



## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE ELETRODIÁLISE COM MEMBRANAS DE TROCA IÔNICA PRODUZIDAS EM ESCALA PILOTO

Laura Bittencourt Rodrigues – [rodrigueslaurab@gmail.com](mailto:rodrigueslaurab@gmail.com)

Universidade Feevale – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas  
ERS-239, 2755 - CEP 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Naiara Camila Martins – [naiara.martins@gmail.com](mailto:naiara.martins@gmail.com)

Universidade Feevale – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

Michel Vinícius Flach – [michelflach@feevale.br](mailto:michelflach@feevale.br)

Universidade Feevale – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

Ricardo Martins de Martins - [ricardomartins@feevale.br](mailto:ricardomartins@feevale.br)

Universidade Feevale – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

Marco Antônio Siqueira Rodrigues - [marcoantonio.marco@gmail.com](mailto:marcoantonio.marco@gmail.com)

Universidade Feevale – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

**Resumo:** O sistema de eletrodiálise apresenta-se como uma alternativa para o tratamento de água e efluentes através de uma tecnologia limpa e eficiente. Membranas poliméricas de troca iônica para aplicação neste sistema vêm sendo desenvolvidas junto à Universidade, visando estabelecer uma tecnologia para fabricação nacional das mesmas. Foram produzidas, em escala piloto, membranas catiônicas e aniônicas, através do método de laminação por espalmagem. Após a caracterização das membranas produzidas, estas foram aplicadas em um sistema de eletrodiálise piloto, com o objetivo de observar-se seu comportamento frente a variações de operação. Foram realizados ensaios com aplicação de tensões elétricas correspondentes a 300 e 500 V durante 3 dias, e o desempenho do sistema avaliado pela relação entre a condutividade removida do efluente e a corrente elétrica medida no sistema. Observou-se que a operação do sistema na tensão de 500 V apresentou melhores resultados de remoção de espécies iônicas. Entretanto, ao relacionar-se os dados obtidos com a corrente elétrica do sistema, concluiu-se que a condição de operação em 300 V otimiza o sistema, sendo necessários menores gastos de energia para a redução de condutividade do efluente.

**Palavras-chave:** Eletrodiálise. Membranas heterogêneas. Tratamento de efluentes. Troca iônica.



## PERFORMANCE EVALUATION OF AN ELECTRODIALYSIS SYSTEM USING ION EXCHANGE MEMBRANES PRODUCED IN PILOT SCALE

**Abstract:** *The electrodialysis system is presented as an alternative for water and wastewater treatment, being a clean and efficient technology. Polymeric ion exchange membranes for this system have been developed by the University, aiming the establishment of a technology for its national production. Cationic and anionic membranes have been produced on a pilot scale, through coating method. After the produced membranes were characterized, they were installed in a pilot electrodialysis system, and its performance evaluated facing operation variations. Assays were performed by the application of voltages corresponding to 300 to 500 V for 3 days, and the system performance was evaluated by the ratio between the conductivity removed from effluent and the electrical current measured in the system. It was noticed that the system operation in 500 V presented a better removal of ionic species. However, by relating it to the data obtained from the electric current of the system, it was concluded that the operation condition of 300 V optimizes the system, requiring less energy to reduce the effluent's conductivity.*

**Keywords:** *Electrodialysis. Heterogeneous membranes. Ion exchange. Wastewater treatment.*

### 1. INTRODUÇÃO

O tratamento e reaproveitamento de água são questões amplamente discutidas atualmente, sendo o foco de inúmeros estudos científicos. Além disto, é constante a busca por processos e tecnologias consideradas limpas, apresentando menor consumo de energia e geração de resíduos. Dado este cenário, o processo de separação por membranas através de eletrodialise (ED) é considerado promissor, muito em função de sua ampla gama de aplicações. O sistema de ED pode ser utilizado na geração de água potável a partir da dessalinização, sendo ainda aplicado na concentração, transporte e separação de íons nas mais diversas áreas, desde o tratamento de efluentes e águas industriais até em indústrias como a alimentícia, farmacêutica e química (GARCIA-VASQUEZ *et al.*, 2013; STRATHMANN, 1995).

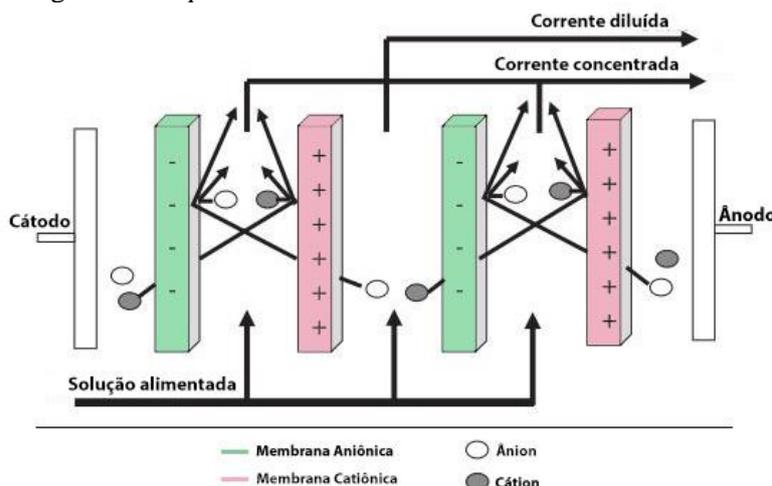
Embora este processo já venha sendo utilizado no Brasil, ainda não há produção nacional em larga escala das membranas de troca iônica. Assim, todas as membranas comercializadas no país são importadas, gerando custos mais elevados para a implantação do processo (MÜLLER, 2013), realidade que impulsiona o estudo, desenvolvimento e validação de uma tecnologia de produção destas membranas. Uma vez definidos os parâmetros de formulação e produção, deu-se a produção em escala industrial de membranas heterogêneas à base de PVC de troca aniônica e catiônica, a partir do método de laminação por espalmagem. As membranas produzidas foram instaladas em sistema de eletrodialise piloto, localizado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Limpas da Universidade Feevale, e submetidas a dois ensaios contínuos por um período de três dias cada, alterando-se entre estes a tensão elétrica aplicada ao sistema. A planta de eletrodialise foi monitorada através da variação de condutividade mensurada nos fluxos de produto e rejeito ao longo de ciclos de 15 minutos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento das membranas de troca iônica produzidas aplicadas em sistema de eletrodialise, frente a diferentes aplicações de tensão elétrica: 300 V e 500 V, com base na razão entre remoção percentual de condutividade do produto e corrente elétrica mensurada no sistema por área de membrana. A planta foi operada em sistema paralelo entre os dois *stacks* (conjuntos de eletrodos e membranas) componentes da mesma, sendo estes avaliados separadamente, obtendo-se ainda os parâmetros de avaliação para o sistema como um todo.

## 1.1. Eletrodialise

A eletrodialise consiste em um processo de separação de espécies iônicas em solução aquosa, combinando a ação íon-seletiva de membranas poliméricas com uma diferença de potencial elétrico (ANADÃO, 2010; NAGARALE *et al.*, 2004). Conforme esquematizado na Figura 1, o sistema de eletrodialise consiste em uma sequência de membranas aniônicas e catiônicas dispostas alternadamente e posicionadas entre dois eletrodos.

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um sistema de ED.



Fonte: Adaptado de (NAGARALE *et al.*, 2004).

Quando uma solução contendo íons é alimentada no sistema e o mesmo está sob ação de um campo elétrico, os cátions presentes no meio migram em direção ao cátodo, enquanto os ânions em direção ao ânodo. A função das membranas no sistema é criar uma barreira de forma a permear apenas um tipo de íon, criando soluções concentradas e soluções diluídas conforme mostrado no esquema (NAGARALE *et al.*, 2004; TANAKA, 2015).

## 1.2. Membranas poliméricas de troca iônica

Uma membrana polimérica pode ser descrita como uma barreira seletiva situada entre duas fases, possuindo a capacidade de permitir, restringir e selecionar a passagem de determinadas espécies químicas presentes na mistura alimentada ao sistema, quando a este é aplicada uma força motriz (ANADÃO, 2010; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). No caso de um sistema de eletrodialise, o transporte de íons ocorre pela diferença de potencial existente entre os eletrodos. Assim, as membranas separam as correntes concentradas e diluídas, sendo permeadas pelos íons de carga oposta àquela presente em sua estrutura. A eficiência do processo de eletrodialise é dependente das propriedades das membranas de troca iônica, como seletividade, resistência elétrica, estabilidade mecânica e química (GARCIA-VASQUEZ *et al.*, 2013; NAGARALE *et al.*, 2004; VOGEL; MEIER-HAACK, 2014).

Para que a separação dos íons em uma ED ocorra, o polímero base das membranas deve receber a adição de grupos funcionais, que agem como um caminho para o transporte de íons. Dependendo do grupo funcional presente em sua estrutura, uma membrana poderá ser de troca catiônica ou aniônica, de acordo com a Tabela 1.



Tabela 1. Características de membranas de troca iônica.

Membrana	Principais grupos funcionais	Íons transportados
Catiônica	Ácidos sulfônicos (-SO <sub>3</sub> H) Ácidos carboxílicos (COOH) Ácidos fosfônicos (-PO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	Cátions
Aniônica	Amônia quaternária (-NR <sub>3</sub> <sup>+</sup> )	Ânions

Adaptado de (VOGEL; MEIER-HAACK, 2014).

Além desta classificação, membranas poliméricas de troca iônica podem ser classificadas em relação à sua microestrutura, podendo ser consideradas homogêneas ou heterogêneas (TANAKA, 2015). Membranas homogêneas têm como principal característica o fato de seus grupos funcionais estarem diretamente ligados à cadeia do polímero que compõe a membrana, sendo distribuídos de forma uniforme ao longo do material. Esta incorporação pode ocorrer por intermédio de reações químicas e processos que visam a funcionalização do polímero (MÜLLER, 2013). Segundo Vyas *et al.* (2000), esta distribuição confere à membrana homogênea excelentes propriedades eletroquímicas, mas seu processo de fabricação tem como consequência propriedades mecânicas inferiores às das membranas heterogêneas.

Por outro lado, as membranas heterogêneas são formadas a partir da mistura de um polímero base (como polietileno, poli(cloreto de vinila), polipropileno ou outros plásticos de engenharia) e uma resina de troca iônica finamente moída. A resina escolhida contém em sua estrutura os grupos funcionais responsáveis pela seletividade e transporte de íons, e quando agregadas à matriz polimérica, conferem a capacidade de troca aniônica ou catiônica (SATA, 2004). Apesar das excelentes propriedades mecânicas, este tipo de membrana possui propriedades eletroquímicas inferiores às homogêneas (VYAS *et al.*, 2000), o que leva a uma constante busca por formas de aprimorar seu desempenho.

## 2. METODOLOGIA

As membranas íon seletivas avaliadas neste estudo foram produzidas a partir de formulação e parâmetros de processo desenvolvidos na Universidade Feevale. A matriz polimérica das membranas foi composta de poli(cloreto de vinila) (PVC), e a ela adicionaram-se plastificantes, agente dispersante e agente redutor de viscosidade, de forma a melhorar as condições de mistura e ajustar a viscosidade da mesma. À mistura obtida foi adicionada a resina de troca iônica micronizada, responsável pelas propriedades íon-seletivas da membrana.

Uma vez definidas as condições ideais de processamento, ocorreu a produção em escala industrial de um lote piloto de membranas, através da tecnologia de laminação por espalmagem. Tal método utiliza-se de elevadas temperaturas de processamento, substituindo assim o uso de solventes potencialmente poluentes e/ou carcinogênicos. Sendo assim, considera-se que o método de fabricação aplicado é não poluente e não agressivo à saúde humana.

### 2.1 Caracterização das membranas

A caracterização inicial das membranas obtidas foi realizada em relação à condutividade e capacidade de troca iônica, parâmetros posteriormente comparados com aqueles obtidos para membranas comerciais.



### Condutividade

A condutividade das membranas foi calculada a partir de valores de resistividade, obtidos em equipamento Solartron SI 1260, com módulo Zplot<sup>®</sup>. Uma amostra retangular de cada membrana foi posicionada em uma célula eletroquímica, ocorrendo varreduras em frequências entre 1Hz e 1.10<sup>7</sup>Hz. A temperatura foi mantida em 20°C, e a umidade relativa em 100%. A Equação 1 foi utilizada para determinação da condutividade.

Equação (1)

$$\sigma = \frac{C}{R \cdot E \cdot L}$$

Sendo:  $\sigma$  a condutividade iônica (S/cm); C o comprimento da amostra na célula (cm); R a resistividade medida no ensaio (ohm); E a espessura da amostra na célula (cm) e L a largura da amostra na célula (cm).

### Capacidade de troca iônica

O ensaio de capacidade de troca iônica visa determinar o número de íons H<sup>+</sup> por grama de membrana seca, indicando a quantidade de sítios ativos para troca iônica disponíveis na estrutura. Uma amostra da membrana é mantida em estufa a 40°C durante 24 horas, obtendo-se sua massa seca. A membrana aniônica é equilibrada em água destilada durante 72 horas, e então imersa em 50mL de KOH 1M durante 48 horas. Este procedimento faz com que os íons presentes sejam convertidos na forma de OH<sup>-</sup>. Passado este tempo, a membrana é retirada da solução e lavada com água destilada, de forma a remover o excesso de KOH. A membrana é então imersa em uma solução de HCl 0,02M (50mL volumétricos), durante 24 horas. O número de íons H<sup>+</sup> presentes na solução é determinado através de uma titulação com NaOH 0,005M. O valor de miliequivalentes de H<sup>+</sup>/grama de membrana seca é calculado a partir da equação 2.

Equação (2)

$$CTI = \frac{N^{\circ} \text{ de Eq HCl}_{\text{inicial}} - N^{\circ} \text{ de Eq HCl}_{\text{final}}}{\text{Massa de Membrana Seca}}$$

Sendo CTI a capacidade de troca iônica, dada em miliequivalentes de H<sup>+</sup>/grama de membrana seca, N<sup>o</sup> de Eq HCl<sub>inicial</sub> o valor obtido com a titulação de 50mL de HCl 0,02M (branco) e N<sup>o</sup> de Eq HCl<sub>final</sub> o valor de titulação da solução na qual foi imersa a membrana.

A CTI de membranas catiônicas é determinada por um procedimento semelhante, variando-se as soluções utilizadas. A amostra da membrana é imersa em uma solução de HCl 1M por 72 horas, responsável pela conversão dos íons presentes à forma H<sup>+</sup>. Passado este período, o excesso de ácido é removido com água deionizada, e a membrana é imersa em uma solução de NaCl 1M durante 48 horas, com o objetivo de trocar os íons de hidrogênio pelos de sódio. A quantidade de H<sup>+</sup> presente na solução é determinada através de titulação com NaOH 0.005M, e indica a proporção de sítios ativos presentes na membrana testada. A equação 3 apresenta o cálculo da capacidade de troca iônica de uma membrana catiônica.

Equação (3)

$$CTI = \frac{\text{Concentração NaOH} \times \text{Volume NaOH}}{\text{Massa Membrana Seca}}$$



Desta forma, a capacidade de troca iônica será expressa em miliequivalentes de H<sup>+</sup> por grama de membrana seca.

## 2.2 Aplicação em sistema de eletrodialise

As membranas produzidas foram submetidas a sequências de testes em sua aplicação final, um sistema de eletrodialise. A unidade piloto, modelo EDR 2 - 300 1E 1s 2e, Hidrodex<sup>®</sup>, opera com capacidade de 2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, possuindo dois *stacks* com um total de 300 membranas. Cada *stack* é instalado contendo 75 membranas aniônicas e 75 membranas catiônicas, além de espaçadores de polipropileno entre cada membrana. Este conjunto é disposto entre dois eletrodos de titânio. A unidade piloto permite a reversão da polaridade dos eletrodos em ciclos programados. Nos experimentos realizados, a reversão ocorreu a cada ciclo de 15 minutos de operação.

Os experimentos foram realizados utilizando-se como efluente no sistema uma solução de sulfato de sódio com condutividade próxima a 950  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . As membranas foram avaliadas em relação à remoção de condutividade do efluente, indicando a separação dos íons presentes no mesmo através da formação de uma corrente concentrada, contendo os íons removidos, e uma segunda corrente, diluída, que apresenta baixa condutividade. O sistema foi operado em modo paralelo, no qual os *stacks* funcionam de forma independente, com recirculação total, condição na qual as correntes de concentrado e diluído retornam ao tanque de alimentação após passagem pelo sistema. Assim, é possível manter o nível e concentração do efluente em uma condição constante.

Neste trabalho, avaliou-se a remoção percentual de condutividade do efluente, relacionando-a à corrente elétrica mensurada no sistema quando exposto a duas tensões elétricas distintas: 300 V e 500 V. O sistema operou de forma contínua durante três dias para cada tensão elétrica aplicada, sendo realizadas medições de condutividade nas correntes de concentrado e diluído dos *stacks* 1 e 2 ao longo de ciclos de 15 minutos. Em cada dia de ensaio foram monitorados entre 4 e 8 ciclos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a caracterização das membranas produzidas em escala piloto permitiram a comparação das mesmas com membranas comerciais disponíveis no mercado, cujas características são conhecidas.

### 3.1 Condutividade

Os valores de condutividade calculados são apresentados na Tabela 2, juntamente com os valores das membranas comerciais utilizadas como comparativo.

Tabela 2 – Valores de condutividade das membranas produzidas e comerciais.

Tipo	Membrana	Condutividade ( $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
Troca aniônica	Piloto	6,91E <sup>-05</sup>
	Comercial	3,75E <sup>-03</sup>
Troca catiônica	Piloto	1,17E <sup>-05</sup>
	Comercial	1,72E <sup>-03</sup>

Os dados indicam que as membranas produzidas em escala piloto são menos condutivas que as membranas comerciais. Este parâmetro está relacionado à quantidade de energia necessária



para que os íons sejam transportados através da membrana, uma vez que quanto menor a condutividade, maior a resistividade do material.

### 3.2 Capacidade de troca iônica

A capacidade de troca iônica (CTI) está relacionada à quantidade de sítios ativos presentes por unidade de massa de membrana. Este parâmetro está relacionado às propriedades da resina de troca iônica utilizada, como quantidade, tamanho de partícula e dispersão. A Tabela 3 apresenta os valores de CTI obtidos para as membranas produzidas e comerciais.

Tabela 3 – Valores de CTI das membranas produzidas e comerciais.

Tipo	Membrana	CTI (meq.g <sup>-1</sup> )
Troca aniônica	Piloto	1,09
	Comercial	1,88
Troca catiônica	Piloto	1,10
	Comercial	2,60

Os valores de CTI calculados para as membranas produzidas encontram-se próximos aos das membranas comerciais, com diferença um pouco maior na membrana de troca catiônica. Tal resultado permite inferir que as membranas produzidas possuem propriedades de troca iônica proporcionais às comerciais, indicando que estas podem ser aplicadas em sistema de eletrodialise piloto.

### 3.3 Avaliação do sistema de eletrodialise

Após a instalação das membranas produzidas em um sistema de eletrodialise piloto, foram monitorados ciclos de 15 minutos durante 3 dias, aplicando-se duas tensões elétricas distintas ao sistema: 300 V e 500 V. A partir dos dados coletados, calculou-se o percentual de condutividade removido por cada *stack* (conjunto de membranas) ao longo de cada ciclo, em relação à condutividade inicial do efluente. A Tabela 4 apresenta os valores médios de remoção percentual de condutividade ao longo de 3 dias, para as duas tensões aplicadas.

Tabela 4 – Valores de remoção percentual de condutividade para 300 V e 500 V.

Remoção de condutividade (%) - 300 V			
Dia	Stack 1	Stack 2	Total
1	7,03	8,89	7,96
2	7,37	9,87	8,62
3	5,19	7,02	6,10
Remoção de condutividade (%) - 500 V			
Dia	Stack 1	Stack 2	Total
1	9,20	13,18	11,19
2	10,38	14,41	12,40
3	13,91	18,18	16,05



O valor total de remoção de condutividade corresponde à média dos dois *stacks*, que foram operados em regime paralelo. Percebe-se que o aumento da tensão elétrica aplicada ao sistema tem como consequência um maior percentual de íons removidos do efluente, uma vez que o campo elétrico formado entre os eletrodos é a força motriz para a separação dos íons. Também é possível observar que, em ambos os ensaios, o *stack 2* apresentou resultados superiores de remoção de condutividade.

Para cada tensão elétrica aplicada, o sistema apresenta uma corrente elétrica diretamente proporcional. A corrente elétrica foi mensurada em ambos os *stacks* ao longo dos ciclos, com o auxílio de multímetros conectados aos mesmos. Para uma correta avaliação do desempenho do sistema de eletrodialise, é preciso relacionar os resultados obtidos com a área de membranas de troca iônica presente nos *stacks*, em contato com o efluente. A área total das membranas em cada *stack* foi mensurada em 10,14 m<sup>2</sup>. A partir destes valores, obteve-se a relação entre remoção percentual de condutividade e corrente elétrica por área de membrana, conforme expresso na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre remoção de condutividade, corrente e área de membrana.

Remoção de condutividade por corrente e área de membrana ( $\mu\text{s}/\text{m}^2 \times \text{A}$ ) - 300 V			
Dia	Stack 1	Stack 2	Total
1	0,86	0,95	0,90
2	0,82	1,27	1,05
3	0,60	0,71	0,65
Remoção de condutividade por corrente e área de membrana ( $\mu\text{s}/\text{m}^2 \times \text{A}$ ) - 500 V			
Dia	Stack 1	Stack 2	Total
1	0,87	1,05	0,96
2	0,88	1,04	0,96
3	1,01	1,14	1,08

Levando-se em consideração a corrente elétrica do sistema, é possível perceber que a diferença de resultados entre os ensaios com 300 V e 500 V diminui. Embora haja uma maior remoção de condutividade ao aplicar-se a tensão de 500 V, a alta corrente elétrica proporcional à tensão faz com que a relação final seja diminuída.

É possível observar uma queda de rendimento no terceiro dia de ciclo em 300 V. Tal comportamento pode ser relacionado a oscilações no equipamento e ao fato de, neste dia, terem sido obtidas apenas quatro medições de ciclos. Salvo esta variação, percebe-se que ambas as tensões resultaram em relações próximas de remoção de condutividade, área de membrana e corrente elétrica. Desta forma, pode-se inferir que o sistema esteve em sua melhor condição no ensaio realizado com a tensão de 300 V, no qual foi observada uma relação otimizada entre remoção de condutividade do efluente e corrente elétrica, sendo necessário um menor gasto energético para a operação da planta.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As membranas produzidas em escala piloto pelo projeto apresentaram propriedades de capacidade de troca iônica próximas às membranas comerciais disponíveis no mercado. Sua condutividade, entretanto, manteve-se aquém do valor tido como referência. A caracterização das membranas produzidas foi importante de forma a conhecer seu comportamento antes da aplicação em um sistema de eletrodialise piloto.



Os ensaios realizados na planta piloto de eletrodialise permitiram a observação do comportamento íon-seletivo das membranas frente a um efluente sintético. Em ambas as condições testadas, as membranas realizaram a remoção de condutividade do meio, indicando a separação das espécies iônicas presentes no mesmo.

A comparação entre condições distintas de tensão aplicada ao sistema permitiu a definição de um ponto de operação otimizado, em que a melhor relação entre remoção de íons e corrente elétrica do meio foi encontrada.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem à Universidade Feevale, UFRGS-LACOR, CNPq, CAPES, FAPERGS, FINEP e BNDES pelo apoio à pesquisa.

### REFERÊNCIAS

ANADÃO, P. **Ciência e Tecnologia de Membranas**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

GARCIA-VASQUEZ, W. *et al.* Evolution of anion-exchange membrane properties in a full scale electro dialysis stack. **Journal of Membrane Science**, v. 446, p. 255–265, 2013.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2006.

MÜLLER, F. **Membranas Poliméricas Íon Seletivas Aniônicas e Catiônicas para Uso em Eletrodialise**. Porto Alegre, 105 p., 2013. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

NAGARALE, R. K. *et al.* Preparation and electrochemical characterization of cation- and anion-exchange/polyaniline composite membranes. **Journal of colloid and interface science**, v. 277, n. 1, p. 162–71, 2004.

SATA, T. Preparation of Ion Exchange Membranes. In: **Ion Exchange Membranes: Preparation, Characterization, Modification and Application**. 1. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2004. p. 35–88.

STRATHMANN, H. Electrodialysis and related process. **Membrane separation technology, principles and applications**, p. 213–281, 1995.

TANAKA, Y. **Ion exchange membranes: fundamentals and applications**. 2. ed. Ibaraki, Japan: Elsevier B.V., 2015.

VOGEL, C.; MEIER-HAACK, J. Preparation of ion-exchange materials and membranes. **DES**, v. 342, p. 156–174, 2014.

VYAS, P. V. *et al.* Studies on heterogeneous cation-exchange membranes. **Reactive and Functional Polymers**, v. 44, n. 2, p. 101–110, 2000.