. Seu emprego global vem aumentando muito rapidamente desde o início dos anos 2000 (DHAKAL, 2017). A Figura 28 ilustra as usinas de dessalinização atualmente instaladas e planejadas para um futuro não muito distante (pontos vermelhos).

Figura 28 Estações de tratamento de osmose reversa.



Fonte: Dhakal (2017).

A Figura 28 mostra uma alta concentração de unidades de tratamento instaladas na Austrália, China, Europa central, Mediterrâneo e Japão. Pode-se observar ainda que a maioria das grandes usinas de dessalinização estão localizadas na região costeira, onde poderão colher diretamente a água do mar, sem necessidade de custos adicionais com transporte de água do mar até a usina (DHAKAL, 2017).

Dentre as grandes usinas de dessalinização de água do mar temos as instalações de Sydney e Gold Coast, ambas estão entre as maiores usinas de dessalinização da Austrália e fornecem água para os seus principais centros urbanos Sydney, Gold Coast e Brisbane (JONES, et al. 2015).

A usina de Sydney utiliza a osmose reversa para realizar a dessalinização da água do mar. Ela possui uma capacidade de abastecimento de cerca de 266.000 m³/dia, o que corresponde a cerca de 15% do consumo total de água da cidade. Entrou em operação em 2010 (JONES, et al. 2015).

Figura 29: Usina de SWRO de Sydney.



Fonte: Jones, et al. (2015).

Já a usina localizada na cidade de Gold Coast tem uma capacidade abastecimento de aproximadamente 133.000 m³/dia e está localizada em Tugun, na Gold Coast de Queensland. A usina tem a função de abastecer a Gold Coast, além de suplementar o fornecimento de água de Brisbane durante os períodos de seca (JONES, et al. 2015).

Figura 30: Usina de SWRO de Gold Coast.



Fonte: Jones (2015).

No Brasil, o maior sistema de dessalinização de água do mar fica localizado no arquipélago de Fernando de Noronha (RODRIGUES; BRENHA, 2014). O local é considerado como um dos mais belos pontos turísticos nacionais. Possui uma população de aproximadamente 4 mil habitantes e recebe cerca de 500 turistas/mês.

O período de funcionamento desse sistema varia entre 10 a 14 horas por dia e a sua grande limitação é a oscilação das marés, pois, só é capaz de operar quando a maré está alta. (TAVARES, 2015).

Para ser purificada a água é transportada por uma tubulação de PVC de 100 mm de diâmetro, por uma distância de 340m, onde então é armazenada em um tanque. Em seguida, a água de alimentação passa por um sistema de pré-tratamento convencional, um filtro de areia e filtro de cartucho, para então ser submetida ao processo de dessalinização por osmose reversa (TORRI, 2015).

Este sistema foi extremamente benéfico aos habitantes, pois antes eles obtinham água potável somente a cada dez dias e após sua implantação o rodizio diminuiu para 6 dias (RODRIGUES; BRENHA, 2014).

Atualmente a capacidade instalada é de aproximadamente 48 m³/h e já possui um projeto finalizado para expandir a capacidade de abastecimento para 72 m³/h, o

que seria suficiente para acabar com o rodízio de dias sem água, ao mesmo tempo o consumo de energia será reduzido (COMPESA, 2018). As Figuras 31 e 32 ilustram o sistema de tratamento de água de Fernando de Noronha.

Figura 31: Sistema de captura de água do mar em Fernando de Noronha.



Fonte: Adaptado de Torri (2015).

Figura 32: Equipamento de pré-tratamento e processo de dessalinização de Fernando de Noronha.



Fonte: Adaptado de Torri (2015).

8.5. ÁGUAS SALOBRAS

As águas subterrâneas são vistas como um importante recurso de abastecimento, estima-se a existência de cerca de 4000 poços no Brasil (TORRI, 2015). Apesar de ser um país que possui uma quantidade abundante de recursos hídricos, existem regiões que sofrem com problemas de escassez de água potável. As regiões Norte e Nordeste são as mais afetadas por este problema. Entretanto na região Nordeste por exemplo, segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) poderiam ser obtidos cerca de 19,5 bilhões de m³/ano, entretanto, a utilização desta água estará inviabilizado devido ao seu alto teor de sais (TORRI, 2015).

Diante deste cenário a implementação estações de tratamento água que utilizem a tecnologia de osmose reversa podem ser uma alternativa para expandir a capacidade de abastecimento da região (TORRI, 2015).

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A dessalinização por membranas, mais especificamente a osmose reversa, mostrou-se como uma tecnologia eficiente quando se deseja realizar a filtração de impurezas da água, podendo obter índices de filtração acima de 99%. Seu princípio de funcionamento é muito simples, o que é um fator diferencial comparado as outras tecnologias de dessalinização, possibilitando sua aplicação em inúmeros setores onde um tratamento mais intenso é requisitado.

Os custos elevados associados à sua operação, principalmente o que diz respeito ao consumo de energia ainda é visto como um fator limitante para o seu emprego em maior quantidade, mas os avanços tecnológicos e desenvolvimento de novas energias renováveis podem vir a ser uma forma de reduzir bastante os custos nas próximas décadas.

Em relação a viabilidade econômica das membranas, uma redução de custos considerável pode ser alcançada com o desenvolvimento de membranas de alta permeabilidade. Estes altos índices de permeabilidade podem reduzir bastante as pressões de operação e como consequência reduzir os custos relacionados ao consumo de energia. Tais resultados podem ser alcançados através da tecnologia de membranas nano compósitas. Essas novas membranas já estão sendo desenvolvidas e nos seus primeiros testes em laboratórios apresentaram uma performance superior as já existentes e estão começando a ser utilizadas como teste.

Por fim, a tecnologia de osmose reversa já é de grande importância para as indústrias e também para suprir o abastecimento de água atualmente, mas a tendência é que daqui a algumas décadas, com o problema da escassez de água se agravando cada vez mais, o emprego dessa tecnologia seja de extremamente necessária.

10. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro, as seguintes ações são recomendadas:

- Realizar Estudos sobre materiais alternativos para fabricação de membranas, tais como o grafeno;
- Estudar a viabilidade do reaproveitamento de materiais para baratear a fabricação das membranas, tais como o bagaço da cana-de-açúcar;
- Verificar a viabilidade de implantação de um sistema de OR para dessalinização de águas salobras dos poços da cidade de Caraúbas;
- Desenvolver projetos de pesquisa para fortalecer e ampliar a capacidade de ensaios e medidas, o conhecimento físico-químico dos sistemas, bem como o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias de membranas semipermeáveis;
- Estudar meios para reduzir os fatores limitantes de rendimento das membranas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRYNE, W., **Reverse osmosis: a practical guide for industrial users**. Tall Oaks publishing Inc., 1995.

CACHEIRA, C. S.; COSTA, M. A. P.; FARIA, J. P. N.; SANTOS, J. P. S.; SILVA, M. F. C. R. P.; VARANDAS, M. M. **processo de coagulação-floculação**. 2012. 20f. Mestrado – Faculdade de engenharia: Universidade do porto. 2012.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 05. Ed. John Wiley & Sons, 2002.

CERON, L. P., **Novo têxtil de poliamida aromática KD**. Revista meio filtrante, 2010. Disponível em: <
<http://www.meiofiltrante.com.br/edicoes.asp?id=619&link=ultima&fase=C>>. Acesso em: 17 de agosto de 2018.

COMPESA. **Modernização dos dessalinizadores vai ampliar abastecimento de água em Fernando de Noronha**. Disponível em: <
<https://servicos.compesa.com.br/modernizacao-dos-dessalinizadores-vai-ampliar-abastecimento-de-agua-em-fernando-de-noronha/>> . Acesso em: 24 de agosto de 2018.

DHAKAL, N., **Controlling biofouling in seawater reverse osmosis membrane systems**. Taylor and Francis group, 2017.

FARIAS, P. A. M., **Nylon**. Disponível em: [http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Nylon/pdf LT/LT nylon.pdf](http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Nylon/pdf_LT/LT_nylon.pdf). Acesso em: 20 de setembro de 2018.

FLUID SEPARATION, **Conceitos básicos sobre osmose reversa**. 1987. p. 19.

GRADY, C. A.; YOUNOS, T. **Potable water: Emerging global problems and solutions**. Springer Netherlands, 2014.

HERMES, M. E., **Enough for One Lifetime: Wallace Carothers, the Inventor of Nylon**, Chemical Heritage Foundation, 1996.

HO, W.; SIRKAR, K.; **Membrane Handbook**, Springer, New York, 1992, reimpressão, Netherlands Kluwer Academic Publishers, 2001.

ISMAIL, A. F.; MATSUURA T., **Progress in transport theory and characterization method of Reverse Osmosis (RO) membrane in past fifty years**. Ottawa, V. 434, pp. 2-11, 2018.

JONES, B.; MALIVA, R. G.; MISSIMER, T. M., **Intakes and outfalls for seawater reverse-osmosis desalination facilities: innovations and enviromental impacts**. Springer Netherlands, 2015.

KUCERA, J., **Reverse Osmosis: Industrial process and applications**, 02. ed. John Wiley & Sons, 2015.

LENNTECH. **Membranas tubulares: Tecnologia membranar**. Disponível em: <https://www.lenntech.com.pt/ultrafiltracao/membranas_tubulares.htm>. Acesso em: 17 de agosto de 2018.

LOPES, M. A. S.; ORISTANIO, B.S.; PEIG, D. B.; **Desenvolvimento de um sistema de pré tratamento para osmose reversa**. 115f. Projeto de formatura – Escola politécnica da universidade de São Paulo. 2006.

MEIRELES, C. S. **Síntese e caracterização de membranas de acetato de celulose, obtido através do bagaço da cana-de-açúcar, e blendas de acetato de celulose com poliestireno de copos plásticos descartados**. 2007. 65f. Dissertação de mestrado – Universidade federal de Uberlândia. Uberlândia. 2007.

MULDER, J., **Basic principles of membrane tchnology**. Springer Netherlands, 1996.

OSMOSIS INVERSA, **Tipos de membranas de osmosis inversa**. Disponível em: <<https://www.osmosisinversafiltroagua.com/tipos-de-membranas/>>. Acesso em: 20 de setembro de 2018.

PURKAIT, M. K.; SINGH R., **Membrane technology in separation Science**. Taylor and Francis group, 2018.

RINCON – Paul - **Cientistas desenvolvem 'peneira' de grafeno que transforma água do mar em potável**. 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-39483587>>. Acesso em: 13 de junho de 2018.

RODRIGUES, A; BRENHA, H. **Dessalinização atenuou racionamento em Fernando de Noronha**. Folha de São Paulo, São Paulo, 07 set. 2014. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/09/1512291-dessalinizacao-atenuou-acionamento-em-arquipelago.shtml>>. Acesso em: 24 de agosto de 2018.

SILVA, J. B. A., **Estudo do rejuvenescimento de membranas de poliamida de osmose reversa em ácido tânico**. 2001. 135f. Dissertação de mestrado – Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

SOUZA, M. S., **Estudo físico-químico do concentrado proveniente do processo de osmose reversa no tratamento de água para uso industrial**. 2014. 122f. Dissertação de mestrado – Universidade federal do Paraná. Curitiba. 2014.

SPELLMAN, F. R. **Reverse Osmosis: A guide for the nonengineering professional**. Taylor and Francis group, 2015.

TAVARES, R. **Desalination Experience in Fernando de Noronha Archipelago, In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT**, Rio de Janeiro. 2015.

TORRI, J. B., **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações. 2015.** 43f. Trabalho de diplomação em engenharia química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.