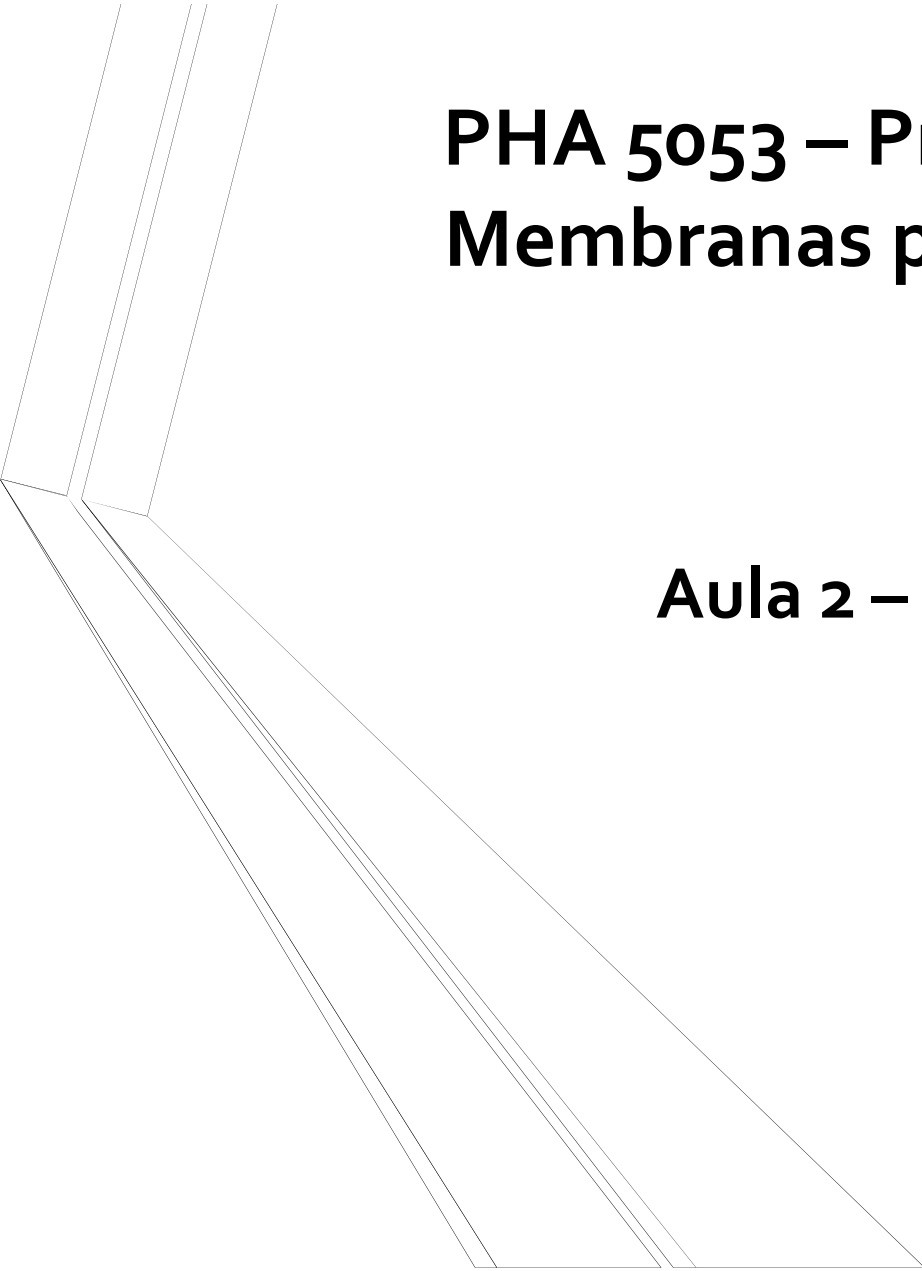
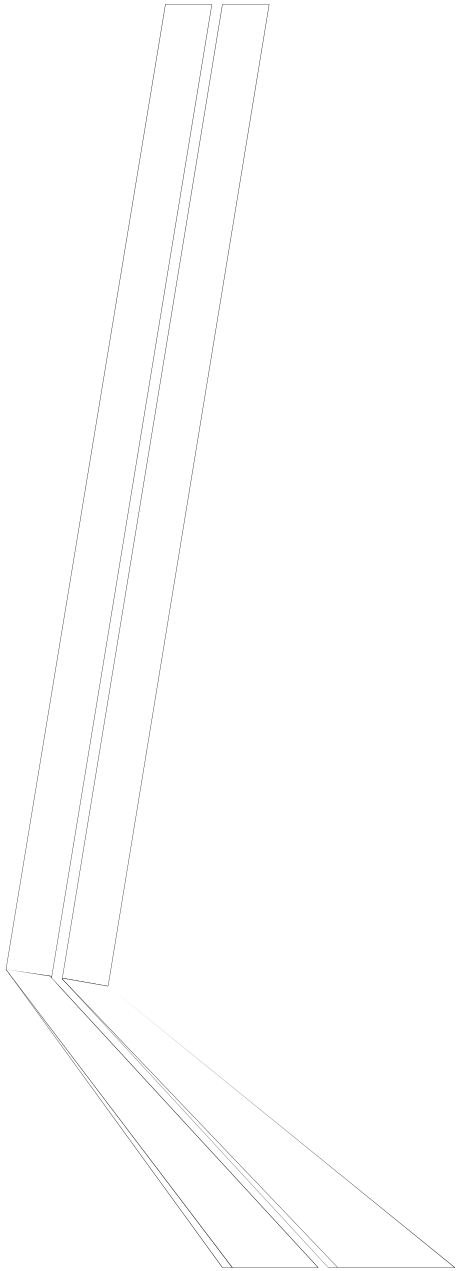




PHA 5053 – Processos de Separação por Membranas para Tratamento de Água e Efluentes

Aula 2 – Classificação dos processos de separação por membranas

Prof.: José Carlos Mierzwa
mierzwa@usp.br



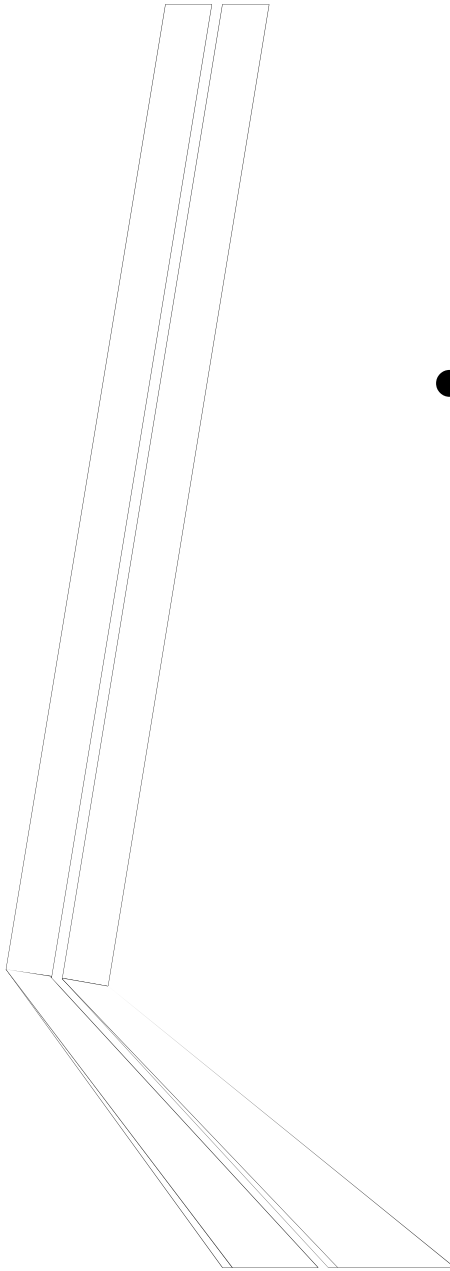
Classificação dos processos de separação

- São classificados com base nos seguintes parâmetros:
 - Força motriz;
 - Mecanismos de separação;
 - Estrutura das membranas;
 - Fases em contato com as membranas.



Classificação com base na força motriz

- Processos que utilizam pressão hidráulica para promover a separação:
 - Microfiltração;
 - Ultrafiltração;
 - Nanofiltração;
 - Osmose reversa.



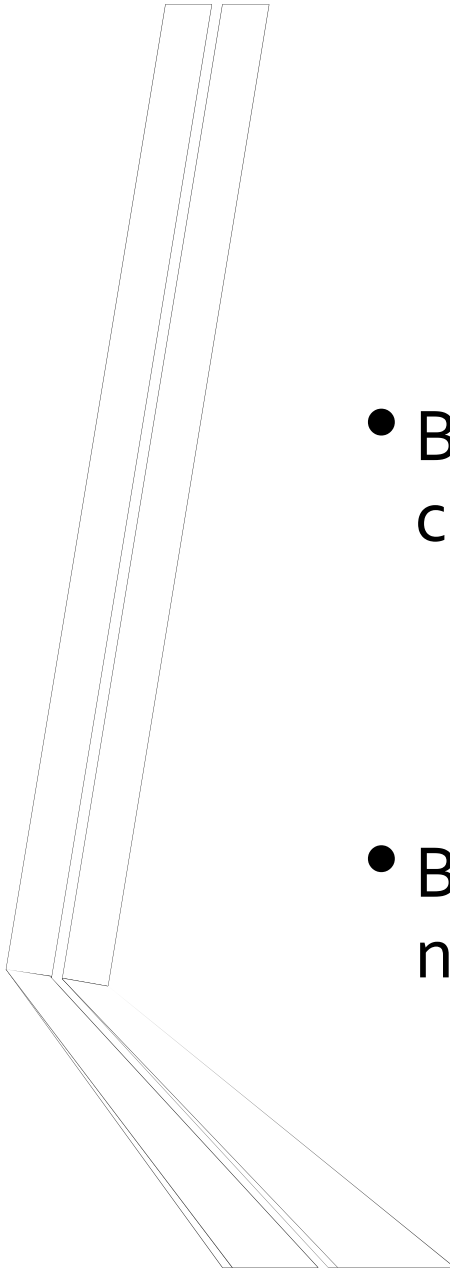
Classificação com base na força motriz (cont.)

- Diferença de atividade através da membrana:
 - Permeação de gases → utilizado para a separação de mistura de gases;
 - Difusão de gases;
 - Pervaporação;
 - Extração ou stripping;
 - Destilação;
 - Osmose.



Classificação com base na força motriz (cont.)

- Diferença de potencial elétrico ou atividade, na ausência de qualquer diferença de pressão através da membrana:
 - Diálise → separação de solutos de baixa massa molecular de soluções com outros solutos;
 - Eletrodiálise.



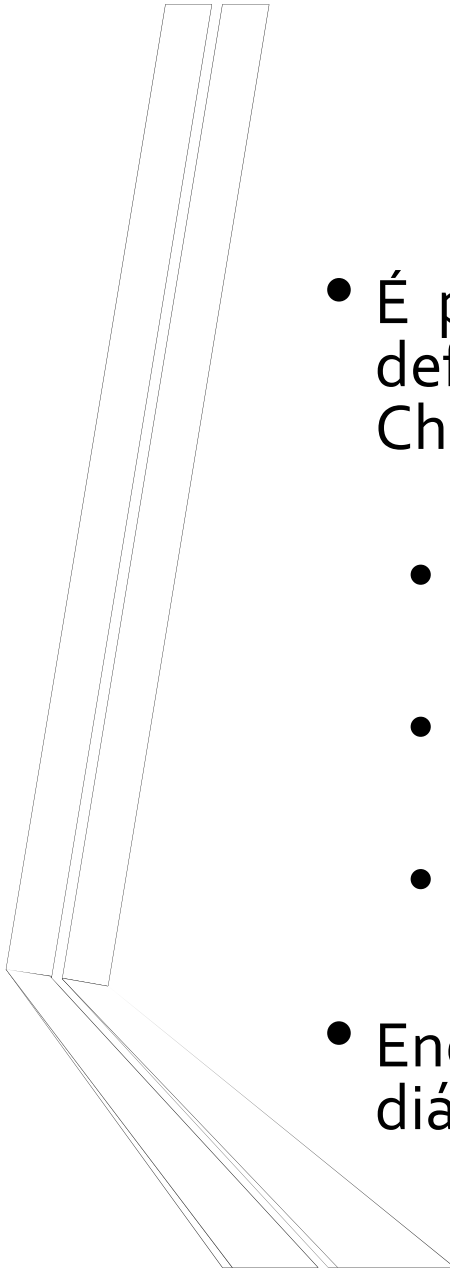
Classificação pelo mecanismo de separação

- Baseada na diferença de tamanho entre os contaminantes e os poros das membranas:
 - Efeito de peneiramento;
 - Estão nesta categoria a MF, UF e diálise.
- Baseada na solubilidade e difusividade dos materiais nas membranas:
 - Permeação de gases, pervaporação e osmose reversa.



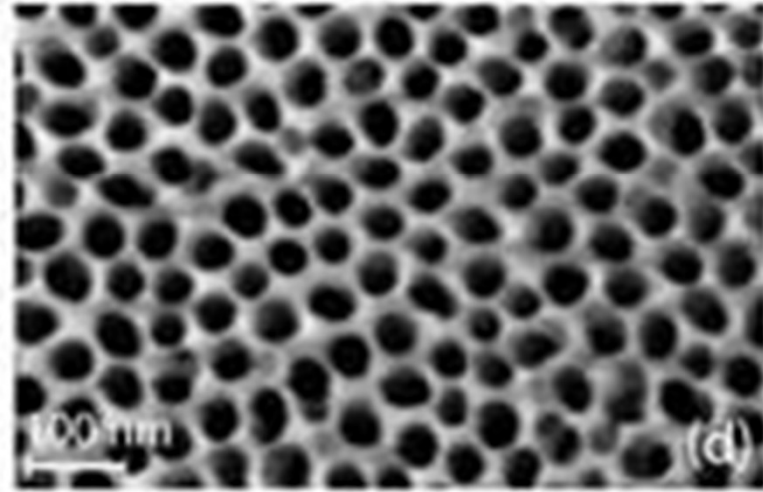
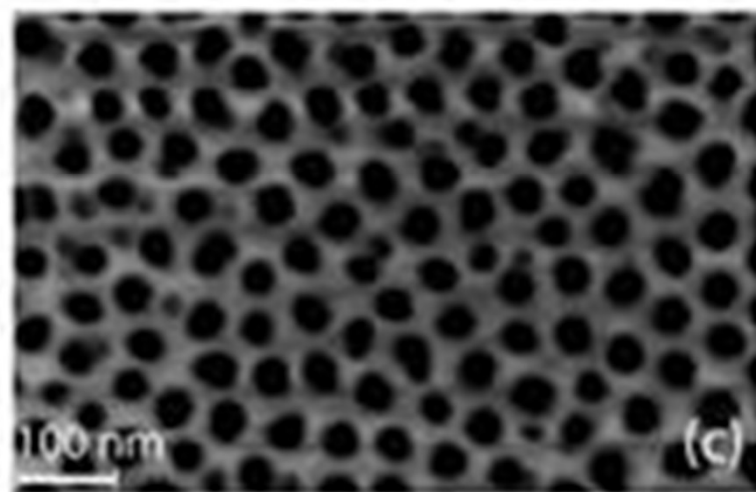
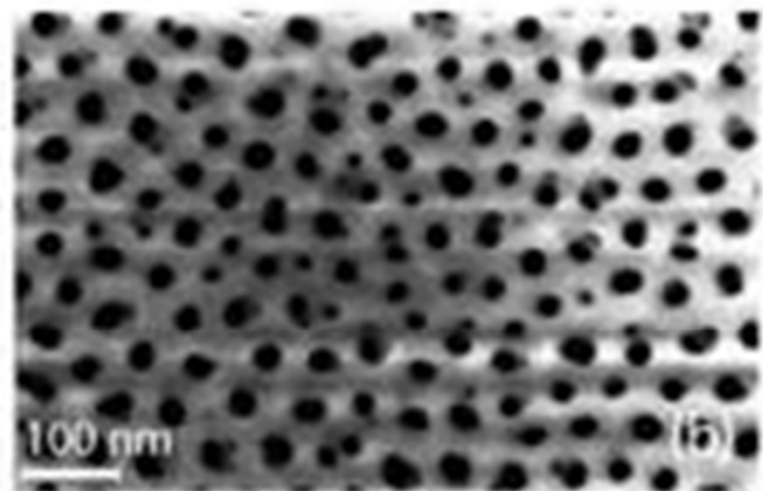
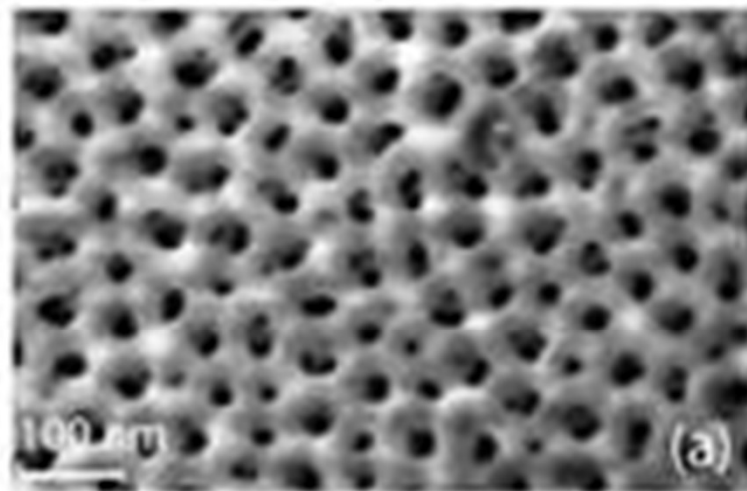
Classificação pelo mecanismo de separação (cont.)

- Baseados nas cargas elétricas das espécies a serem separadas (efeito eletroquímico), como o que ocorre na eletrodialise;
- A classificação das membranas com base no mecanismo de separação conduzem a três classes principais de membranas:
 - Porosas;
 - Não porosas ou densas;
 - Eletricamente carregadas ou membranas de troca iônica.



Membranas porosas

- É possível verificar a presença de poros, os quais com base na definição adotada pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), são:
 - Macroporos → diâmetro $> 0,05 \mu\text{m}$,
 - Mesoporos → diâmetro entre $0,002$ e $0,05 \mu\text{m}$;
 - Microporos → diâmetro menor que $0,002 \mu\text{m}$;
- Enquadram-se nesta classificação os processos de MF, UF e diálise;



Superfície de uma membrana porosa

(http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000300722)



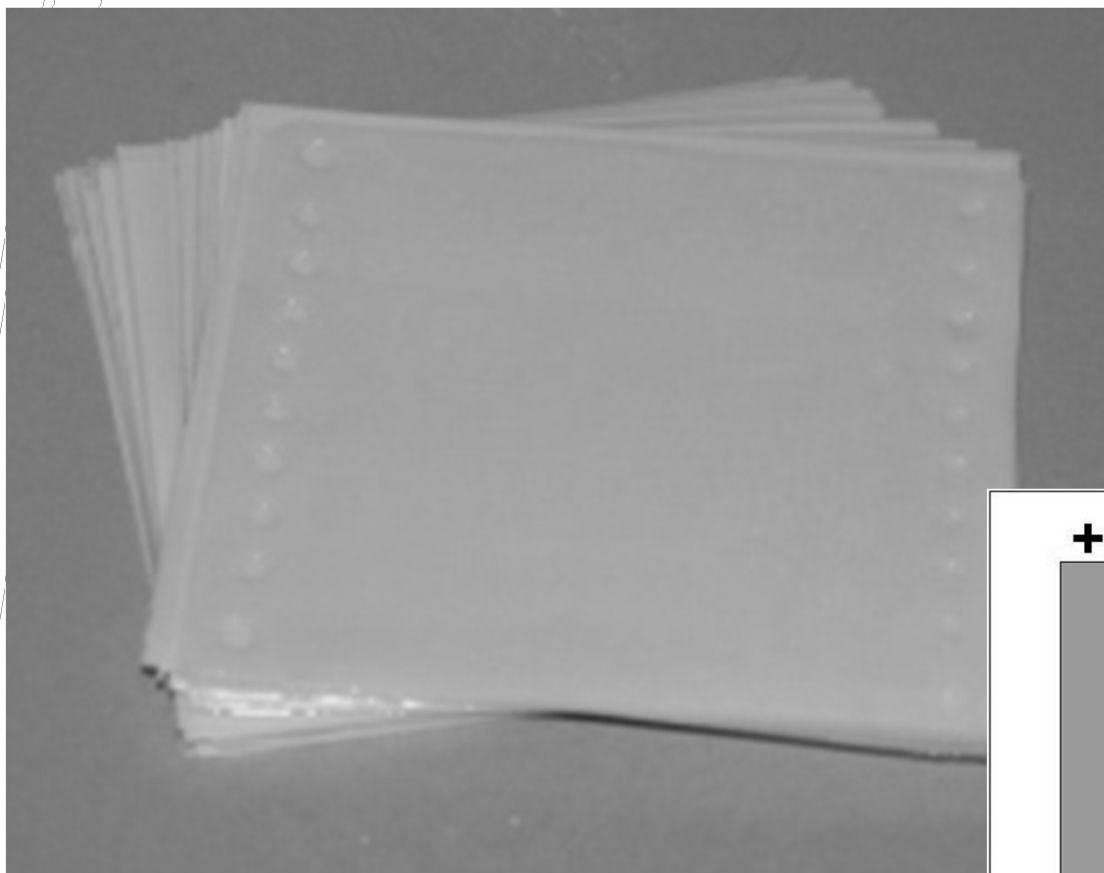
Membranas não porosas

- Podem ser consideradas como um meio denso,
 - A difusão das espécies ocorre no espaço livre entre as cadeias poliméricas;
- Processos de Permeação de gases, Pervaporação, NF e OR utilizam este tipo de membrana.

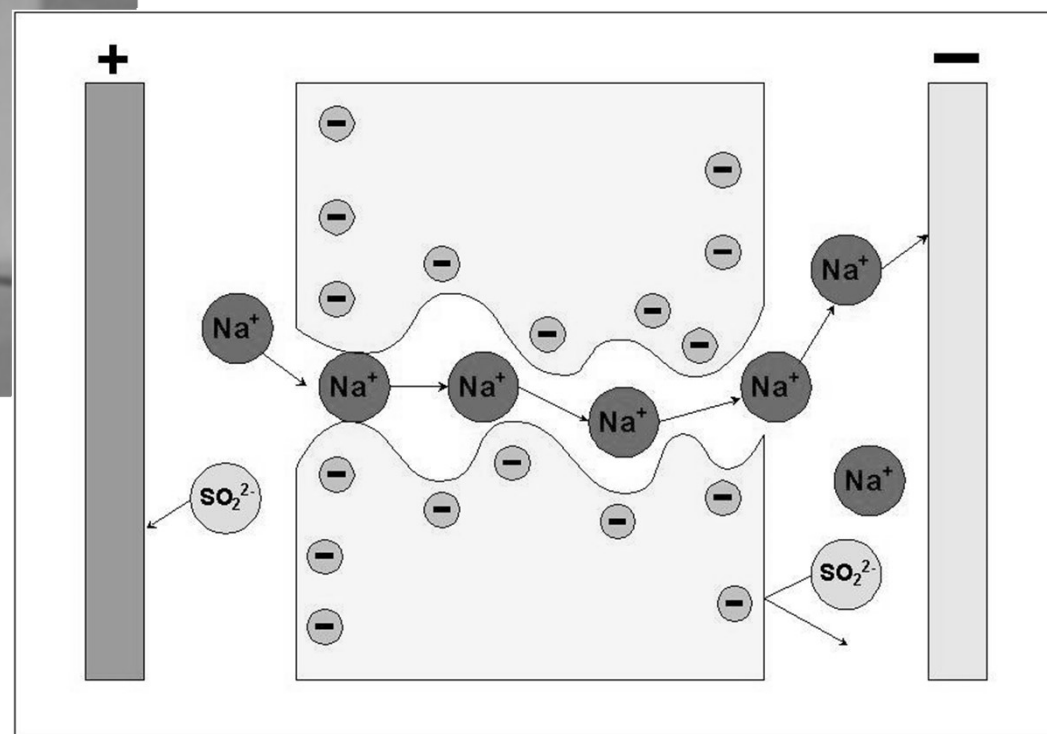


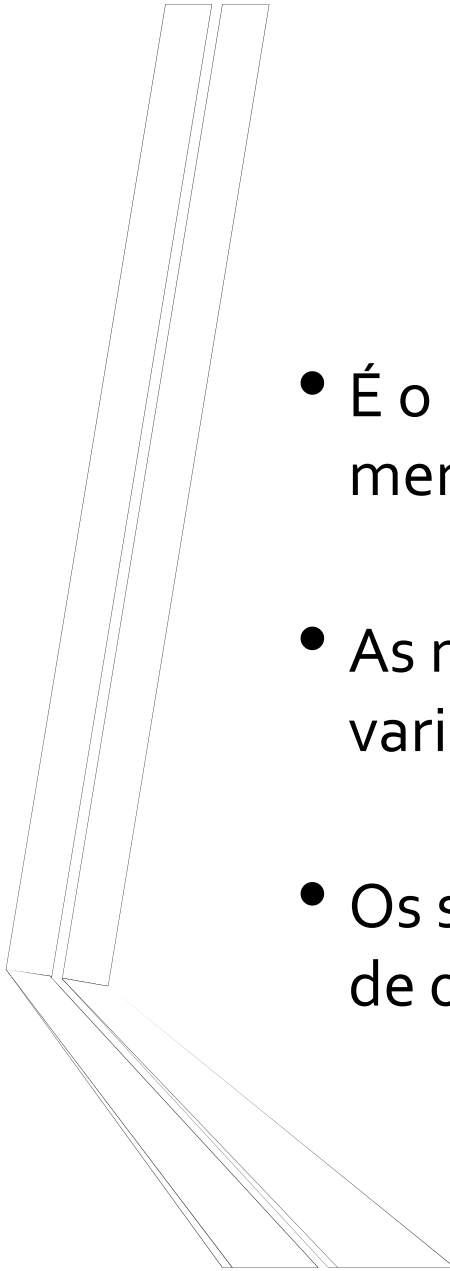
Membranas de troca iônica

- São um tipo específico de membranas não porosas;
- Apresentam-se na forma de um gel altamente expandido, que contém cargas elétricas fixas;
- Membranas com cargas fixas positivas são denominadas de aniônicas e aquelas com cargas negativas de catiônicas.



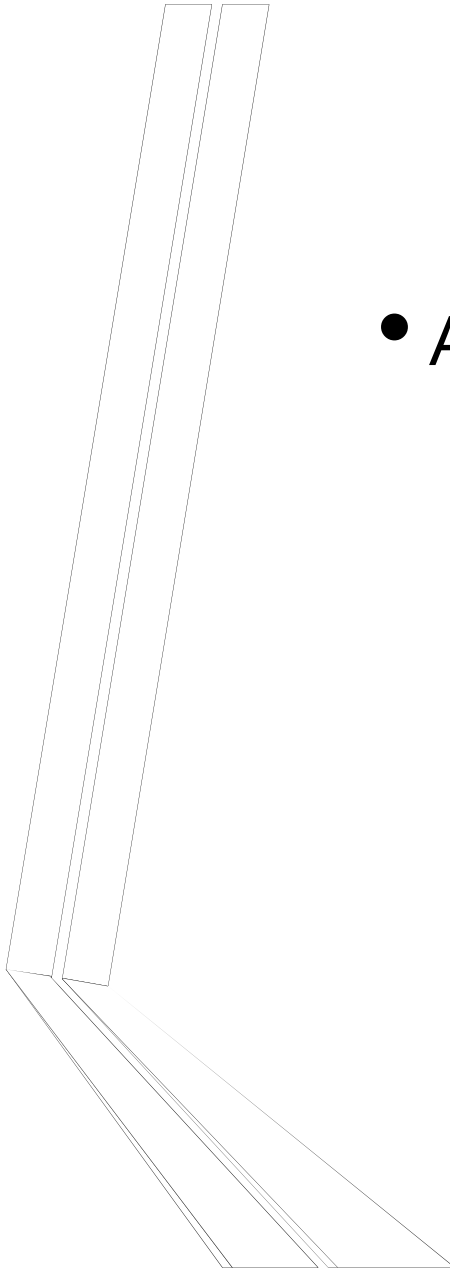
Membranas de Troca Iônica





Microfiltração

- É o mais antigo entre os processos de separação por membranas que utilizam pressão hidráulica;
- As membranas utilizadas são porosas, com diâmetro de poro variando de 0,05 até 3 μm ;
- Os sistemas de microfiltração operam com pressões variando de 0,3 a 1,7 bar;



Microfiltração (cont.)

- As principais aplicações incluem:
 - Clarificação de bebidas;
 - Tratamento de água;
 - Tratamento de efluentes industriais e domésticos;
 - Tratamento de emulsões de óleo e água;
 - Processos de concentração e separação na indústria de alimentos.

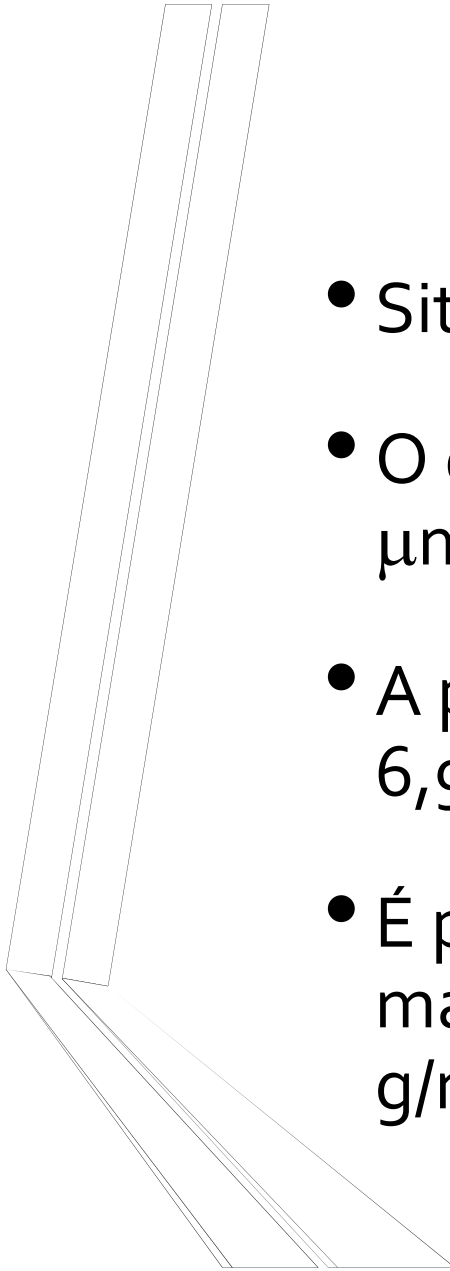
Características de uma Membrana de MF (DS-E-500 GE Water)

<http://xflow.pentair.com/en/products/r100>



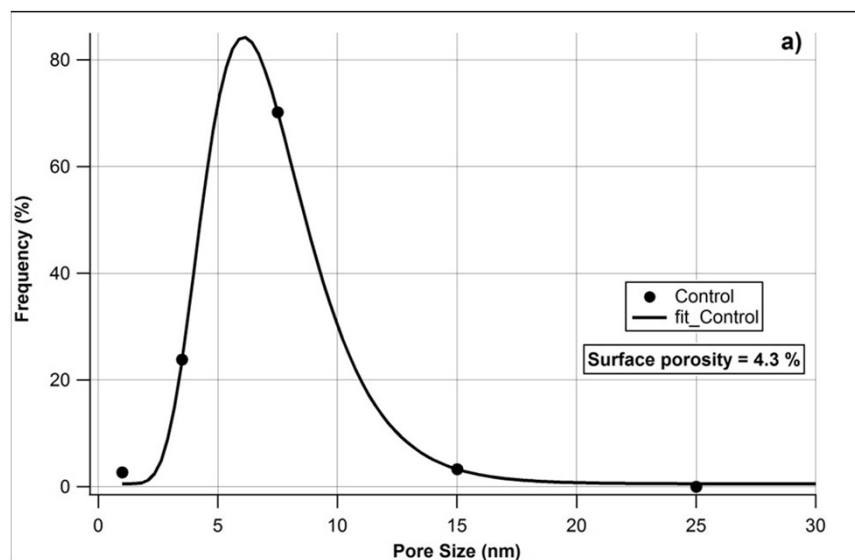
SPECIFICATIONS

	R-100 MF02/1,5MM	R-100 MF02/3,0MM
Membrane surface area	9.3 m ²	5.0 m ²
Module dimensions (dxl)	160.6X1.022mm	160.6X1.022mm
Housing material	Stainless steel AISI 316/316L	Stainless steel AISI 316/316L
Membrane material	Polyether sulphone	Polyether sulphone
Hydraulic membrane diameter	1,5mm	3,0mm
Nominal pore size	0,1 µ	0,1 µ
pH-range	1 -12	1 -12
Chlorine resistance	500 ppm max 250.000 ppm.h	500 ppm max 250.000 ppm.h
Download datasheet		

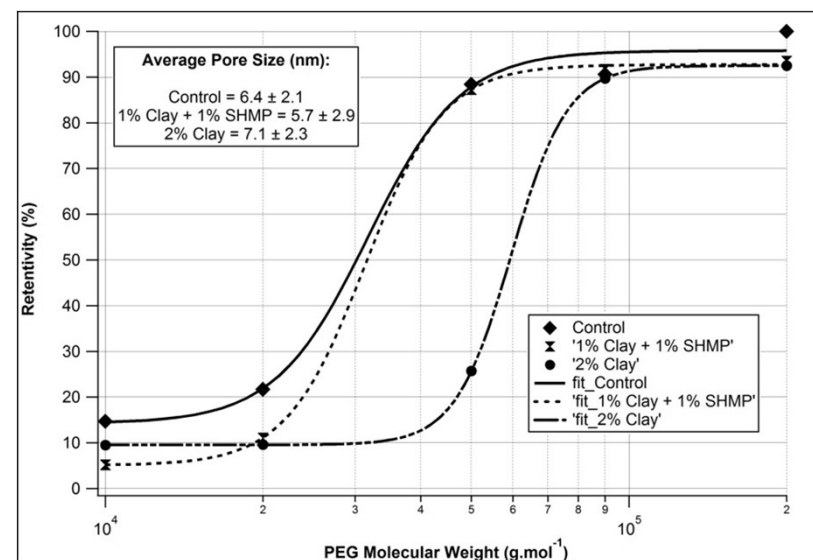


Ultrafiltração

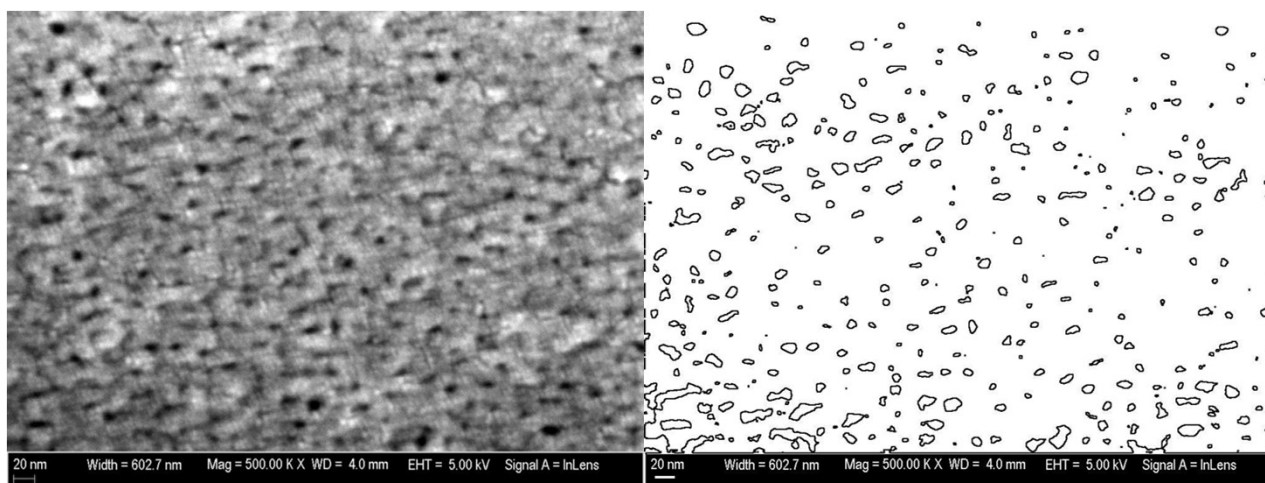
- Situa-se entre a microfiltração e a nanofiltração;
- O diâmetro dos poros das membranas varia entre 0,001 μm até 0,05 μm ;
- A pressão de operação dos sistemas pode variar de 0,7 a 6,9 bar;
- É possível obter a separação de colóides e macromoléculas com massa molecular próxima de 1000 g/mol (MWCO).



Distribuição do tamanho de poro de uma membrana de UF – Polietersulfona



Massa molecular de corte da membrana de UF - Polietersulfona

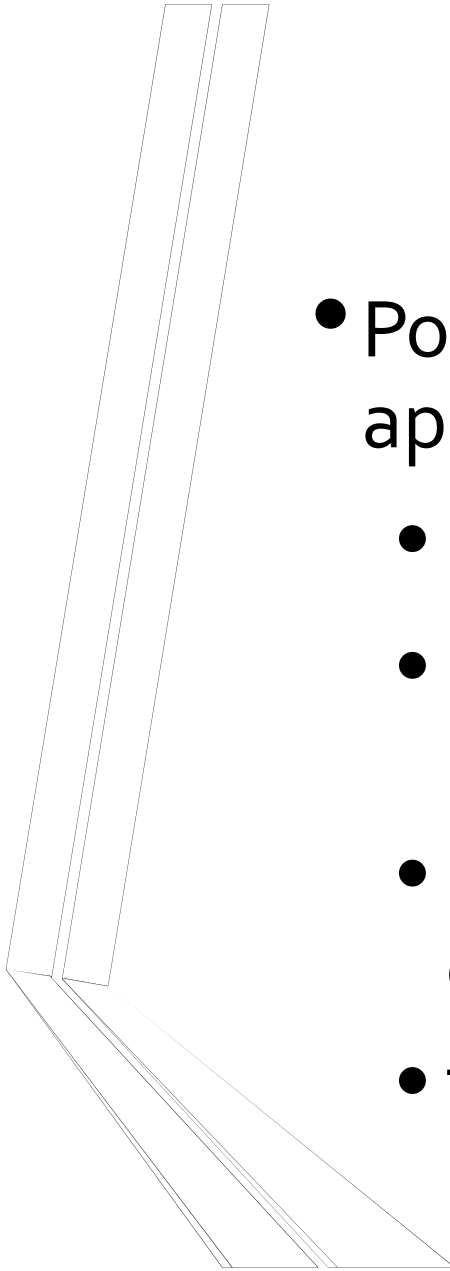


Configuração dos poros da membrana de UF – MMC $\sim 50.000 \text{ g.mol}^{-1}$



Ultrafiltração (cont.)

- A rejeição pela membrana é determinada pelo tamanho e forma dos contaminantes em relação ao diâmetro dos poros;
- O transporte do solvente através da membrana é diretamente proporcional à pressão aplicada;



Ultrafiltração (cont.)

- Pode ser utilizado em uma grande variedade de aplicações, incluindo:
 - Indústria de laticínios (tratamento do soro do leite);
 - Indústria de alimentos (separação de amido e proteínas);
 - Indústria mecânica e metalúrgica (tratamento de emulsões de óleo e água e efluentes);
 - Tratamento de água

Características de uma Membrana de UF



Nitto

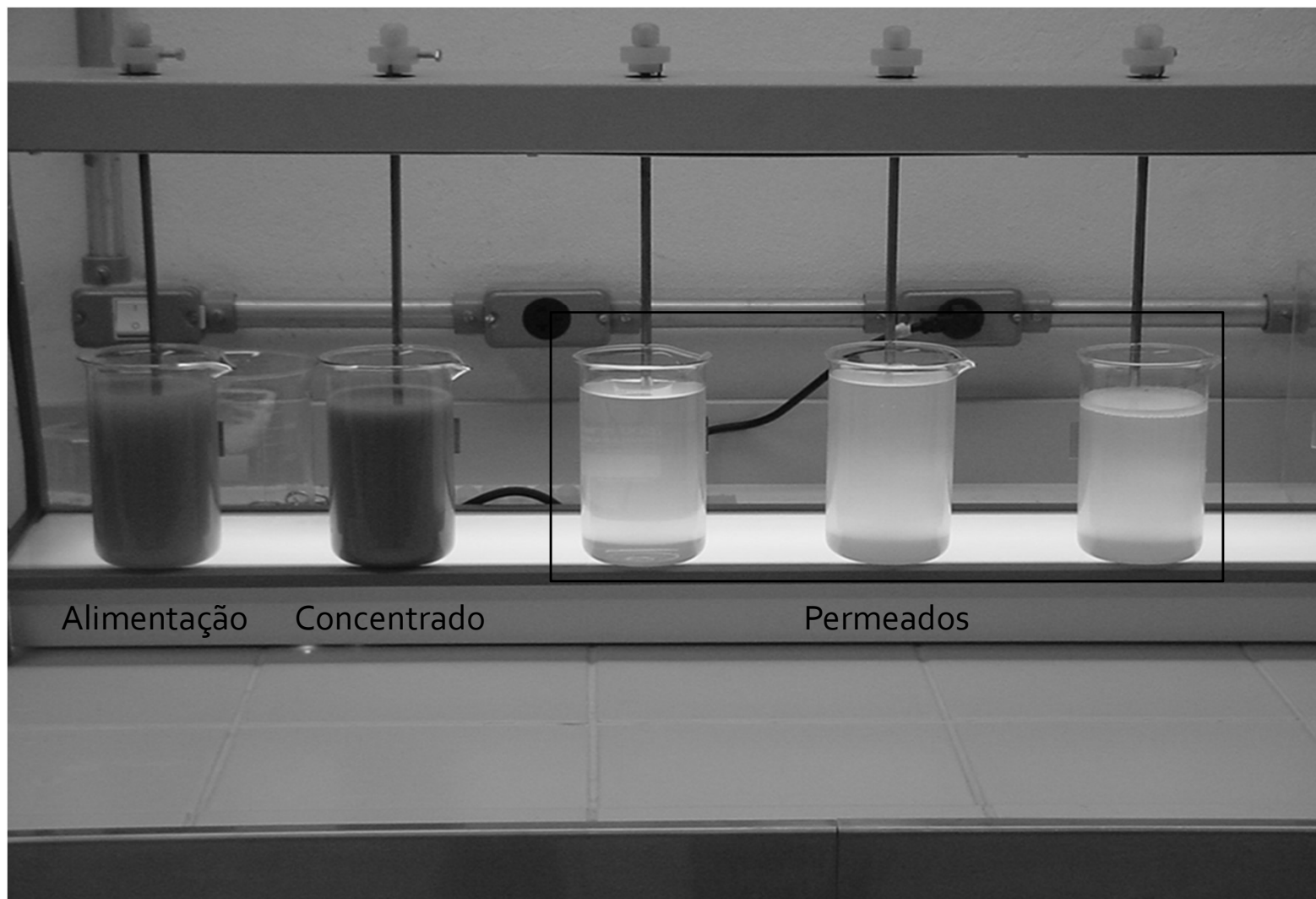
HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Capillary Ultrafiltration Module

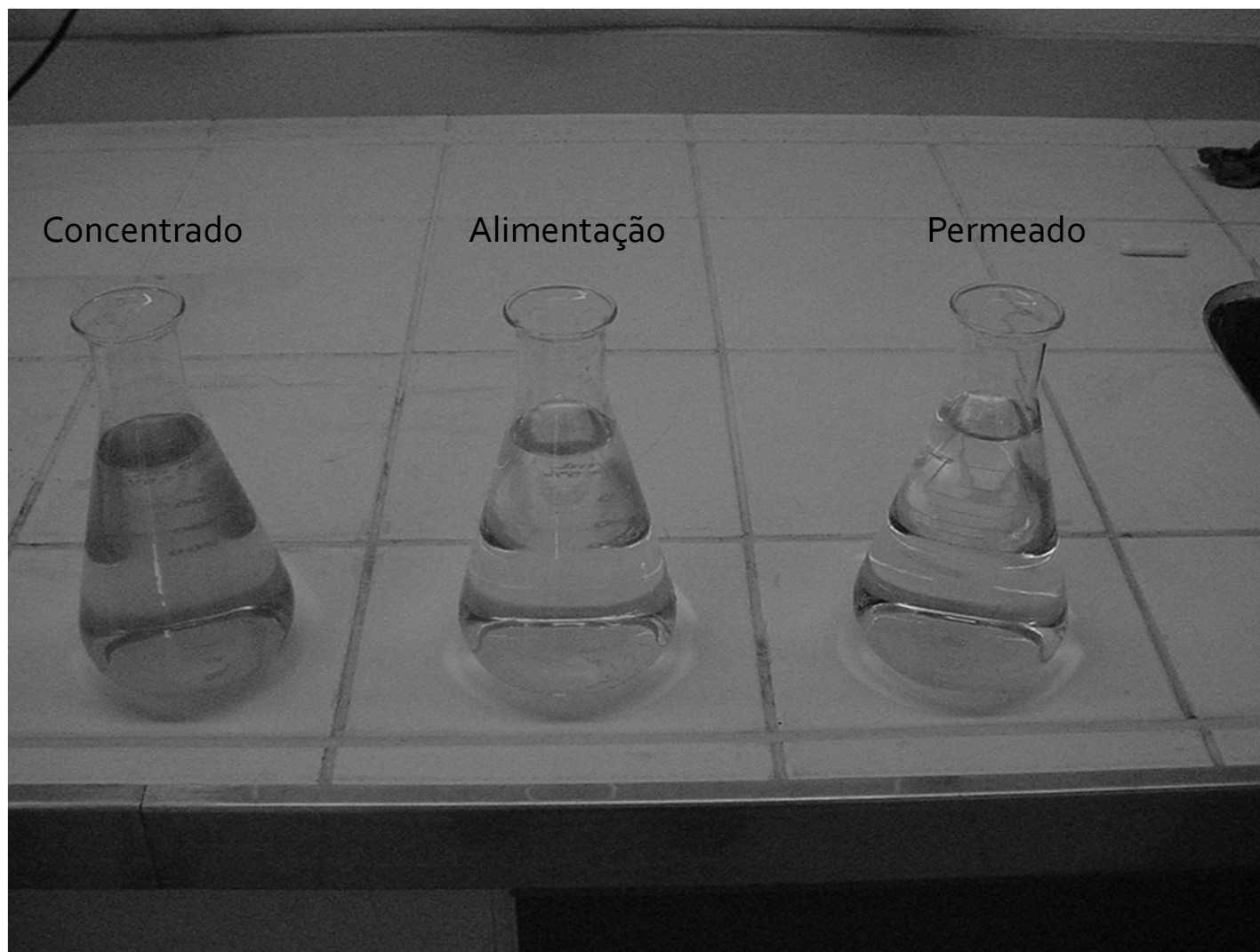
HYDRAcap® MAX 40

Performance¹	Filtrate Flow: Filtrate Turbidity: Bacteria removal:	7.5 – 24.4 gpm (1.7 – 5.5 m ³ /h) ≤ 0.10 NTU ≥ 4 log
Type	Configuration: Membrane Polymer: Nominal Membrane Area: Fiber Dimensions: Pore size:	Capillary Ultrafiltration Module PVDF 560 ft ² (52 m ²) ID 0.024" (0.6 mm), OD 0.047" (1.2 mm) 0.08 micron
Application Data²	Typical Filtrate Flux Range: Maximum Applied Feed Pressure: Maximum Transmembrane Pressure: Instantaneous Chlorine Tolerance: Maximum Chlorine Exposure: Maximum Feed Turbidity: Maximum Operating Temperature: pH Operating Range: Cleaning pH Range: Operating Mode:	20 – 65 gfd (34 – 110 l/m ² /h) 73 psig (5.0 bar) ³ 30 psig (2.0 bar) 5000 ppm ⁴ 750,000 ppm-hrs 300 NTU ⁵ 104 °F (40 °C) 4.0 – 10.0 1.0 – 13.0 Outside to Inside Filtration Dead End or Cross flow mode
Typical Process Conditions	Air Scour Rate: Air Scour Duration: Air Scour Frequency: Maintenance Clean Frequency: Maintenance Clean Duration: Disinfection Chemicals: Cleaning Chemicals:	7.3 – 9.1 acfm (12.3 – 15.4 m ³ /h) 120 – 240 seconds Once every 20 – 60 minutes 1 – 3 times per day 20 – 30 minutes NaOCl, ClO ₂ or NH ₂ Cl NaOH, HCl, H ₂ SO ₄ or Citric Acid

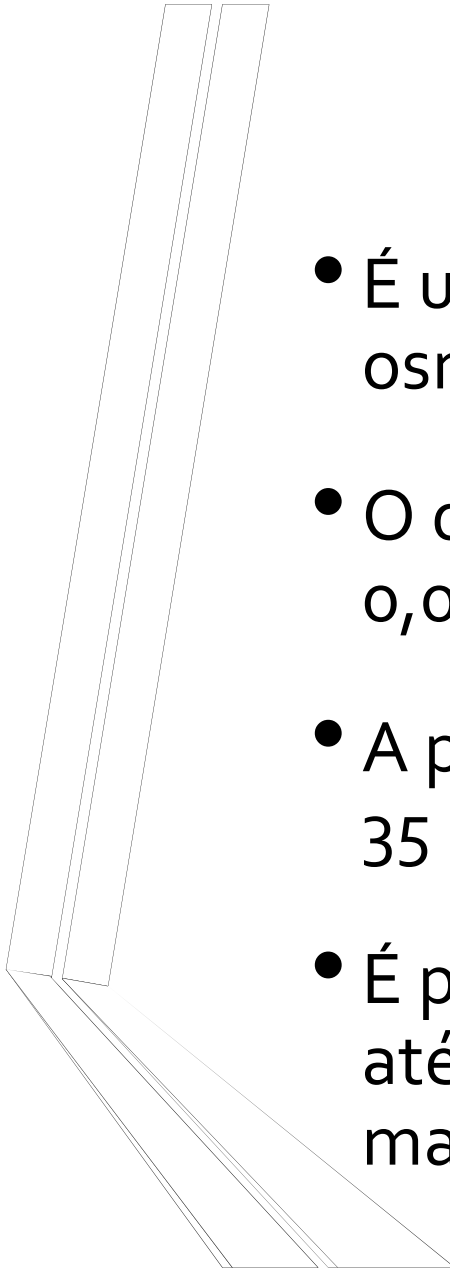
<http://membranes.com/solutions/products/uf/hydracap-max/>



**Resultado do tratamento de uma emulsão de óleo solúvel
por ultrafiltração**



Amostras de concentrado, água bruta e permeado – Ensaio de Tratamento de Água do Reservatório Guarapiranga



Nanofiltração

- É um processo de transição entre a ultrafiltração e osmose reversa;
- O diâmetro dos poros da membrana é da ordem de $0,001\ \mu\text{m}$;
- A pressão de operação nos sistemas de NF varia de 5 a 35 bar;
- É possível separar moléculas com massa molecular de até $200\ \text{g/mol}$ e íons bivalentes, como cálcio e magnésio;



Nanofiltração (cont.)

- O mecanismo de separação não é apenas o de filtração, estando envolvidos os mecanismos de solubilidade e difusão;
- Neste processo a pressão osmótica começa a ter influência sobre o fluxo de solvente através da membrana;



Nanofiltração (cont.)

- Pode ser utilizado nas seguintes aplicações:
 - Operações de abrandamento;
 - Tratamento de água;
 - Operações industriais para concentração de sucos de frutas, açúcares e leite.

Características de uma Membrana de NF (Filmtec)

FILMTEC Membranes

FILMTEC NF90-400 Nanofiltration Element

Features

The FILMTEC™ NF90-400 nanofiltration element is a high area, high productivity element designed to remove a high percentage of salts, nitrate, iron and organic compounds such as pesticides, herbicides and THM precursors.

The high active area membrane combined with low net driving pressure of the membrane allows the removal of these compounds at low operating pressure.

Product Specifications

Product	GMID	Nominal Active Surface Area ft ² (m ²)	Product Water Flow Rate gpd (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
NF90-400	149985	400 (37)		
NaCl			7,500 (28.4)	85 – 95
MgSO ₄			9,500 (36.0)	>97

1. Pervate flow and salt passage based on the following test conditions:
2,000 mg/l NaCl, 70 psi (0.48 MPa), 77°F (25°C) and 15% recovery.
2,000 mg/l MgSO₄, 70 psi (0.48 MPa), 77°F (25°C) and 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary +/-15%.
3. The above specifications are benchmark values. Please be sure to operate according to our system design guidelines.

Product	Single-Element Recovery	Dimensions – Inches (mm)		
		A	B	C
NF90-400	15%	40 (1,016)	1.5 (38)	7.9 (201)

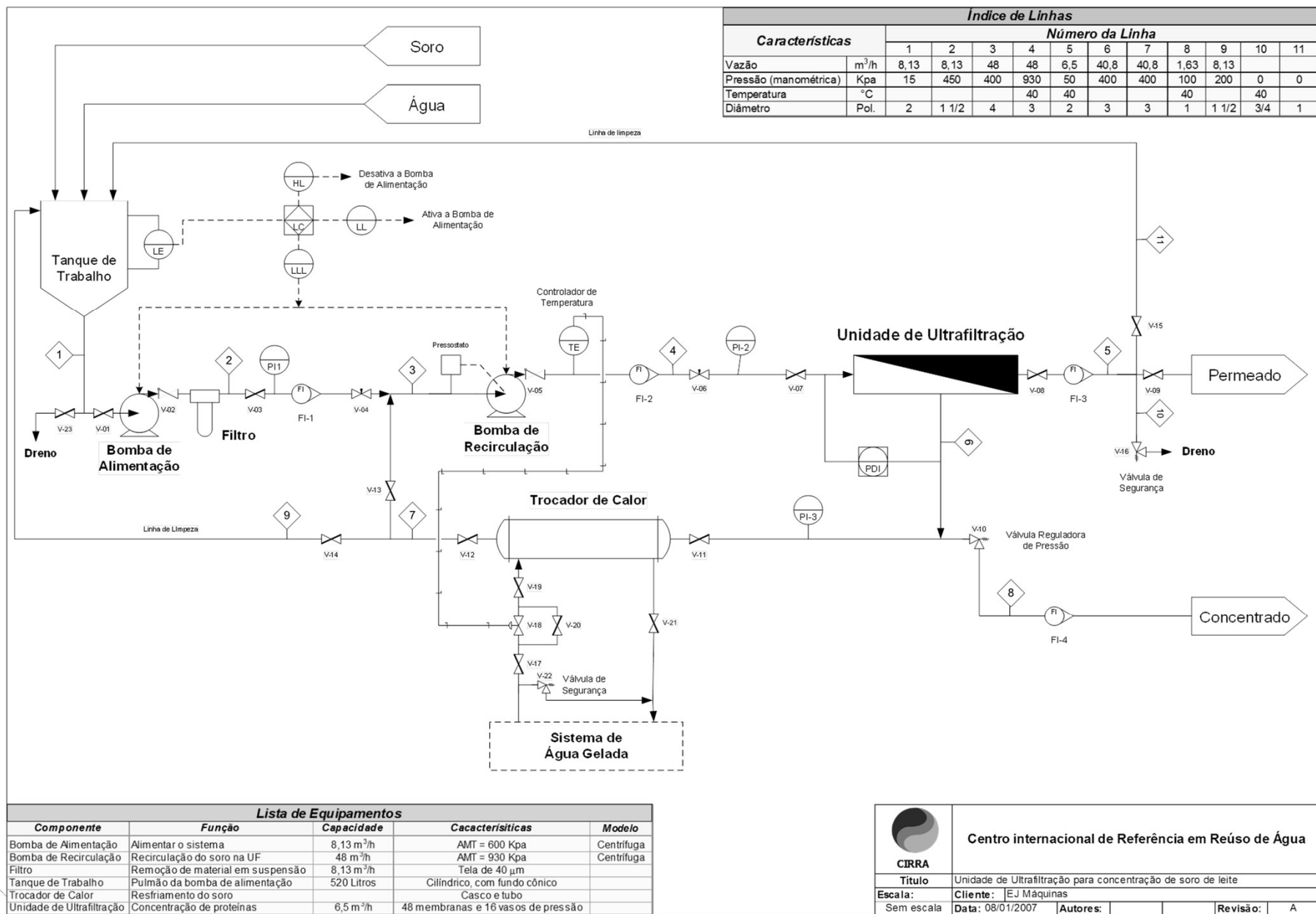
1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element applications and recommended element recovery rates for various feed sources.
2. Element to fit nominal 8.00-inch (203 mm) I.D. pressure vessel.

1 inch = 25.4 mm

Operating Limits

- Membrane Type: Polyamide Thin-Film Composite
 - Maximum Operating Temperature: 113°F (45°C)
 - Maximum Operating Pressure: 600 psig (41 bar)
 - Maximum Pressure Drop: 15 psig (1.0 bar)
 - pH Range, Continuous Operation^a: 3 – 10
 - pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)^b: 1 – 12
 - Maximum Feed Flow: 70 gpm (15.9 m³/hr)
 - Maximum Feed Silt Density Index: SDI 5
 - Free Chlorine Tolerance^c: <0.1 ppm
- ^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.
^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

Fluxograma de processo de um sistema de concentração de soro de leite

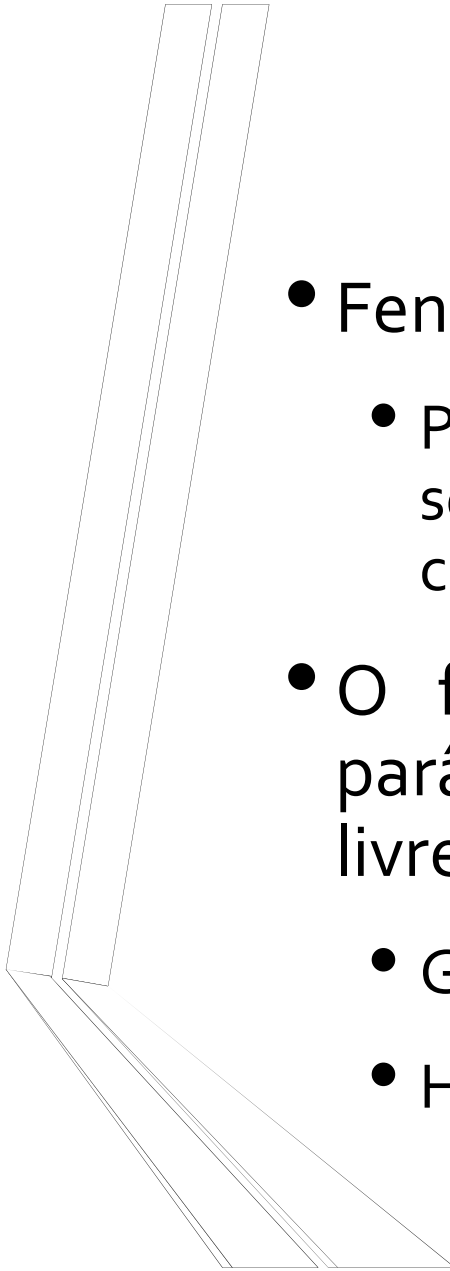


Centro internacional de Referência em Reúso de Água

Título		Unidade de Ultrafiltração para concentração de soro de leite			
Escala:		Cliente:		EJ Máquinas	
Sem escala		Data:		08/01/2007	
		Autores:			
		Revisão:		A	

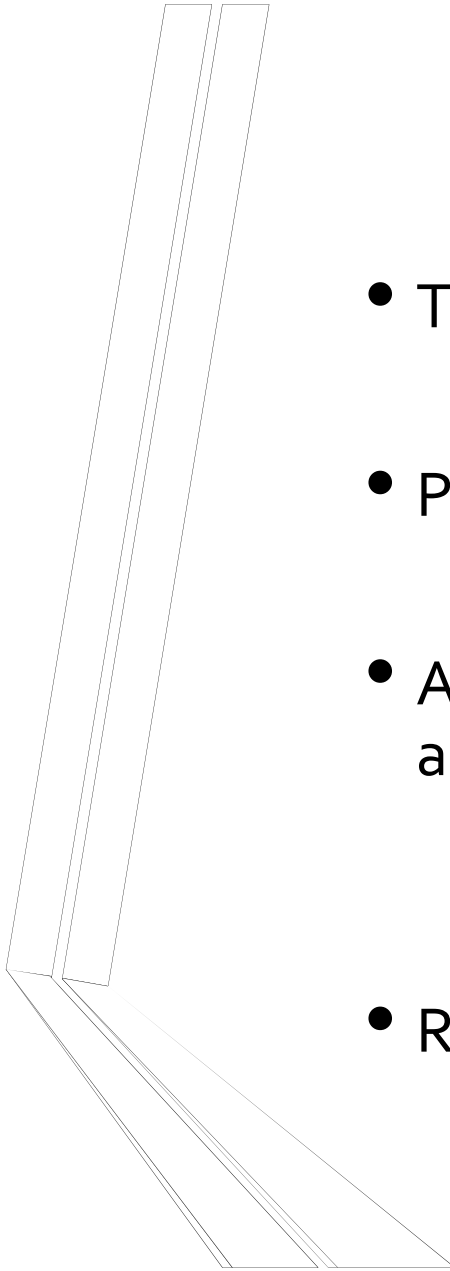


Unidade de Osmose Reversa para Concentração de Leite em Indústria de Laticínios



Osmose

- Fenômeno natural:
 - Passagem de um solvente (água), através de uma membrana semi-permeável, de uma solução diluída para uma mais concentrada.
- O fenômeno de osmose pode ser demonstrado por parâmetros termodinâmicos e pela equação de energia livre de Gibbs (Cheryan, 1998):
 - $G = H - TS$
 - $H = E + PV$



Osmose (cont.)

- Tomando-se as equações diferenciais:
 - $dG = dE + PdV + VdP - TdS - SdT$
- Pela primeira lei da termodinâmica:
 - $dE = dq + dW$
- Assumindo-se que a mudança no sistema é reversível e que apenas ocorra trabalho de expansão, tem-se:
 - $dq = TdS$ (segunda lei da termodinâmica);
 - $dW = - PdV$
- Rearranjando-se as expressões tem-se:
 - $dG = VdP - SdT$

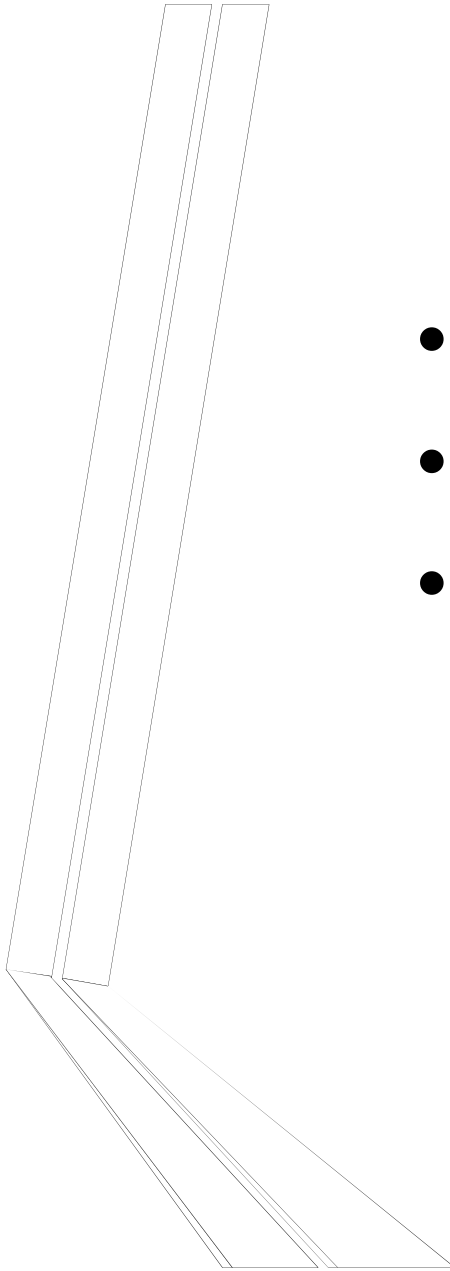
Osmose (cont.)

- Em um sistemas abertos:
 - $dG = -SdT + VdP + \mu_1 dn_1 + \mu_2 dn_2 + \mu_3 dn_3 + \dots$
 - μ = potencial químico dos componentes;
 - n = número de moles dos componentes.
 - $dG = -SdT + VdP + \mu_i dn_i$
- Derivando-se em relação à n_i :

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_j}$$

Osmose (cont.)

- $dG = -SdT + VdP + \mu_i dn_i$
- Derivando em relação à dP :
 - $(\partial G/\partial P)_{T, n_i} = V$
- Derivando-se a expressão anterior em relação à n_i :
 - $(\partial^2 G/\partial n_i \partial P)_{T; P; n_j} = (\partial V/\partial n_i)_{T; P; n_j}$
 - $(\partial V/\partial n_i)_{T; P; n_j} = \forall_i$ (volume específico)
- Derivando-se a expressão da atividade química em relação à P_i :
 - $d\mu_i/dP_i = \forall_i \rightarrow d\mu_i = \forall_i \cdot dP_i$
 - $d\mu_i = RT dP_i/P_i$ (lembrar que $P_i \cdot V = n_i \cdot R \cdot T$ e $\forall_i = V/n_i$)



Osmose (cont.)

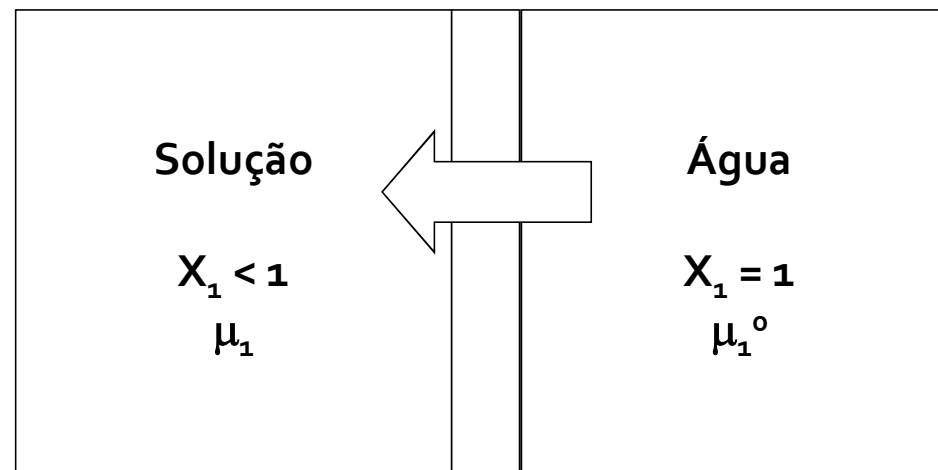
- Quando $P = P_o \rightarrow \mu_i = \mu_i^o$
- Quando $P = P \rightarrow \mu_i = \mu_i^1$
- Integrando-se a expressão tem-se:
 - $\mu_i^o - \mu_i^1 = - RT \ln P/P_o$
 - P = pressão de vapor da solução;
 - P_o = pressão de vapor da água pura.

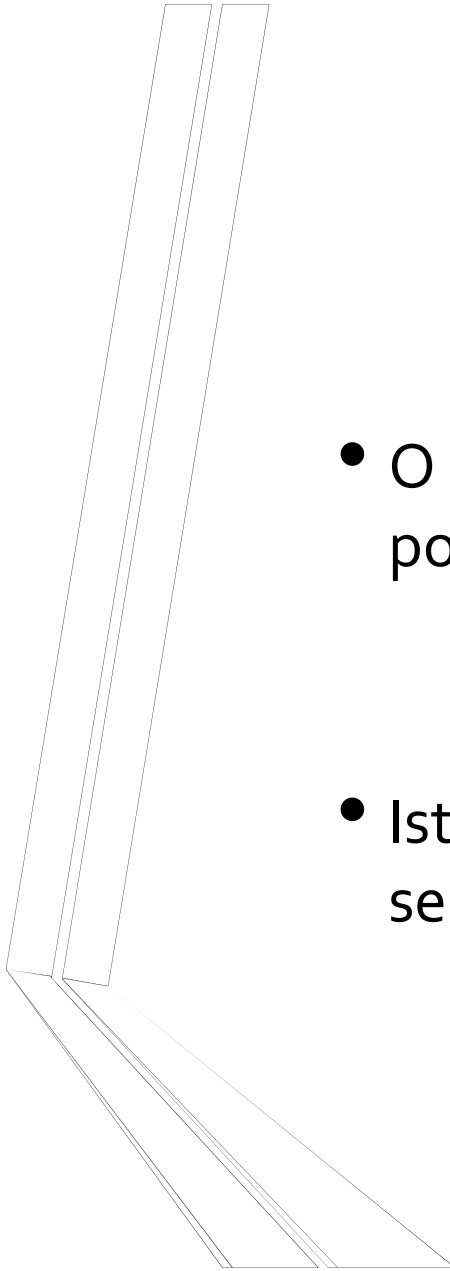
Osmose (cont.)

- Para sistemas aquosos a água pura tem potencial químico padrão representado por μ_1^0 , neste caso a fração molar da água é 1;
- No caso de soluções aquosas o potencial químico é representado por μ_i^1 e a fração molar da água é menor que 1;
- Em termos físicos, a maior forma de energia da água é quando ela se encontra no estado puro;
- A adição de qualquer substância ou impureza à água aumenta a entropia do sistema e pela lei de Gibbs isto irá resultar na redução da energia livre.

Osmose (cont.)

- Como a pressão de vapor de uma solução é menor do que a pressão de vapor do solvente puro, tem-se:
 - $P = X_1 \cdot P_o$ (Lei de Raoult) $\rightarrow \mu_1^o - \mu_1 = -RT \ln X_1$
 -
- Uma vez que X_1 é sempre menor que 1, $\ln X_1$ será menor que zero, resultando em $\mu_1^o - \mu_1$ maior que zero.





Osmose (cont.)

- O potencial químico da água em uma solução é menor que o potencial químico da água no estado puro;
- Isto justifica a passagem da água pura através da membrana semipermeável, da solução diluída para a concentrada.

Osmose Reversa (cont.)

- Para que o fluxo de água seja interrompido é necessário que a energia do lado da solução concentrada seja aumentada, o que é feito com o aumento da pressão:

$$\mu_i - \mu_i^0 = RT \ln X_i + \int_{P_0}^{P^*} \bar{V} dP$$

- P^* = pressão externa;
- P_0 = pressão padrão.
- No equilíbrio $\mu_1 - \mu_1^0 = 0$ e a pressão aplicada é chamada de pressão osmótica de equilíbrio:
 - $\pi = P^* - P_0$

Osmose Reversa (cont.)

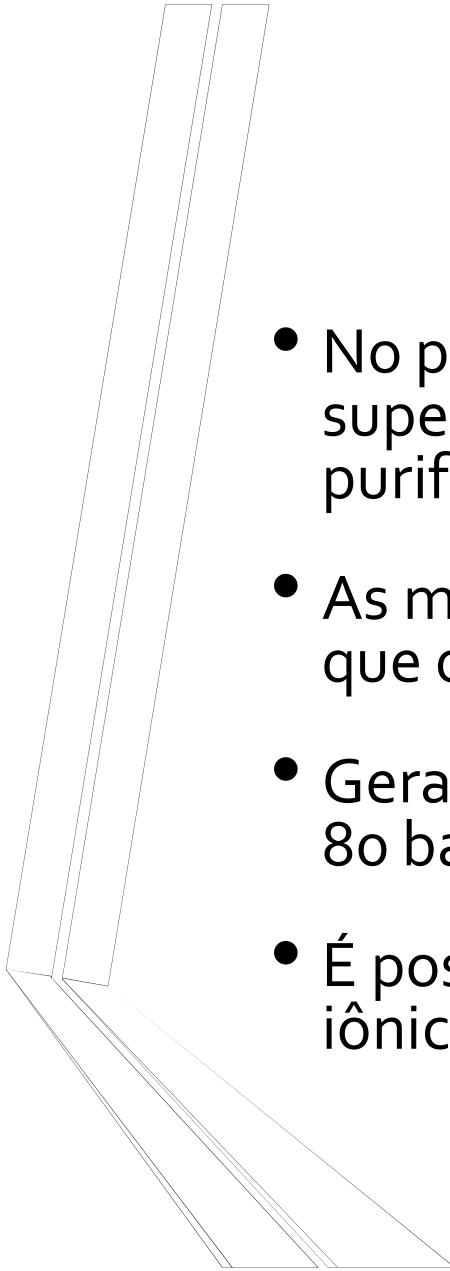
- Assumindo-se que o líquido é incompressível:

$$\pi = -\frac{RT}{V_1} \ln X_1$$

- Para soluções diluídas a pressão osmótica pode ser obtida pela expressão desenvolvida por Van't Hoff:

$$\pi = \frac{n_2}{V} . RT = i . \frac{C}{M} . RT$$

- C = concentração do soluto em g/L
- M = massa molecular do soluto;
- i = número de íons produzidos na ionização



Osmose Reversa

- No processo de osmose reversa aplica-se uma pressão hidráulica superior à pressão osmótica de equilíbrio para promover a purificação da água;
- As membranas de osmose apresentam poros com diâmetro menor que $0,001\ \mu\text{m}$;
- Geralmente a pressão utilizada varia de 3,4 a valores próximos de 80 bar;
- É possível separar contaminantes com baixa massa molecular, iônicos ou não.



Osmose Reversa (cont.)

- Aplicações:
 - Dessalinização de água salina e salobra;
 - Produção de água ultrapura;
 - Concentração de soluções específicas para recuperar elementos de interesse;
 - Tratamento de efluentes.

Características de uma Membrana de OR (Filmtec)

FILMTEC Membranes

FILMTEC LE-400 High Productivity Low-Energy Brackish Water RO Element

Features

The FILMTEC™ LE-400 element is a low-energy element for industrial and municipal applications that operates at low pressure to deliver energy savings in new equipment or replacement situations where energy cost is an important factor and unit price is a key driver.

- Delivers equivalent permeate flow at 40% lower feed pressure, compared to the FILMTEC BW30-400.
- Offers the proven performance and high productivity of the FILMTEC BW30-400 element construction, with lower energy use and operating expense.
- The new FILMTEC LE-400 has an industry standard 1.125 inch ID permeate tube to facilitate element replacement.

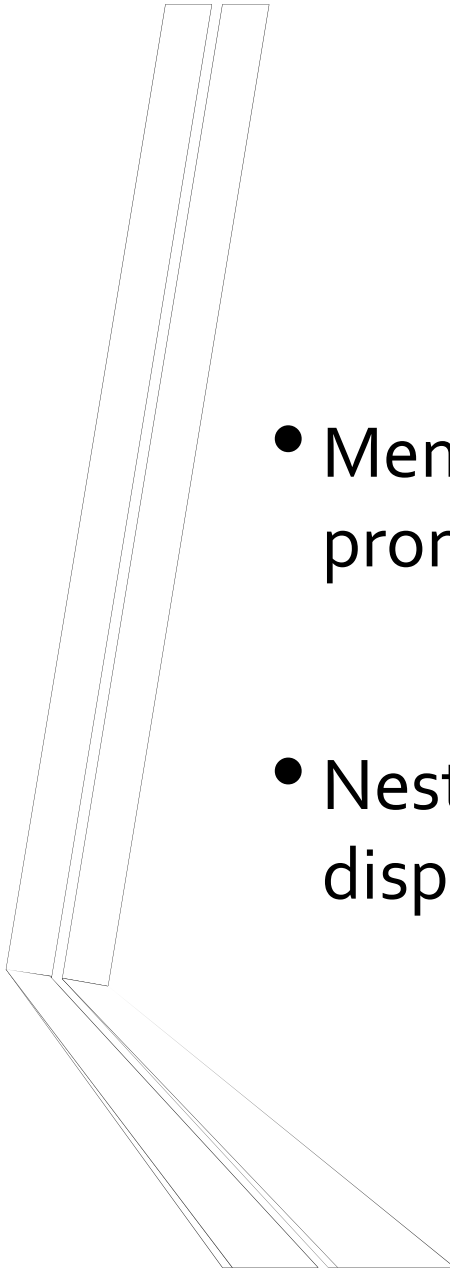
Product Specifications

Product	Part number	Active area ft ² (m ²)	Feed spacer thickness (mil)	Permeate flow rate gpd (m ³ /d)	Stabilized salt rejection (%)	Minimum salt rejection (%)
LE-400	249109	400 (37)	28	11,500 (44)	99.3%	99.0%

1. Permeate flow and salt rejection based on the following standard conditions: 2,000 ppm NaCl, 150 psi (10.3 bar), 77°F (25°C), pH 8 and 15% recovery.
2. For comparison, the LE-400 will have a permeate flow of 12,200 gpd (46 m³/d) and stabilized salt rejection of 99.3% when normalized to a feed solution of 1,500 ppm NaCl as used by some manufacturers.
3. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than 15% below the value shown.
4. Sales specifications may vary as design revisions take place.
5. Active area guaranteed $\pm$ 3%. Active area as stated by FilmTec is not comparable to nominal membrane area often stated by some manufacturers. Measurement method described in Form No. 609-00434.

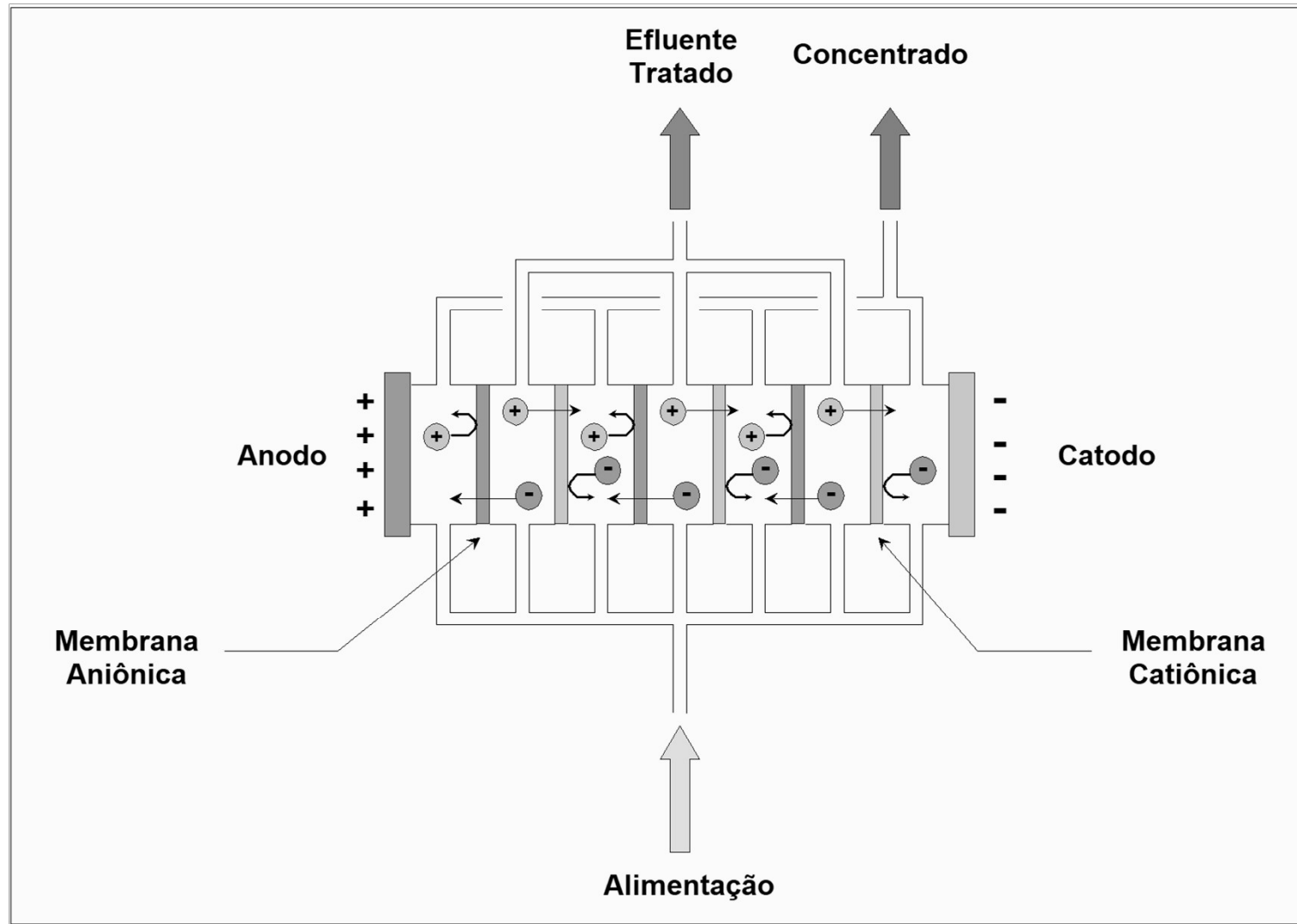
Operating Limits

- Membrane Type Polyamide Thin-Film Composite
 - Maximum Operating Temperature^a 113°F (45°C)
 - Maximum Operating Pressure 600 psig (41 bar)
 - Maximum Pressure Drop 15 psig (1.0 bar)
 - pH Range, Continuous Operation^a 2 – 11
 - pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)^b 1 – 12
 - Maximum Feed Flow 85 gpm (19 m³/hr)
 - Maximum Feed Silt Density Index SDI 5
 - Free Chlorine Tolerance^c <0.1 ppm
- ^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
- ^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.
- ^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

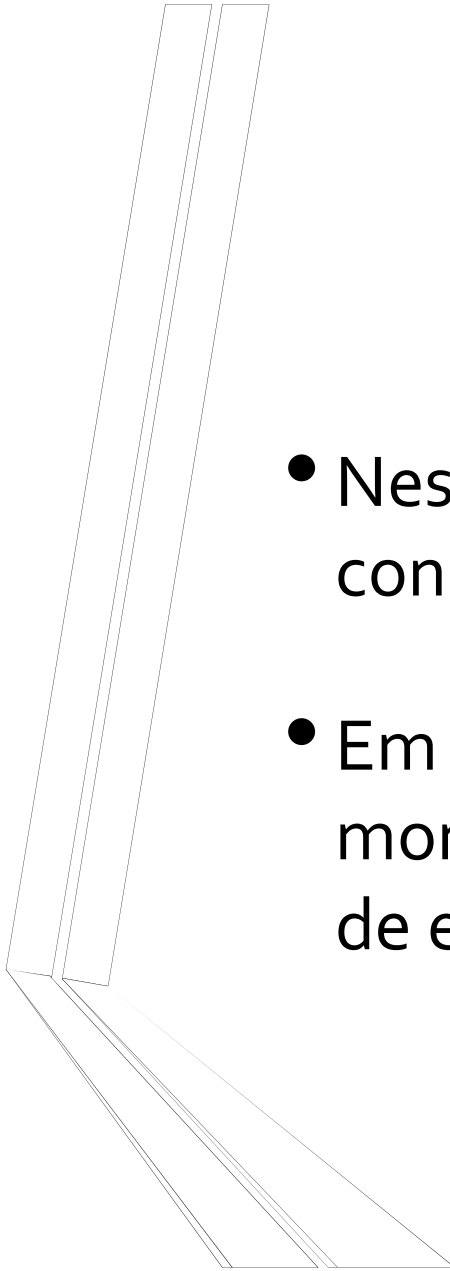


Eletrodiálise

- Membranas com cargas elétricas são utilizadas para promover a separação de espécies iônicas;
- Neste caso utilizam-se membranas aniônicas e catiônicas dispostas alternadamente entre dois eletrodos

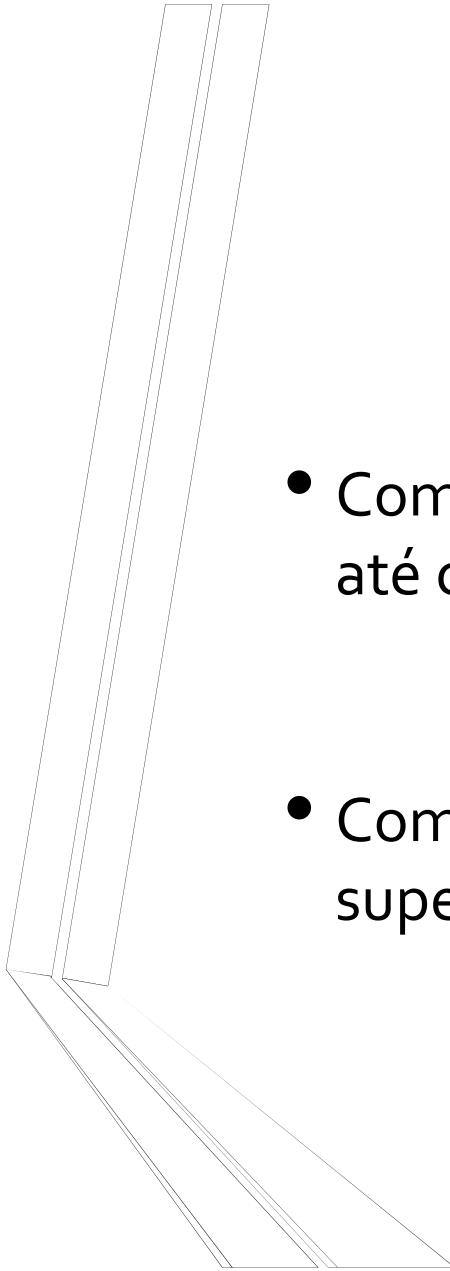


Representação Esquemática do Processo de Eletrodialise



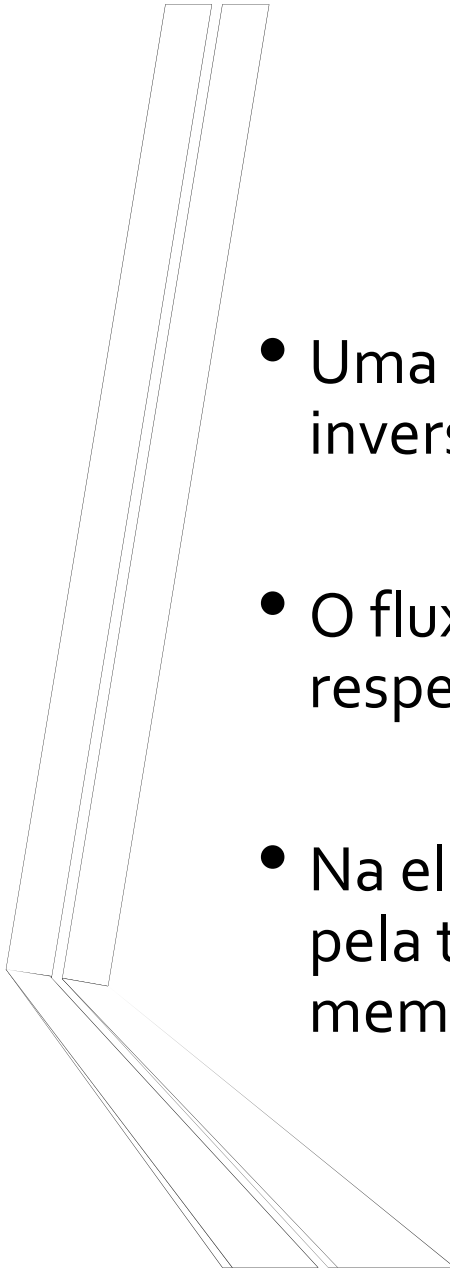
Eletrodiálise (cont.)

- Neste processo pode ocorrer a eletrólise da água, com consequente formação de H_2 e OH^- ;
- Em aplicações industriais centenas de pares de células são montadas em uma pilha, melhorando a eficiência do uso de energia;



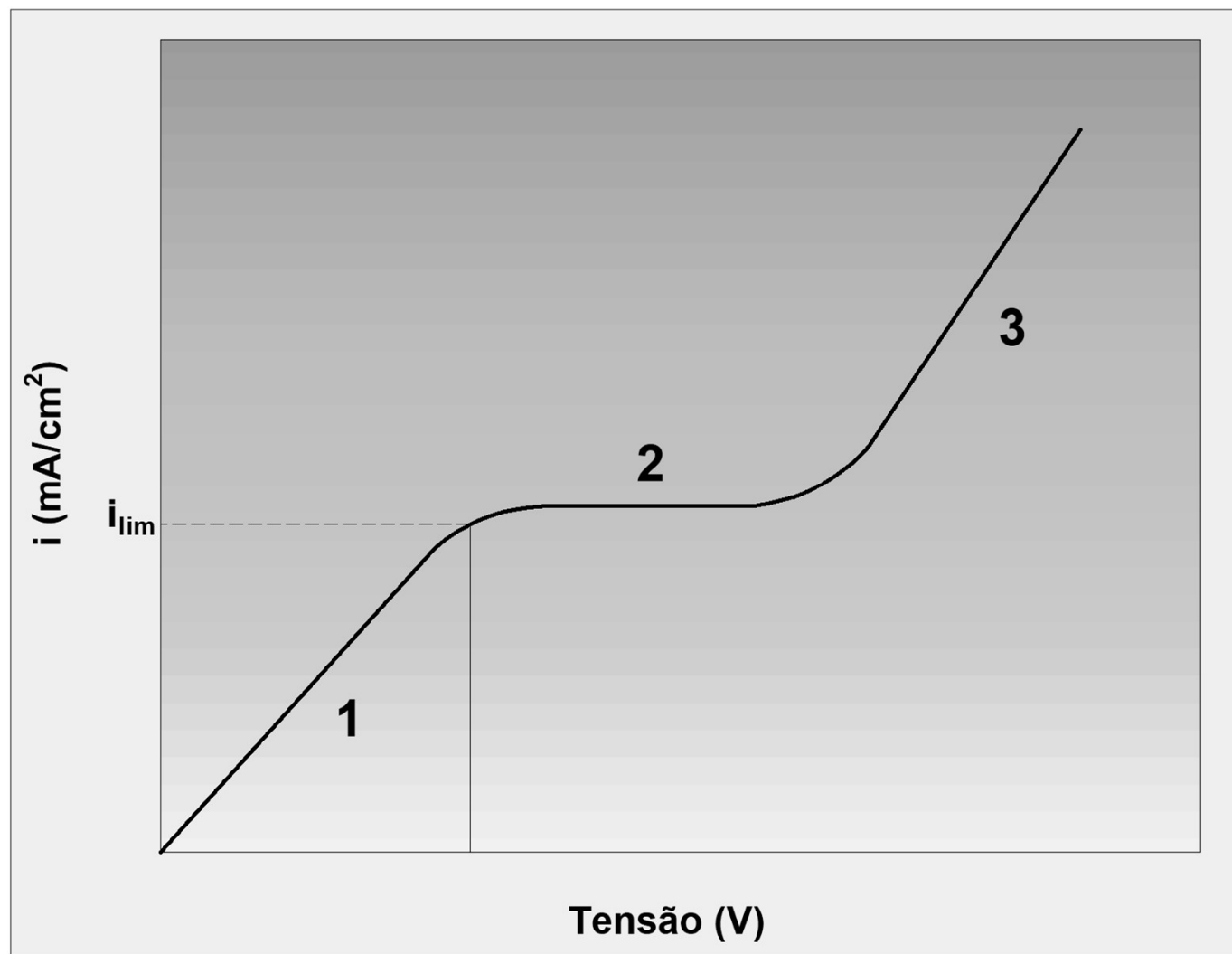
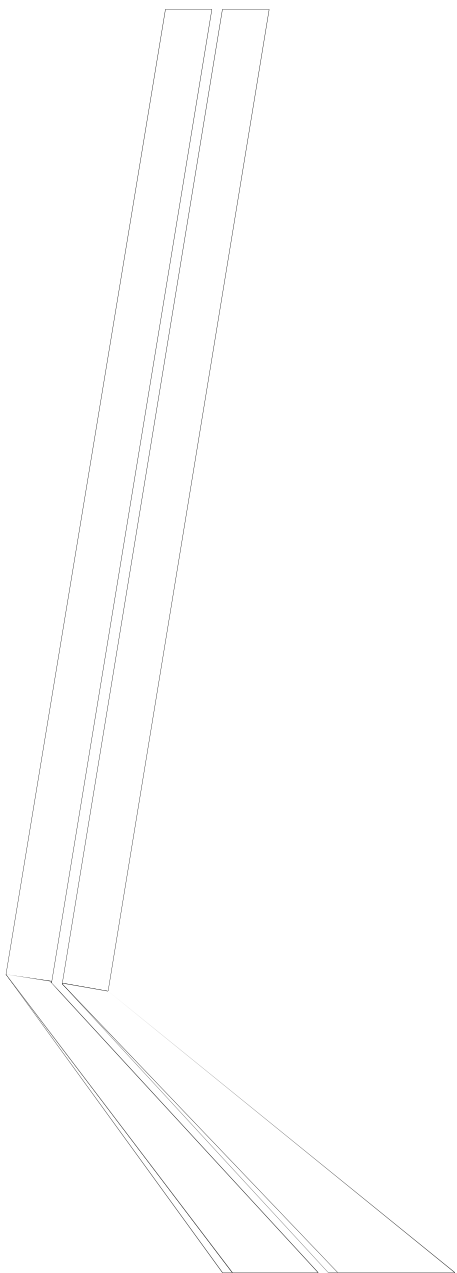
Eletrodiálise (cont.)

- Compostos orgânicos e não iônicos não são afetados, podendo até causar problemas à membranas;
- Compostos iônicos com baixa solubilidade podem precipitar na superfície das membranas.

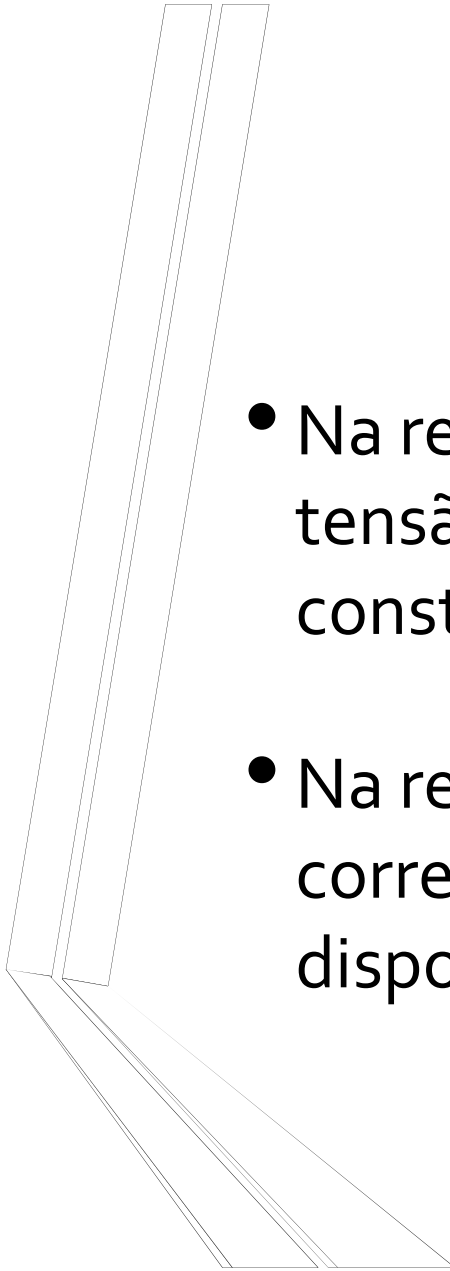


Eletrodiálise (cont.)

- Uma opção para reduzir o potencial de depósito é promover a inversão da polaridade dos eletrodos periodicamente;
- O fluxo osmótico interfere na eficiência do processo, no que diz respeito à produção de água purificada;
- Na eletrodiálise a densidade de corrente (mA/cm^2), é determinada pela tensão aplicada aos eletrodos e resistência total da pilha de membranas.

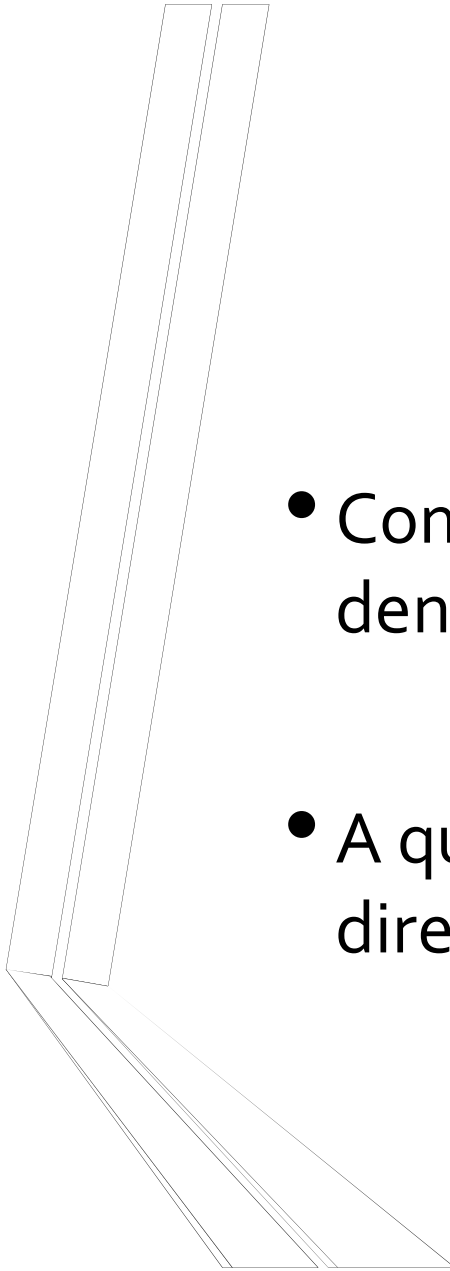


Características de tensão e corrente em uma célula de eletrodíálise



Eletrólise (cont.)

- Na região 1 a densidade de corrente se relaciona com a tensão aplicada pela lei de Ohm (resistência praticamente constante);
- Na região 2 há um aumento na resistência à passagem de corrente através do sistema indicando que todos os íons disponíveis foram transferidos;



Eletrodiálise (cont.)

- Com o aumento da tensão irá ocorrer o aumento na densidade de corrente, resultando na eletrólise da água;
- A quantidade de íons transportada através da membrana é diretamente proporcional à corrente elétrica.

Eletrólise (cont.)

$$I = \frac{z \mathfrak{F} q \Delta C_i}{\xi}$$

I = corrente elétrica ou densidade de corrente (A ou A/cm²);

Z = valência do íon;

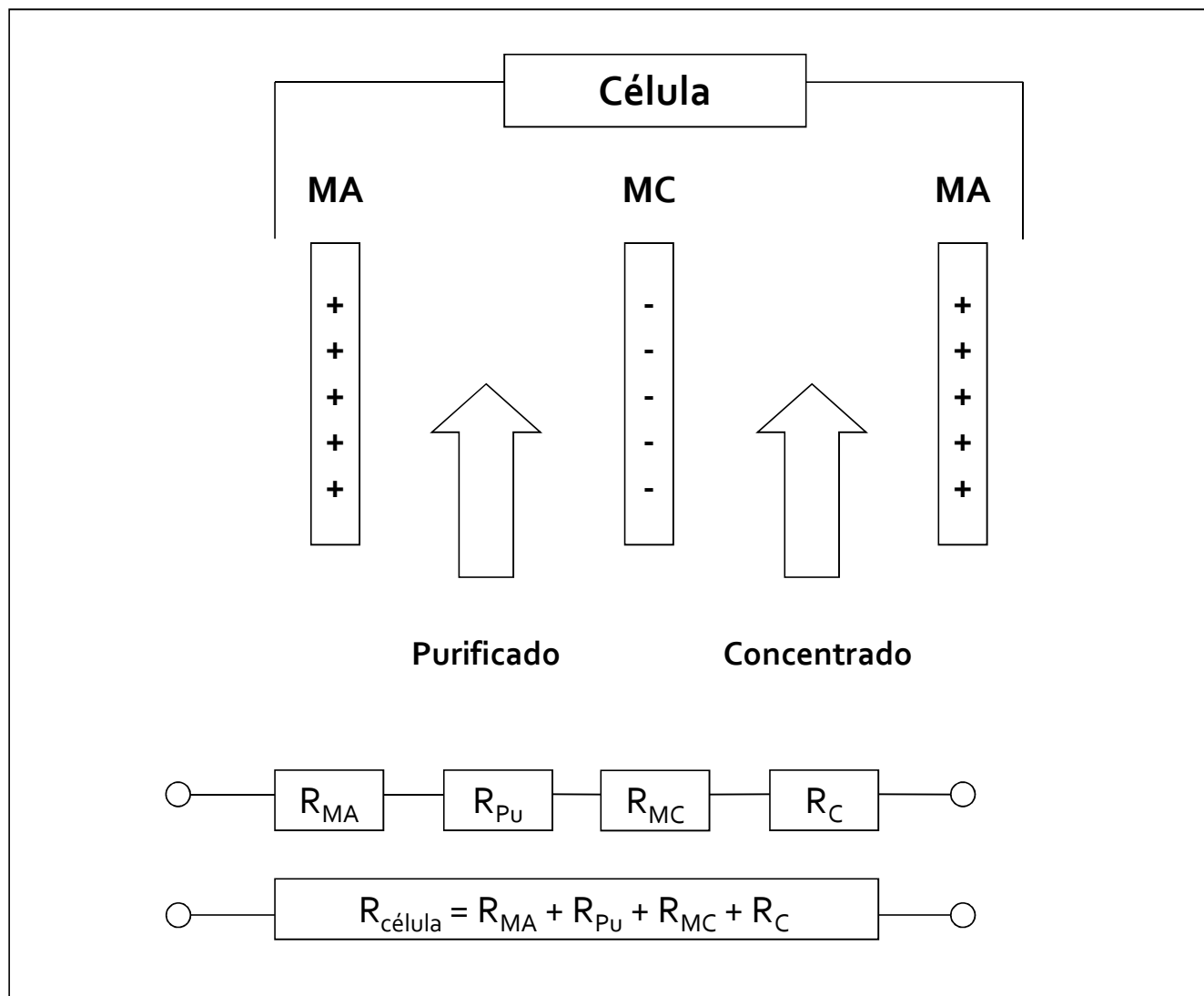
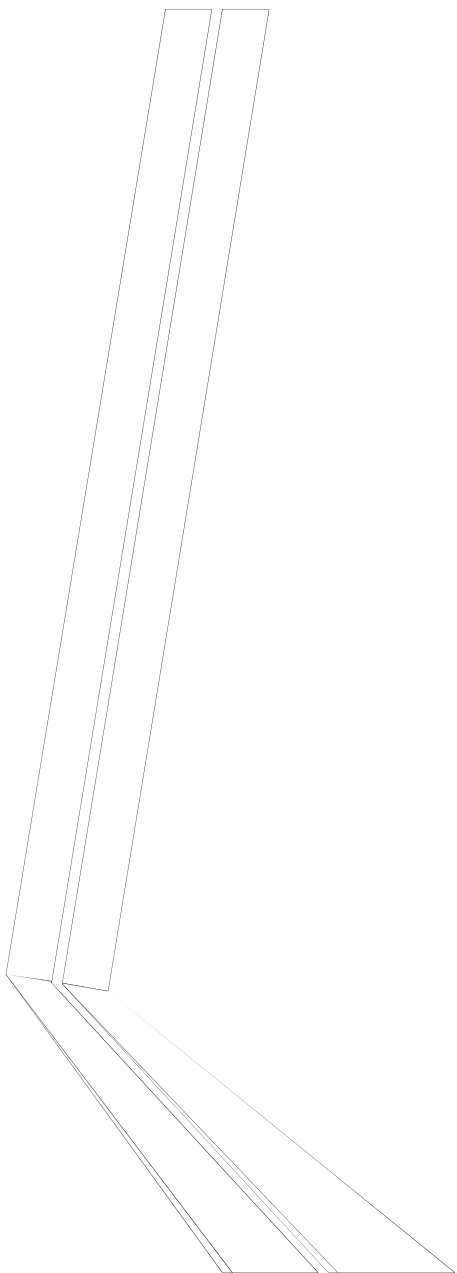
$\mathfrak{F}$ = Constante de Faraday (96.500 coulombs/eq ou A.segundo/eq);

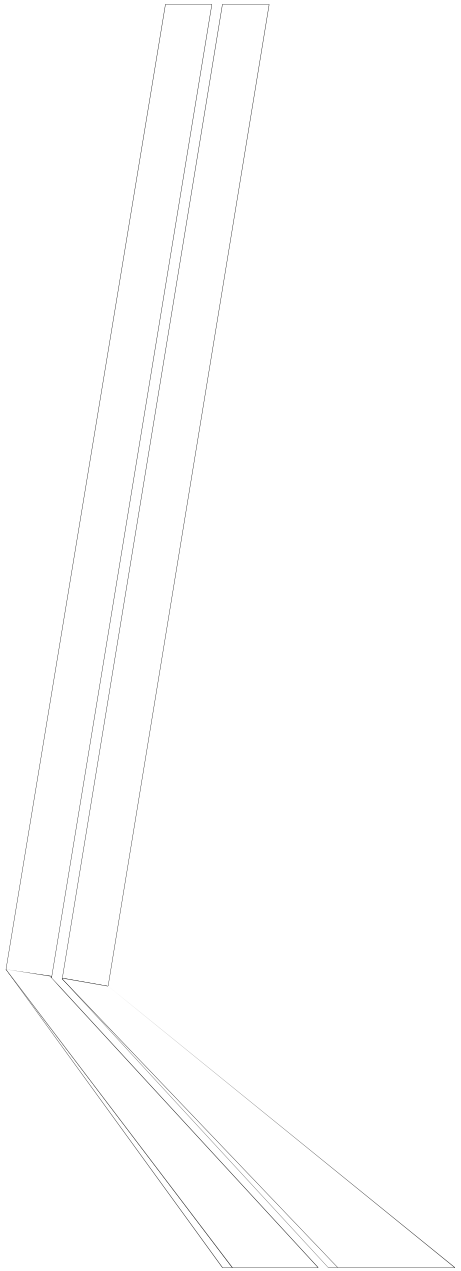
q = vazão (L/s)

ΔC_i = Variação na concentração de íons entre a alimentação e o purificado (eq/L.cm²);

ξ = eficiência de aproveitamento da corrente elétrica;

- Teoricamente 1 Faraday é capaz de transferir 1 equivalente de cátions para o catodo e 1 equivalente de ânions para o anodo;
- A corrente se relaciona com o potencial elétrico pela lei de Ohm.





Eletrodiálise (cont.)

- Aplicações:
 - Produção de água potável;
 - Concentração de sais;
 - Tratamento de efluentes;
 - Obtenção de cloro e hidróxido.

Módulo de Eletrodiálise da Suez Water Technology



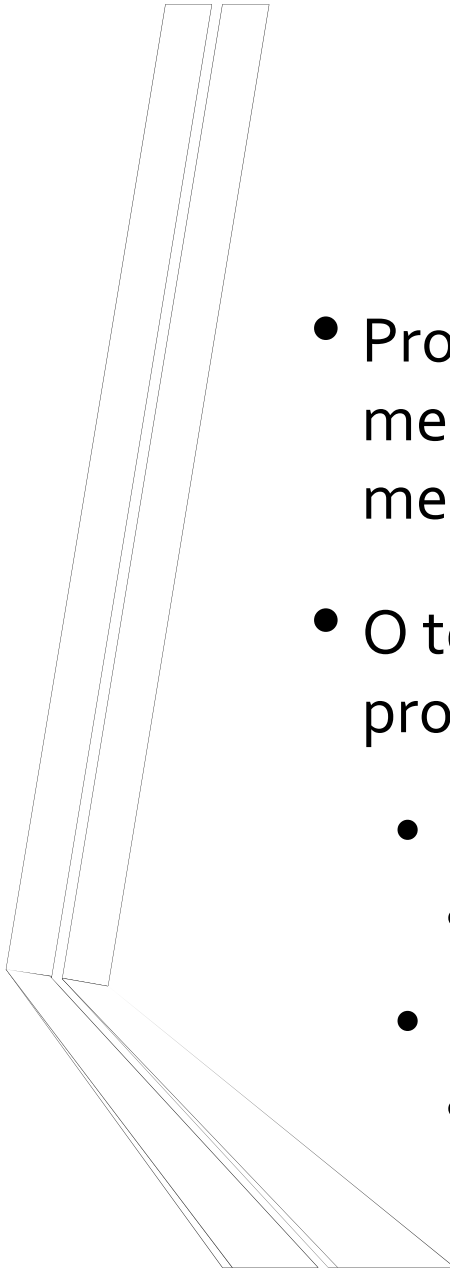
Operating Parameters

Water Recovery	Up to 94%
Salt Removal	50% to 95%
Silica Removal	none
Temperature	40 to 100°F (4 To 38°C)
Maximum Feed Pressure	50 psi
Input Voltage	480VAC/3/60Hz

Feed Water Requirements

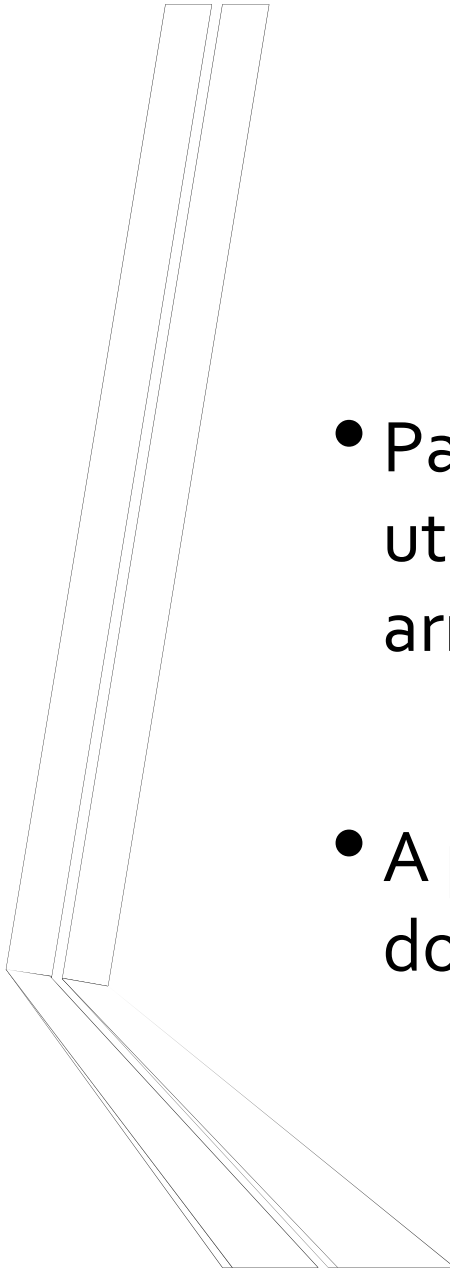
Typical Feed TDS	100 to 3,000 ppm (mg/l)
Maximum Feed TDS	12,000 ppm (mg/l)
Silica (Reactive)	unlimited
pH	2 to 10
SDI (5 min. test)	10
Turbidity	< 0.5 NTU
Free Chlorine (continuous)	0.5 ppm (mg/l)

<https://www.suezwatertechnologies.com/products/electrodialysis-reversal-water-treatment>



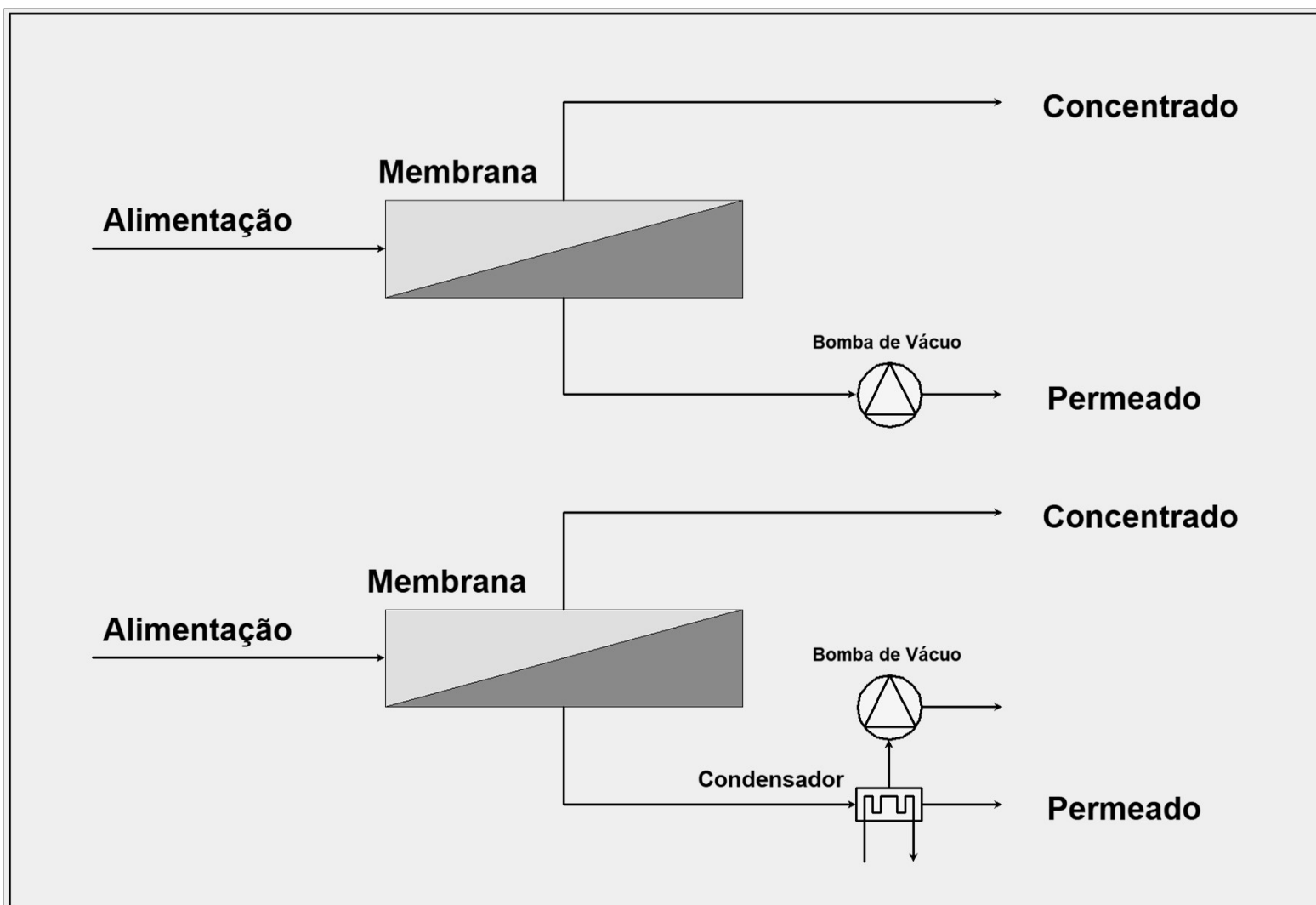
Pervaporação

- Processo utilizado para a separação seletiva de solventes, por meio da redução da pressão de vapor em um dos lados da membrana;
- O termo pervaporação resulta das principais etapas envolvidas no processo de separação:
 - Permeação → dissolução e difusão de um dos componentes da solução através da membrana;
 - Evaporação → absorção de calor pelo componente, que passa para vapor após atravessar a membrana.

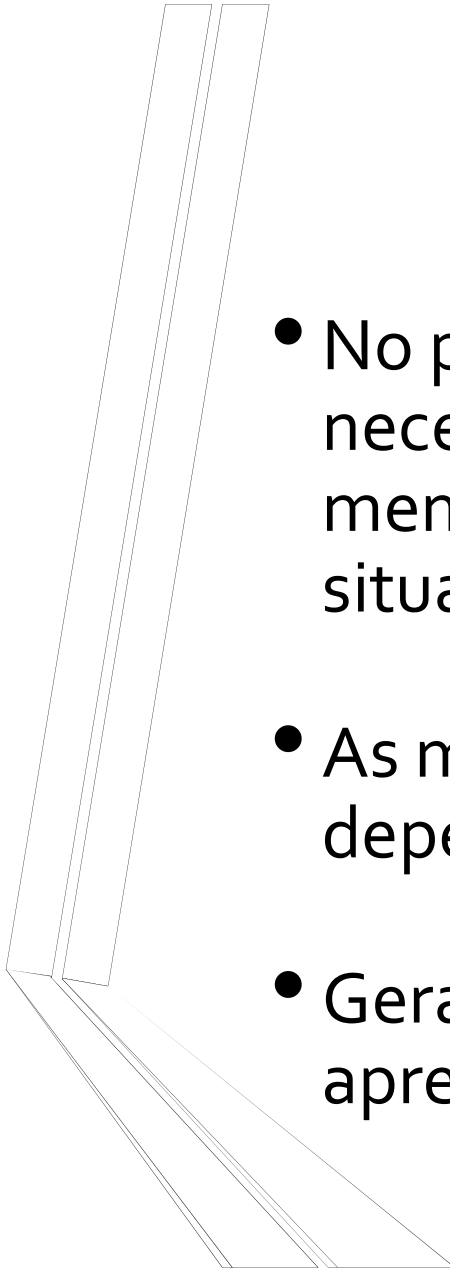


Pervaporação (cont.)

- Para facilitar o mecanismo de transporte pode-se utilizar vácuo do lado do permeado, ou um gás de arraste.
- A pressão parcial do lado do permeado deve ser menor do que a pressão de saturação;

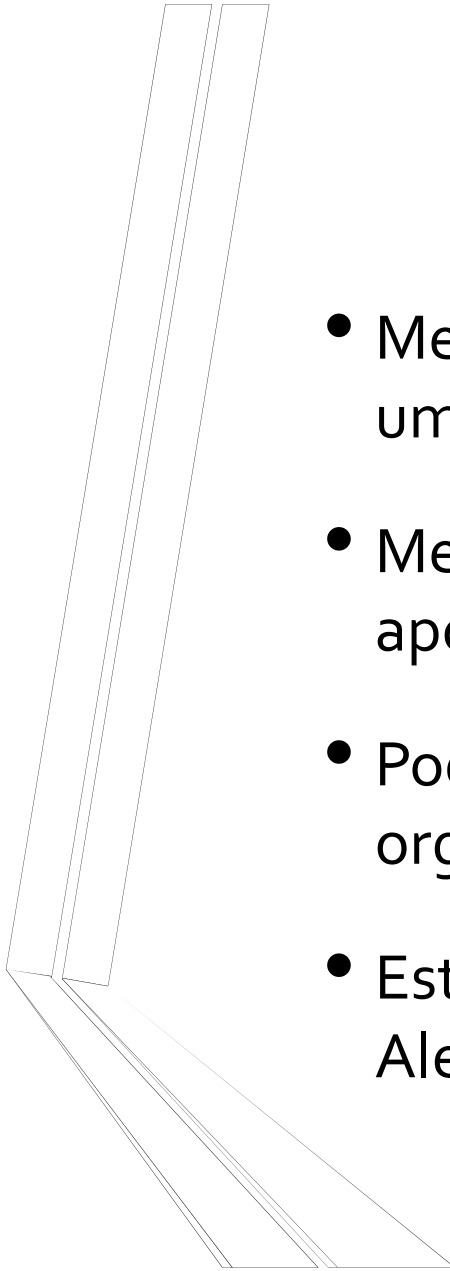


Arranjos do Processo de Pervaporação



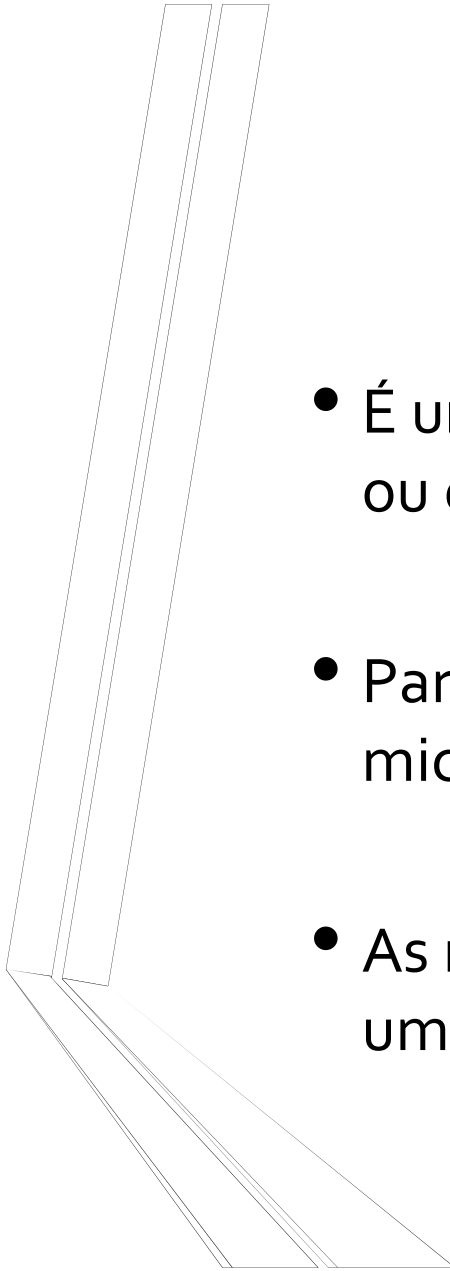
Pervaporação (cont.)

- No processo de pervaporação e separação de gases é necessário utilizar membranas não porosas, embora membranas porosas possam ser utilizadas em algumas situações;
- As membranas podem ser hidrofílicas ou hidrofóbicas, dependendo do contaminante que se deseja separar;
- Geralmente considera-se como contaminante aquele que se apresenta em menor concentração na mistura;



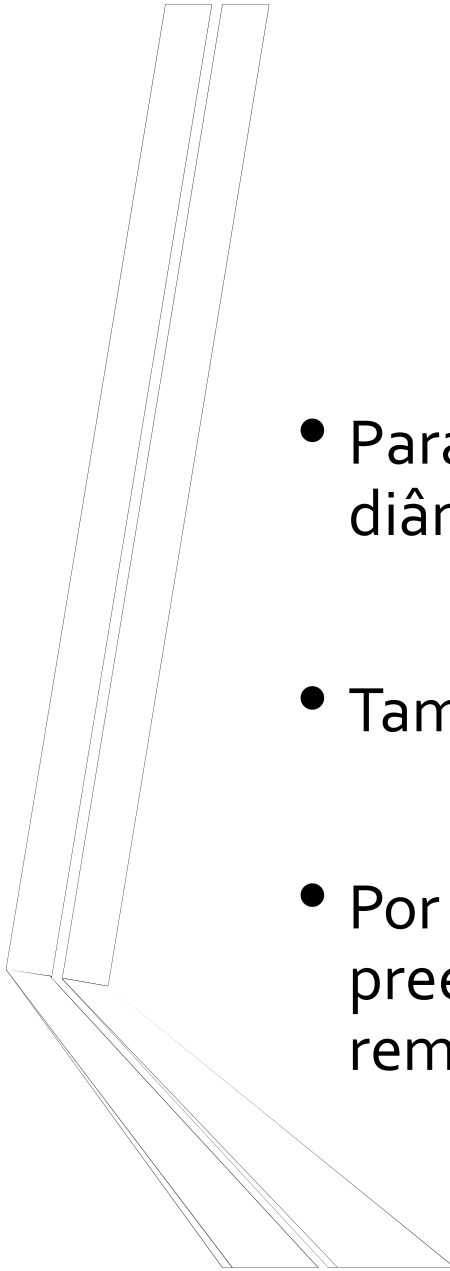
Pervaporação (cont.)

- Membranas hidrofílicas são utilizadas para remover água de uma mistura;
- Membranas hidrofóbicas são utilizadas para remover solventes apolares de uma solução aquosa ou outros solventes polares;
- Pode-se utilizar a pervaporação para a remoção de compostos orgânicos voláteis da água;
- Este processo foi aplicado em escala industrial em 1982 na Alemanha e Holanda.



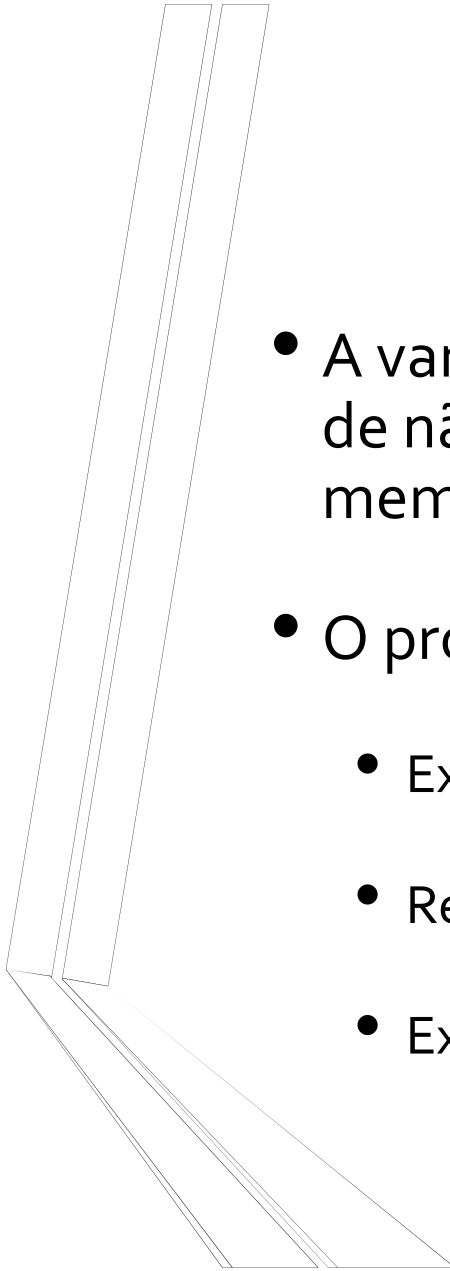
Extração à Vácuo

- É um processo que pode ser utilizado para a separação de gases ou compostos voláteis e semivoláteis de uma solução aquosa;
- Para se obter a separação utiliza-se vácuo e uma membrana com micro poros;
- As membranas apresentam uma grande área específica criando uma extensa superfície de contato;



Extração à Vácuo (cont.)

- Para esta operação são utilizadas membranas hidrofóbicas, com diâmetro de poro próximo de $0,1\ \mu\text{m}$ e porosidade de 70%;
- Também podem ser utilizadas membranas não porosas;
- Por ser hidrofóbica os poros da membrana permanecem secos e preenchidos com gás ou vapor dos compostos que estão sendo removidos;



Extração à Vácuo (cont.)

- A vantagem da utilização de membranas não porosas está no fato de não haver potencial de penetração de líquido através da membrana;
- O processo de extração a vácuo pode ser utilizado para:
 - Extração de gases da água;
 - Remoção de produtos voláteis;
 - Extração de amônia.



Liqui-Cel® Contactors efficiently treat ammonia wastewater in European facility

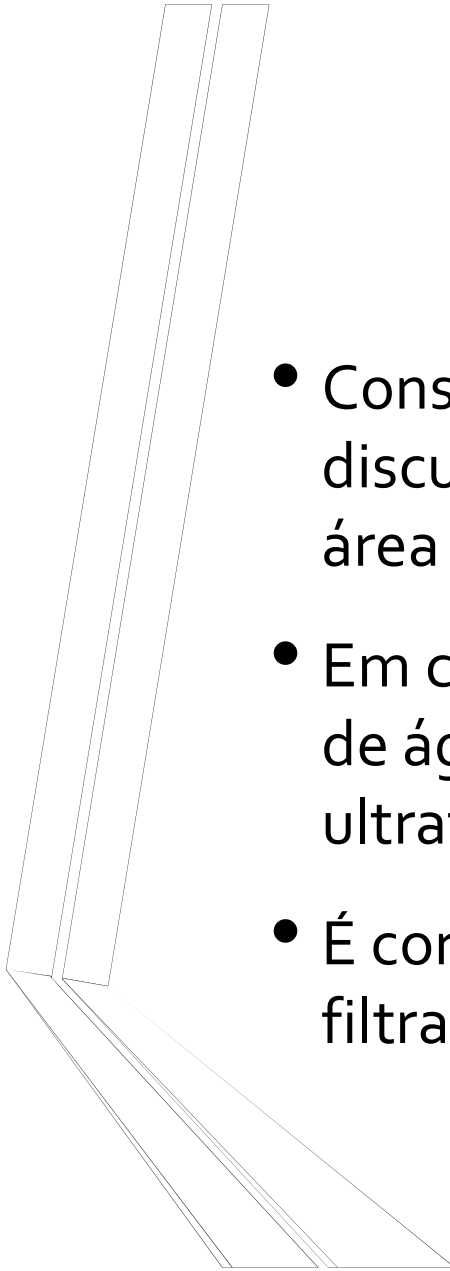
Extração de Amônia:

Capacidade do sistema = 10 m³/h;

Concentração de NH₃ = 1.100 mg/L;

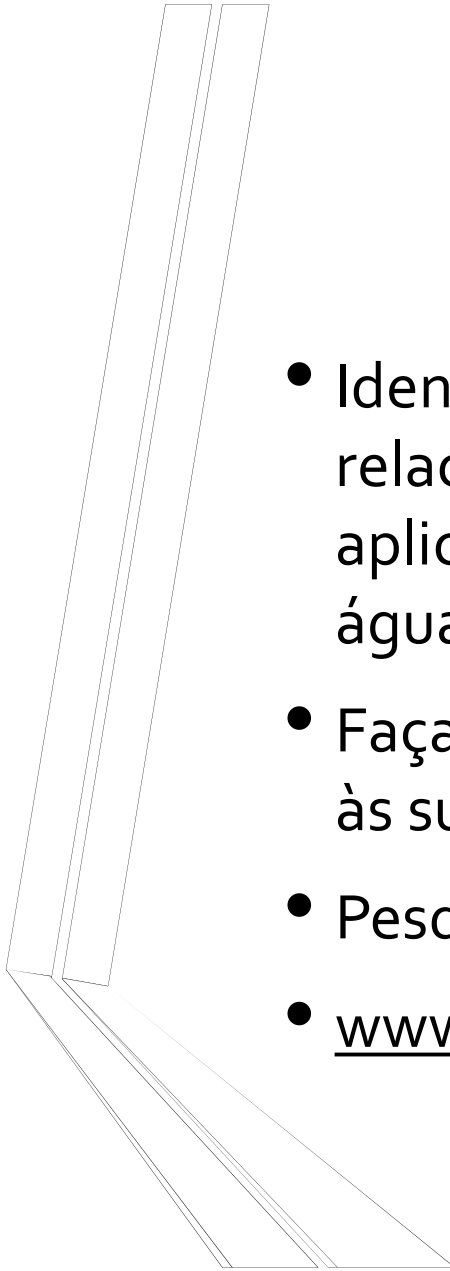
Eficiência de remoção = 95%

http://www.liqui-cel.fr/uploads/documents/TB43_Rev%202_10-05%20Ammonia%20Removal.pdf



Perguntas para fixar conceitos

- Considerando-se os processos de separação por membranas, discuta a sua versatilidade em relação às possíveis aplicações na área ambiental e de processos industriais.
- Em comparação aos processos convencionais para tratamento de água, quais as vantagens e desvantagens dos processos de ultrafiltração?
- É correto designar os processos de nanofiltração e osmose como filtração? Justifique.



Atividade 2

- Identifique na literatura atual (últimos 3 anos), um artigo, relacionados à utilização de processos de pervaporação para aplicação em processos industriais ou tratamento de água/efluentes.
- Faça uma análise crítica da utilização deste processo com relação às suas vantagens e desvantagens.
- Pesquisar em:
- www.sciencedirect.com.