



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia  
Química



Brenda Carolina de Carvalho Gomes

**Avaliação teórica do processo de Eletrodíálise**

Uberlândia

2020

Brenda Carolina de Carvalho Gomes

Avaliação teórica do processo de Eletrodiálise

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química

Área de concentração: Engenharia Química

Orientadora: Profa. Dra. Miriam Maria de Resende

Uberlândia

2020

Brenda Carolina de Carvalho Gomes

Avaliação teórica do processo de Eletrodiálise

Trabalho de Conclusão de Curso  
aprovado como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheiro  
habilitação Engenharia Química  
apresentado à Faculdade de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Uberlândia

Área de concentração: Engenharia  
Química

Banca examinadora:

Profa. Dra. Miriam Maria de Resende

Orientadora  
Faculdade de Engenharia Química/UFU

Profa. Dra. Thamayne Valadares

Avaliadora  
Faculdade de Engenharia Química/UFU

Ms. Marília Silva Rodrigues

Avaliadora  
Faculdade de Engenharia Química/UFU

Uberlândia, 16 de Janeiro de 2020

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado aos meus pais e ao meu marido João Paulo que incentivou e acompanhou todos os momentos ao longo dessa jornada, por ser essencial e fazer com que isso se tornasse possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, que estive comigo não somente nestes anos como universitária, mas em todos os momentos da minha vida, por me dar força e vigor para enfrentar todos os momentos de dificuldade;

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a maior experiência da minha vida até o momento, proporcionando um sentimento de confiança e dever cumprido;

A minha orientadora Miriam Maria de Resende, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas correções e incentivos, por se dedicar tanto a esta instituição e demonstrar tamanha afetividade pela educação;

Aos meus pais Beatriz e Ovando, que me deram apoio e incentivo em todos os momentos de dificuldades, desânimo e cansaço;

Ao meu Marido João Paulo Cardoso por ter me acompanhando e ajudado todo esse tempo, por me dar força e conselhos sempre que eu precisava;

Aos amigos Ana Beatriz e Carlos Eduardo, companheiros nessa jornada, que estiveram presentes em todos os momentos compartilhando experiências, amigos que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida.

Preste atenção aos sinais. As boas oportunidades sempre estão escondidas atrás de um trabalho árduo.

(Carlos Torres)

## **RESUMO**

A eletrodialise é uma técnica de separação por membranas na qual espécies iônicas em solução são transportadas através de membranas seletivas por ação de um campo elétrico. Esse movimento através das membranas faz com que se formem duas soluções: uma mais diluída e outra mais concentrada que a solução inicial. A eletrodialise pode ser utilizada no tratamento de efluente, pois possibilita a recuperação de metais pesados e o reuso da água. O objetivo deste trabalho é fazer uma revisão teórica sobre o processo de eletrodialise e suas principais aplicações. Serão detalhados temas importantes dentro da eletrodialise, mostrando como acontece a separação e os eventuais problemas que podem aparecer. A metodologia utilizada foi uma revisão sistemática da literatura, tendo como ferramenta norteadora, material já publicado sobre o tema; livros, artigos científicos, publicações periódicas e materiais na Internet disponíveis nos seguintes bancos de dados: SCIELO, Periódico CAPES, Google ACADEMICO. Desta forma será possível concluir como acontece todo o processo de eletrodialise, o que acontece em cada etapa do processo e sua importância nos estudos atuais.

Palavras-chave: Eletrodialise; Membranas; Metais; Técnica de separação.

## **RESUMO**

Electrodialysis is a membrane separation technique in which ionic species in solution are transported through selective membranes by the action of an electric field. This movement across the membranes causes two solutions to form: one more dilute and one more concentrated than the initial solution. It can be used in wastewater treatment as it enables the recovery of heavy metals and the reuse of water. The aim of this paper is to make a theoretical review about the electrodialysis process and its main applications. Important topics will be detailed within electrodialysis, showing how separation occurs and any problems that may arise. The methodology used was a systematic literature review, using as a guiding tool, material already published on the subject; books, scientific articles, periodicals, and Internet materials available in the following databases: SCIELO, Periodical CAPES, Google ACADEMICO. Thus it will be possible to conclude how the whole process of electrodialysis happens, what happens each step of the process and its importance in current studies.

**Keywords:** Electrodialysis; Membranes; Metals; Selection technique

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – História da eletrodialise;

Figura 2- Representação do processo de eletrodialise;

Figura 3- Estrutura esquemática de uma membrana;

Figura 4- Densidade de corrente para potencial aplicado sobre empilhamento;

Figura 5 - Curva proposta por Cowan e Brown;

Figura 6 – Exemplo de membrana com Fouling;

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ED - Eletrodiálise

AMF – American Machine and Foudry

EDR – Eletrodiálise Reversa

MEM – Mistura – energia – membrana

$A_{\text{mem}}$  – Área da seção transversal do empilhamento

$e$  – Espessura dos espaçadores

$\Lambda$  – Condutividade da Solução

$N$  – Quantidade de espaçadores

$U$  – Potencial

$E_p$  – Extração percentual

$C_i$  – Concentração de íon no tempo zero

$C_f$  – Concentração de íon no tempo final

$I_{\text{lim}}$  – Corrente Limite

$I$  – Corrente

$V$  – Potencial total

$A$  – Ampéres

$s$  – Segundos

$J_s$  – Fluxo molar

$i$  – Densidade da Corrente

$\tau$  – Constante de Faraday

$C_f$  – Concentração de sal no instante final

$C_i$  – Concentração de sal no instante inicial

$V_f$  – Volume de solução concentrado no instante final

$V_i$  – Volume de solução concentrado no instante inicial

$N'$  – Número de pares de membrana

$\text{Cu}$  – Cobre

$\text{Fe}$  – Ferro

$\text{Ni}$  – Níquel

$\Delta t$  – Variação de tempo

## Sumário

|          |                                                      |    |
|----------|------------------------------------------------------|----|
| 1.       | INTRODUÇÃO .....                                     | 12 |
| 1.1.     | Objetivo Geral .....                                 | 13 |
| 1.2.     | Objetivo específico.....                             | 13 |
| 2.       | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                           | 14 |
| 2.1.     | A eletrodialise .....                                | 14 |
| 2.1.1.   | História da eletrodialise .....                      | 14 |
| 2.1.2.   | Funções da eletrodialise.....                        | 15 |
| 2.1.2.1. | Proposta da eletrodialise .....                      | 15 |
| 2.1.3.   | Princípios da eletrodialise .....                    | 17 |
| 2.1.4.   | Espaçadores .....                                    | 19 |
| 2.1.5.   | Localização da eletrodialise em um processo .....    | 19 |
| 2.1.6.   | Membranas para eletrodialise .....                   | 19 |
| 2.1.7.   | Transferência osmótica da água .....                 | 21 |
| 2.1.8.   | Resistência elétrica aplicada a eletrodialise .....  | 22 |
| 2.1.9.   | Extração percentual .....                            | 23 |
| 2.1.10.  | Polarização por concentração e corrente limite ..... | 23 |
| 2.1.11.  | Eficiência da Corrente .....                         | 26 |
| 2.1.12.  | <i>Fouling</i> das membranas.....                    | 26 |
| 2.1.13.  | Limitações do processo .....                         | 28 |
| 3.       | APLICAÇÕES DA ELETRODIÁLISE .....                    | 29 |
| 4.       | CONCLUSÕES.....                                      | 32 |
| 5.       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                     | 34 |

# 1. INTRODUÇÃO

Os efluentes líquidos são os principais meios de poluição produzidos pelas indústrias de vários seguimentos e estes se não tratados de forma correta, acabam contaminando os rios e causando diversos problemas para o meio ambiente e para os seres humanos. Com isso, vem crescendo de uma forma muito rápida os estudos sobre como minimizar os efeitos dessa forma de poluição e assim o tratamento de efluentes, utilizando membranas, vem ganhando cada vez mais destaque.

Em função da intensa atividade industrial espalhada pelo mundo utilizando os recursos naturais com uma velocidade que a natureza não consegue acompanhar, são inevitáveis que as consequências dessa exploração atinjam todo o planeta, como mudanças climáticas que causam problemas de falta de água em diversas partes do mundo. Assim, a preocupação em tentar reaproveitar a água de todos os lugares se torna cada vez maior e desta forma impulsiona as pesquisas.

Muitas vezes os efluentes a serem tratados estão contaminados com uma alta concentração de metais e os processos de separação convencionais como neutralização, floculação e conversão biológica não são eficientes para remover metais. É necessário utilizar métodos que utilizem membranas como forma de separação como, por exemplo, osmose reversa, eletroeletrólise, ultrafiltração e eletrodiálise (KORZENOWSKI, 1996). Dentre os meios de separação por membranas, a eletrodiálise (ED) vem se tornando cada vez mais importante, ganhando destaque quando comparado com outros métodos.

A ED tem uma abordagem que usa o acionamento elétrico para separar íons através do controle seletivo e transporte de espécies iônicas, sendo esse um diferencial em relação aos outros métodos que são acionados por pressão, apresentando-se pouco eficientes quando precisam separar íons (ALVORADO E CHEN, 2014). A ED apresenta algumas vantagens quando comparada a outros métodos como a não precipitação de íons na forma de hidróxido metálicos, evitando assim custos com transportes e controle de resíduos (GÓMEZ, 1999). Neste tipo de separação, os íons podem ser recuperados diretamente sem passar por transformações químicas (RODRIGUES et al., 1999, DALLA COSTA et al., 1998).

Os métodos de separação que utilizam membranas necessitam de baixa energia para separar materiais dissolvidos, pois a separação ocorre na fase líquida e nenhuma vaporização é requerida, contudo é necessária uma atenção especial na tecnologia de fabricação das membranas. Cada vez mais os pesquisadores estão focando seus estudos na síntese de materiais para o desenvolvimento das membranas (NAGARALE et.al. 2006).

O princípio fundamental por trás de processos acionados eletricamente é a passagem de íons através de uma barreira seletiva (membrana de troca) devido a um gradiente ou força motriz (campo elétrico). A troca de íons nas membranas desempenha um papel crítico nesses processos, pois elas são responsáveis por aceitar ou rejeitar os íons no estabelecimento de compartimentos diluídos e concentrados (STRATHMANN et. al. 2013).

Logo, é possível por meio da eletrodialise tratar grandes volumes de efluentes concentrando num pequeno volume de solução os íons tóxicos, sendo que esses apresentam possibilidades de serem recuperados e voltar ao processo produtivo, principalmente se não ocorrer redução ou oxidação deles durante a técnica (SANTOS, 2016).

Dentre as aplicações possíveis para a eletrodialise pode-se citar a remoção de íons metálicos, sejam eles derivados de metais pesados ou não, de uma solução contaminada. É uma alternativa interessante visto que, para que ocorra a separação não é necessário adicionar outros reagentes, o que minimiza ou elimina a formação de produtos secundários e indesejáveis durante o tratamento de água e/ou efluentes.

## **1.1. Objetivo Geral**

Realizar uma revisão teórica sobre o processo de eletrodialise e suas principais aplicações.

## **1.2. Objetivo específico**

- Estudar a história da eletrodialise;
- Entender a função e os princípios da eletrodialise;
- Conhecer sobre as membranas utilizadas na eletrodialise;
- Compreender a resistência elétrica aplicada na eletrodialise;
- Estudar a polarização por concentração e corrente limite;
- Conhecer a eficiência de corrente da eletrodialise;
- Entender sobre Fouling das membranas;
- Estudar aplicações da eletrodialise;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A ELETRODIÁLISE**

#### **2.1.1. HISTÓRIA DA ELETRODIÁLISE**

O primeiro trabalho produzido em eletrodiálise foi realizado pela Ionics, Inc., e Rohms & Haas no início de 1950. A organização de pesquisa do governo da Holanda também iniciou os trabalhos neste processo ao mesmo tempo. Rohm & Haas, embasaram suas pesquisas em desenhos de resinas trocadoras de íons, fizeram suas membranas pressionando partículas muito finas de resina unidas com polietileno. Em contraste, a Ionics iniciou com poliestireno cruzado para o qual os grupos funcionais eram subsequentemente atacados. Depois de aproximadamente cinco anos, o material estabilizado da Ionics conquistou fortemente o mercado devido à baixa resistência de suas membranas, e Rohm & Haas deixou o mercado (BIRKETT, 1978).

Contudo, o método de dessalinização da água do mar, atraiu novas companhias para a área no final de 1950 e início de 1960. A National Aluminate Company, assistida pela tecnologia de troca iônica da Dow Chemical Company, entrou em campo por meio de sua subsidiária Ionic. American Machine and Foundry (AMF) começou a disponibilizar unidades com alguma tecnologia licenciada da T.N.O. Aqua Chem, Inc., para a produção de unidades de eletrodiálise utilizando membranas AMF. A situação descomplicou em 1964 quando a AMF foi acusada de violação de patentes iônicas e afastou-se como fonte principal de pesquisa (STRATHMANN, 1990).

A mais agressiva atividade estrangeira foi feita pela Asahi Chemical Industries no Japão. A Asahi inicialmente enfocou na concentração da água do mar para produção de sal, mas mais tarde expandiu para o tratamento de água e resíduos. Em abril de 1976, Dow Chemical Company anunciou que gostaria de usar o sistema da Asahi nos Estados Unidos (KORZENOWSKI, 1996).

Durante os primeiros anos o Departamento Americano de água salina apoiou diretamente a pesquisa e desenvolvimento da eletrodiálise para a produção de água potável a partir de água salobra. Novos projetos de desenvolvimento de membranas e processos com a eletrodiálise foram surgindo, pelos países da Europa, Israel e África do sul a maioria em pequena escala (KORZENOWSKI, 1996).

Os primeiros sistemas de eletrodiálise eram todos operados unidirecionalmente, isto é, o ânodo e cátodo tanto quanto as células diluídas e concentradas ficavam fixas

em um arranjo de eletrodialise. Este modo de operação frequentemente levava à formação de sais de baixa solubilidade que precipitavam sobre a superfície da membrana. Isto afetava significativamente a eficiência da eletrodialise e os materiais precipitados sobre a superfície da membrana tinham de ser removidos lavando-os com soluções de limpeza. Casos extremos de impregnação das membranas eram processos economicamente não atrativos. Um significativo progresso no controle da impregnação nas membranas foi obtido com a introdução do modo de operação referido como eletrodialise reversa (EDR). Esta possui o mesmo princípio de ED, apenas a polaridade dos eletrodos é invertida com o objetivo de limpar as membranas.

A EDR foi introduzida pela Ionics, Inc., para produzir continuamente água desmineralizada sem constante adição química durante a operação normal, eliminando assim os principais problemas encontrados em sistemas unidirecionais (STRATHMANN, 1990). A Figura 1 abaixo mostra a evolução da história da eletrodialise simplificada.

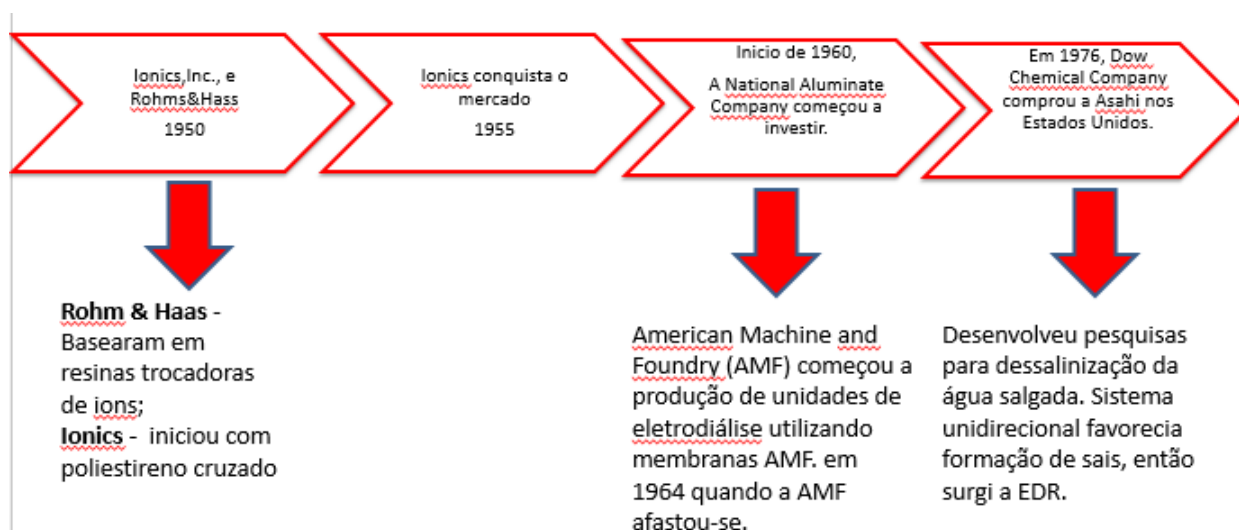


Figura 1 – História da Eletrodialise

Fonte: Autoria Própria

A partir desses estudos o uso da eletrodialise veio se tornando cada vez mais frequente e o número de pesquisas relacionadas a ela aumentou, conseguindo modelos de sistemas mais eficientes e que cada vez apresentam melhores resultados.

## 2.1.2. FUNÇÕES DA ELETRODIÁLISE

### 2.1.2.1. PROPOSTA DA ELETRODIÁLISE

Eletrodialise (ED) é uma das técnicas amplamente utilizada para desmineralização, isto é, dessalinização da água e prévia concentração da água do

mar para evaporação. O uso de membranas trocadoras de íons para concentrar água do mar e para produzir água fresca a partir da água salina tem sido estudado há cerca de 30 anos e tem alcançado agora o estágio prático. Aplicações com muito sucesso para a produção de água fresca utilizando água do mar têm ocorrido nos Estados Unidos e Mediterrâneo. Plantas para a produção de água fresca para uso em caldeiras têm sido construídas no Japão (AUDINOS, 1992).

A produção de água potável é ainda a aplicação industrial mais importante dessa técnica, mas também tem sido amplamente utilizada no setor alimentício na desmineralização do soro de queijo, na remoção da acidez de suco de frutas, na preparação de soluções isotônicas e na estabilização do vinho (VÁSQUEZ-GARZÓN et al. 2011). Esta técnica de separação por membranas apresenta o seu uso em expansão no tratamento de efluentes industriais; pois esse processo pode recuperar sais de metais pesados como o  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$  (DALLA COSTA, 1996; MARDER, 2002; ARRUDA, 2003).

O conceito básico da intersecção mistura-energia-membrana (MEM) é baseado em energia elétrica aplicada a um meio contendo íons em uma solução aquosa, de modo que a separação ocorra na presença de membranas trocadoras de íons. Usado para recuperação de metais na forma de íons em solução, este processo possibilita que soluções de baixa concentração de íons sejam concentradas (KORZENOWSKI, 1996).

Diferente dos processos de difusão como a diálise e de adsorção como os de troca iônica, a eletrodiálise tem a vantagem de recuperar íons em solução em concentrações desejadas e operar como um processo contínuo, e não necessita de qualquer etapa de regeneração, as quais geralmente produzem resíduos líquidos de aproximadamente mesmo volume que a solução tratada. Além disso, a eletrodiálise é usada para eliminar parcialmente espécies não desejadas de íons, e é útil para separar íons com cargas elétricas de mesmo sinal se estas forem distinguíveis pela trilogia MEM (KORZENOWSKI, 1996).

Para os processos de ultrafiltração e osmose reversa, uma propriedade da solução conhecida como pressão osmótica vem a ser um fator limitante dos processos. Pressão osmótica é uma característica de todas as soluções, e é definida como a resistência imposta pelo solvente ao passar livremente através da membrana. A pressão osmótica é uma função do soluto tanto quanto de sua concentração. O processo de eletrodiálise praticamente não é afetado pela pressão osmótica (ALVORADO E CHEN, 2014).

### 2.1.3. PRINCÍPIOS DA ELETRODIÁLISE

A eletrodialise é um processo de separação baseado na migração seletiva de íons em solução através de membranas de troca iônica sob ativação de um campo elétrico, um esquema simplificado do processo pode ser visto na Figura 2, sendo que  $M^+$  representa os cátions e  $X^-$  os ânions. Um sistema de ED consiste em uma série de membranas de troca de ânions e cátions que são espaçados alternadamente entre dois eletrodos, o que resulta na formação de concentrado e compartimentos de solução diluída. A solução circula através de cada compartimento e uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre os dois eletrodos no processo (LLORENS, 1992).

Em resposta à presença do campo elétrico, os cátions migram em direção ao cátodo, enquanto os ânions migram para o ânodo; no entanto, as membranas seletivas interpostas atuam como barreiras à sua migração, o que permitem ou impedem a passagem de íons de acordo com sua carga elétrica. Com o tempo, um dos compartimentos é desprovido de íons (diluído), enquanto o outro se torna mais povoado ionicamente (concentrado) (LLORENS, 1992). Nos compartimentos dos eletrodos, circula uma solução salina chamada de eletrólito, a qual não se mistura com as outras duas (diluída e concentrada), o que não torna necessário a utilização das mesmas espécies iônicas da alimentação. Uma recomendação é não usar sais com  $Cl^-$ , evitando assim a formação do gás cloro ( $Cl_2$ ) (GALUCHI, 2010).

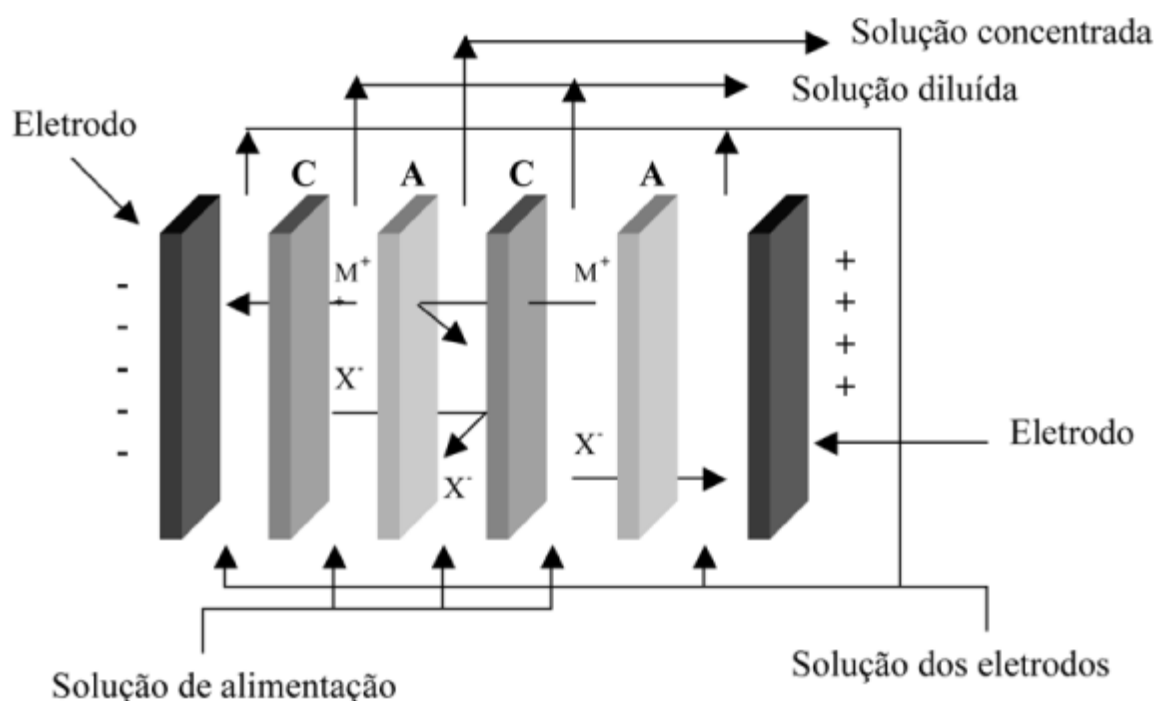


Figura 2 - Representação do processo de eletrodialise

Fonte: (AMORIM et al, 2005).

As reações que ocorrem dentro desses compartimentos são mostradas nas Equações 1 e 2 abaixo:



O fluxo da solução através da membrana durante um processo ED é determinado pelo gradiente de potencial elétrico aplicado. As membranas de troca iônica são permeáveis aos íons porque possuem uma matriz composta por resina de troca iônica sintética. A matriz polimérica da membrana contém grupos funcionais fixos que são eletricamente carregados (íons), enquanto que os íons móveis intercambiáveis (chamados contraíons) residem nos espaços porosos. Esse arranjo serve para manter o equilíbrio elétrico dentro da matriz. Dessa forma, existe um campo elétrico que é suficiente para superar as forças que restringem os íons móveis e os íons que entram nos poros da solução para substituir as cargas, possibilitando a passagem seletiva de íons (ALVORADO E CHEN, 2014).

Se a matriz é carregada positivamente, os contra-íons são negativos e, portanto, permeáveis aos ânions. Com a aplicação de um campo elétrico, eles substituem os contra-íons e as cargas fixas da matriz, impedindo a passagem de cátions (íons com a mesma carga dos grupos fixos), neste caso os cátions. Caso contrário, se a matriz polimérica tiver cargas negativas fixas, o contra-íon será positivo e, portanto, a membrana será permeável a cátions e impermeável a ânions (SATA, 2004; TANAKA, 2007). A eletrodialise pode ser realizada em processo contínuo ou em batelada. Em um processo contínuo as soluções diluídas e concentradas passam através do sistema apenas uma vez. Como em geral, todas as condições de operação do sistema eletrodialítico são realizadas apenas uma vez, a quantidade de material transferido do diluído para o concentrado são praticamente constante. Como consequência, qualquer mudança no fluxo ou na solução alimentadora age sobre o produto. Em um processo em batelada, uma dada quantidade de solução é deionizada ou concentrada a um valor desejado. Uma vez alcançado esse valor, a solução contida no tanque é descartada. Se apenas uma parte da solução é desmineralizada, misturando-se a parte remanescente com a parte tratada, é possível ajustar a concentração final de toda a solução. Geralmente essa mistura tende a ser mais econômica que o processo contínuo (AUDINOS, 1992).

#### **2.1.4. Espaçadores**

As correntes de alimentação (solução diluída) e a solução concentrada circulam pelo empilhamento de membranas através dos espaçadores, que tem a função de manter a distância apropriada entre as membranas. Esses são feitos de materiais poliméricos, normalmente tem a espessura que varia de 0,5 a 2,0 mm e pode apresentar diferentes formatos, o que altera a turbulência no sistema (SANTOS, 2016).

#### **2.1.5. Localização da eletrodialise em um processo**

A eletrodialise pode ser utilizada antes ou depois da operação principal de um processo. Se utilizada antes da operação principal, a ED age como uma etapa de pré-tratamento. Neste caso, ela pode ser usada para concentrar íons desejados ou eliminar íons indesejados antes de iniciar a etapa principal do processo. Esta pode ser um reator, uma célula, entre outros. Por exemplo, ED é amplamente utilizada em conjunto com processos eletroquímicos, como dissolução ou deposição de metais; se utilizada após a reação principal, a ED pode agir como operação de limpeza, para minimizar o consumo de matérias-primas, reduzindo a poluição (KORZENOWSKI, 1996).

#### **2.1.6. Membranas para eletrodialise**

Segundo JACKSON e colaboradores (1971), as membranas para eletrodialise são membranas trocadoras de íons, as quais são polímeros na forma de lâminas, tendo como sua principal característica a propriedade de escolher entre íons migrantes pelo sinal de sua carga.

As membranas íon-seletivas utilizadas nos processos de eletrodialise são capazes de permitir ou impedir a permeação de uma substância dependendo da carga que esta substância possui. Estas membranas, que são polímeros com ligações cruzadas, apresentam poros de tamanho muito pequeno (de nível molecular), sendo que no interior destes poros encontram-se grupos funcionais positivos ou negativos ligados quimicamente à matriz polimérica. Estes grupos fazem com que as paredes internas dos poros da membrana apresentem cargas elétricas, de modo que ocorra uma interação eletrostática entre estas cargas fixas e os íons que estão na solução. Dependendo do íon ligado à membrana, essa pode ser seletiva a ânions (aniônicas), que contém grupos funcionais carregados positivamente como, por exemplo,  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{RNH}_2^+$ ,  $\text{R}_2\text{NH}^+$ ,  $\text{R}_3\text{N}^+$ ,  $\text{R}_3\text{P}^+$  e  $\text{R}_2\text{S}^+$ , ou seletiva a cátions (catiônicas), que contém

grupos funcionais carregados negativamente como  $\text{AsO}_3^{2-}$ ,  $\text{COO}^-$ ,  $\text{PO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_2^-$  e  $\text{SeO}_3^-$  (SANTOS, 2016).

A espessura de membranas trocadoras de íons comerciais é da ordem de 0.15 a 0.6 mm e a resistência elétrica entre  $3 \times 10^{-4}$  e  $3 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{m}^2$ , a temperatura ambiente e em solução 0.5N de NaCl (KORZENOWSKI, 1996).

Membranas heterogêneas compostas por um polímero com polipropileno e poliestireno têm diversas desvantagens, as mais importantes são a alta resistência elétrica e pouca força mecânica quando inchada em soluções de sais dissolvidos. Membranas trocadoras de íons homogêneas que são formadas por polimerização em blocos por condensação de polieletrólitos, têm características mais positivas neste aspecto, pois as cargas fixas são distribuídas mais homogeneamente sobre a matriz polimérica (STRATHMANN, 1990).

A Figura 3 mostra que, em uma membrana catiônica os ânions fixos estão em equilíbrio elétrico com os cátions móveis (contra-íons) nos interstícios do polímero. Em contrapartida, os ânions móveis (co-íons) são excluídos da matriz polimérica devido à sua carga elétrica, que é igual a dos íons fixos, o que faz com que a membrana catiônica permita a passagem apenas de cátions. Em contrapartida a membrana aniônica exclui os cátions e é permeável somente aos ânions (NOBLE e STERN, 1995).

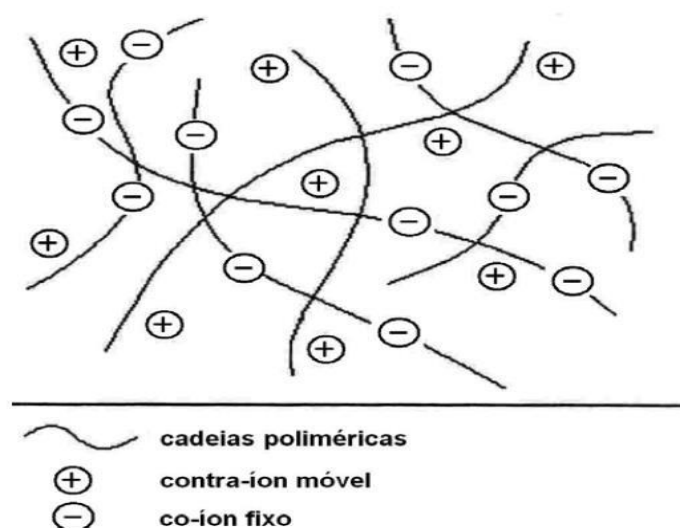


Figura 3 - Estrutura esquemática de uma membrana íon-seletiva catiônica

Fonte: (SANTOS, 2016).

O Quadro 1 mostra resumidamente esta característica íon seletiva das membranas aniônicas e catiônicas

Quadro 1-Diferença entre os tipos de membranas utilizadas em eletrodialise

| <b>Membrana</b> | <b>Carga do íon<br/>fixo na matriz<br/>polimérica<br/>membrana</b> | <b>Íons<br/>permeados</b> | <b>Íons retidos</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Catiônica       | Negativo                                                           | Cátions                   | Ânions              |
| Aniônica        | Positivo                                                           | Ânions                    | Cátions             |

As propriedades mais desejadas para as Membranas íons seletivas são:

- 1) Alta permeseletividade iônica: é a capacidade que a membrana tem de permitir que alguns íons passem mais rapidamente. Essa é uma característica extremamente importante, pois quanto maior a permeseletividade mais eficiente é o processo.
- 2) Baixa resistência elétrica: esta característica está relacionada com o consumo de energia elétrica pela ED, então quanto menor a resistência elétrica para passar os íons, menor será o consumo de energia.
- 3) Alta força mecânica: As membranas devem possuir reforçadores de alta qualidade para evitar danos durante o processo, os reparos necessários durante a operação devem ser facilitados para evitar complicações.
- 4) Alta estabilidade dimensional: as membranas além de reforçadores devem possuir estabilidade dimensional, pois evita que ocorra defeitos durante o processo. As membranas com boa estabilidade dimensional sofrem poucas variações de contração e expansão com a mudança de temperatura.
- 5) Alta resistência química: as membranas devem ser resistentes a vários tipos de soluções, não podendo lascar ou deformar durante o uso (SANTOS, 2016).

### 2.1.7. Transferência osmótica da água

Durante o processo de eletrodialise ocorre transporte de água do compartimento diluído para o concentrado. Isto ocorre devido à hidratação dos íons, difusão, osmose e a gradientes de pressão e temperatura que ocorrem através da membrana. A água, que faz parte da camada de hidratação dos íons que atravessam a membrana, acompanha os íons no processo de passagem, com isso, o fluxo de água é proporcional ao fluxo de íons, e, portanto, proporcional a corrente elétrica aplicada (AUDINOS, 1992; GERING e SCAMEHORN, 1988; DALLA COSTA, 1996).

### 2.1.8. Resistência elétrica aplicada a eletrodialise

Um parâmetro importante para a avaliação da resistência elétrica é a resistência aparente, ela é resultante da soma das resistências das soluções e membranas, como mostra a Equação 3:

$$R_{\text{aparente}} = R_{\text{mem}} + R_{\text{solução}} \quad (3)$$

Mas, as Equações 4 e 5 mostram como é a resistência aparente e a resistência solução, respectivamente:

$$R_{\text{aparente}} = \frac{U * A_{\text{mem}}}{N' * I} \quad (4)$$

$$R_{\text{solução}} = \frac{1}{\Lambda_c * e * N_d} + \frac{1}{\Lambda_d * e * N_c} \quad (5)$$

Segundo Santos (2016),  $R_{\text{aparente}}$  [ $\Omega$ ],  $R_{\text{memb}}$  [ $\Omega$ ],  $R_{\text{solução}}$  [ $\Omega$ ] são as resistências elétricas do empilhamento, das soluções e das membranas, respectivamente.  $U$  [V],  $I$  [A] e  $N'$  é a diferença de potencial entre os dois eletrodos, corrente elétrica e número de pares de membranas, respectivamente.  $A_{\text{memb}}$  [ $\text{m}^2$ ],  $e$  [cm],  $\Lambda$  [ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] e  $N$  representam a área da secção transversal do empilhamento (área útil), a espessura dos espaçadores, a condutividade da solução e a quantidade de espaçadores, respectivamente.

Para processos tipo batelada, a concentração da espécie iônica da alimentação diminui com o passar do tempo. Assim,  $R_{\text{aparente}}$  varia e o potencial ( $U$ ) é constante, então a corrente é representada pela Equação 6:

$$I = \frac{U}{R_{\text{aparente}}} \quad (6)$$

Resistência elétrica de membranas trocadoras de íons é dependente das espécies de eletrólitos, temperatura e espessura da membrana. Essas resistências são normalmente a menor contribuição à resistência total do sistema, mas pode aumentar significativamente se os compartimentos diluído e concentrado são pequenos devido à alta concentração de eletrólitos. Um dos fatores que pode aumentar as resistências das membranas, das soluções diluída e concentrada é a presença de molécula orgânica pesada que atrapalha o fluxo da corrente (SANTOS, 2019).

### 2.1.9. Extração percentual

A extração percentual mostra o quanto de cada espécie iônica de cada solução foi removido pela eletrodialise, sendo função da corrente elétrica aplicada no processo, como mostra a Equação 7.

$$E_p(\%) = \frac{C_f - C_i}{C_i} * 100 \quad (7)$$

Em que  $E_p$  é a extração percentual (%),  $C_i$  é a concentração do íon considerado no compartimento da solução diluída no tempo zero e  $C_f$  é a concentração do íon considerado no compartimento da solução diluída no tempo final. O aumento da extração de íons pela eletrodialise pode ser obtido pelo aumento da densidade de corrente, desde que não se atinja a densidade de corrente limite. Portanto o consumo de energia também vai aumentar (ROCZANSKI, 2006).

### 2.1.10. Polarização por concentração e corrente limite

A polarização em eletrodialise descreve o conjunto de fenômenos que ocorrem quando uma corrente elétrica passa através de uma interface, a uma densidade de corrente maior do que a interface pode prontamente transmitir. Em um processo de eletrodialise, a polarização na interface da membrana-solução ocorre quando a migração de íons através da membrana é mais rápida que o transporte de íons do seio da solução até a membrana (ROCZANSKI, 2006).

A corrente limite ( $I_{lim}$ ) ocorre quando a concentração de íons na superfície das membranas do lado da alimentação tende a zero. Quando uma membrana íon-seletiva é colocada entre duas soluções, a curva dos valores da densidade de corrente *versus* potencial elétrico é composta de três regiões distintas, que permitem identificar a ocorrência de polarização por concentração e a densidade de corrente limite (TANAKA, 1991; TAKY et al., 1992), como mostra a Figura 4.

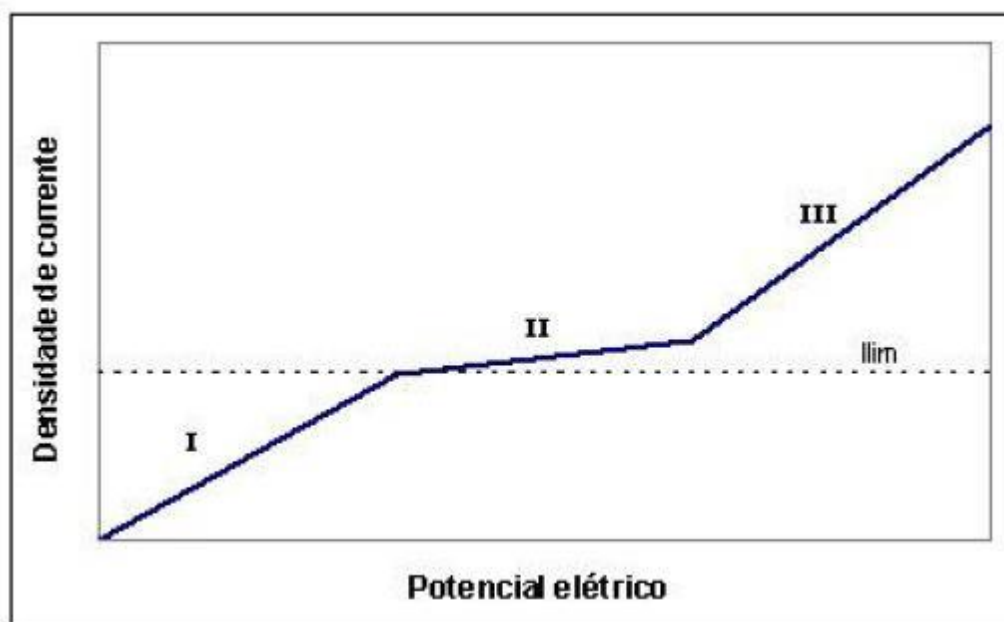


Figura 4- Densidade de corrente para potencial aplicado sobre empilhamento

Fonte:(GALUCHI, 2010).

De acordo com SANTOS 2019, essas três regiões podem ser conhecidas da seguinte maneira:

- 1) Região I – caracterizada por uma variação ôhmica da densidade de corrente *versus* o potencial. Este comportamento pode ser analisado sob a suposição de que um estado de quase equilíbrio é mantido na interface membrana/solução, ocorrendo um acúmulo de íons na superfície da mesma.
- 2) Região II – a corrente varia ligeiramente com a voltagem. Há a estabilidade da corrente na interface membrana/solução, enquanto o potencial aumenta. Tal fato é uma consequência da polarização por transferência de massa: a concentração das espécies iônicas cruzando a membrana tende à zero na camada limite.
- 3) Região III – caracterizada pelo aumento da densidade de corrente que pode ser atribuída à condução da corrente pelas espécies iônicas  $H^+$  e  $OH^-$ , formadas pela dissociação da água.

As plantas de ED devem operar na Região I, onde íons chegam à superfície das membranas em maior quantidade do que atravessam as mesmas. Para garantir a operação de uma planta de eletrodialise nessa região, recomenda-se aplicar ao processo no máximo 80% da corrente limite (GALUCHI, 2010).

A determinação da corrente limite, a partir da curva de potencial elétrico versus densidade de corrente, nem sempre é clara e por causa disso, vários métodos foram desenvolvidos com a finalidade de determinar o valor da  $I_{lim}$  para células de eletrodialise. COWAN e BROW (1959) recomendam traçar a curva da relação entre o

potencial total da célula e da corrente ( $V/I$ ) em função do inverso da corrente ( $1/I$ ), conforme a Figura 5.

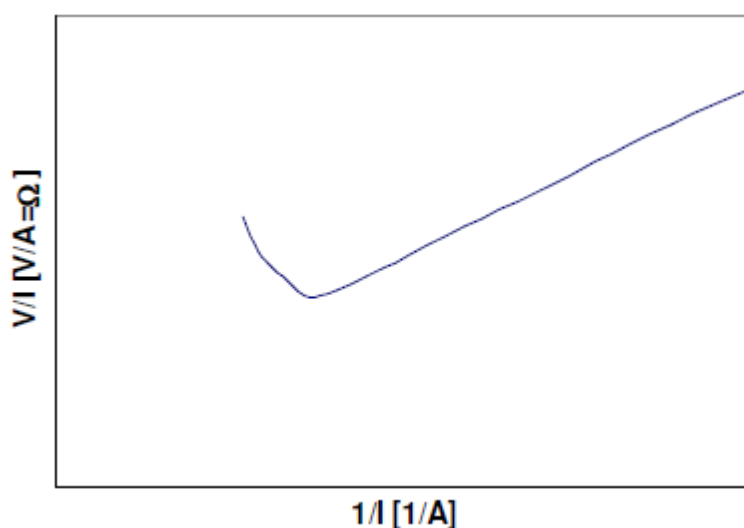


Figura 5 - Curva proposta por Cowan & Brown, 1959 apud Galuchi (2010).

No método de COWAN e BROWN (1959) a corrente é aumentada ponto a ponto, em incrementos pequenos. A curva tem um comportamento qualitativo linear inversamente proporcional até o ponto em que começa a ocorrer a polarização por concentração. O valor de corrente que corresponde ao ponto de inflexão da curva é adotado como o valor da corrente limite (SEQUEIRA, 1994).

Na eletrodialise a densidade de corrente limite é excedida, a eficiência do processo diminuirá drasticamente devido a um aumento na resistência elétrica da solução e devido à dissociação da água. Isto leva a um aumento de consumo de energia assim como a mudança no pH das soluções na superfície das membranas, causando problemas operacionais adicionais como *fouling* nas membranas (TANAKA, 1991; TANAKA, 2009).

Para evitar a polarização por concentração, costuma-se utilizar espaçadores entre as membranas para que promova um fluxo turbulento na solução, o que resulta numa compressão da camada limite. As principais variáveis relacionadas à polarização por concentração são: O potencial elétrico ou densidade de corrente aplicada; a concentração de eletrólito na solução diluída; a velocidade de fluxo (agitação) da solução; o tipo de contra-íon na membrana; as propriedades das membranas relativas à concentração das cargas fixas, sua permeabilidade e resistência elétrica (MARDER, 2002).

### 2.1.11. Eficiência da Corrente

Na eletrodialise a variável mais importante para controlar a quantidade de íons transferidos através das membranas é a corrente aplicada. A energia elétrica fornecida às células de eletrodialise possui a função de conduzir os íons através de uma barreira resistente das membranas e da própria solução eletrolítica.

Esta resistência é determinada pelas concentrações iônicas nas soluções concentradas e diluídas (SCOTT, 1997 apud ARRUDA, 2003). Em um sistema de eletrodialise, segundo a Lei de Faraday, a passagem de 96.500 ampéres (A) da corrente elétrica em 1 segundo (s) transferirá 1 equivalente-grama do sal. A quantidade de 96.500 A/s recebe a denominação de Faraday. Assim, a Lei de Faraday é a base de cálculo da quantidade de corrente elétrica em um sistema de eletrodialise para a transferência de uma determinada quantidade de sais (SANTOS, 2016)

O aumento da extração de íons pela eletrodialise pode ser obtido pelo aumento da densidade de corrente, desde que não se atinja a densidade de corrente limite. Entretanto, o consumo de energia também vai aumentar. Dessa forma, não se pode garantir que um aumento da densidade de corrente traga um aumento de rendimento do processo, considerando-se a extração efetuada e a energia consumida.

A eficiência da corrente limite pode ser mostrado numericamente pela Equação 8 abaixo:

$$\eta = \frac{J_s}{i/t} \quad (8)$$

$$J_s = \frac{C_f V_f - C_i V_i}{\Delta T * N' * A_{memb}} \quad (9)$$

Em que  $J_s$  é o fluxo molar de sal [Mol/(s.cm<sup>2</sup>)],  $i$  é a densidade de corrente [A/cm<sup>2</sup>],  $\tau$  é a constante de Faraday,  $C_f$  é a concentração de sal no instante final,  $C_i$  é a concentração de sal no instante inicial,  $V_f$  é o volume de solução concentrada no instante final,  $V_i$  é o volume de solução concentrada no instante inicial,  $\Delta t$  é a variação no tempo,  $N'$  é o número de pares de membranas e  $A_{memb}$  é a área da secção transversal de uma membrana (SANTOS, 2019).

### 2.1.12. Fouling das membranas

Esse fenômeno pode ser definido como uma deposição irreversível de partículas, coloides, emulsões, suspensões, macromoléculas e sais na membrana devido ao impedimento dessas partículas de penetrar nos poros das membranas, o que provoca o acúmulo dessas na superfície da membrana bloqueando os poros. Este acúmulo de partículas provoca a queda no fluxo de transporte dos eletrólitos e um aumento da resistência das membranas, elevando o consumo de energia do processo (STREIT, 2011). A Figura 6 abaixo mostra um exemplo de uma membrana com Fouling.



Figura 6 – Exemplo de membrana com Fouling

Fonte: Santos 2016

STREIT (2011) sugere que as alternativas mais comuns para minimizar este problema do *fouling* são o pré-tratamento da solução de alimentação, limpezas químicas, elétrica, mecânica e/ou hidráulica, sendo necessário interromper o processo para o procedimento de limpeza das membranas. Antigamente, a limpeza física era bastante utilizada como, por exemplo, inversão do fluxo do sistema e enxágue com água, mas devido à ineficiência desse método isolado, viu-se como oportunidade de melhoria a combinação da limpeza física com a química.

A limpeza química é um dos mais importantes métodos para a redução do *fouling* com reagentes químicos, sendo empregados separadamente ou combinados. A concentração do reagente e o tempo de limpeza são importantes com relação à resistência química da membrana e os reagentes mais comuns para essa finalidade são os ácidos (fortes ou fracos, ex:  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ), os álcalis ( $NaOH$ ), detergentes não iônicos e alcalinos e desinfetantes ( $H_2O_2$  e  $NaOCl$ ). O fator determinante para a escolha da melhor opção é a preservação das características físicas e químicas das

membranas, de maneira que esta limpeza química não tenha um impacto na diminuição da sua vida útil (PROENÇA, 2009).

### **2.1.13. Limitações do processo**

O processo de eletrodialise está sujeito a algumas limitações, segundo SANTOS (2019):

- 1) Apenas soluções aquosas devem ser utilizadas. Entretanto, contaminação com pequenas quantidades de solventes orgânicos é tolerável.
- 2) Cuidados devem ser tomados para evitar precipitações de hidróxidos ou sais insolúveis.
- 3) Oxidantes fortes devem ser excluídos.
- 4) A quantidade de sólidos suspensos deve ser preferencialmente menor que 1ppm, e tamanho das partículas não deve ser maior que 5 µm.
- 5) Eletrólitos de alto peso molecular como alguns detergentes devem ser excluídos
- 6) A temperatura da solução deve ser menor que 60°C e, preferencialmente, menor que 40°C

### 3. APLICAÇÕES DA ELETRODIÁLISE

O tratamento de efluente industrial por eletrodiálise pode ser usado com dois objetivos, o de descartar o efluente de acordo com a legislação ambiental e o de reusar alguns componentes no próprio processo, que pode ser um cátion, ânion ou água. Estudos mostram a Eletrodiálise para recuperação de ácidos a partir de efluentes industriais (BUZZI, 2012).

Na Espanha em Barranco Seco nas Ilhas Canárias, em novembro de 2002, foi instalado uma unidade de ED com capacidade de 20.000 m<sup>3</sup>/dia para tratamento de águas residuárias, buscando o reuso da água na irrigação, principalmente em fazendas de frutas e vegetais. Para prevenir o *fouling* das membranas, uma ultrafiltração foi instalada à montante deste processo. Estes dois processos demonstram capacidade de alcançar o tratamento desejado (BROENS et. Al., 2004).

Um estudo realizado por Cifuentes et al. (2013), mostrou-se eficaz para a separação de cobre e ferro e para recuperação de água de soluções usadas em operações de eletrólise de cobre, utilizando ED. Foi utilizado um sistema com cinco compartimentos com recirculação dos eletrólitos avaliando: densidade de corrente aplicada, fluxo de recirculação e o tempo de operação. A taxa de remoção de íons mostrou-se mais eficaz com o aumento da densidade de corrente aplicada e também com o aumento do fluxo da solução. Foram obtidas taxa de remoção de até 96,6% de Cu e 99,5% de Fe<sup>2+</sup>, após um período de 24 horas de ensaio, mostrando ser possível a recuperação da água. Neste estudo observou-se que o Cu e o Fe passaram juntos através das membranas catiônicas, portanto, ambos foram separados da água, mas não um do outro, sendo necessária outra etapa para separação desses metais.

Esses mesmos autores mostram a separação de ácido sulfúrico desta solução, utilizando o sistema de ED, colocando uma membrana bipolar, este estudo demonstrou ser eficaz. Foi avaliada a influência da densidade de corrente e a temperatura no processo além de comparar dois sistemas de ED, um com seis compartimentos e um mais simples com três compartimentos.

Os resultados apresentaram que a taxa de recuperação do ácido aumentou com o aumento na densidade de corrente e com o aumento na temperatura e que os resultados obtidos para a célula de seis compartimentos foram os mesmo obtidos para a célula de três compartimentos, porém nesta ultima a montagem do sistema é mais simples sendo necessário um menor potencial na célula e consequentemente um menor consumo de energia fazendo desse sistema mais vantajoso.

Outro estudo foi realizado por BENVENUTI, et al. (2014), utilizando a ED para concentrar e extrair níquel (Ni) de efluentes do processo de galvanoplastia, com o objetivo de recuperação de água e da solução concentrada para reutilizar no processo, economizando recursos ambientais e industriais. Avaliou-se o transporte de íons, considerando espécies catiônicas e aniônicas. As concentrações estudadas foram de 2,75 e 0,65 g/L de  $\text{NiCl}_2$  e  $\text{NiSO}_4$ , respectivamente. O tempo médio de realização para que o processo se mostre eficiente para 1L de efluente de galvanoplastia sintética de níquel, em escala laboratorial, utilizando 16  $\text{cm}^2$  de área de membrana de troca iônica foi de 39,9 horas, resultando em uma taxa de desmineralização, em torno de 95%. A ED apresentou um percentual de extração de níquel elevado, aproximadamente 97% garantindo água de boa qualidade para reutilização.

MERKEL et al. (2017), estudaram a possível aplicação de eletrodialise para recuperação de álcalis de água residuais de mercerização, que é a conversão de celulose nativa (celulose I) no polimorfo de celulose II, que é mais estável. Para realização do ensaio a solução concentrada apresentava 250 mL de NaOH a 9%. O eletrólito com 250 mL de NaOH a 3%. A eletrodialise foi realizada com duas condições que se diferenciam pela concentração da solução diluída. Na condição I foi usada uma solução alcalina de 0,1% e na condição II uma solução alcalina de 4,5. O tempo de cada corrida de ED foi de 4 horas, com uma vazão de 50 L/h para o eletrodo e de 55 L/h para solução concentrada e solução diluída. O potencial elétrico médio usado foi de 6,4 V e 3,4 V para as condições I e II, respectivamente. Com este estudo concluiu-se que a eficiência da corrente no processo de eletrodialise não foi influenciada pela concentração da solução diluída. Não foi observada degradação significativa das membranas devido ao meio alcalino. Portanto, a conversão parcial dos grupos de amônio quaternário em amônio secundário e terciário pode afetar parcialmente as membranas de troca aniônica. Assim, entendeu-se que devido à possibilidade de usar uma solução muito diluída no tanque da solução diluída, as águas residuais deste processo podem ser descartadas para o esgoto sem nenhum risco ambiental.

O estudo de GALLY (2018), o objetivo foi avaliar o desempenho do processo da eletrodialise como tratamento terciário em uma estação de tratamento de águas residuais domésticas usando um efluente previamente tratado por macrófitas. Os parâmetros iniciais do efluente utilizado na ED, são sódio 58,1 mg/L, potássio 11,4 mg/L, magnésio 4,0 mg/L, cálcio 25,7 mg/L, pH 7,85 e condutividade de 666  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Inicialmente, a solução concentrada foi alimentada com uma solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,5 g/L. O compartimento de eletrodo foi preenchido com uma solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de 4 g/L. O processo de eletrodialise foi realizado até a solução diluída atingir uma condutividade elétrica em torno de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  esse valor é semelhante ao da água da

torneira brasileira. O tempo inicial de realização da ED foi de três horas, a densidade de corrente de 1,65 mA/cm<sup>2</sup>. A porcentagem de extração foi de aproximadamente 70% para o sódio, 80% para magnésio e cálcio e 90% para amônio e potássio.

## 4. CONCLUSÕES

Com o estudo realizado neste trabalho pode-se concluir que a eletrodialise é uma técnica muito promissora para várias pesquisas. Sua forma de separar metais através de membranas é uma técnica que vem ganhando cada vez mais destaque devido à alta taxa de remoção que vem sendo encontrado com porcentagens superiores a 90% de remoção. A eletrodialise é uma técnica de separação por membranas que utiliza a diferença de potencial para separar os íons. A técnica utiliza membranas catiônica e aniônicas colocadas de forma intercaladas, e quando uma solução com altas concentrações de íons entram em contato com essas membranas consegue-se separar esses íons de acordo com a sua carga. São obtidas duas soluções finais uma com alta concentração de íons, que em diversos processos são reutilizadas para economizar matéria prima, e uma outra solução com baixa concentrações de íons, sendo que esta solução pode ser reutilizada em diversas funções ou até mesmo descartada sem causar danos ao meio ambiente.

Foi observado que para um bom funcionamento da técnica de eletrodialise, diversos fatores devem ser considerados: montagem da uma unidade como os espaçadores, localização da eletrodialise em um processo, material de fabricação das membranas, transferência osmótica da água, resistência elétrica aplicada, extração percentual, polarização por concentração e corrente limite, eficiência da corrente, *fouling* das membranas e limitações do processo que devem ser analisadas com cuidado para garantir que o processo seja eficaz.

Foram apresentadas também algumas aplicações para o processo de eletrodialise, entre elas estão: a separação de cobre e ferro para recuperação de água de soluções usadas em operações de eletrólise de cobre; o uso da ED para concentrar e extrair níquel (Ni) de efluentes do processo de galvanoplastia, com o objetivo de recuperação de água e da solução concentrada para reutilizar no processo, economizando recursos ambientais e industriais; a aplicação de eletrodialise para recuperação de álcalis de água residuais de mercerização, que é a conversão de celulose nativa (celulose I) no polimorfo de celulose II, que é mais estável; e também avaliar o desempenho do processo da eletrodialise como tratamento terciário em uma estação de tratamento de águas residuais domésticas usando um efluente previamente tratado por macrófitas.

Desta forma, é possível ter uma visão de como essa técnica de separação pode vir a ajudar em diversas situações para melhorar processos e limpar efluentes,

ajudando a economizar recurso e a reaproveitar a água, um bem cada vez mais escasso.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARADO, L.; CHEN, A. **Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications**. *Electrochimica Acta*, v. 132, p. 583-597, 2014/06/20/ 2014.

AMORIM, L.V; GOMES, C. M.; SILVA, F. L. H.; FRANÇA, K. B.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. **Uso da eletrodialise na eliminação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e sua influência na reologia de dispersões de argilas bentoníticas da Paraíba**. Março 2005.

ARRUDA, M.E.B. **Estudo do Transporte de Íons Complexos com Cianeto utilizando a Técnica de Eletrodialise**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. UFRGS. 2003.

AUDINOS, R. **Liquid waste concentration by electrodialyses**. In Li, N.N.; Calo, J. M. (Ed.) **Separation and purification technology**, Marcel Decker, 229-301, 1992.

BENVENUTI, T. et al. **Recovery of nickel and water from nickel electroplating wastewater by electrodialysis**. *Separation and Purification Technology*, v. 129, p. 106-112, 2014/05/29/ 2014.

BIRKETT, J. D. **Electrodialysis**. In: BERKOWITZ, J. B. (Eletrodialise.) **Unit operations for treatment of hazardous industrial wastes**. New Jersey: Noyes Data Co., 1978.

BROENS, L.; LIEBRAND, N.; TORRENT, J. C. A.. **Effluent reuse at BarrancoSeco (Spain): a 1000 m<sup>3</sup>/h case study**. *Desalination*. V. 167, p. 13-16, 2004

BUZZI, D. C. **Aplicação da eletrodialise no tratamento da drenagem ácida de minas visando a recuperação de ácido sulfúrico**. Dissertação (Doutorado em Engenharia) programa de Pós Graduação da escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

CIFUENTES-ARAYA, N.; POURCELLY, G.; BAZINET, L. **Water splitting proton-barriers for mineral membrane fouling control and their optimization by accurate**

**pulsed modes of electrodialysis.** Journal of Membrane Science, v. 447, p. 433-441, 2013/11/15/ 2013.

COWAN, D. A.; BROWN, J. H. **Effect of Turbulence on Limiting Current in Electrodialysis Cells.** Industrial & Engineering Chemistry, v. 51, n. 12, p. 1445-1448, 1959/12/01 1959.

DALLA COSTA, R. F. **Emprego da Técnica de Eletrodialise na Remoção e Concentração de Cromo em Solução Aquosa Ácida.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. UFRGS. 1996.

DALLA COSTA R. F.; RODRIGUES, M.A.S.; FERREIRA, J.Z., **Transport of trivalent and hexavalent chromium through different ion-selective membranes in acidic aqueous media,** Separation Science and Technology, 33(8), p.1135-1143, 1998.

GALLY, C. R. et al. **Electrodialysis for the tertiary treatment of municipal wastewater: Efficiency of ion removal and ageing of ion exchange membranes.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 6, n. 5, p. 5855-5869, 2018/10/01/ 2018.

GALUCHI, T. P. D. **Montagem e caracterização de unidade de eletrodialise em escala de laboratório para tratamento de soluções salinas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.

GERING, K. L.; SCAMEHORN, J. F. **Use of Electrodialysis to Remove Heavy Metals from Water.** Separation Science and Technology, 23, n.14&15, p.2231-2267, 1988.

GÓMEZ, J.R.O.; **Tecnologías sostenibles. Revalorización de efluentes industriales mediante tecnologías de electromembrana.** Revista Mensual de Gestión Ambiental, 3, p.13- 25,1999.

JACKSON,C.; COOKE,B.A; WOODHALL,B.J. **Diaphragms and electrolytes.** In: **Kuhn, A.T. (Ed.) Industrial electrochemical processes.** Amsterdam: Elsevier, Cap.15, 1971. p.575-597.

KORZENOWSKI, C. **Tratamento de Efluentes Ácidos e Alcalinos de Zincagem Eletrolítica por Eletrodiálise.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. 1996.

LLORENS, J. Apuntes del curso de doctorado: **Membranas**, Universidad de Barcelona (1992).

MARDER, L. **Emprego da Técnica de Eletrodiálise no Tratamento de Soluções contendo Cádmio e Cianeto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre. UFRGS. 2002.

MERKEL, A.; ASHRAFI, A. M.; ONDRUŠEK, M. **The use of electrodialysis for recovery of sodium hydroxide from the high alkaline solution as a model of mercerization wastewater.** Journal of Water Process Engineering, v. 20, p. 123-129, 2017/12/01/ 2017.

NAGARALE, R. K.; GOHIL, G. S.; SHAHI, V. K.; **Adv. Colloid Interfac.** 119: 2-3 (2006) 97.

NOBLE, R. D.; STERN, S. A. **Membrane Separations Technology.** Elsevier **Science**, v. 2, p. 738, 1995.

PROENÇA, M. P. Dissertação de mestrado: **Desenvolvimento de membranas íon seletivas com poliestireno sulfonado e polianilina dopada para aplicação em eletrodiálise.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2009.

ROCZANSKI, A. O., **Recuperação da água de retenção do processo de eletrodeposição de ouro por eletrodiálise,** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2006.

RODRIGUES, M.A.S; BERNARDES A.M.; FERREIRA J.Z, **The Application of Electrodialysis on the Treatment of Effluents with Hexavalent Chromium**, In: The Mineral, Metals and Material Society, Proceedings of the Anual Meeting 28/02-04/03/99, p.659-672, San Diego - Califórnia- USA.

SANTOS, C. S. L. D. **Aplicação do processo de eletrodialise na remoção de cromo em efluente sintético advindo de biorreator anaeróbico**. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2016.

SANTOS, C. S. L. D. **O uso da eletrodialise para remoção de metais de efluentes contaminados**. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2019.

SATA, T. Cambridge: **Royal Society of Chemistry** (2004) pp. 314.

SEQUEIRA, C. A. C. **Environmental Oriented Electrochemistry**. Elsevier Science, v. 59, 1994.

SCOTT, K. **Handbook of industrial membranes**. UK: Elsevier Science Publishers Ltda, 1997. 912p

STRATHMANN, H. **Synthetic membranes and their preparation**. In: PORTER, M.C. (Ed.) Handbook of industrial membrane technology. New Jersey: Noyes Publications, 1990.

STRATHMANN, H. ; GRABOWSKI, A.; EIGENBERGER, G.; **Ind. Eng. Chem. Res.** 52:31 (2013) 10364.

STREIT, K. F. **Estudo da aplicação de processos de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume: nanofiltração e eletrodialise**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2011.

TAKY, M.; POURCELLY, G.; LEBON, F.; GAVACH, C. **Polarization phenomena at the interfaces between an electrolyte solution and an ion exchange membrane**. **Journal Electroanalytical Chemistry**, v. 336, p. 171–194, 1992.

TANAKA, Y. **Concentration polarization in ion membrane electro dialysis.** Journal of Membrane Science, v. 57, p. 217-235, 1991.

TANAKA, Y., **Membrane Sci. Technol. Series**, 12, 1st ed., Amsterdam: Elsevier (2007) pp. 251.

TANAKA, Y. **A computer simulation of batch ion exchange membrane electro dialysis for desalination of saline water.** Desalination, v. 249, n. 3, p. 1039-1047, 2009/12/25/ 2009.

VÁSQUEZ-GARZÓN, M.L.; BONOTTO, G.; MARDER, L.; ZOPPAS FERREIRA, J.; BERNARDES, A.M. **Transport properties of tartrate ions through an anion-exchange membrane.** Desalination, p. 10062-10066, 2011.