



## Remoção de sulfato em salmoura utilizando a membrana de nanofiltração NF90-4040 na produção de clorato de sódio

### Removal of sulfate in brine using nanofiltration membrane NF90-4040 in sodium chlorate production

Bianca P. S. Santos<sup>1</sup>

Raiany A. Martins<sup>2</sup>

Thiago S. P. Faria<sup>3</sup>

Daniele E. S. L. Silva<sup>4</sup>

Alberto C. Habert<sup>5</sup>

Cristina P. Cardoso<sup>6</sup>

**Resumo:** Os processos de separação por membranas (PSM) podem ser empregados em diversos segmentos por serem economicamente vantajosos devido ao gasto com energia ser consideravelmente menor. Estes processos têm sido utilizados em indústrias farmacêuticas, alimentícias, dessalinização de água, remoção de contaminantes entre outros. Com base nestas afirmações, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da membrana de nanofiltração (NF90-4040) na remoção de sulfato na salmoura que é alimentada no sistema de produção de clorato de sódio. O trabalho foi realizado no laboratório de separação por membranas (PAM) do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da COPPE/UFRJ. Foi empregada uma carga real de salmoura com concentração de 316 g/L de cloreto de sódio e 0,96 g/L de sulfato coletada no estágio de tratamento primário, após o processo de filtração. Os parâmetros vazão (40 L/h) e a temperatura (22°C) foram mantidos fixos, somente a pressão de trabalho foi alterada 12, 10 e 8 bar respectivamente. Através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi verificado que não

<sup>1</sup> UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>2</sup> UNIPAC – Universidade Presidente Antônio Carlos

<sup>3</sup> UNIPAC – Universidade Presidente Antônio Carlos

<sup>4</sup> UFU – Universidade Federal de Uberlândia

<sup>5</sup> UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>6</sup> UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

houve danos na superfície da membrana, ruptura ou formação de *fouling*. A remoção de sulfato empregando (NF90-4040) foi aproximadamente 33%, indicando que membranas de nanofiltração apresentam-se como método eficiente para remoção de sulfato na faixa de pressão trabalhada.

**Palavras-chave:** Sulfato; Nanofiltração; Membranas.

---

**Abstract:** The membrane separation processes (PSM) can be used in several segments because they are economically advantageous because the energy expenditure is considerably lower. These processes were used in pharmaceutical, food, water desalination, contaminant removal and other industries. Based on these affirmations, the objective of present work was evaluated by evolution of the nanofiltration membrane (NF90-4040) in the removal of sulfate in the brine that is fed without sodium chloride production system. The work was carried membranes separation laboratory (PAM) of the Graduate Program in Chemical Engineering of COPPE / UFRJ. An actual brine load with a concentration of 316 g/L sodium chloride and 0.96 g/L sulfate collected at the primary treatment stage was used after the filtration process. The parameters flow (40 L/h) and temperature (22 °C) were kept fixed, only one working pressure was changed 12, 10 and 8 bar respectively. Through scanning electron microscopy (SEM) was verified that it is not a membrane surface damage, rupture or scale formation. The sulfate removal employed (NF90-4040) was approximately 33%, indicating that nanofiltration membranes known as an efficient method for sulphate removal in the worked pressure range.

**Keywords:** Sulphate; Nanofiltration; Membranes.

---

## 1. Introdução

A eletrólise da salmoura (solução de NaCl), é o princípio básico dos processos químicos, tais como a produção de clorato de sódio ( $\text{NaClO}_3$ ), cloro ( $\text{Cl}_2$ ) e de soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ). A salmoura alimentada no processo e o licor (solução formada de NaCl, dicromato de sódio e clorato de sódio) que circula nas plantas devem conter uma quantidade mínima especificada de impurezas, promovendo assim uma redução de custos, maximização de produção e preservação do meio ambiente (LAKSHMANAN e MURUGESAN, 2013).

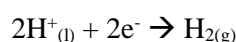
No início do processo de produção de clorato de sódio ocorre a dissociação do cloreto de sódio e da água presentes no licor. Quando o licor flui através dos eletrodos, o íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) difunde do seio da solução para a superfície do anodo, simultaneamente, o íon hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) difunde para o catodo. Na superfície do anodo, os íons cloretos são oxidados para gás cloro e enquanto na superfície do catodo o íon hidrogênio é reduzido e forma gás hidrogênio. A reação global da produção de clorato de sódio (Equação 1) e reação anódica (Equação 2) e catódica (Equação 3) são apresentadas abaixo (Chemetics International Company, 1993).



(Equação 1)



(Equação 2)



(Equação 3)

Um dos inconvenientes no processo de produção é a presença de impurezas na salmoura utilizada como matéria prima que, durante o processo causam problemas como aumento da voltagem ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , sílica), danos ao ânodo, como  $\text{SO}_4^{2-}$ , e metais pesados ( $\text{V}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ). Impurezas como íons cálcio e magnésio são retiradas da salmoura antes de sua alimentação no reator, através de técnicas simples como precipitação e troca iônica. O sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pode entrar na planta de clorato através da salmoura. Se não for removido pode alcançar valores elevados ( $>20$  g/L), e causar efeitos adversos na eficiência das plantas de clorato de sódio e agir como promotor do aumento do nível de oxigênio no fluxo de gás hidrogênio. Normalmente o mesmo é precipitado com íons cálcio ou bário, purgado e cristalizado no licor que circula no processo, porém as técnicas citadas são pouco viáveis (BRIEN, BOMMARAJU, HINE, 2005).

Segundo Gang e colaboradores (2011), os processos de separação por membranas, para remoção do sulfato na salmoura, têm sido estudados nos últimos anos, apresentando-se como alternativa viável às técnicas utilizadas atualmente, tendo como vantagens: não promove mudança de fases, não necessita de reação química, e adição de produtos químicos,

apresentando boa qualidade de filtração, operação simples, baixo custo além de não sofrer qualquer restrição de ordem ambiental.

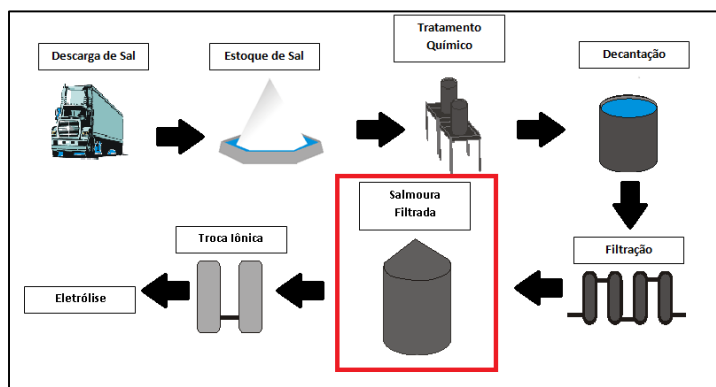
O uso de membranas no tratamento de água marinha, tendo como objetivo a remoção de sulfato antes da injeção, representa um importante avanço na área de produção de petróleo, porém não é a única demanda. Associado a isto, observou-se uma dificuldade no controle da concentração de sulfato no licor do processo eletrolítico na indústria de papel e celulose (BESSARABOV e TWARDOWSKI, 2002; SHON, PHUNTSHO, CHAUDHARY, VIGNESWARAN, CHO, 2013; LE e NUNES, 2016).

O processo de separação por membranas (PSM) empregando principalmente nanofiltração (NF) tem sido muito utilizado nos últimos anos. O mecanismo de transferência de massa na nanofiltração é a difusão, na qual permite a difusão de diferentes espécies iônicas (tais como: sódio e cloretos), predominantemente íons monovalentes, bem como água. A capacidade de uma membrana de nanofiltração na separação de uma corrente de íons multivalentes a faz um excelente material para remoção de sulfato (MADAENI e KAZEMI, 2008; ALVES, 2006; HABERT *et al.*, 2005). Desta maneira a nanofiltração pode ser utilizada como rota alternativa para remoção deste composto. O objetivo do presente trabalho é avaliar a eficiência da remoção de sulfato oriundo do estágio de tratamento primário após o processo de filtração, no tanque de salmoura filtrada através da técnica de nanofiltração utilizando a membrana NF90-4040, bem como as variáveis envolvidas no processo.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Coleta e caracterização da amostra

A salmoura foi obtida em uma empresa em Belo Oriente - Minas Gerais. Sua coleta foi realizada conforme mostrado na Figura 1, no estágio de tratamento primário após o processo de filtração, no tanque de salmoura filtrada.



**Figura 11:** Esquema da planta de tratamento de salmoura.

**Fonte:** Adaptado do Manual de Operação, 1993.

Foram realizados os testes em triplicata no Laboratório de Separação por Membranas (PAM) do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da COPPE/UFRJ. Foram coletados 10 litros e armazenados a 23°C até a realização do processo de nanofiltração. A concentração das amostras foi de 316 g/L de cloreto de sódio e 0,96 g/L de sulfato de sódio, obtidos a partir de métodos analíticos (gravimétrico e titulométrico).

## 2.2. Remoção da salmoura pelo processo de nanofiltração

O equipamento utilizado para o trabalho foi desenvolvido e adaptado no Laboratório de Membranas (PAM/COPPE/UFRJ) em escala de bancada. Quanto ao módulo utilizado foi do tipo tangencial e a membrana utilizada foi de nanofiltração adquirida da Filmtec (NF90-4040), com as seguintes características nominais: permeabilidade hidráulica  $8,6 \text{ L.h}^{-1}.\text{bar}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ; rejeição salina 97%; cloro livre menor  $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ ; pH de 2 a 11; temperatura máxima 45°C. O sistema de nanofiltração e o detalhamento do equipamento que constituem são na Figura 2.



**Figura 2:** Sistema de nanofiltração de bancada.

A etapa inicial do trabalho experimental constituiu em adicionar 2 litros da solução de salmoura no reservatório de alimentação. Realizou-se a abertura do módulo de filtração para adicionar a nova membrana NF 90-4040 e a vedação do mesmo utilizando parafusos (Figura 3).



**Figura 3:** Módulo de nanofiltração.

Dando início ao processo as seguintes variáveis foram mantidas constantes: frequência da bomba 15 rpm, vazão 40 L/h e a temperatura 22°C para todos os testes, sendo apenas a pressão de trabalho variada em 12, 10 e 8 bar, nesta ordem. Antes de iniciar o processo de nanofiltração e coletar o permeado foi necessário realizar a compactação da membrana. A compactação é descrita como a deformação mecânica irreversível da subcamada porosa da membrana (suporte), quando a mesma é submetida a um gradiente de pressão, causando um adensamento da sua microestrutura e conseqüentemente ocorre uma diminuição no fluxo de permeado (PENDERGAST *et al.*, 2010). Para evitar essa diminuição é necessário realizar a circulação da salmoura submetendo à membrana a maior pressão de operação para garantir que não sofrerá compactação durante os testes. A pressão utilizada foi de 12 bar. Para garantir a compactação foram realizadas medidas do fluxo do permeado utilizando uma proveta de 50 mL até que atingisse uma linearidade entre os dados até ao máximo da pressão utilizada. Ao término da compactação da membrana na pressão de 12 bar, foram realizadas medidas de fluxo de permeado sob diferentes pressões.

O fluxo de permeado foi medido cronometrando-se o tempo para permear 5 mL em uma proveta graduada. A primeira pressão utilizada foi 12 bar e realizou-se a coleta do permeado aproximadamente 200 mL para posterior análise. Após a coleta da amostra na pressão referida acima, foi regulada a pressão através do manômetro abaixando a mesma para 10 bar, e realizada a medida do fluxo de permeado e a coleta da amostra aproximadamente 200 mL. Este procedimento foi repetido com a pressão de 8 bar. A rejeição salina foi determinada na pressão de 12, 10 e 8 bar, com uma solução de 316g/L de NaCl e 0,96 g/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, recolhendo-se alíquotas da alimentação e do permeado para determinação das concentrações correspondentes e cálculo da rejeição.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Caracterização da salmoura concentrada

A salmoura utilizada como alimentação no processo de nanofiltração foi caracterizada quanto aos seguintes parâmetros físico-químicos: concentração de cloreto de sódio (NaCl), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e pH. A Tabela 1 apresenta os resultados desta caracterização.

**Tabela 1:** Análise química da salmoura a partir dos métodos gravimétricos e titulométricos.

Parâmetro	Resultados
Cloreto de sódio	316 g/L
Sulfato	0,96 g/L
pH	10,5

A concentração de cloreto de sódio e sulfato foram 316 g/L e 0,96 g/L, respectivamente. Já o pH foi igual a 10,5. A medição do pH foi necessária, de acordo com descrição do fabricante, a membrana deve ser operada em uma faixa de pH entre 2 e 11. Valores de pH menor ou maior que o especificado poderia causar danos a sua estrutura. Segundo Nath (2000), o pH pode afetar a eficiência, os sítios das membranas de NF (grupo carboxílico e sulfônico) estão carregados negativamente em pH neutro ou maior porém, perde esta carga em pH ácido. A maioria das membranas de NF e osmose inversa (OI) tem menor rejeição em pH baixo ou, após lavagem ácida. O pH pode ser responsável pela mudança das características da solução de alimentação, alterando assim a eficiência da membrana, como por exemplo, a mudança da solubilidade e dissociação dos íons.

#### 3.2. Testes de nanofiltração

Para iniciar o teste com a membrana, primeiramente foi necessário um processo de compactação, que consistiu em submeter à membrana a maior pressão que seria utilizada no processo, que neste experimento foi de 12 kgf/cm<sup>2</sup>. Esta compactação é descrita como uma deformação irreversível na membrana.

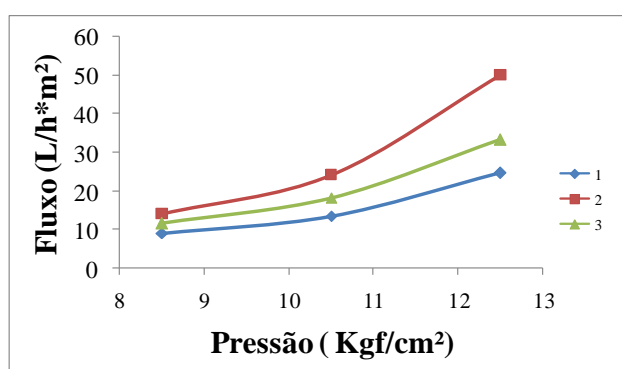
Após a etapa de compactação da membrana o sistema foi mantido a pressão de 12 kgf/cm<sup>2</sup> e iniciou-se a coleta de 200 mL de amostra para a análise. Este procedimento foi executado para as pressões de 10 e 8 kgf/cm<sup>2</sup>. A temperatura durante o processo foi mantida constante em 22°C, pois de acordo com as especificações do fabricante temperaturas superiores a 40° C ocasionaria danos à membrana. Outro parâmetro mantido constante foi a vazão de concentrado, controlada por um inversor de frequência em 40 L/h.

Durante a realização dos experimentos observou-se a variação da vazão de permeado com a pressão aplicada. A Tabela 2 apresenta os valores de fluxo de permeado para cada pressão aplicada. O fluxo de permeado foi obtido pela razão da vazão pela área da membrana utilizada. A área da membrana  $0,0028 \text{ m}^2$  foi determinada a partir do diâmetro do módulo de filtração.

**Tabela 2:** Fluxo do permeado.

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Fluxo (L/h*m <sup>2</sup> ) (1)	Fluxo (L/h*m <sup>2</sup> ) (2)	Fluxo (L/h*m <sup>2</sup> ) (3)
12	25	50	33
10	14	24	18
8	9	14	12

De acordo com a literatura estudada (FRARÈS *et al.*, 2005), esta relação entre fluxo e pressão era esperada, como pode ser observado no Figura 4. Como o processo de nanofiltração utiliza o gradiente de pressão quando se trata do solvente puro, o fluxo de permeado é proporcional ao próprio gradiente de pressão. Mas neste caso, como se trata de uma solução concentrada outros fatores como o *fouling* e a polarização de concentração devem ser considerados.



**Figura 4:** Relação entre o fluxo do permeado e a pressão durante os testes.

As curvas acima demonstram uma relação entre o fluxo e a pressão dos três testes realizados, onde a análise 1 apresentou um menor fluxo em relação aos demais. A explicação para este fato está relacionada com a compactação da membrana, pois a cada teste foram com amostras diferentes da NF90-4040, podendo assim, caracterizar deformações diferentes ocasionando alteração no fluxo e consequentemente na taxa de rejeição.



### 3.3. Concentração de sulfato e cloreto de sódio no permeado

Os valores de concentração obtidos para sulfato e cloreto de sódio no fluxo de permeado através de métodos gravimétricos e titulométricos podem ser observados na Tabela 3. Todos os resultados foram expressos em termos de gramas de soluto por litro de solução.

**Tabela 3:** Concentração para cloreto (a) e sulfato (b) de sódio no fluxo de permeado.

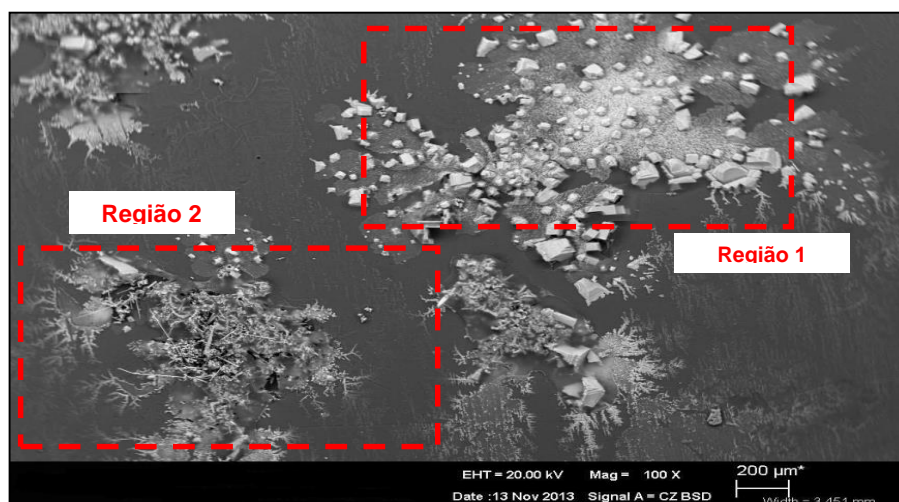
	Cloreto (g/L)			Sulfato (g/L)		
	12 kgf/cm <sup>2</sup>	10 kgf/cm <sup>2</sup>	8 kgf/cm <sup>2</sup>	12 kgf/cm <sup>2</sup>	10 kgf/cm <sup>2</sup>	8 kgf/cm <sup>2</sup>
Teste 1	267,10	268,90	273,50	0,56	0,58	0,56
Teste 2	290,10	287,90	287,40	0,70	0,71	0,70
Teste 3	281,00	278,10	279,40	0,65	0,64	0,66

### 3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise morfológica da membrana de poliamida foi verificada através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Antes da análise a membrana foi conservada em água desmineralizada. Foi realizada uma análise por EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X) da região a fim de detectar a presença de picos nos espectros, confirmando a presença de alguns elementos. A análise foi qualitativa, varrendo assim uma região maior e não pontual da foto gerada, detectando apenas a presença dos elementos de interesse que para este caso foi o enxofre e cloro, denunciando assim, a presença de sulfato e cloreto.

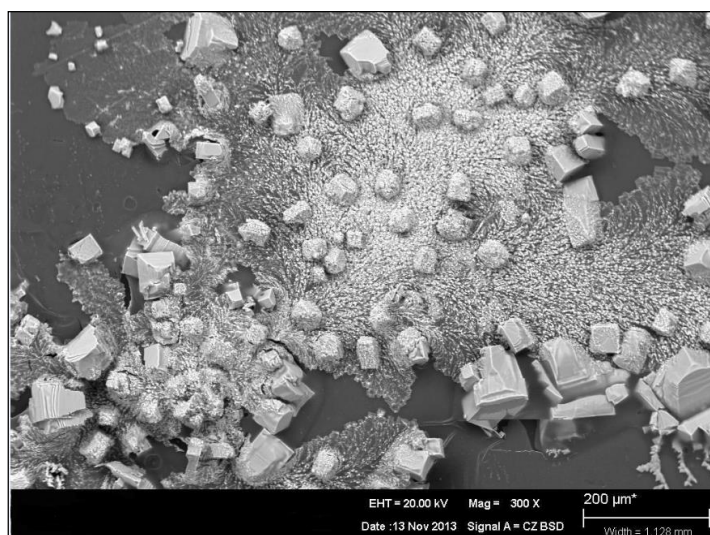
A Figura 5 apresenta uma segunda condição da membrana que, após ser utilizada foi seca naturalmente a temperatura ambiente. Podem-se observar duas regiões de destaque, analisando a micrografia é possível observar a formação de um filme salino na superfície do material. Através desta, é possível concluir que não houve danos na superfície da membrana, nem ruptura, o que também pode ser confirmado pelo fluxo que se manteve constante durante os testes. Pelo fato da compactação ter sido realizada com a própria amostra e não com outro solvente como a água, houve maior deposição na superfície da membrana dos cristais presentes na amostra, portanto, quando a carga foi utilizada para iniciar o experimento houve a formação da polarização de concentração. Isto é claramente observado com a deposição dos cristais na superfície da membrana.

As incrustações ou *fouling* não puderam ser visualizadas com clareza, uma vez que a seção transversal não pode ser analisada. Também pode-se verificar ao longo do processo que não houve redução do fluxo levando assim, a uma conclusão de que não houve formação de *fouling*.



**Figura 5:** Micrografia eletrônica de varredura (MEV) com uma visão geral da membrana seca naturalmente após sua utilização com um aumento de 100x.

A região 1 pode ser observada com mais detalhes na Figura 6 (a), onde a morfologia dos cristais apresentam-se de forma bem definida. Houve também formação de cristais apresentando-se em formas de agulhas e dendritos (b), que podem representar as diferentes fases dos cristais de sulfato e cloreto. Pode-se observar que as perfurações encontradas estão no filme salino formado, caracterizando assim a integridade da membrana ou seja, não foi ocasionada nenhuma ruptura ou danos a mesma.



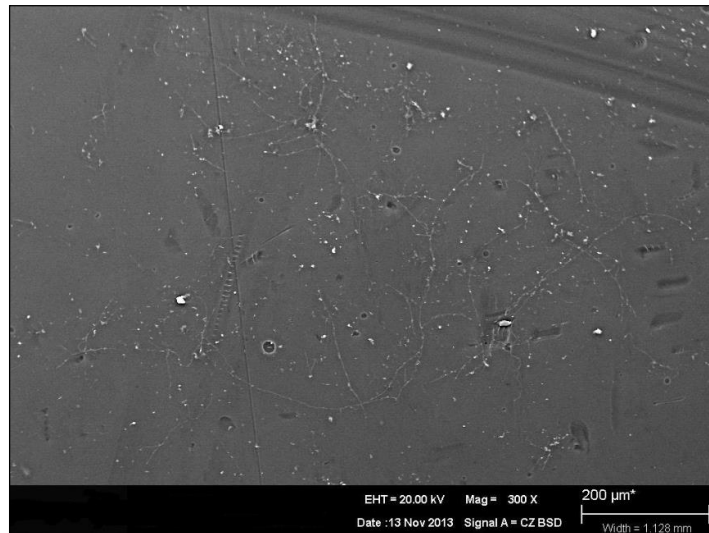
(a)



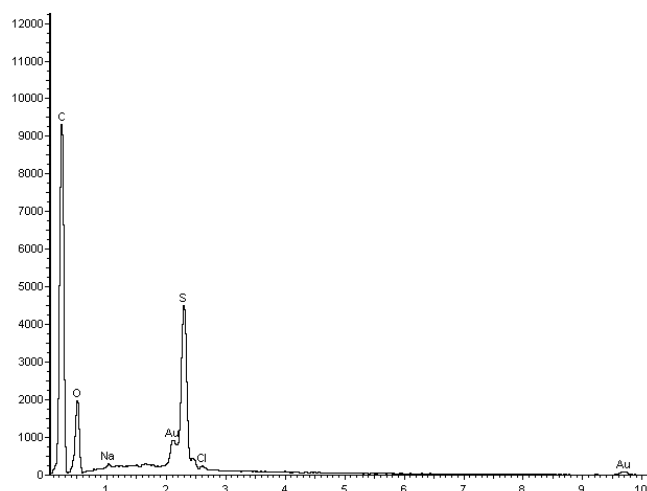
(b)

**Figura 62:** Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da região 1 (a) e região 2 (b) da membrana seca naturalmente após sua utilização com um aumento de 300x.

A Figura 7 apresenta a fotomicrografia da membrana conservada em água desmineralizada (a) e o EDS (b) da mesma. Pode observar na fotomicrografia que não existe a presença dos cristais como observado na membrana seca naturalmente, a explicação provável para este fato deve-se a diluição dos mesmo pela água desmineralizada. Os picos do EDS denunciam a presença de sulfato e cloreto.



(a)



(b)

**Figura 7:** Micrografia da membrana conservada em água desmineralizada, após sua utilização com um aumento de 300x (a) e EDS da mesma(b).

### 3.5. Cálculo da rejeição

A partir dos resultados de concentração da corrente de alimentação e da corrente de permeados (Tabela 3), realizou o cálculo da rejeição para sulfato e cloreto de sódio em todas as pressões (Equação 4).

$$R = 100 \times \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

R, é a rejeição (%)

$C_p$ , é a concentração do componente no permeado (g/L);

$C_a$ , é a concentração do componente na alimentação (g/L).

Após a análise dos dados de rejeição, observou que a membrana utilizada apresentou resultado satisfatório para sulfato e cloreto de sódio como é apresentado na Tabela 4.

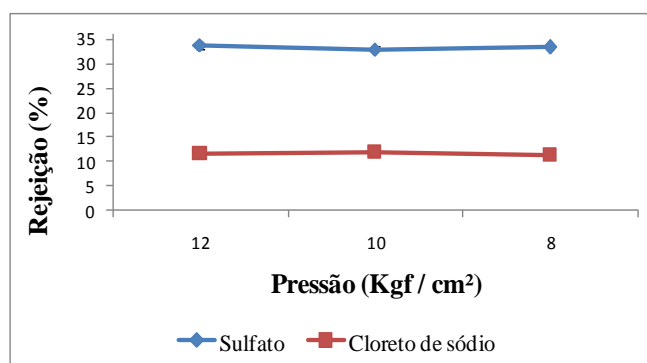
**Tabela 4:** Rejeição de cloreto de sódio e sulfato.

Teste	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rejeição para SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Rejeição para NaCl
Teste 1	12	42%	15%
	10	40%	15%
	8	42%	13%
Teste 2	12	27%	8%
	10	26%	9%
	8	27%	9%
Teste 3	12	32%	11%
	10	33%	12%
	8	31%	12%

Levando em consideração a capacidade de remoção da membrana segundo a especificação do fabricante, em torno de 97% de rejeição de sulfato, obteve-se após os testes uma rejeição de 33% de sulfato e 12% de cloreto. O processo utilizado possui algumas considerações que devem ser observadas, como: o tipo de operação (batelada), o tempo de compactação da membrana no módulo de operação, a pressão e a polarização de concentração. Portanto, observando estas considerações e a capacidade da membrana pode-se justificar a baixa remoção de sulfato e a moderada rejeição de cloreto.

### 3.6. Efeito da pressão

Na Figura 8, observa-se que para todas as pressões a rejeição manteve-se praticamente linear tanto para sulfato como para cloreto de sódio.



**Figura 8:** Pressão e a rejeição da membrana para o cloreto de sódio e o sulfato.

Relacionando o experimento com a literatura (GANG *et al.*, 2011), esperava-se o aumento da rejeição quando aplicada uma pressão maior, concluindo a relação de proporcionalidade entre rejeição e pressão. Porém, não foi observada esta relação. Alguns fatores como o tipo de operação (batelada), o tempo de compactação da membrana no módulo de operação, a pressão e a polarização de concentração, poderia ter contribuído para este resultado.

## 4. Conclusão

Através deste trabalho foi possível confirmar que a nanofiltração é um processo eficiente para remoção de sulfato de sódio em plantas de celulose e papel.

Através da variável pressão, foi observada a redução do fluxo de permeado em um sistema de único passe. Verificou-se que uma pressão de 8 bar já foi suficiente para remover o sulfato a um teor desejável. Uma alternativa para aumentar a rejeição seria a realização do

processo em múltiplos passes. Em relação ao cloreto de sódio, houve uma rejeição significativa (12%), ou seja, acima do descrito na literatura.

Com o MEV/EDS foi possível confirmar a presença de sulfato e cloreto na superfície da membrana e concluir que houve polarização de concentração sem que houvesse o fenômeno de *fouling*/incrustações. Foi possível observar a deposição dos cristais denunciados não só pelas micrografias eletrônicas de varredura, mas também pelo EDS, com maior formação pelo fato da compactação ter sido realizada com a própria carga e não com soluto diferente como a água.

## 5. Agradecimento

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da COPPE/ UFRJ pela realização dos experimentos no Laboratório de Membranas (PAM).

## 6. Referências

- ALVES, T. L. 2006. *Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação*. Dissertação de Doutorado, Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- BESSARABOV, D., TWARDOWSKI, Z., CHEMETICS, K. 2002. Industrial application of nanofiltration new perspectives. *Membrane Technology*, 9, 6-9.
- BRIEN, T. F., BOMMARAJU, T. V., HINE, F. 2007. *Handbook of Chlor-Alkali Technology*, Springer Science & Business Media.
- CHEMETICS INTERNATIONAL COMPANY. 1993. *Manual de Operação, planta de Clorato de sódio*, Vancouver.
- FRARÈS, N. B., TAHA, S., DORANGE, G. 2005. Influence of the operating conditions on the elimination of zinc ions by nanofiltration. *Desalination*, 185, 245-253.
- GANG, L., XIA, C., FANG, C. 2011. Study of the application of nanofiltration membrane in the SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> removal of sodium sulfate-type brine. *IEEE*, 1464-1467.
- HABERT, A. C., BORGES, C. P., NÓBREGA, R., OLIVEIRA, D. R. 2005. *Fundamentos e Operação dos Processos de Nanofiltração e Osmose Inversa*.
- LAKSHMANAN, S., MURUGESAN, T. 2014. The chlor-alkali process: Work in Progress. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, 225-234.
- LE, N. L., NUNES, S. P. 2016. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 7, 1–28.
- MADAENI, S., KAZEMI, V. Treatment of saturated brine in chlor-alkali process using membranes. 2008. *Separation and Purification Technology*, 61, 68-74.
- NATH, K. 2000. *Membrane separation processes*. New Delhi: Prentice-Hall of India.

PENDERGAST, M. T. M., NYGAARD, J. M., GHOSH, A. K., HOEK, E. M. V. 2010. Using nanocomposite materials technology to understand and control reverse osmosis membrane compaction. *Desalination*, 261, 255–263.

SHON, H. K., PHUNTSHO, S., CHAUDHARY, D. S., VIGNESWARAN, S.; CHO, J. 2013. Nanofiltration for water and wastewater treatment a mini review. *Drinking Water Engineering and Science*, 6, 47-53.