



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Avaliação do pré-tratamento eletromagnético para o processo de osmose inversa

Autor: Débora Hansen Lauxen

Orientador: Isabel Cristina Tessaro

Porto Alegre, julho de 14

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Membranas	2
2.2 Osmose Inversa	3
2.3 Polarização por concentração e as incrustações	4
2.3.1 Incrustação por deposição	5
2.3.2 Incrustação por precipitação	5
2.3.3 Bioincrustação	5
2.4 Pré-tratamento	6
2.4.1 Dosagem de produtos químicos	6
2.4.2 Filtros de areia	7
2.4.3 Filtros de cartucho	7
2.4.4 Microfiltração e ultrafiltração	7
2.4.5 Eletromagnetismo	8
2.5 Mecanismo de ação das forças eletromagnéticas	10
2.6 Limpeza química	10
3 Estudo de Caso	12
3.1 Pré-tratamento para o sistema de osmose inversa	12
3.1.1 Características da água bruta	13
3.1.2 Estação de tratamento de água (ETA)	13
3.1.3 Sistema de microfiltração	14
3.1.4 Sistema de osmose inversa	16
3.1.5 Limpeza química	19
3.1.6 Equipamento eletromagnético	19
4 Metodologia	21
4.1.1 Coleta de dados	21
4.1.2 Análises químicas	21
4.1.3 Limpeza química	22
5 Resultados	23
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	28
7 Referências	29

Agradecimentos

À minha família, que sempre me incentivou e apoiou durante toda a graduação.

Ao meu amor, Marcelo Lauxen, pelo companheirismo, amizade e, principalmente, pelo incentivo à nunca desistir.

Aos ensinamentos dos professores do Departamento de Engenharia Química da UFRGS, especialmente à minha orientadora Isabel Cristina Tessaro, pelos ensinamentos durante o trabalho de conclusão.

À Refinaria Alberto Pasqualini e à Petrobras. A todo o setor de Utilidades no nome do gerente Leandro de Ávila. Ao engenheiro Irasu Schmitz, pelo exemplo de profissional, ensinamentos, compreensão e confiança. Aos colegas da ETA, Daniel Magalhães, Karina Koch, Joseane da Silva e Marcelo Gauto, pela amizade e apoio.

Resumo

Unidades de osmose inversa têm como um dos principais problemas a formação de depósitos sobre as membranas. A fim de que eles possam ser evitados, é necessário um pré-tratamento eficiente. Foi avaliada a eficiência do uso de um equipamento eletromagnético como pré-tratamento de uma osmose inversa (de proporção industrial), com o objetivo de reduzir a incrustação por depósito de sais inorgânicos, principalmente, os compostos de cálcio. Os resultados foram avaliados em termos de alteração de pressão de alimentação para manter uma vazão constante, do diferencial de pressão nos estágios da osmose inversa, da rejeição salina, da quantidade de cálcio em todas as correntes de entrada e saída. Foi avaliada também a mudança da formação cristalina dos sais presentes em águas que passaram e que não passaram pelo campo eletromagnético. Foi verificada uma alteração da formação cristalina dos sais presentes na água, porém os outros parâmetros avaliados tiveram comportamento similar aos valores do pré-tratamento sem o uso do campo eletromagnético.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Faixas de diâmetro de vários processos de filtração.	2
Figura 2.2: Representação esquemática do processo de osmose, do equilíbrio osmótico e do processo de osmose inversa.....	3
Figura 2.3: Representação esquemática do fenômeno de polarização por concentração. .	5
Figura 2.4: Micrografia dos cristais de cálcio depositados na superfície da membrana sem o uso de equipamento eletromagnético.	8
Figura 2.5: Micrografia dos cristais de cálcio depositados na superfície da membrana com o uso de equipamento eletromagnético.	9
Figura 3.1: Fluxograma simplificado do tratamento da água.	12
Figura 3.2: Fotografia dos módulos fibras ocas de membranas de microfiltração.....	15
Figura 3.3: Esquema do funcionamento do módulo de microfiltração.	15
Figura 3.4: Osmose inversa da empresa analisada.	17
Figura 3.5: Configuração do sistema de osmose inversa.....	18
Figura 3.6: Configuração do sistema de osmose inversa com o equipamento eletromagnético instalado na entrada do 1º passe do quarto conjunto de membranas...	19
Figura 3.7: Fotografia do equipamento eletromagnético instalado na planta industrial. .	20
Figura 5.1: Diferencial de pressão do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.	23
Figura 5.2: Pressão de alimentação do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.	24
Figura 5.3: Rejeição salina do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.	24
Figura 5.4: Micrografia dos cristais da corrente de alimentação da osmose inversa, detalhando o formato prisma cúbico.	26
Figura 5.5: Micrografia dos cristais no rejeito do 1º estágio do 1º passe da osmose inversa com tratamento eletromagnético, detalhando o formato acicular.....	26
Figura 5.6: Micrografia dos cristais no rejeito do 1º estágio do 1º passe da osmose inversa sem tratamento eletromagnético, detalhando o formato prisma cúbico.	27

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Propriedades físicas da calcita e da aragonita	9
Tabela 3.1: Principais características analisadas na água bruta	13
Tabela 3.2: Características das membranas de microfiltração	14
Tabela 3.3: Características da corrente de água de entrada da unidade de microfiltração.	16
Tabela 3.4: Características da corrente de água de entrada da unidade de osmose inversa.	18
Tabela 5.1: Resultados de cálcio	25

1 Introdução

Os processos de separação usando membranas são tecnologias recentes e que vêm encontrando cada vez mais espaço na pesquisa e em aplicações em nível industrial. O processo de osmose inversa (OI) está sendo aplicado em diversas áreas, sendo a mais expressiva a dessalinização de águas.

O principal problema durante a operação de uma planta de osmose inversa é a formação de incrustações. Este efeito provoca a redução da seletividade das membranas e o aumento da pressão de alimentação para uma produção constante de água desmineralizada. A maneira mais adequada para a prevenção dos depósitos é o pré-tratamento da alimentação do sistema de OI.

O uso de produtos químicos para remoção de sais inorgânicos, como os antincrustantes, altera a composição da água, o que não ocorre nos métodos físicos. Particularmente, o eletromagnetismo tem as vantagens de ter um custo baixo, uma operação simples e não apresentar nenhum risco de dano para o meio ambiente.

Baseado no progresso do tratamento eletromagnético da água e na urgência em resolver problemas de incrustação, alguns pesquisadores introduziram o campo eletromagnético nos processos de separação por membrana como uma estratégia para prevenir e eliminar a formação de incrustação na superfície das membranas.

No presente trabalho será avaliada a eficiência do uso de um campo eletromagnético como pré-tratamento de um sistema de osmose inversa, com o objetivo de reduzir a formação de incrustação por depósito de sais inorgânicos na superfície das membranas. Desta forma, deseja-se melhorar a eficiência da osmose inversa e reduzir os custos operacionais, pois a incrustação aumenta a demanda de energia (pelo aumento da pressão de operação), diminui o intervalo entre limpezas químicas e reduz o tempo de vida útil das membranas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Membranas

A seleção da membrana e o pré-tratamento são fatores importantes no projeto do sistema de osmose inversa. Uma membrana ideal apresenta altos fluxos de permeado e alta retenção de sais, é tolerante a oxidantes como o cloro, é resistente ao ataque biológico e depósitos de materiais coloidais e em suspensão, apresenta elevada resistência mecânica, estabilidade química e térmica e baixo custo de aquisição.

As membranas podem ser classificadas em densas e porosas. A membrana é considerada densa quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que constitui a membrana. A capacidade seletiva depende da afinidade das diferentes espécies presentes no fluido com o material da membrana e da difusão das mesmas através do filme polimérico, como é o caso da osmose inversa. Já na membrana porosa o transporte através da mesma ocorre devido às diferenças de tamanhos entre as substâncias e os poros da membrana, como ocorre na microfiltração e ultrafiltração.

Membranas de osmose inversa são densas e são comumente disponíveis em módulos em espiral onde as folhas de membrana são enroladas em torno de um tubo através do qual é recolhido o permeado. A membrana de osmose inversa rejeita contaminantes menores, íons monovalentes, enquanto membranas de ultrafiltração, microfiltração e nanofiltração são projetadas para remover materiais de tamanhos maiores, como indicado da Figura 2.1 (Greenlee, 2009).

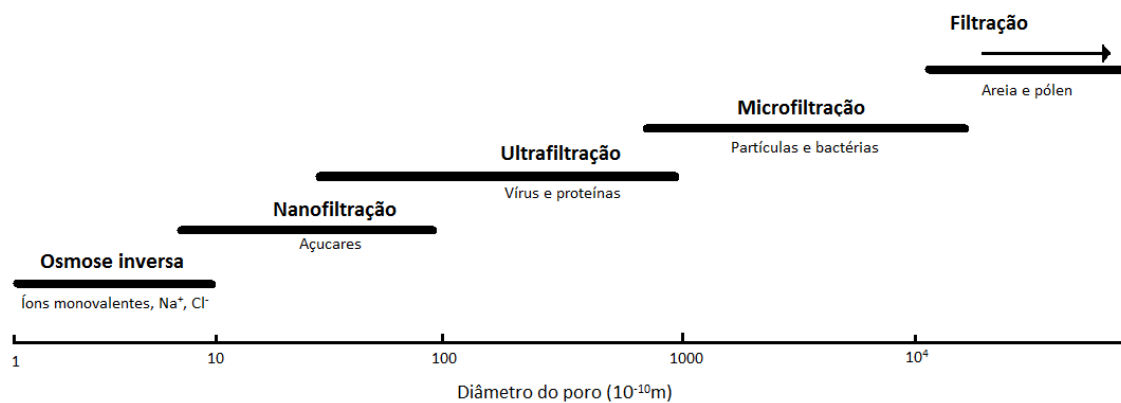


Figura 2.1: Faixas de diâmetro de vários processos de filtração.

Fonte: Adaptado de Greenlee, 2009.

Segundo Mulder (1996), vários são os materiais utilizados na fabricação de membranas, tais como: metais, cerâmicas, filmes homogêneos de polímero ou metal, sólidos heterogêneos como a mistura de polímeros, vidros e estruturas assimétricas,. As membranas cerâmicas são de grande importância, pois resistem a altas temperaturas. As membranas poliméricas dominam o comércio por estarem sempre evoluindo e por serem bastante competitivas e econômicas.

Byrne (1995) menciona que para aplicações de purificação de águas, as membranas mais utilizadas são as de polímeros de acetato de celulose ou poliamida.

As membranas de acetato de celulose possuem alta estabilidade química e resistência a baixos níveis de cloro, mas estão sujeitas ao ataque biológico e não possuem boa retenção salina. As membranas de poliamida possuem excelente estabilidade química, são resistentes ao ataque biológico e tem elevada retenção salina, entretanto são suscetíveis ao ataque do cloro (Brandt et al., 1992).

2.2 Osmose Inversa

A nomenclatura osmose inversa é utilizada, pois promove exatamente o inverso do processo natural de osmose. Quando uma solução é separada de seu solvente por uma membrana seletiva, ocorre naturalmente um processo osmótico no qual o solvente migra através da membrana em direção à solução a fim de que os potenciais químicos de ambos os líquidos se igualem atingindo um estado de equilíbrio. A diferença de pressão hidráulica atingida neste momento equivale à diferença de concentração inicial e a pressão osmótica. No momento em que é aplicada, na solução em equilíbrio, uma pressão maior do que a pressão osmótica, o solvente retorna através da membrana concentrando a solução a qual está deixando, exatamente o processo inverso ao da osmose. Desta forma, torna-se possível a obtenção de um solvente a partir de uma solução quando nela for aplicada uma pressão superior à pressão osmótica em um sistema de osmose inversa. A representação esquemática dos processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose inversa estão apresentados na Figura 2.2.

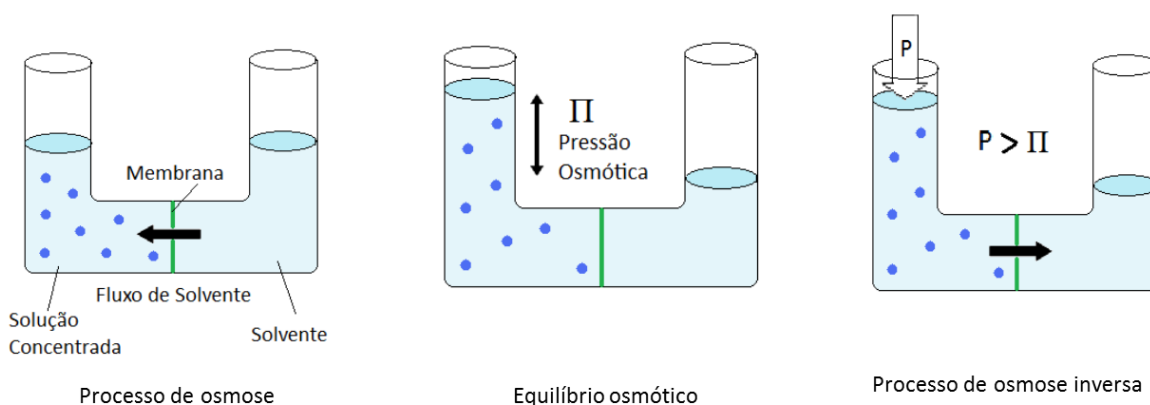


Figura 2.2: Representação esquemática do processo de osmose, do equilíbrio osmótico e do processo de osmose inversa.

Fonte: Adaptado de Martins, 2012.

Atualmente, a osmose inversa é amplamente utilizada nos processos de desmineralização, dessalinização, tratamento de efluentes e reuso de águas. Esta técnica apresentou um grande desenvolvimento nas últimas décadas e passou a ser competitiva com outros processos de separação, pois houve aumento do desempenho das membranas, diminuição nos preços, e conseqüentemente, o aumento de projetos envolvendo a osmose inversa (Byrne, 1995).

A Osmose inversa é avaliada em termos da permeabilidade, da seletividade e da recuperação (Mulder, 1996). A permeabilidade hidráulica relaciona-se com o fluxo de permeado segundo a equação:

$$J = L_p(\Delta P - \Delta\pi) \quad (2.1)$$

onde, J é o fluxo de permeado, L_p é a permeabilidade hidráulica, ΔP e $\Delta\pi$ são, respectivamente, as diferenças de pressão hidráulica e de pressão osmótica entre os dois lados da membrana.

A seletividade é quantificada pela rejeição salina através da seguinte equação:

$$R(\%) = \frac{(C_a - C_p)}{C_a} * 100 \quad (2.2)$$

onde C_a e C_p são a concentração na alimentação e no permeado, respectivamente.

Valores de rejeição próximos a 100% indicam que a membrana tem menor afinidade com os solutos de forma que o permeado obtido é mais puro. Para membranas de osmose inversa usadas na dessalinização de água o valor de R típico é 99,9% (Martins, 2012).

Por fim, a razão entre a vazão de permeado e a de alimentação é definida como recuperação:

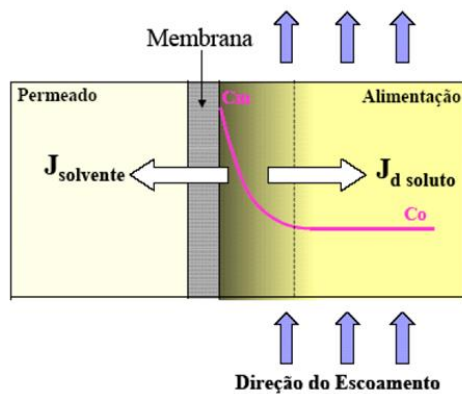
$$\text{Recuperação } (\%) = \frac{Q_p}{Q_a} * 100 \quad (2.3)$$

onde Q_p e Q_a são as vazões de permeado e de alimentação, respectivamente.

2.3 Polarização por concentração e as incrustações

Várias condições de operação como pH, temperatura, pressão, taxa de permeado, presença de sais e metais ionizados e a polarização por concentração podem influenciar a formação da incrustação na membrana (Antony et al., 2011).

Processos que utilizam a pressão como força motriz, como a osmose inversa, são suscetíveis ao fenômeno conhecido como polarização por concentração. Toda vez que os componentes de uma solução permeiam seletivamente através de uma membrana, ocorre um aumento de concentração do soluto com menor permeabilidade na interface membrana/solução. O arraste por convecção dos solutos em direção à superfície da membrana é igual ao fluxo difusivo destes para o seio da solução. Entre as principais consequências do aumento de concentração dos solutos próximo à superfície da membrana está o aumento da pressão osmótica da solução nesta região, o que diminui a força motriz e o fluxo do solvente. A maior concentração de soluto também favorece seu transporte através da membrana, contribuindo para redução da seletividade do processo. Este fenômeno é ilustrado esquematicamente na Figura 2.3 (Vargas *apud* Oliveira, 2007).



J_{solvente} e $J_{\text{d soluto}}$ são, respectivamente, fluxos do solvente e do soluto.

C_m e C_o são, respectivamente, a concentração junto à membrana e concentração inicial da alimentação

Figura 2.3: Representação esquemática do fenômeno de polarização por concentração.

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2007.

Os principais problemas operacionais dos processos de separação por membranas são causados por vários tipos de incrustações, que incluem: incrustações por deposição, incrustações por precipitação e bioincrustação. A formação das incrustações aumenta os custos operacionais, pois gera uma maior demanda de energia (pelo aumento da pressão de operação), diminui os intervalos entre as limpezas químicas e reduz significativamente o tempo de vida útil das membranas (Seidel e Elimelech *apud* Oliveira, 2007).

2.3.1 Incrustação por deposição

A deposição de sólidos suspensos tais como, coloides, orgânicos, produtos de corrosão, hidróxido de ferro, algas e materiais particulados finos, pode ocorrer gradativamente na superfície da membrana. Alguns tipos de depósitos são extremamente difíceis de remover, podendo levar a incrustações irreversíveis, conduzindo à perda do desempenho do sistema de osmose inversa pela diminuição do fluxo e da rejeição (Habert et al. *apud* Oliveira, 2007).

2.3.2 Incrustação por precipitação

A incrustação por precipitação decorre da precipitação de compostos solúveis presentes na alimentação, quando estes atingem o limite de solubilidade. Como o permeado consiste de água com baixa concentração de sal, a concentração de íons na alimentação aumenta. Devido à polarização de concentração, este efeito se intensifica próximo à superfície da membrana, podendo atingir o limite de solubilidade dos sais e ocorrer a sua precipitação. Os sais mais comuns de precipitar, em ordem de importância são: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, complexos de sílica, sulfato de bário, sulfato de estrôncio e fosfato de cálcio (Vrouwenvelder et al. *apud* Oliveira, 2007).

2.3.3 Bioincrustação

Segundo Baker e Dudley (1999), as bioincrustações ocorrem devido ao acúmulo de material orgânico na superfície da membrana, incluindo fragmentos celulares, substâncias poliméricas extracelulares e microrganismos, que resulta na formação de biofilmes.

No caso dos processos de osmose inversa e nanofiltração a formação de biofilme aumenta a resistência ao transporte, reduzindo o fluxo permeado ou levando a necessidade de maior consumo de energia pelo aumento da pressão de operação.

2.4 Pré-tratamento

Os sistemas de pré-tratamento para osmose inversa podem ser relativamente simples ou complexos, dependendo diretamente da qualidade física, química e microbiológica da água que é captada. Quanto menor a qualidade da água, maior será a necessidade ou mais intensivo será o pré-tratamento (Elguera e Báez, 2005). Do mesmo modo, a qualidade da água que se deseja obter como produto deverá influenciar na escolha do sistema mais apropriado, pois para uma mesma recuperação, quanto melhores as características da água de alimentação, melhor a qualidade do produto final.

Um sistema de pré-tratamento deve controlar o fluxo de cada poluente presente na água e deve ser desenvolvido face à pior qualidade de água que poderia ser encontrada, provendo constantemente uma alimentação de boa qualidade ao sistema de OI (Bonnélye et al., 2003).

Todo sistema de osmose inversa possui algum nível de pré-tratamento da água a fim de aumentar o tempo de vida útil das membranas, prevenir a formação de incrustação nas membranas e manter o desempenho em relação à recuperação e retenção do sistema.

Os sistemas de pré-tratamento mais utilizados e suas principais características estão citados a seguir.

2.4.1 Dosagem de produtos químicos

A dosagem de produtos está diretamente associada à qualidade da água captada. Diversos autores citam a razão para a adição dos produtos químicos conforme listado a seguir:

- hipoclorito de sódio (NaClO): utilizado para controlar a atividade biológica e, conseqüentemente, o processo de formação de bioincrustação nas membranas. Também podem ser utilizados outros biocidas oxidantes, como o Cl_2 , ClO_2 , O_3 , etc. (Choo et al., 2005 e Hafsi et al., 2004);
- ácido sulfúrico (H_2SO_4): aumenta o poder de ação do biocida NaClO , regula o pH da água do processo e ajuda na ação dos inibidores de incrustação (Elguera e Báez, 2005 e Hafsi et al., 2004);
- coagulantes / floculantes (Cl_3Fe , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e outros tipos de polieletrólitos: a adição desses sais resulta na formação de seus correspondentes hidróxidos que por sua vez, neutralizam as cargas das partículas coloidais agregando-as e permitindo a deposição e clarificação da água. Assim, controlam o processo de incrustação nas membranas retirando os materiais particulados da água de alimentação da osmose inversa (Elguera e Báez, 2005 e Bonnélye et al., 2008);
- antincrustantes: inibem a incrustação do ferro e sais de sulfatos sobre a superfície da membrana (Hafsi et al., 2004);
- metabissulfito ou bissulfito de sódio (NaHSO_3): agente redutor capaz de neutralizar completamente o cloro residual ativo (processo de descloração) que poderia prejudicar sistemas com membranas de poliamida (Elguera e Báez, 2005 e Hafsi et al., 2004).

2.4.2 Filtros de areia

Os filtros de areia são frequentemente usados para a remoção de sólidos suspensos da água com partículas a partir de 40-50 μm . O sistema de filtração consiste em múltiplas camadas de areia ou outro material com uma variedade de tamanhos de grãos. Quando a água flui através do filtro, os sólidos suspensos precipitam sobre as camadas do material possibilitando a água sair do filtro com o conteúdo de sólidos reduzido.

2.4.3 Filtros de cartucho

Os filtros de cartucho são universalmente utilizados nos sistemas de osmose inversa, servindo como uma barreira final às partículas remanescentes na água após todo o pré-tratamento. O diâmetro nominal geralmente usado nas aplicações de osmose inversa fica na faixa de 5 a 15 μm , mas alguns sistemas contam com diâmetros de até 0,1 μm . A frequência de troca dos filtros está diretamente associada à qualidade da água bruta, assim como ao desempenho do pré-tratamento anterior (Wolf et al., 2005).

Os filtros de areia, a dosagem de produtos químicos e os filtros cartucho citados compõem o que chamamos de pré-tratamento convencional. Esse sistema descrito pode produzir uma água de alimentação de osmose inversa de qualidade aceitável, desde que seja conduzido corretamente e a água bruta captada tenha qualidade relativamente boa e constante. Contudo, na maioria das vezes, as flutuações na qualidade da água dificultam o seu pré-tratamento e o sistema convencional deixa de ser eficiente.

2.4.4 Microfiltração e ultrafiltração

A microfiltração e a ultrafiltração são processos que têm ganhado popularidade no pré-tratamento da água de alimentação dos sistemas de osmose inversa. São chamados de sistemas de clarificação da água e são bastante conhecidos na produção de água potável.

A microfiltração é a técnica que mais se aproxima da filtração convencional e utiliza membranas porosas com poros de 0,1 a 10 μm , sendo, portanto indicada para retenção de materiais em suspensão e emulsões. A pressão aplicada como força motriz é baixa, geralmente em torno de 3 bar.

A ultrafiltração é geralmente utilizada quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas possuem poros de 1 a 100 nm e, portanto a força motriz a ser aplicada é maior, podendo chegar a 10 bar.

Segundo Wolf et al. (2005) as membranas de ultrafiltração são capazes de prover uma barreira aos particulados e patogênicos protegendo a membrana de osmose inversa pela remoção física dos sólidos. Isso assegura uma consistente e excelente qualidade da água de alimentação para o sistema de osmose inversa mesmo quando o valor de turbidez da água bruta for elevado.

Para Bonnélye et al. (2008), a ultrafiltração e a microfiltração são teoricamente as melhores técnicas de pré-tratamento para a osmose inversa, removendo da água a maior parte dos elementos potenciais causadores de incrustação sobre as membranas, porém as tecnologias têm limitações. Se forem utilizadas no tratamento de uma água com qualidade muito ruim, sem nenhum outro tipo de pré-tratamento, a frequência de

limpezas químicas aumenta consideravelmente, pois se estaria movendo o problema da incrustação da osmose inversa para o pré-tratamento.

2.4.5 Eletromagnetismo

Baseado no progresso no tratamento eletromagnético da água e na urgência em resolver problemas de incrustação, alguns pesquisadores introduziram o campo magnético nos processos de separação por membrana como uma estratégia para prevenir e eliminar a formação de incrustação na superfície das membranas.

Segundo Gabrielli et al. (2001), no começo do século passado vários tratamentos físicos e químicos foram propostos para reduzir a incrustação. O uso de antincrustantes altera a composição da água, o que não ocorre nos métodos físicos. Particularmente, o eletromagnetismo tem as vantagens de ter um custo baixo, uma operação simples e não apresentar nenhum risco de dano para o meio-ambiente. Em estudo realizado pelo autor foi verificado que a força do campo magnético, a composição e a velocidade da água têm importância na formação da incrustação.

Vedavyasan (2001) realizou um estudo da vantagem econômica do uso de equipamento eletromagnético numa planta com pré-tratamento convencional para osmose inversa. A conclusão do estudo foi de redução de 20% da queda de pressão através da membrana da osmose inversa com o uso do equipamento eletromagnético e redução de 8% do custo total de produção de água do sistema em estudo.

No experimento realizado por Li et al. (2007) foram utilizadas soluções com concentrações conhecidas de carbonato de cálcio (CaCO_3) para alimentar um sistema de nanofiltração. Foi avaliado o fluxo normalizado, medidas ultrasônicas em tempo real para avaliar incrustação formada e micrografias das membranas, com e sem o uso de equipamento eletromagnético. No experimento foi concluído que o tratamento eletromagnético melhora o desempenho das membranas de nanofiltração.

As micrografias obtidas por Li et al. (2007) do processo de OI sem e com o uso do equipamento eletromagnético são mostradas nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente. Na Figura 2.4 pode ser visto uma formação generalizada de prismas cúbicos, estrutura típica de calcita. Já na Figura 2.5 ocorre um aumento da formação de vaterita e aragonita, sugerindo assim, que o equipamento eletromagnético aumenta a formação desses cristais. Essa mudança de estrutura altera a camada de incrustação sobre a membrana, deixando-a menos compacta, o que facilita sua remoção.

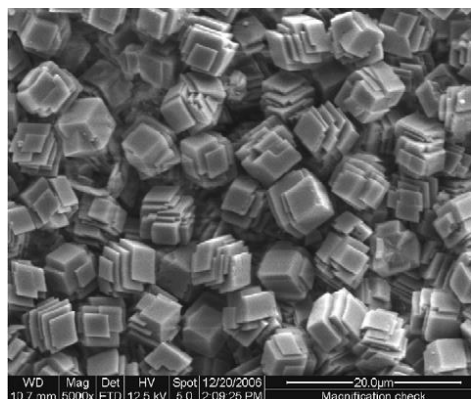


Figura 2.4: Micrografia dos cristais de cálcio depositados na superfície da membrana sem o uso de equipamento eletromagnético.

Fonte: Li et al., 2007

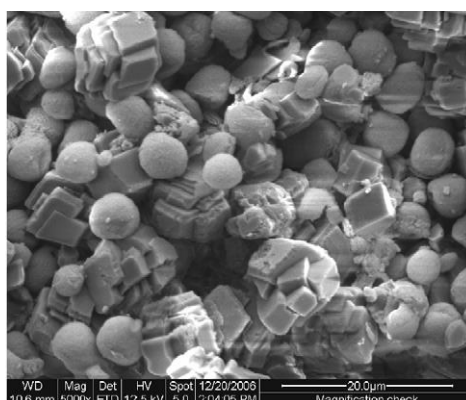


Figura 2.5: Micrografia dos cristais de cálcio depositados na superfície da membrana com o uso de equipamento eletromagnético.

Fonte: Li et al., 2007

Na Tabela 2.1 é possível ver as propriedades da calcita e da aragonita, conforme informado em Bessler e Rodrigues (2008).

Tabela 2.1: Propriedades físicas da calcita e da aragonita

Propriedade	Calcita	Aragonita
Massa específica (g.cm ⁻³)	2,711	2,944
Sistema cristalino	Trigonal	Ortorrômbico
Forma cristalina mais comum	Romboedros ou prismas	Prismas aciculares
Solubilidade em água a 25°C e 1 bar (g/100 g de água)	8,35	8,22

Fonte: Bessler e Rodrigues, 2008.

Segundo Alimi et al. (2009) um número grande de mecanismos já foram propostos para explicar o efeito eletromagnético em soluções aquosas e na dispersão das partículas, porém, certamente, há muitos fatores que ainda são desconhecidos para explicar exatamente o que ocorre. Os efeitos que, provavelmente, afetam a dispersão e a cristalização das partículas estão apresentados a seguir.

Hidratação modificada de íons e superfícies sólidas

O campo magnético induz a transferência rápida de prótons para a água. A ocorrência da hidratação dos íons CO₃⁻², que pode modificar diretamente a fase polimórfica de equilíbrio durante a precipitação, sugere que o mesmo fenômeno pode ocorrer com a desidratação de uma associação de pares iônicos e as formas hidratadas de carbonato de cálcio podem agir como percussores na formação de estruturas anidras, que constituem o precipitado de carbonato e cálcio.

Efeitos da força de Lorentz em íons e partículas dispersas

A força de Lorentz (ou fenômeno magnético-hidrodinâmico) exercida sobre espécies carregadas induz um movimento de convecção local que pode contribuir para acelerar associações entre íons ou partículas coloidais.

2.5 Mecanismo de ação das forças eletromagnéticas

O campo magnético é gerado ou pela colocação direta de ímãs ou pela utilização de solenoides com campo elétrico.

Para entender o funcionamento dos equipamentos eletromagnéticos sobre partículas presentes na água será necessário recorrer às leis e conceitos da física. Assim, conforme demonstrado em Wentworth (2006), as principais forças exercidas são a de Lorentz e a de Faraday.

A equação de Lorentz é muito útil na determinação dos percursos que partículas carregadas (como sólidos dissolvidos presentes na água), tomam quando se movem através do campo eletromagnético.

$$F = q * (E + u * B) \quad (2.4)$$

onde F é a força total da carga, q é a carga, E é a intensidade de campo elétrico, u é a velocidade da carga e B é a intensidade de campo magnético (em Tesla).

A intensidade de campo magnético (B) é calculada como:

$$B = \mu_0 * H \quad (2.5)$$

onde μ_0 é a permeabilidade no vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) e H é o campo magnético.

E o campo magnético (H) para solenoides é definido como:

$$H = \frac{NI}{h} a \quad (2.6)$$

onde N é o número de espiras, I é a corrente elétrica, h e a são, respectivamente, o comprimento e o raio da solenoide.

Como consequência da lei de Faraday, surge um fator indutivo sobre as partículas, que melhora o deslocamento das partículas.

$$L = \frac{\int B * H dv}{I^2} \quad (2.7)$$

onde L é a indutância. Indutores armazenam energia num campo magnético.

2.6 Limpeza química

A limpeza química tem como objetivo a recuperação das condições de operação no que se refere ao fluxo de permeado e à seletividade (Sadhvani e Veza, 2001), aumentando-se, assim, a vida útil das membranas.

A prática de limpezas químicas com a periodicidade adequada contribui para o não comprometimento irreversível da membrana, além de prevenir a formação excessiva de biofilmes. A eficiência da limpeza está diretamente relacionada com os produtos utilizados e as condições sob as quais ela é processada (Ebrahim, 1994).

A realização de uma limpeza química demanda tempo e durante este tempo o sistema não estará produzindo, além disso, por mais que o sistema seja automatizado, é necessário o acompanhamento do procedimento por uma pessoa capacitada. A limpeza ainda consome produtos químicos, gera efluentes, pode causar degradação nas membranas e pode agredir o sistema como um todo. Todos estes fatores fazem com que, de forma geral, os custos com limpeza química em membranas de osmose inversa possam variar de 5 a 20% do total dos custos de operação do sistema (Madaeni et al., 2001).

Segundo Sadhwani e Veza (2001) as condições que definem a necessidade de realização de uma limpeza química são:

- decréscimo de 10% no fluxo de permeado quando em operação a pressão constante;
- aumento de 10% na pressão de alimentação para obter-se um mesmo fluxo de permeado;
- aumento de 15 a 20% na diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a de rejeito;
- elevação significativa da concentração do permeado em uma mesma condição de alimentação (redução da seletividade).

3 Estudo de Caso

Neste trabalho será analisada a eficiência do pré-tratamento eletromagnético para a corrente de alimentação de uma osmose inversa, de proporção industrial, utilizada para produção de água desmineralizada para produção de vapor.

A seguir será descrito todo o pré-tratamento e o funcionamento da osmose inversa em estudo, bem como as características da água tratada em cada etapa do processo.

3.1 Pré-tratamento para o sistema de osmose inversa

O tratamento de água na empresa em estudo tem por objetivo a obtenção de cinco tipos de água: potável, industrial, de incêndio, de resfriamento e desmineralizada. Para tais objetivos são utilizados três sistemas de tratamento: um sistema de tratamento convencional, um sistema de microfiltração e um sistema de osmose inversa.

A concepção da estação de tratamento (ETA) e do sistema de microfiltração e as características requeridas para a qualidade da água final serão apresentadas, brevemente, devido à importância da qualidade da água para a OI.

Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de tratamento da água até chegar ao produto final, a água desmineralizada.

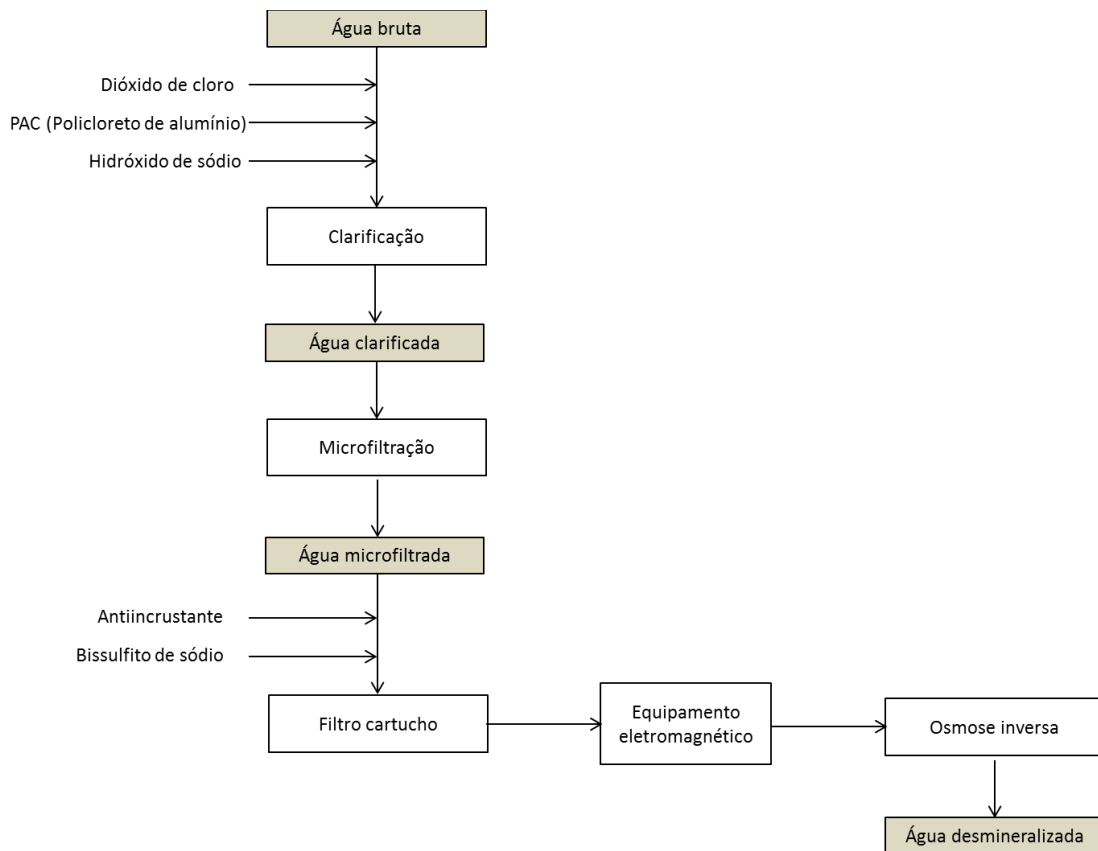


Figura 3.1: Fluxograma simplificado do tratamento da água.

3.1.1 Características da água bruta

O resultado da avaliação das características da água captada no manancial influencia na escolha da tecnologia empregada no tratamento de água da empresa. A intensidade de cor, turbidez, tipo e tamanho de impurezas, bem como a presença de colóides dissolvidos ou em suspensão são características que devem ser consideradas na definição do tipo e da quantidade de produtos químicos a serem utilizados.

Os valores médios de alguns parâmetros da água bruta que será tratada na ETA são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Principais características analisadas na água bruta

Parâmetro	Valor
Turbidez (NTU)	30
O ₂ dissolvido (mg.L ⁻¹)	2,0
pH	6,4
DQO (mg.L ⁻¹)	< 5

3.1.2 Estação de tratamento de água (ETA)

O processo de tratamento realizado na estação de tratamento de água (ETA) tem como objetivo a produção de vários tipos de água na empresa. Neste item serão apresentadas as principais etapas envolvidas no tratamento da água que alimenta a osmose inversa, a fim de entender seus efeitos na qualidade de água desmineralizada obtida.

O processo de tratamento da água apresenta, basicamente, três estágios: desinfecção, clarificação e filtração.

O dióxido de cloro é misturado à água bruta antes do tratamento a fim de destruir a matéria orgânica dissolvida por oxidação de forma a eliminar algas, bactérias e microrganismos.

Após a desinfecção a água bruta escoo pela calha *Parshall*, onde são dosados o coagulante policloreto de alumínio (PAC) e hidróxido de sódio para controle do pH. Também, a calha atua como uma caixa de mistura rápida dos produtos químicos e, neste ponto, é medida a vazão.

A água segue para o *pulsator*, onde ocorre a clarificação. A clarificação pode ser definida como sendo a remoção da matéria finamente dividida e em suspensão na água. O processo de clarificação tem duas etapas: coagulação/floculação e decantação. Na clarificação a gravidade atua sobre as partículas mais pesadas, deslocando-as e separando-as na parte mais profunda do *pulsator*, onde se forma um colchão de lodo. Acima desse colchão fica uma água mais límpida que é a água clarificada.

Saindo do *pulsator*, a água clarificada é encaminhada para o chamado canal de água clarificada, no qual toda a água que passou pelo processo de clarificação se encontra. A

partir deste canal a água clarificada é dividida em três correntes: a alimentação dos filtros de areia, a alimentação das torres de resfriamento (água de *make-up*) e a alimentação da microfiltração.

3.1.3 Sistema de microfiltração

Neste item será apresentado o funcionamento do sistema de microfiltração da empresa estudada, o qual é utilizado como pré-tratamento para o sistema de osmose inversa.

A Tabela 3.2 apresenta as principais características das membranas de microfiltração.

Tabela 3.2: Características das membranas de microfiltração

Item	Característica
Modelo	Memcor L10V - Siemens
Material	PVDF (fluoreto de polivinilideno)
Tipo de membrana	Fibra oca
Tamanho do poro nominal (μm)	0,04
Área ativa nominal (m^2)	23,4
Comprimento (mm)	1157
Diâmetro (mm)	119
Faixa de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0 a 40
Faixa de pH	2 a 10
Máxima concentração de cloro (mg.L^{-1})	1000

A microfiltração apresenta atualmente 8 *skids* com um total de 90 módulos cada. Cada módulo contém uma membrana formada por 14500 capilares formados de membranas de fluoreto de polivinilideno, conforme pode ser visto na Figura 3.2. Cada *skid* é um conjunto com módulos, tubulações, instrumentos, válvulas e outros acessórios.



Figura 3.2: Fotografia dos módulos fibras ocas de membranas de microfiltração.
Fonte: Siemens (2013).

O funcionamento da planta de microfiltração consiste em conduzir a água da alimentação na parte externa para a parte interna da membrana. A corrente filtrada sai pelo centro da fibra, ao passo que os contaminantes se depositam na parte externa desta, como indicado na Figura 3.3. Devido a este depósito, é necessário realizar limpezas periódicas da membrana.

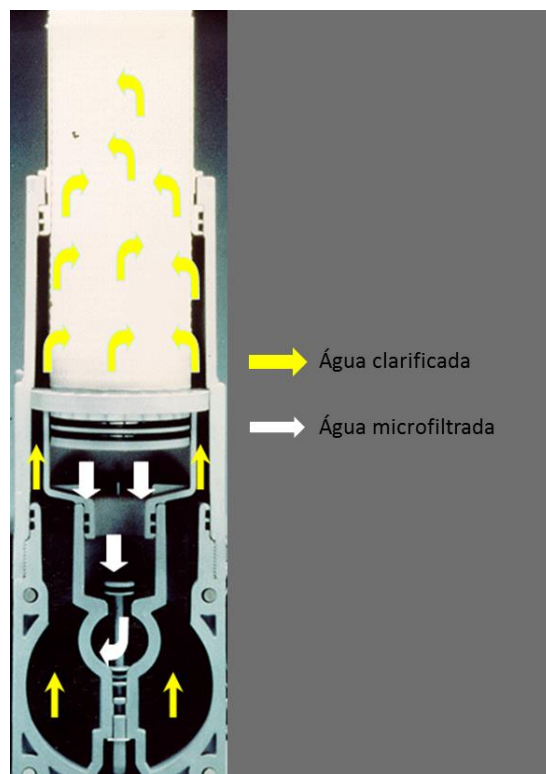


Figura 3.3: Esquema do funcionamento do módulo de microfiltração.

A Tabela 3.3 apresenta algumas características da água de alimentação do processo de microfiltração.

Tabela 3.3: Características da corrente de água de entrada da unidade de microfiltração.

Parâmetro	Valor
Turbidez (NTU)	1,5
Dureza (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	30
Sílica (mg.L ⁻¹)	18
pH	6,4
TOC (mg.L ⁻¹)	3,0
Sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)	< 10

3.1.4 Sistema de osmose inversa

Para a produção de vapor, é necessário o uso de água totalmente livre de impurezas, pois a presença destes contaminantes é a causa de depósitos, corrosão ou arraste em equipamentos. Para as caldeiras de alta pressão (60 kgf/cm² e 445°C) os parâmetros máximos permitidos são 0,02 mg.L⁻¹ de ferro, 0,015 mg.L⁻¹ de cobre e 0,05 mg.L⁻¹ de dureza total, sendo a sílica mantida abaixo de 0,15 mg.L⁻¹ e o oxigênio totalmente removido por tratamento químico e desaeração mecânica. É necessário, portanto, um controle rigoroso da qualidade da água a fim de que não ocorram incrustações, depósitos e por consequência danos no material das caldeiras.

A osmose inversa é utilizada para obter uma água desmineralizada de qualidade para a produção de vapor em caldeiras.

As membranas de OI utilizadas são confeccionadas em poliamida, com carga neutra dispostas em módulos do tipo espiral. Cada membrana possui diâmetro de 8 polegadas, área de 37,2 m² e a produção de permeado é de 41,6 m³.dia⁻¹. Os módulos são conectados um ao outro, formando um coletor para o permeado no centro das membranas. A OI, com seus vasos de pressão, onde estão colocadas as membranas está representada na Figura 3.4.



Figura 3.4: Osmose inversa da empresa analisada.

A água microfiltrada, antes de entrar no sistema de OI, recebe a adição de antincrustante e de bissulfito de sódio.

O antincrustante é dosado para reduzir a possibilidade de precipitação de sais sobre as membranas, aumentando sua solubilidade.

As membranas utilizadas são projetadas para trabalhar com, no máximo, $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ de cloro por 10.000 horas ou 1000 mg.L^{-1} de cloro por uma hora. Então para monitorar os compostos clorados é utilizado um medidor de ORP (potencial de oxirredução). Com o valor de ORP lido faz-se a dosagem de bissulfito de sódio para o controle do cloro.

A água passa por um filtro de cartucho com poros de tamanho nominal de $1 \mu\text{m}$, com o objetivo de retirar os sólidos em suspensão, antes de chegar nas membranas de osmose inversa.

Existem na empresa estudada quatro conjuntos de osmose inversa, cada um formado por dois passes. O primeiro passe possui 14 vasos pressurizados com 7 membranas cada, totalizando 98 módulos, e o segundo passe é composto por 12 vasos pressurizados com 6 membranas cada, totalizando 72 módulos.

A corrente de alimentação é pressurizada e flui tangencialmente à superfície da membrana, dividindo-se em duas correntes de saída: a solução que passou através da superfície da membrana (permeado) e a corrente concentrada remanescente (rejeito). A configuração das correntes da osmose inversa da empresa estudada é mostrada na Figura 3.5, e as características da água que entra na osmose inversa são apresentadas na Tabela 3.4.

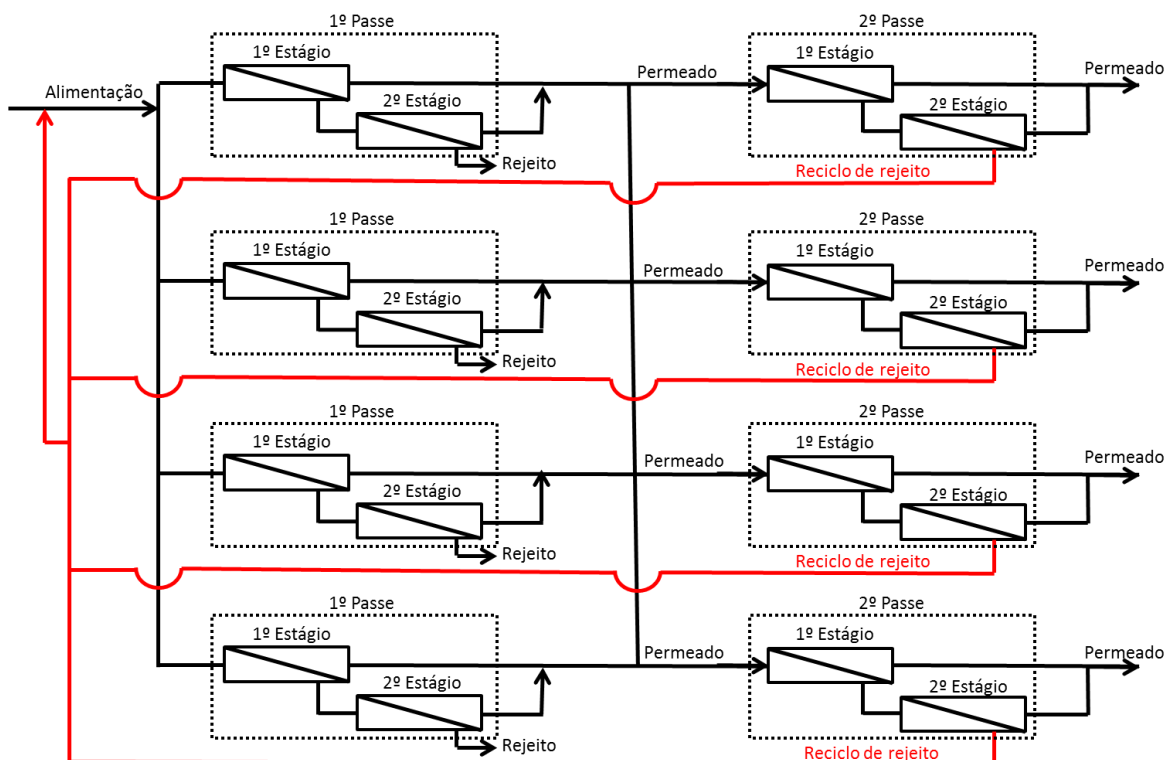


Figura 3.5: Configuração do sistema de osmose inversa.

Tabela 3.4: Características da corrente de água de entrada da unidade de osmose inversa.

Parâmetro	Entrada
Sólidos dissolvidos (mg.L^{-1})	< 10
Sólidos suspensos (mg.L^{-1})	< 10
Cálcio (mg.L^{-1})	6,0
Dureza total ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$)	30
TOC	2,6
Turbidez (NTU)	< 0,3
SDI	< 3,0
pH	5,97
Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$ à 25 °C)	130

A água de alimentação passa pelo 1º passe de cada um dos quatro conjuntos. Cada passe é composto por dois estágios, onde o rejeito do 1º estágio alimenta o 2º estágio e o rejeito deste vai ser utilizado como água industrial. Os permeados do 1º e do 2º estágio de todos os conjuntos se unem para alimentar o 2º passe, após receberem dosagem de hidróxido de sódio. Passando pelo 1º estágio do 2º passe as correntes se dividem e o rejeito alimenta o 2º estágio. Ao final, o permeado do 1º e do 2º estágio do 2º passe se

juntam para produção de vapor em caldeiras e o rejeito do 2º estágio do 2º passe voltará para a alimentação do 1º passe da unidade de osmose inversa.

A recuperação do 1º passe é de 81% e a recuperação do 2º passe é de 89%.

3.1.5 Limpeza química

Quando a limpeza química se torna necessária, a mesma é realizada utilizando hidróxido de sódio e EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) a 40°C para a limpeza básica, visando eliminar depósitos orgânicos e biofilmes. Para remoção da matéria inorgânica é realizada a limpeza ácida com ácido cítrico e biocida.

3.1.6 Equipamento eletromagnético

O equipamento eletromagnético avaliado foi instalado na alimentação do 1º estágio do 1º passe do quarto conjunto de osmose inversa, logo após o filtro de cartucho, conforme ilustrado na Figura 3.6.

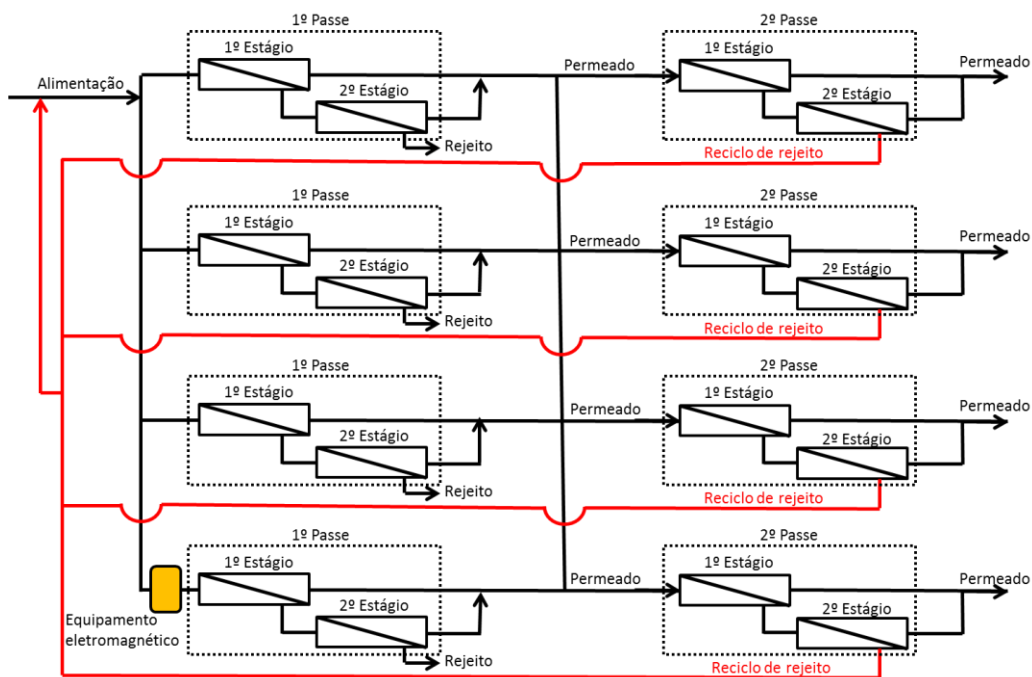


Figura 3.6: Configuração do sistema de osmose inversa com o equipamento eletromagnético instalado na entrada do 1º passe do quarto conjunto de membranas.

Na Figura 3.7 é representado o equipamento eletromagnético aberto. A parte oca do equipamento é onde será colocada a tubulação da alimentação da OI. No seu interno tem espiras por onde passa corrente elétrica, gerando o campo eletromagnético que é aplicado ao fluido. Nota-se que o equipamento não entra em contato direto com o fluido, não ocorrendo contaminação ou corrosão do equipamento.



Figura 3.7: Fotografia do equipamento eletromagnético instalado na planta industrial.

O equipamento eletromagnético instalado tem uma alimentação elétrica de 220 V, e a tensão que vai para o equipamento é de 27,16 V de corrente contínua gerando uma intensidade de campo magnético de 0,45 Teslas.

O equipamento foi instalado dia 25 de março de 2014 e permaneceu em operação até o fim dos testes, em 08 de junho de 2014.

4 Metodologia

A metodologia utilizada para avaliar o equipamento eletromagnético como pré-tratamento para osmose inversa foi a comparação dos dados de queda de pressão na osmose inversa, pressão de entrada no 1º estágio do 1º passe, condutividade elétrica de entrada e de saída (avaliados como retenção salina) antes e após a instalação do equipamento eletromagnético.

Foi avaliada também a qualidade das correntes de alimentação do sistema de osmose inversa, de concentrado e de permeado em relação à quantidade de cálcio presente em cada uma dessas correntes. O tempo entre limpezas químicas necessárias, antes e após o tratamento, também foi um indicativo de eficiência do equipamento.

Além disso, os sais presentes na água de alimentação e do rejeito do 1º estágio do 1º passe do conjunto com e sem tratamento eletromagnético foram avaliados quanto a sua formação cristalina.

4.1.1 Coleta de dados

Os dados de queda de pressão na osmose inversa, pressão de alimentação, condutividades elétricas de entrada e de saída foram obtidos do software 'PI'.

O 'PI' é um sistema que permite analisar, rastrear e monitorar a operação de plantas industriais. Podem-se montar gráficos e acompanhar uma variável operacional em períodos que podem chegar a mais de dois anos.

Instrumentos de medição instalados na planta de osmose inversa, devidamente controlados e calibrados, fornecem os dados para o software 'PI'. Foram utilizadas as médias diárias de cada parâmetro para análise dos resultados.

Todos os valores coletados foram normalizados em função da temperatura. As características de retenção das membranas alteram-se, proporcionalmente, com a temperatura, alterando a passagem de sais e, por consequência, a pressão requerida para sua passagem.

4.1.2 Análises químicas

A análise de cálcio foi realizada por espectrofotometria de emissão atômica e plasma indutivamente acoplado, por método desenvolvido no laboratório da empresa estudada, baseado nas normas ASTM D5185-09/D5708-12 e STD 3120-11. Seu limite de quantificação é de 0,021 mg.L⁻¹, sua repetibilidade e reprodutibilidade são, respectivamente 0,08 mg.L⁻¹ e 0,21 mg.L⁻¹.

Foram analisadas as correntes de alimentação e rejeito do 1º estágio do 1º passe e o permeado total dos 1º e 2º estágios do 1º passe. O 2º passe não foi avaliado, pois a sua alimentação é o permeado total de todos os quatro conjuntos de osmose inversa, reduzindo o provável efeito do campo magnético.

Para a análise da formação cristalina dos sais presentes na corrente de alimentação e do rejeito sem e com pré-tratamento eletromagnético, as amostras foram colocadas em estufa à 120°C até secarem completamente, permanecendo somente os sais presente em

cada amostra. Após os sais foram analisados em microscópio, modelo axiostar da Zeiss, para verificação da alteração da formação cristalina como consequência do tratamento eletromagnético. Este método foi adaptado do trabalho de Bessler e Rodrigues (2008).

4.1.3 *Limpeza química*

A limpeza química se torna necessária quando ocorrer:

- aumento de 10% na pressão de alimentação para obter-se um mesmo fluxo de permeado;
- aumento de 15 a 20% na diferença de pressão entre a corrente de alimentação e a de rejeito;
- elevação significativa da concentração do permeado em uma mesma condição de alimentação (redução da seletividade).

Foi avaliado se o tempo decorrido entre uma limpeza química e outra reduzirá ou aumentará com o uso do equipamento eletromagnético.

5 Resultados

Os resultados obtidos são mostrados e avaliados a seguir. Serão analisados o diferencial de pressão, a pressão da corrente de alimentação do 1º passe, a rejeição salina, a quantidade de cálcio e a formação de cristais.

Na Figura 5.1 são apresentados os valores obtidos de diferencial de pressão dos 1º e 2º estágios do 1º passe e o seu somatório (1º passe).

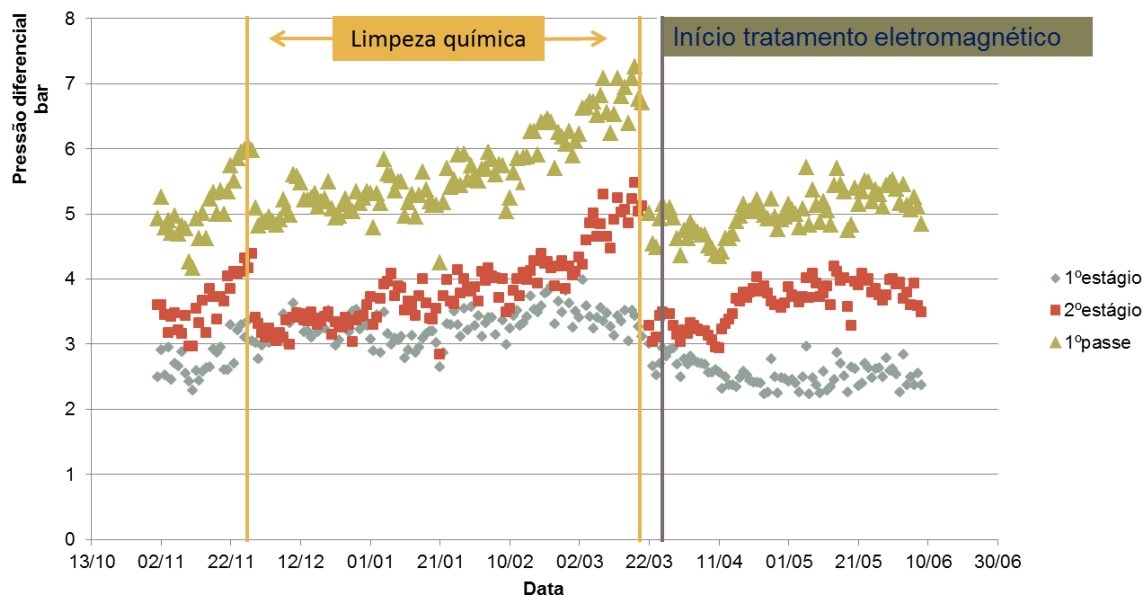


Figura 5.1: Diferencial de pressão do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.

Pode-se notar que o diferencial de pressão do 1º estágio após a limpeza química manteve-se estável, não aumentando com o passar do tempo. Contudo, o diferencial de pressão no 2º estágio aumentou. Porém seu aumento foi proporcional ao processo sem o tratamento eletromagnético. Considerando que após o aumento de 20% no diferencial de pressão deve ser feita uma limpeza química, sem o tratamento eletromagnético esse aumento de 20% ocorreu após 39 dias da limpeza química, já com o tratamento eletromagnético o mesmo ocorreu em 29 dias. E em ambos os casos após 25% de aumento do diferencial de pressão houve a estabilização do diferencial de pressão.

Ocorreu um aumento exponencial do diferencial de pressão do 2º estágio, sem o campo eletromagnético após 93 dias da limpeza química. Como o equipamento eletromagnético foi instalado em 25 de março, decorreram 76 dias de operação desde sua instalação e até o momento esse aumento exponencial não foi observado.

Na Figura 5.2 estão apresentados os valores da pressão de alimentação do 1º estágio do 1º passe.

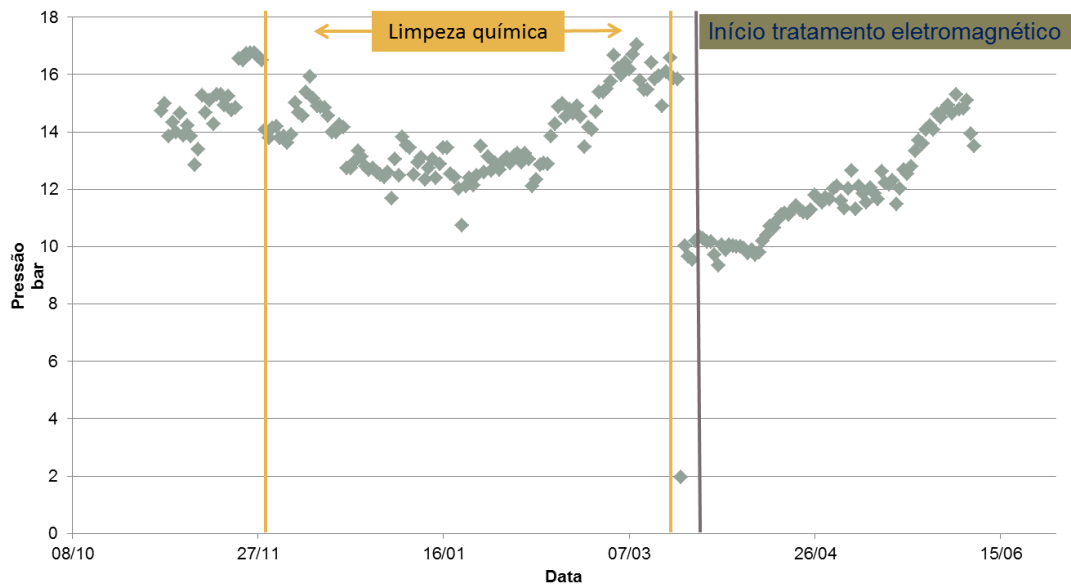


Figura 5.2: Pressão de alimentação do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.

A avaliação da pressão de alimentação do 1º estágio do 1º passe permite verificar se está ocorrendo um aumento geral da incrustação, pois a pressão somente aumenta se há dificuldade de passagem da água através da membrana.

A pressão vai aumentar para manter a vazão de produção de água desmineralizada constante. Para isso, a bomba de alimentação da osmose inversa possui um inversor de frequência que irá aumentar a rotação e, conseqüentemente, a pressão na descarga da bomba.

No gráfico apresentado na Figura 5.2 pode-se notar que a pressão de alimentação aumentou rapidamente com o uso do equipamento eletromagnético. Por esse parâmetro observa-se que já existe a necessidade de uma limpeza química no sistema num tempo menor que no processo sem uso de campo eletromagnético.

Os valores obtidos de rejeição salina são representados na Figura 5.3.

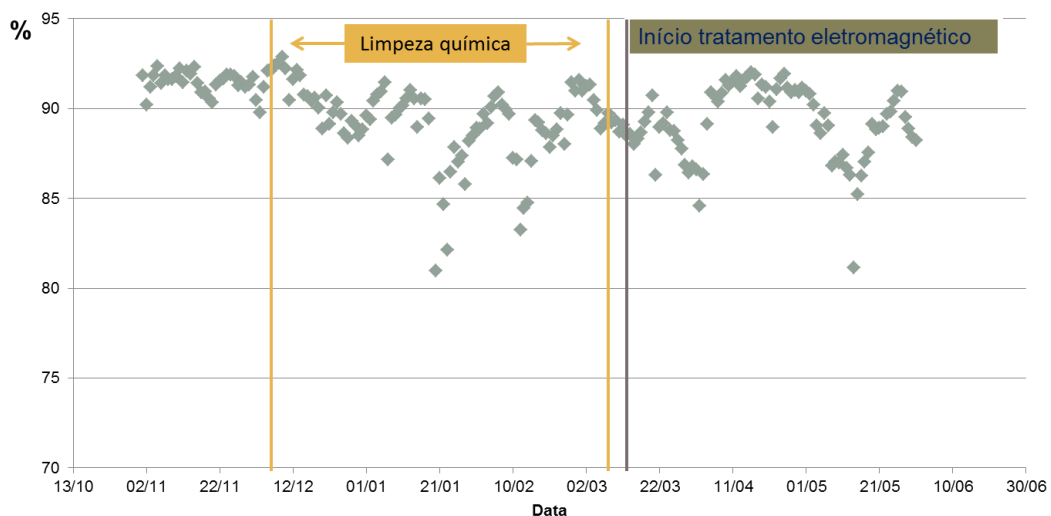


Figura 5.3: Rejeição salina do 1º passe da osmose inversa, para o período de novembro/2013 a junho/2014.

A rejeição salina manteve o mesmo comportamento, tanto sem quanto com campo eletromagnético aplicado.

Porém, como as membranas usadas na osmose inversa já apresentam um tempo de operação de, aproximadamente, dois anos a rejeição salina é considerada baixa para ambos os casos. A rejeição mínima deveria ser de 97%.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados da análise de cálcio realizada na água de alimentação e rejeito do 1º estágio do 1º passe e o permeado total do 1º passe.

Tabela 5.1: Resultados de cálcio

Concentração de cálcio (mg.L⁻¹)			
Data	Alimentação	Permeado	Rejeito
24/03 – Sem eletromagnetismo	6,91	0,12	28,3
27/03 – Com eletromagnetismo	5,98	0,05	25,54
31/03– Com eletromagnetismo	6,32	0,04	25,91
10/04– Com eletromagnetismo	5,49	0,14	20,40
08/05– Com eletromagnetismo	5,99	0,21	16,34
15/05– Com eletromagnetismo	7,71	0,09	30,64
26/05– Com eletromagnetismo	6,19	0,02	26,27
02/06– Com eletromagnetismo	6,96	0,04	28,04

Os valores de cálcio tiveram sutis alterações, mas pode-se considerar que os mesmos valores foram mantidos em todas as correntes, comparando com os resultados das amostras sem o efeito do campo eletromagnético.

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 é possível ver, respectivamente, a formação de cristais na alimentação da osmose inversa, no rejeito do 1º estágio do 1º passe com pré-tratamento eletromagnético e no rejeito do 1º estágio do 1º passe sem pré-tratamento eletromagnético.

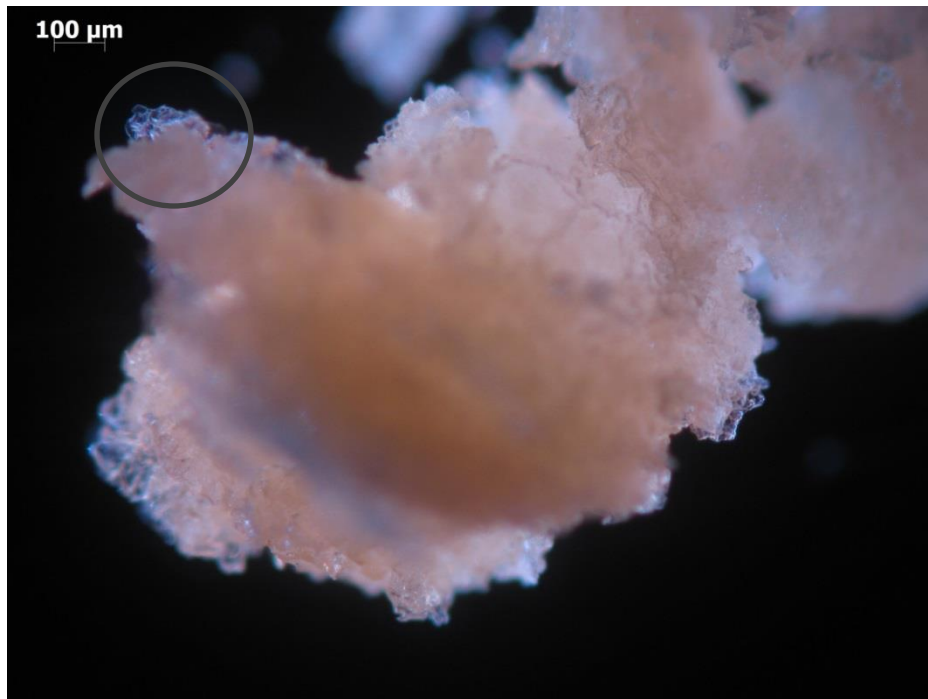


Figura 5.4: Micrografia dos cristais da corrente de alimentação da osmose inversa, detalhando o formato prisma cúbico.

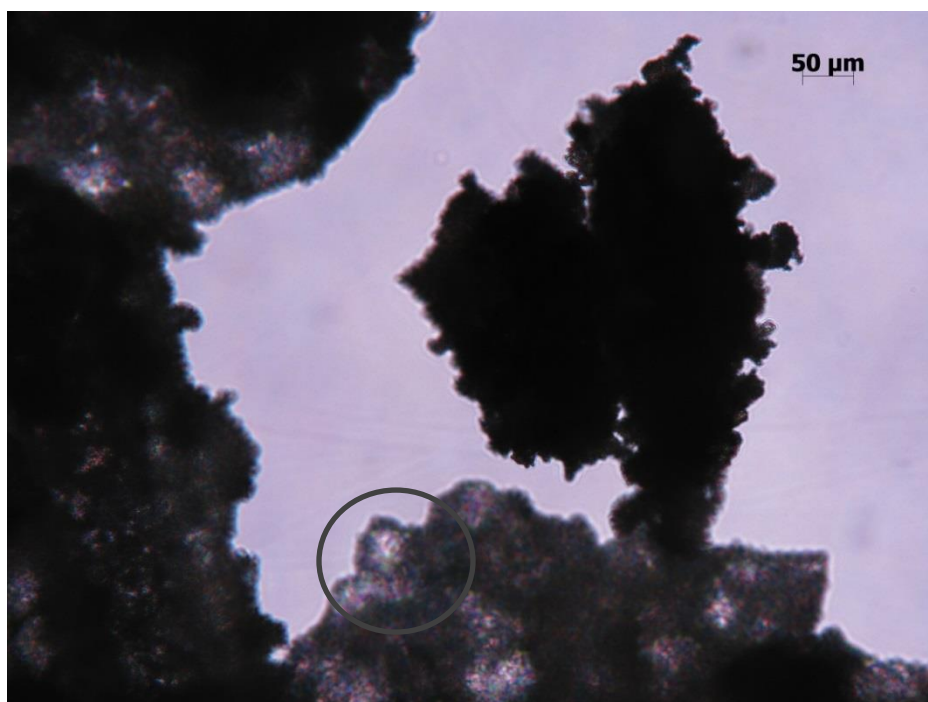


Figura 5.5: Micrografia dos cristais no rejeito do 1º estágio do 1º passe da osmose inversa com tratamento eletromagnético, detalhando o formato acicular.

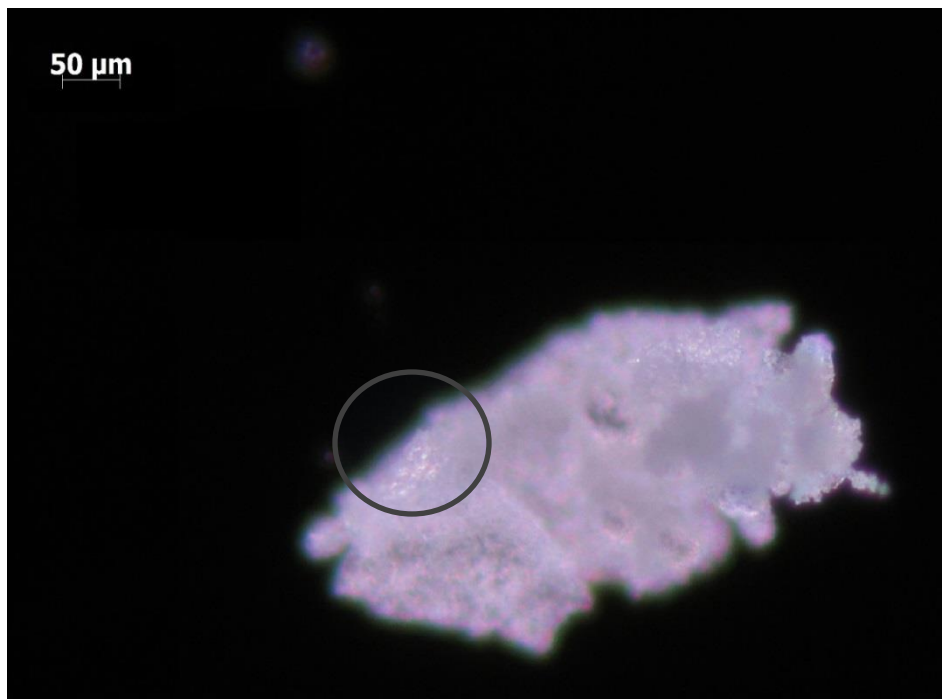


Figura 5.6: Micrografia dos cristais no rejeito do 1º estágio do 1º passe da osmose inversa sem tratamento eletromagnético, detalhando o formato prisma cúbico.

A formação cristalina dos sais da água de alimentação e do rejeito sem tratamento eletromagnético é do tipo prisma cúbico. Já a formação cristalina dos sais presentes no rejeito que passou pelo campo eletromagnético é acicular (em forma de agulhas), formando cristais finos e menores. Conforme informado em Bessler e Rodrigues (2008), a estrutura dos cristais da calcita é do tipo prisma cúbico e da aragonita é do tipo acicular. Desta forma, pode-se ver que a calcita presente na alimentação alterou estruturalmente, formando a aragonita.

Este fato evidencia que o campo eletromagnético aplicado alterou, realmente, a estrutura dos sais presentes na água de alimentação e que tal processo é devido somente a este campo, uma vez que, os cristais do rejeito da osmose inversa que não recebeu nenhum tratamento eletromagnético mantiveram sua formação cristalina igual à formação cristalina dos sais da água de alimentação.

No período de teste, esta mudança de estrutura não alterou as variáveis do processo analisadas. Mas outras variáveis, como a dosagem simultânea de antincrustante e as membranas já em uso por mais de dois anos, podem ter influenciado também este resultado.

Não foi realizada nenhuma limpeza química após o tratamento eletromagnético. Conforme Li et al. (2007), a mudança de estrutura cristalina favorece a formação de uma camada de incrustação não tão compacta quanto a camada formada sem o uso de campo eletromagnético, o que facilita a remoção desta camada com a limpeza química.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi avaliada a eficiência do uso de um equipamento eletromagnético como pré-tratamento no processo de osmose inversa, colocando-o em uso em uma planta industrial de produção de água desmineralizada para produção de vapor.

A pressão de alimentação da osmose inversa, o diferencial de pressão em todos os estágios do 1º passe, a retenção salina e a quantidade de cálcio não sofreram alterações significativas, a ponto de não poder concluir que o equipamento eletromagnético melhora o processo de osmose inversa, ao menos no período estudado.

Foi avaliada a alteração da formação cristalina e verificou-se que a estrutura dos sais presentes na água que sofreu tratamento eletromagnético modificou-se. Porém esta mudança, no período de teste do tratamento eletromagnético, não gerou uma melhor operação da osmose inversa.

Como a planta em estudo estava em plena operação, os testes realizados ficaram um pouco restritos devido à necessidade de continuidade da produção de água desmineralizada. Não foi possível remover o antincrustante do processo para usar apenas o campo magnético para eliminação de sais inorgânicos. Sugere-se realizar experimentos futuros sem o uso simultâneo de antincrustantes e do campo eletromagnético.

Estudos em longo prazo devem ser realizados para se poder ter uma melhor verificação da eficiência do tratamento. Ao mesmo tempo, estudos em escala laboratorial devem ser realizados para verificar as melhores condições de operação, como vazão adequada do fluido que recebe o campo magnético e a intensidade ideal deste campo.

Por fim, é possível também, alterar a configuração da planta, colocando o equipamento eletromagnético na alimentação do 2º estágio do 1º passe da osmose inversa, pois nessa parte do processo a quantidade de sais é, pelo menos, 5 vezes maior e, como a força eletromagnética é proporcional às cargas presentes na solução, quanto maior a quantidade de partículas maior será a força eletromagnética exercida.

7 Referências

- ALIMI, F. et al. Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 8, p. 1327-1332, 2009.
- ANTONY A. et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review. **Journal of Membrane Science**, v. 383, n. 1-2, p. 1-16, 2011.
- BAKER, J. S.; DUDLEY, L. Y. Biofouling in membrane systems - a review. **Water Supply**, v. 17, n. 1, p. 173-181, 1999.
- BESSLER, K. E. ; RODRIGUES L. C. Os polímeros polimorfos de carbonato de cálcio. **Química Nova**, 2008.
- BONNÉLYE, V. et al. UF/MF as RO pre-treatment: the real benefit. **Desalination**, v. 222, n. 1-3, p. 59-65, 2008.
- BRANDT, D. C. et al. Reverse osmosis –Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial application. **Chapman &Hall**, Chapter 1, Reverse Osmosis Membranes State of the Art, p. 1-35, 1992.
- BYRNE, W. Reversis Osmosis – A practical guide for Industrial Users. **Littleton: Tall Oaks**, 1995.
- CHOO, K. H. et al. Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 267, n. 1-2, p. 18-26, 2005.
- EBRAHIM, S. Cleaning and regeneration of membranes in desalination and wastewater applications: State-of-the-art. **Desalination**, v. 96, n. 1-3, p. 225-238, 1994.
- ELGUERA M.; BÁEZ P. Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake. **Desalination**, v. 184, n. 1-3, p. 173-183, 2005.
- GABRIELLI, C. et al. Magnetic water treatment for scale prevention. **Water Research**, v. 35, n. 13, p. 3249-3259, 2001.
- GREENLEE, L. F. et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. **Water Research**, v. 43, n. 9, p. 2317-2348, 2009.
- HAFSI, M. et al. Effects of the chemical injection points in pre-treatment on reverse osmosis (RO) plant performance. **Desalination**, v. 167, n. 1-3, p. 209-216, 2004.
- LI, J. et al. Quantitative study of the effect of electromagnetic field on scale deposition on nanofiltration membranes via UTDR. **Water Research**, v. 41, n. 20, p. 4595-4610, 2007.
- MADAENI, S. et al. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes. **Desalination**, v. 134, n. 1-3, p. 77-82, 2001.

MARTINS N. M. Estudo de limpeza química em membranas de osmose inversa. Trabalho (Graduação em engenharia química) - **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2012.

MULDER, M. Basic Principles of Membrane Technology Second Edition. **Kluwer**, 1996.

OLIVEIRA, D. R. D. Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas. Dissertação (mestrado em ciências em engenharia química) - **Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE)**, 2007.

SADHWANI, J. J.; VEZA, J. M. Cleaning tests for seawater reverse osmosis membranes. **Desalination**, v. 139, n. 1–3, p. 177-182, 2001.

VEDAVYASAN, C. V. Pontential use of magnetic fields — a perspective. **Desalination**, v. 134, n. 1–3, p. 105-108, 2001.

WENTWORTH, S. M. Fundamentos de eletromagnetismo com aplicações em engenharia. **LTC**, 2006.

WOLF, P. H. et al. UF membranes for RO desalination pretreatment. **Desalination**, v. 182, n. 1-3, p. 293-300, 2005.