

# PHA 3418 - Tecnologia de Separação por Membranas para Tratamento de Água e Efluentes

## Aula 10 - Principais componentes do sistema e estratégias de pré-tratamento



Prof.: José Carlos Mierzwa  
mierzwa@usp.br

# Introdução

- A operação adequada dos sistemas de separação por membranas só é possível mediante a utilização de componentes que permitam:
  - Operar o sistema nas condições estabelecidas;
  - Acompanhar o desempenho do processo;
  - Indicar a necessidade de intervenções.

# Operação do sistema

- Para a operação adequada dos processos de separação por membranas deve-se dar atenção especial:
  - Ao subsistema de pré-tratamento;
  - Bomba de alimentação;
  - Válvulas;
  - Medidores de pressão (manômetros);
  - Medidores de vazão;
  - Dispositivos de segurança.

# Acompanhamento da operação

- Para acompanhar o desempenho do sistema deve-se considerar:
  - Medidores de pressão diferencial;
  - Indicadores de temperatura;
  - Condutivímetro;
  - pH-metro.

# Subsistema de pré-tratamento

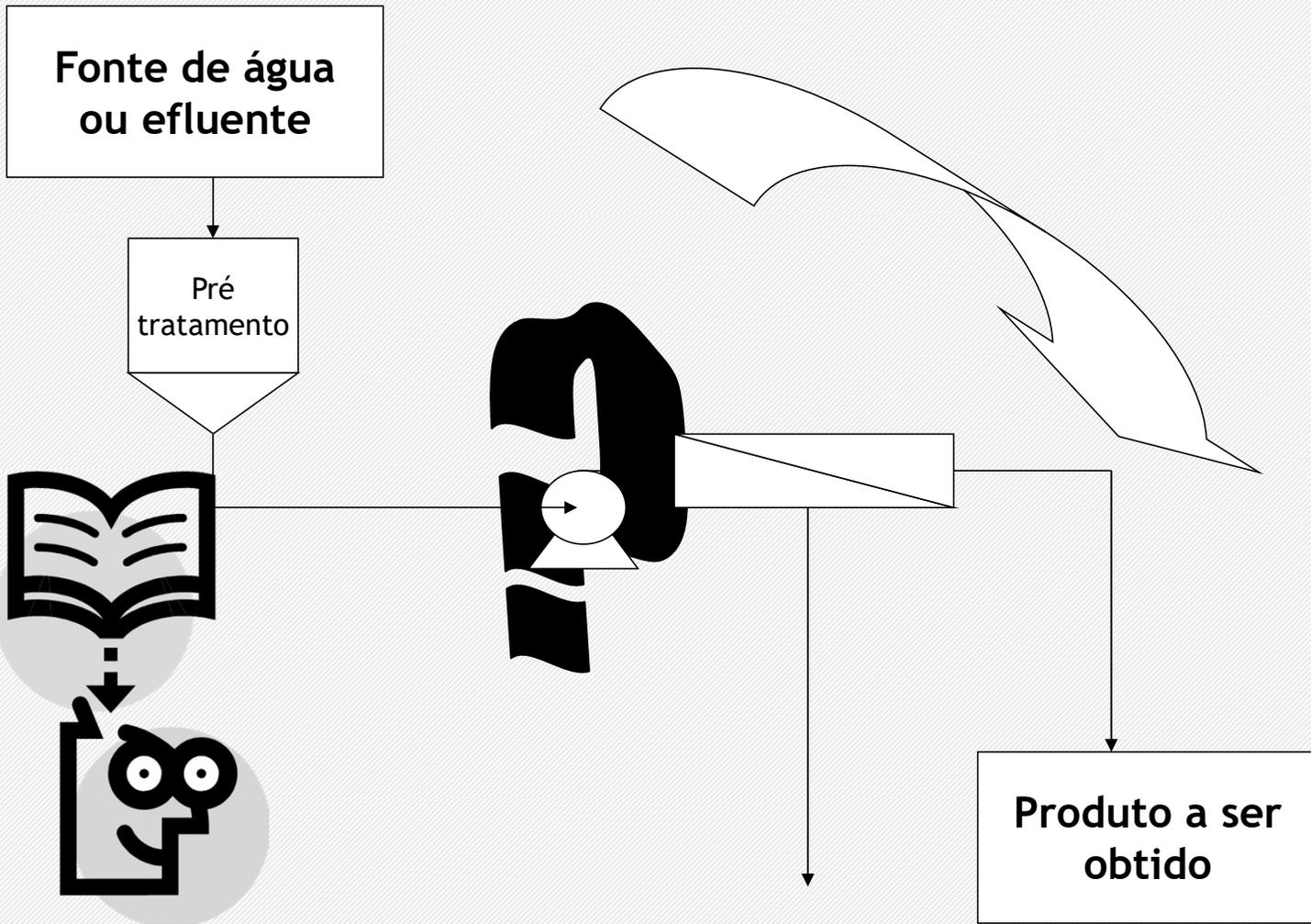
- Assegurar o máximo desempenho dos processos de separação por membranas:
  - Minimizar problemas operacionais;
- Cada processo apresenta limitações com relação aos possíveis contaminantes presentes;
- Formação de depósitos, incrustação, formação de biofilme e degradação das membranas devem ser minimizados.

## Subsistema de pré-tratamento (cont.)

- O pré-tratamento a ser utilizada depende:
  - Do tipo de processo de separação por membranas;
  - Da configuração das membranas;
  - Das características da corrente de alimentação;
  - Dos parâmetros de operação do sistema.
- Para MF e UF são menos complexos.

## Subsistema de pré-tratamento (cont.)

- Na MF e UF não ocorre a concentração de espécies solúveis, principalmente inorgânicas.
- Por operarem com pressões elevadas, a presença de sólidos em suspensão é uma condição crítica na NF e OR;
- O sistema de eletrodialise não possibilita a separação de sólidos suspensos e espécies não iônicas,
- O potencial de formação de biofilme e degradação das membranas deve ser considerado em todos os processos.



## Problemas com sólidos em suspensão

- Sistemas de MF e UF apresentam maior tolerância
- Sistemas de NF, OR e ED são restritivos;
- A configuração das membranas apresenta grande influência sobre esta tolerância.

## Problemas com sólidos em suspensão (cont.)

- Membranas tubulares e capilares permitem:
  - Operação com maior concentração de partículas;
  - Alimentação com partículas de maior diâmetro;
- Membranas de fibra oca, enroladas em espiral e planas são mais restritivas;
- Membranas em espiral podem ser especificadas com espaçadores especiais.

## Problemas com sólidos em suspensão (cont.)

- Membranas NF e OR alimentadas com correntes com sólidos em suspensão podem sofrer depósitos irreversíveis;
- Em decorrência das restrições de cada processo é necessário utilizar um pré-tratamento adequado;
- A redução do potencial de formação de depósitos pode ser obtida com a utilização de dispersantes.

# Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos

- Os processos de pré-tratamento disponíveis para remoção de sólidos são:
  - Filtração;
  - Clarificação;
  - Microfiltração ou ultrafiltração.
- O pré-tratamento a ser utilizado depende da capacidade do sistema e concentração de sólidos suspensos;
- A MF e UF são opções de pré-tratamento para os processos de NF e OR.

# Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos (cont.)

- Membranas tubulares ou de fibra oca ( $\phi > 1$  mm):
  - Filtros com capacidade de retenção de partículas com 1/10 do diâmetro interno da membrana;
- Membranas planas ou enroladas em espiral:
  - Filtros com capacidade de retenção de partículas com diâmetro de 1/30 a 1/20 da espessura do espaçador.

## Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos (cont.)

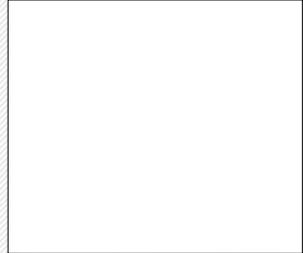
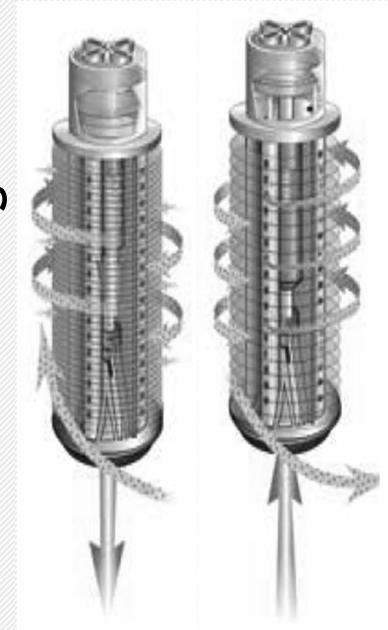
- Processos de NF e OR:
  - O sistema de pré-tratamento deve possibilitar a obtenção de uma corrente com as seguintes características:
    - Turbidez → < 1 UNT;
    - Índice de densidade de obstrução (SDI):
      - Tratamento de água < 5
      - Tratamento de efluentes < 3.
  - As técnicas de pré-tratamento dependem da característica da alimentação;
  - Como componente final do pré-tratamento utiliza-se um sistema de filtração, para reter partículas com diâmetro de até 5  $\mu\text{m}$ .

# Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos (cont.)

- Filtros de disco:
  - Para retenção de partículas com diâmetro de até 20 mm;
  - A corrente de alimentação deve ter baixa concentração de sólidos em suspensão (<0,01% em massa).
- Filtros tipo cartucho ou tipo bolsa (Bag):
  - Indicados para sistemas de baixa capacidade, como elementos principais ou finais de pré-tratamento;
  - A corrente de alimentação deve apresentar baixa concentração de sólidos (< 0,01 % em massa).
- Filtros de meio granular:
  - Indicados para sistema de grande capacidade;
  - A concentração de sólidos na corrente de alimentação deve ser baixa < 10 mg/L,
  - Os filtros podem ser de camada única ou dupla.



Modos de filtração e  
contralavagem



Disc material type availability according to filtration degree:

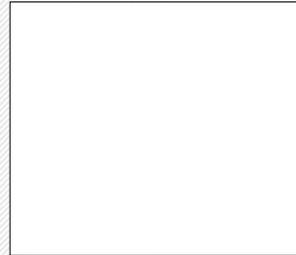
Color Code	Gray	Purple	Green	Brown	Black	Red	Yellow	Blue
Micron	20	40	55	70	100	130	200	400
PP Disc PA (Nylon) Disc	PP, PA	PP						

## Filtros tipo disco

([http://www.amiad.com/files/4\\_Spin\\_Klin\\_Galaxy.pdf](http://www.amiad.com/files/4_Spin_Klin_Galaxy.pdf))



**Filtros BAG e  
Cartucho**



## Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos (cont.)

- Processo de clarificação:
  - Indicados para sistemas com elevada capacidade de tratamento;
  - A concentração de sólidos é superior a 10 mg/L;
  - Nos casos em que a concentração de sólidos resulta em um SDI ligeiramente superior a 5 pode-se utilizar as variantes do processo de clarificação:
    - Coagulação em linha;
    - Filtração direta.

## Tipos de pré-tratamento para remoção de sólidos (cont.)

- Processo de clarificação (cont.):
  - Na clarificação deve ser dada atenção especial ao tipo de coagulante e floculante utilizados;
  - Coagulantes e floculantes catiônicos podem resultar na formação de depósitos - interação com as membranas ou reação com dispersantes;
  - O uso de sais de ferro ou alumínio exige a redução do pH antes da passagem pelas membranas;
  - Recomenda-se evitar o uso de floculantes catiônicos;
  - A presença de ferro e manganês na forma solúvel requer oxidação preliminar.



Filtro cartucho com depósito de ferro em função da dosagem excessiva no sistema de pré-tratamento



Amostra de filtro cartucho com deposição de ferro devido à corrosão de equipamentos à montante da sua instalação

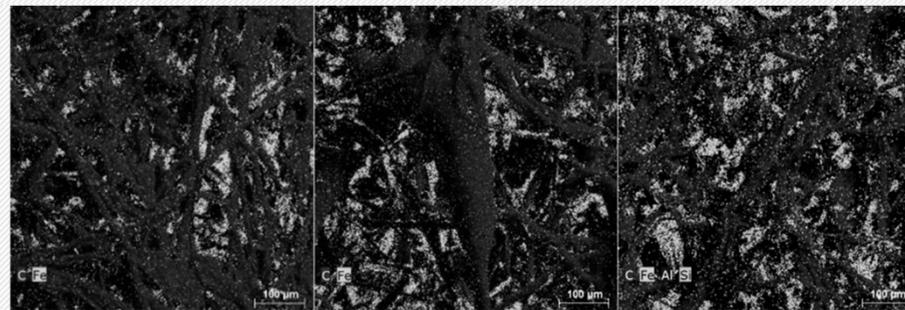


Imagem obtida por espectroscopia de raios-x com energia dispersiva (coloração verde indica a presença de ferro)

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade

- Quando ocorre a concentração de espécies dissolvidas o efeito de precipitação deve ser considerado;
- Para o tratamento de água os compostos que despertam maior preocupação são:
  - Carbonato, sulfato e fluoreto de cálcio;
  - Sulfato de bário;
  - Sulfato de estrôncio;
  - Sílica solúvel.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- A precipitação de carbonato de cálcio pode ser controlada com base no Índice de Saturação de Langelier (ISL);
- Este índice tem aplicação para correntes com concentração de sais dissolvidos inferior a 10.000 ppm,
- Para concentrações de sais acima de 10.000 deve-se utilizar o índice de Estabilidade de Stiff & Davis (IES&D).

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- O IS de Langelier é calculado pela seguinte expressão:
  - $ISL = pH_c - pH_s$ 
    - $pH_c = pH$  do concentrado;
    - $pH_s = pH$  de saturação do carbonato de cálcio.
  - $pH_s = pCa + pAlcalinidade + C$ 
    - $C$  é função da concentração de sais dissolvidos.
- No caso do cálculo do IES&D, a variável  $C$  é substituída por  $K$ , que é função da força iônica do concentrado.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- Para evitar a precipitação de carbonato de cálcio o ISL deve ser ajustado para valores negativos;
- Em casos específicos é possível operar o sistema com o ISL positivo, utilizando-se dispersantes:
  - $ISL < 0 \rightarrow$  nenhuma medida é necessária;
  - $ISL \leq 1 \rightarrow$  uso de dispersante inorgânico (HMFS);
  - $ISL > 1 \rightarrow$  é possível utilizar inibidores orgânicos.
- Na maioria dos casos o valor máximo do ISL é de 1,8.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- Como alternativa aos inibidores de incrustação pode-se adotar os seguintes procedimentos:
  - Reduzir a taxa de recuperação de água;
  - Reduzir a concentração de cálcio na alimentação;
  - Reduzir o pH da corrente de alimentação.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

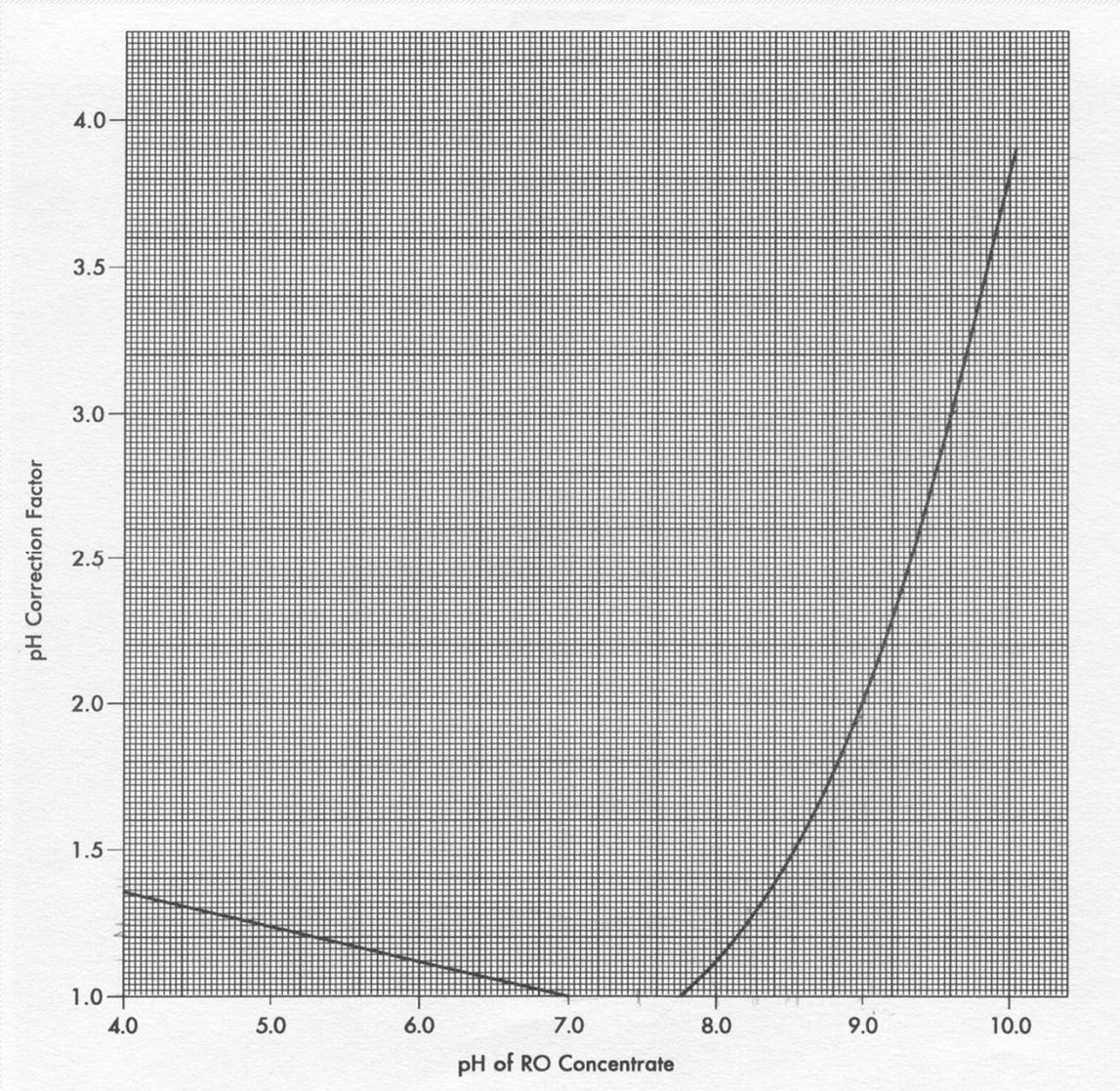
- Os mesmos cuidados aplicam-se a outros sais como  $\text{CaSO}_4$ ;  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{SrSO}_4$  e  $\text{CaF}_2$ :
  - O pH tem pouco efeito;
- O produto de solubilidade é bastante importante para o controle da incrustação por estes compostos.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- Quando se utiliza inibidores de incrustação os limites tolerados são:
  - Sulfato de cálcio:
    - $[Ca^{2+}].[SO_4^{2-}] \leq 1,0 \times 10^{-3}$
    - $[Ca^{2+}].[SO_4^{2-}] \leq 1,5 \text{ Kps}$
  - Sulfato de bário  $\rightarrow [Ba^{2+}].[SO_4^{2-}] \leq 50 \text{ Kps}$
  - Sulfato de estrôncio  $\rightarrow [Sr^{2+}].[SO_4^{2-}] \leq 50 \text{ Kps}$
  - Fluoreto de cálcio  $\rightarrow [Ca^{2+}].[F^-]^2 \leq 100 \text{ Kps}$
- O produto de solubilidade dos compostos presentes varia com a força iônica da solução.

## Problemas com compostos que apresentam baixa solubilidade (cont.)

- A sílica solúvel é de grande preocupação para os processos de separação por membranas;
- Águas naturais podem apresentar teor de sílica variando de 1 a 100 mg/L;
- Quando o limite de saturação é atingido ocorre formação de sílica coloidal insolúvel, ou sílica gel.



Fator de correção da solubilidade da Sílica em função do pH

# Problemas com adsorção de compostos orgânicos

- Compostos orgânicos podem conduzir à redução do fluxo de água;
- A adsorção de compostos orgânicos é favorecida quando:
  - Sua massa molecular é elevado;
  - São hidrofóbicos;
  - Apresentam carga positiva quando em solução.

## Problemas com adsorção de compostos orgânicos (cont.)

- Valores elevados de pH reduzem o potencial de adsorção :
  - A maioria das membranas e substâncias orgânicas apresentam carga negativa em valores de pH acima de 9;
  - A presença de óleos e graxas também pode conduzir à redução de fluxo de algumas membranas;
  - Estes contaminantes são mais críticos para processos de NF, OR e ED.

## Problemas com adsorção de compostos orgânicos (cont.)

- Substâncias húmicas apresentam potencial para reduzir o fluxo através das membranas;
- Como opção de pré-tratamento para remoção de compostos orgânicos pode-se lançar mão:
  - Processo de coagulação floculação;
  - Adsorção em carvão ativado;
  - Ultrafiltração.

# Problemas com microrganismos

- Os microrganismos, principalmente bactérias, podem resultar na formação de biofilme;
- Este problema não se restringe apenas às membranas:
  - Qualquer componente do sistema pode ser afetado.
- Como medida de controle dos microrganismos utiliza-se o processo de desinfecção.

## Problemas com microrganismos (cont.)

- Como processos de desinfecção pode-se considerar:
  - Tratamento de choque:
    - Uso de elevadas doses do agente de desinfecção em um pequeno intervalo de tempo;
    - É comum a utilização do bissulfito de sódio como inibidor do crescimento microbiológico;
  - Dosagem contínua de um biocida:
    - Cloração ou ozonização;
    - As membranas devem ser resistentes.

## Problemas com microrganismos (cont.)

- Uso de radiação ultravioleta:
  - A radiação com comprimento de onda de 254 nm apresenta efeito germicida;
  - É um processo físico, não requer o uso de produtos químicos;
  - Não é indicado para águas com elevada turbidez ou que apresentam cor;
- Como opção é possível utilizar leitos de carvão granular de grande profundidade.

## Problemas com microrganismos (cont.)

- Utilizando-se condições operacionais adequadas é possível obter uma boa remoção de microrganismos:
  - Taxa de aplicação → 2 a 10 m/h;
  - Profundidade do leito → 2 a 3 m.
- O processo de remoção é similar àquele que ocorre nos filtros lentos;
- Não existem dados práticos que demonstrem a eficiência deste método de controle.

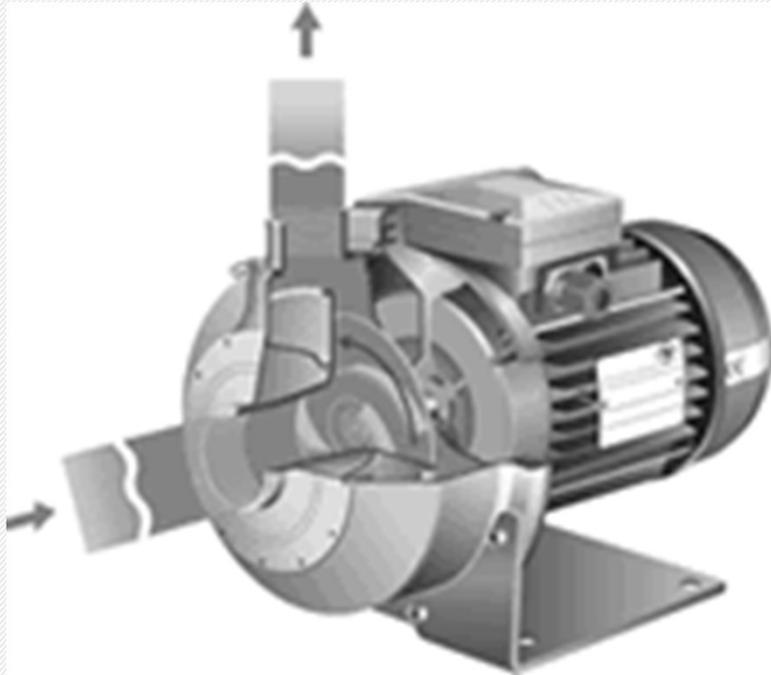
## Técnicas de Pré Tratamento Utilizadas para processos de separação por membranas

Pré Tratamento	Contaminante										
	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	BaSO <sub>4</sub>	SrSO <sub>4</sub>	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe	Al	Bactéria	Agentes Oxidantes	Matéria Orgânica
Acidificação	E						P				
Inibidor de Incrustação	P	E	E	E	E	P					
Abrandamento por Troca Iônica	E	E	E	E	E						
Dealcalinização por Troca Iônica	P	P	P	P	P						
Abrandamento com Cal	P	P	P	P	P	P	P				
Limpeza Preventiva	P					P	P	P	P		P
Ajuste dos Parâmetros de Operação		P	P	P	P	E					
Filtro de Areia						P	P	P			
Oxidação / Filtração							E				
Coagulação em linha							P	P			
Coagulação / Flocculação						P	P	P			
Microfiltração ou Ultrafiltração						E	P	P	P		
Filtro Cartucho						P	P	P	P		
Cloração									E		
Remoção de Cloro										E	
Tratamento de choque									P		
Desinfecção Preventiva									P		
Adsorção em Carvão Ativado Granular									P	E	E

**P – Possível**  
**E – Efetivo**

## Outros componentes do sistema

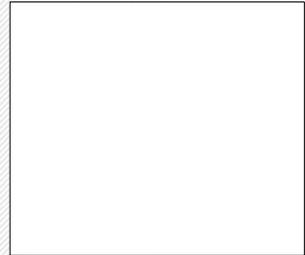
- Bombas:
  - São vitais para os processos de separação por membranas;
  - São os pontos fracos dos sistemas de tratamento;
  - Os principais tipos utilizados nos processos de separação por membranas são:
    - Centrífugas → estágio simples ou múltiplos estágios;
    - Bombas de deslocamento positivo → pistão , diafragma, engrenagens e eixo helicoidal.



**Bomba centrífuga de  
simples estágio**



**Bomba centrífuga de múltiplos estágios**

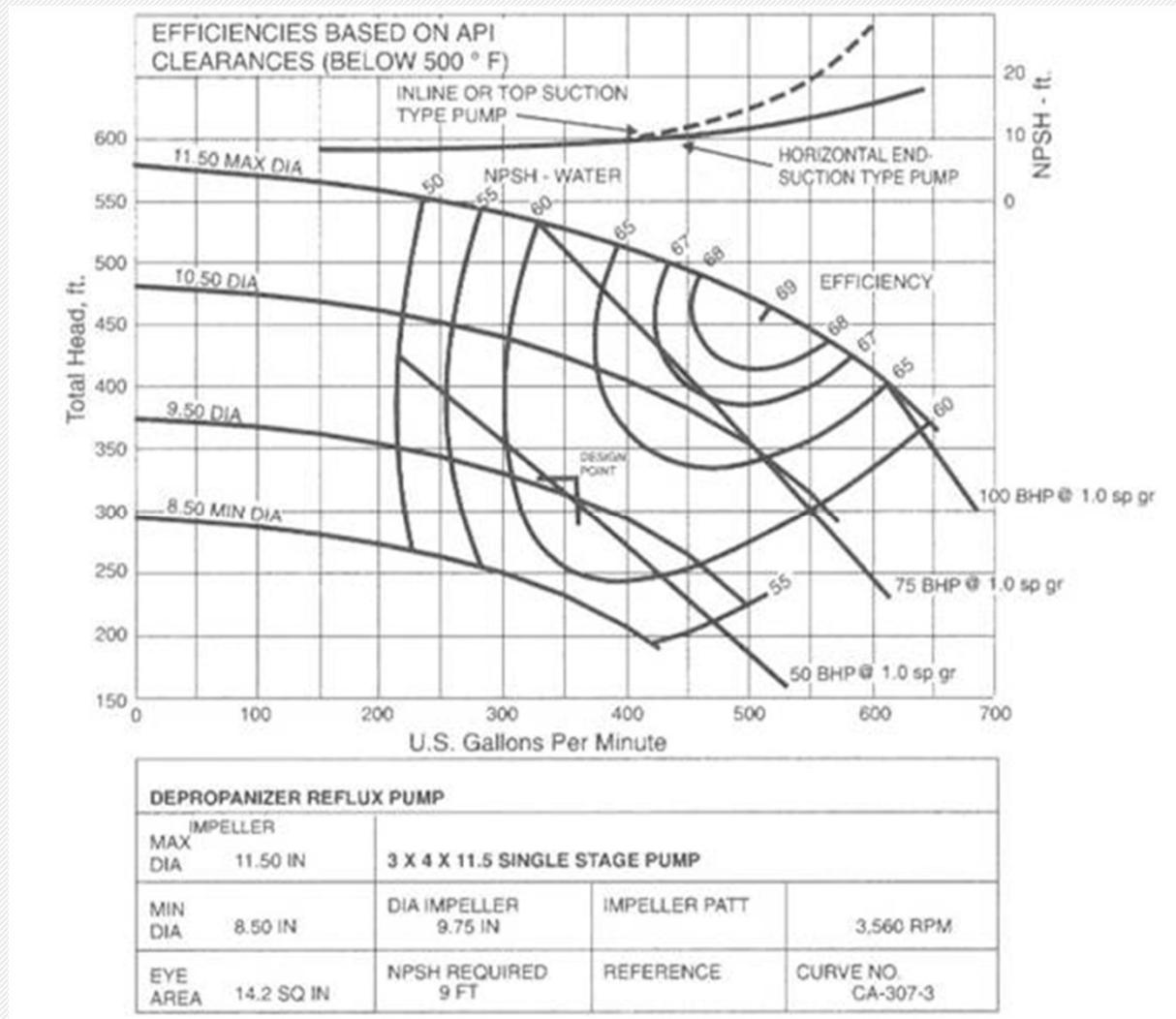


## Bombas (cont.)

- Preferencialmente são utilizadas bombas centrífugas;
- Bombas de deslocamento positivo podem causar danos ao sistema;
- Caso as bombas de deslocamento positivo sejam utilizadas deve-se prever dispositivos de segurança.

## Bombas (cont.)

- Bombas de simples estágio e baixa rotação não possibilitam a obtenção de pressões elevadas (máximo de 10 bar);
- Bombas de múltiplos estágios permitem obter pressões de até 26 bar, sendo possível em alguns projetos pressões da ordem de 70 bar;
- Nas bombas centrífugas a vazão varia com a pressão de descarga;



Exemplo de curvas de bombas centrífugas

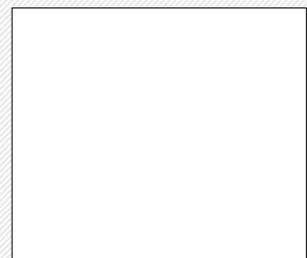
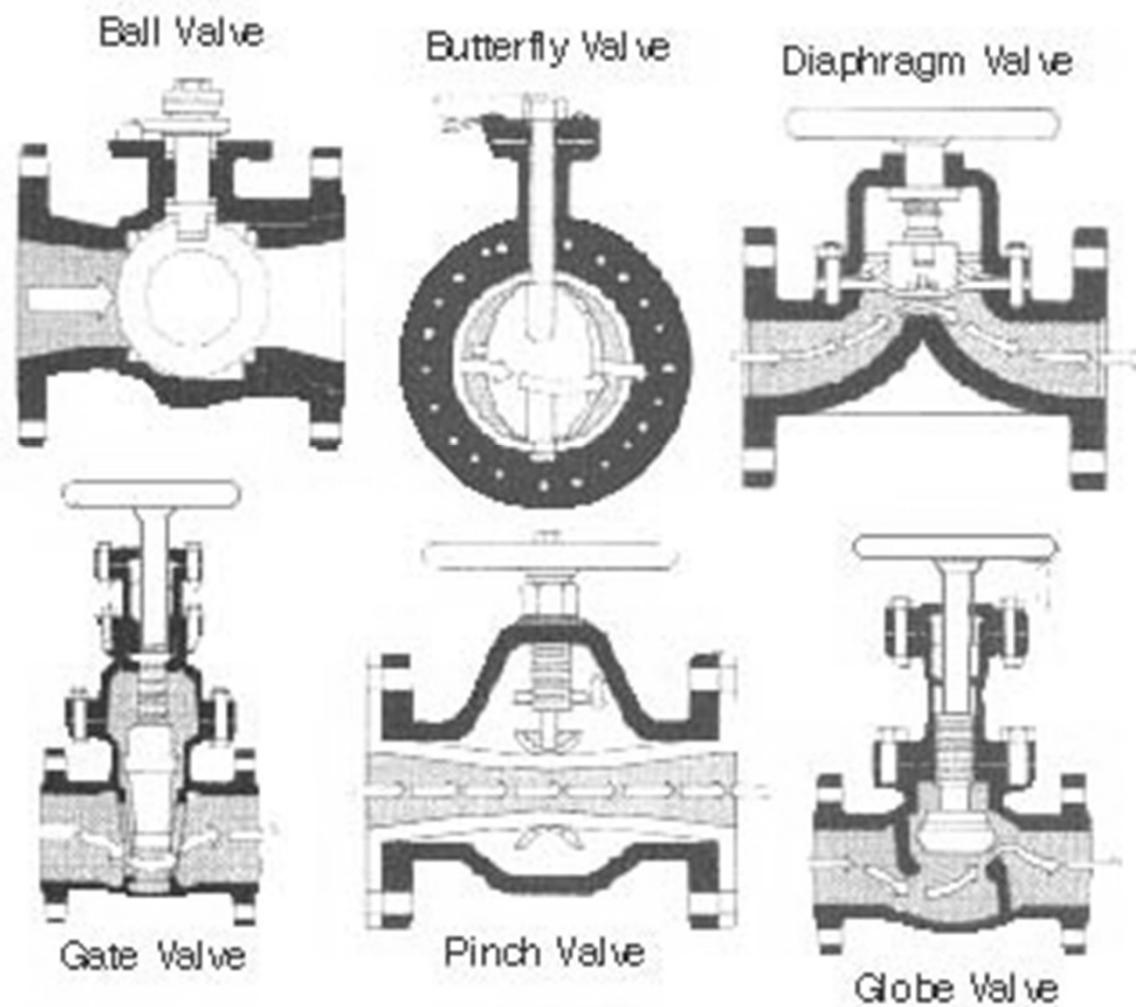
# Válvulas

- As válvulas também são importantes no sistemas de separação por membranas;
- Elas possibilitam controlar o fluxo através dos componentes e a realização de manobras com o fluído;
- Algumas válvulas podem ser utilizadas como dispositivo de segurança.

## Válvulas (cont.)

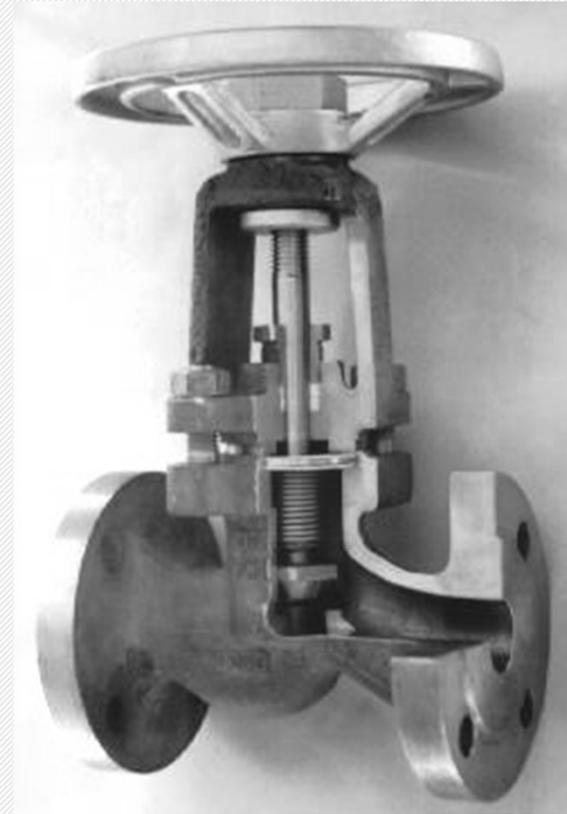
- Entre os principais tipos de válvulas disponíveis no mercado destacam-se:
  - Válvulas de bloqueio:
    - Esfera, borboleta, gaveta e diafragma.
  - Válvulas de controle:
    - Globo, agulha e reguladora de pressão.
  - Válvulas de segurança:
    - Retenção, alívio e quebra vácuo.

Figure 1 - Manual Valves

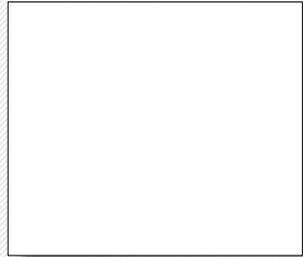




**Válvula esfera**



**Válvula globo**

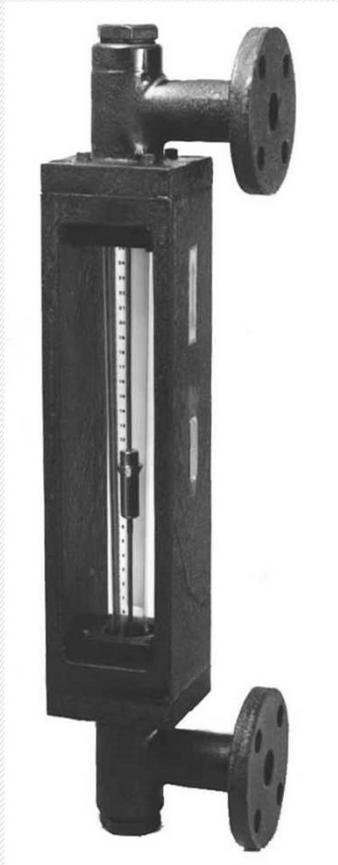


## Medidores de vazão

- Acompanhar o desempenho do sistema, assim como fornecer informações para ajuste das condições operacionais;
- Por meio dos medidores de vazão é possível verificar a taxa de recuperação de água do sistema;
- São instalados na linha de alimentação, concentrado, recirculação e permeado.

## Medidores de vazão (cont.)

- Os medidores disponíveis no mercado são dos seguintes tipos:
  - Rotâmetro (indicação visual);
  - Tipo turbina;
  - Por ultrassom;
  - Magnético.
- Os medidores tipo rotâmetro e turbina são mais indicados para fluídos limpos.



**Rotâmetro**



**Medidor de vazão magnético**



**Medidor de vazão turbina**

# Manômetros

- Vitais para os sistemas que utilizam a pressão hidráulica como força motriz;
- Fornecem informações utilizadas para o ajuste de válvulas e para a realização de procedimentos de parada;
- São instalados na descarga de bombas, alimentação e saída de concentrado dos vasos de pressão;

## Manômetros (cont.)

- Manômetros utilizados para controle da perda de carga em filtros e outros componentes?
- Não é o procedimento mais adequado quando as pressões são elevadas e os manômetros são analógicos;
- Imprecisão na leitura e o erro inerente ao dispositivo utilizado;
- A melhor opção são os transmissores de pressão diferencial.



Manômetros com leitura analógica e digital



## Manômetro e Termômetro Digital

---

### Manômetro Digital MDR-2000



**Caixa**  
Tipo baioneta, em aço inoxidável AISI 304, diâmetro nominal de 100mm

**Sistema Eletrônico**  
Constituído por circuito que faz toda a conversão mecânica em eletrônica proporcionando alta robustez

**Tomada de Pressão**  
Interior ou Traseira

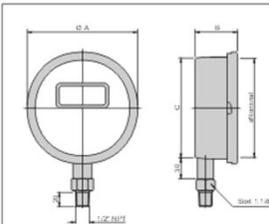
**Display**  
3.1/2 dígitos, de cristal líquido

**Amostragem**  
3 leituras por segundo

**Faixa de Indicação**  
Manômetros: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400; 600; 1000  
Vacuômetros: -1...0  
Manôvacuômetros: -0,5...+1; -1...+0,5; -1...1,5; -1...+3; -1...+6; -1...+9; -1...+15; -1...+24

**Exatidão**  
A3, com desvio admissível de 0,25 %  
A2, com desvio admissível de 0,50 %

**Alimentação**  
Uma bateria alcalina de 9V  
Temperatura de operação  
0 a 60°C



Ø Nominal	A	B	C
100	108	51	100
114	128	68	114

---

### Termômetro Digital TDR-2000



**Caixa**  
Tipo baioneta, em aço inoxidável AISI 304, diâmetro nominal de 100mm

**Sistema Eletrônico**  
Constituído por circuito que faz toda a conversão eletrônica proporcionando alta robustez

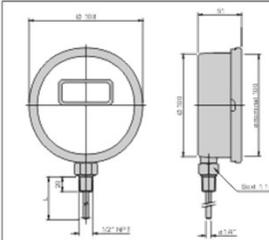
**Display**  
3.1/2 dígitos, de cristal líquido

**Amostragem**  
3 leituras por segundo

**Faixas de Indicação**  
-40 a +109,9 °C, resolução de 0,1 °C  
-40 a +200 °C, resolução de 1 °C  
-40 a +1000 °C, resolução de 1 °C

**Exatidão**  
±0,5 % do total da escala (último dígito)

**Alimentação**  
Uma bateria alcalina de 9V



Consulte-nos sobre outros diâmetros



FÁBRICA DE MANÔMETROS RECORD S.A.  
Rua Orfanato, 1387 - V. Prudente - Cep 03131-010 - São Paulo - SP - Brasil  
Tel: (011) 6995-2533 - Fax: (011) 6995-7446 / 6995-6000  
email: record@record.com.br  
homepage: <http://www.record.com.br>  
A Fabrica de Manômetros Record S.A. se reserva o direito de alterar o desenho de seus produtos e as especificações sem prévio aviso.

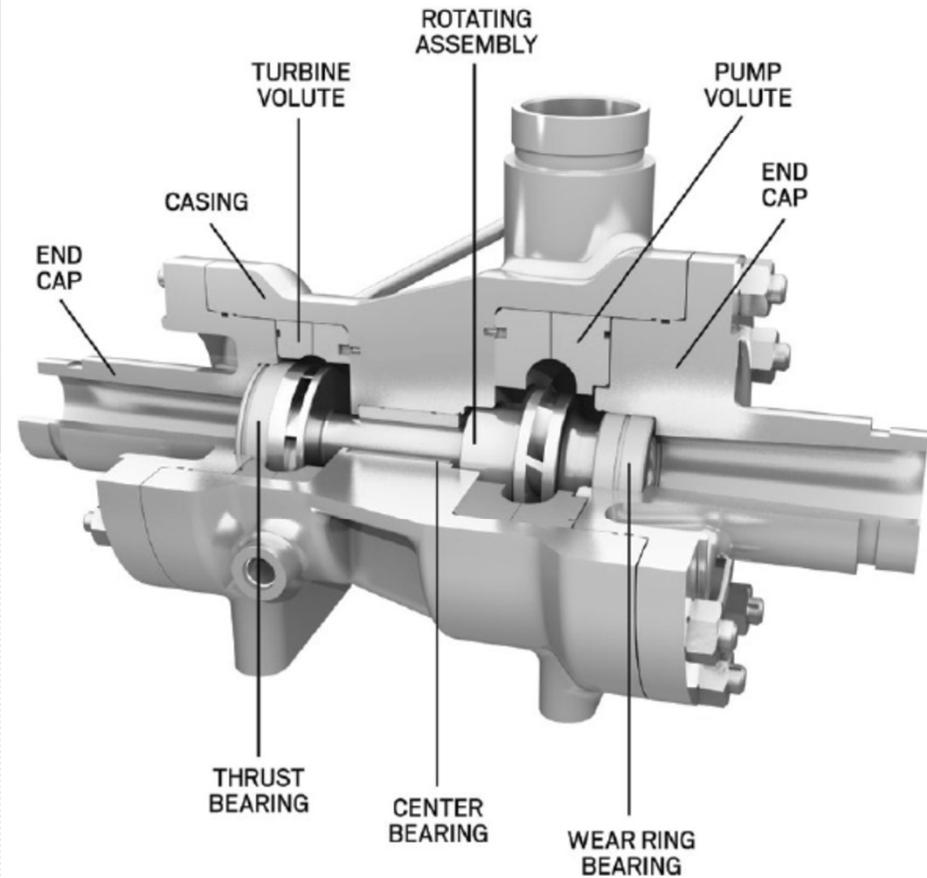
# Sistema de recuperação de energia

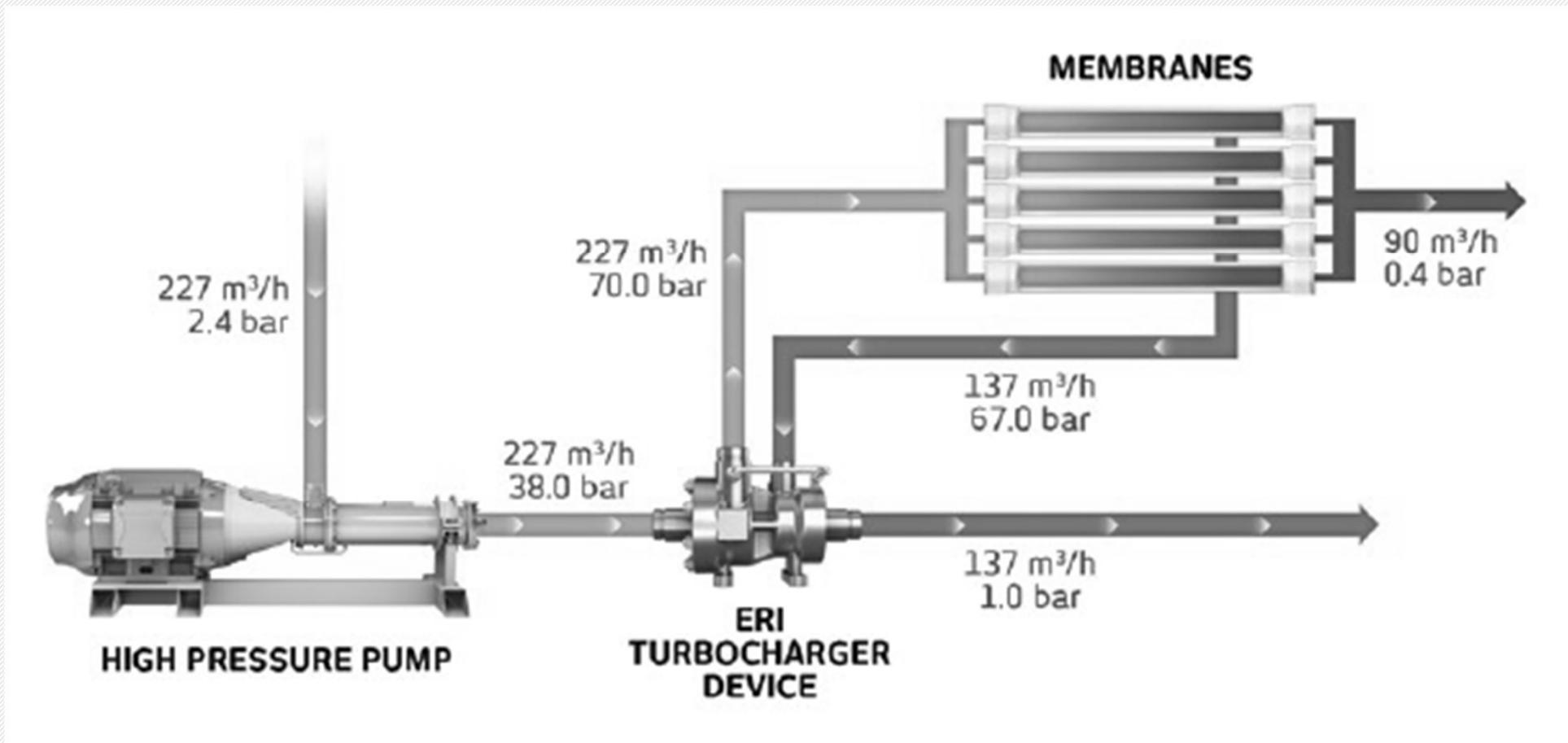
- O consumo de energia em unidades de dessalinização é relevante;
- Em função da taxa de recuperação de água, o concentrado ainda apresenta uma quantidade elevada de energia (até 55% da energia aplicada);
- Se esta energia for recuperada, o consumo será reduzido de forma significativa;
- Esta questão resultou no desenvolvimento de dispositivos variados.



## Recuperador de energia tipo turbo compressor

(<http://www.energyrecovery.com/water/turbochargers/>)





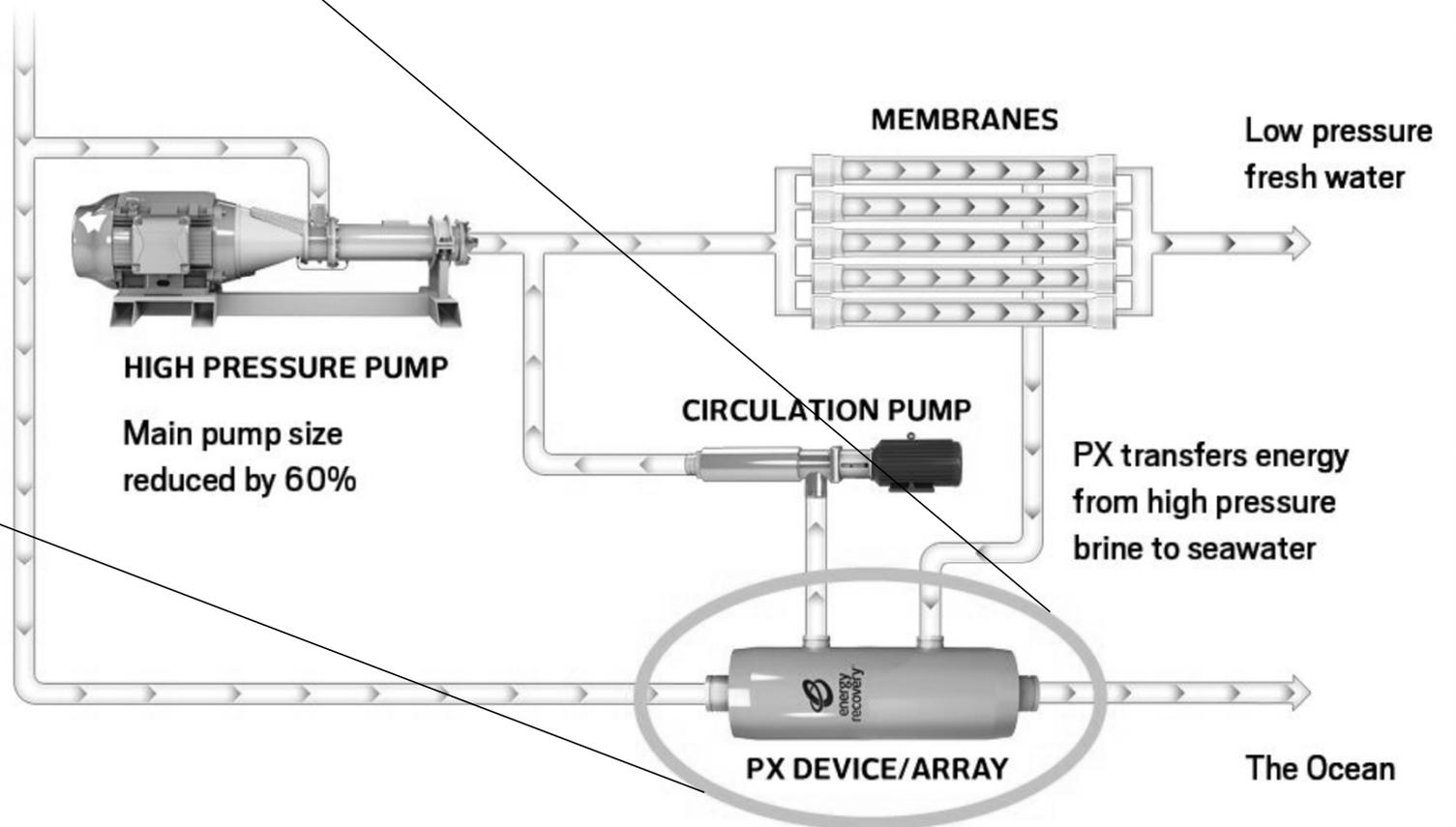
**Exemplo de aplicação do turbo compressor para recuperação de energia**

(<http://www.energyrecovery.com/water/turbochargers/>)

# Recuperador de energia por troca de pressão



Incoming seawater routed to pump and PX



## Dispositivos de segurança

- São utilizados para garantir a integridade dos componentes do sistema;
- Podem ser utilizados para manter o sistema operando dentro das condições estabelecidas;
- Os próprios componentes utilizados para acompanhar o desempenho do sistema podem ser utilizados como dispositivos de segurança.

## Dispositivos de segurança (cont.)

- Neste caso é necessário que o componente disponibilize um sinal elétrico ou digital para elementos de controle;
- Alguns dispositivos podem ter função exclusiva, caso dos pressostatos e válvulas de alívio ou quebra vácuo.

# Automação e Controle

- Com o avanço da eletrônica, houve uma redução significativa nos custos de instrumentos para automação de sistemas;
- Uso de Controladores Lógicos Programáveis, é imprescindível para sistemas que operam com contralavagem;
- Uso de data loggers para armazenagem e coleta de dados.

# Componentes para automação e controle

- Transdutores e transmissores diversos:

- Transformam uma propriedade física, ou química do sistema em sinal elétrico, transmitindo-as para um outro dispositivo.

- Indicadores:

- Recebem o sinal do transmissor e o apresenta em um display ou tela de computador.

# Componentes para automação e controle (cont.)

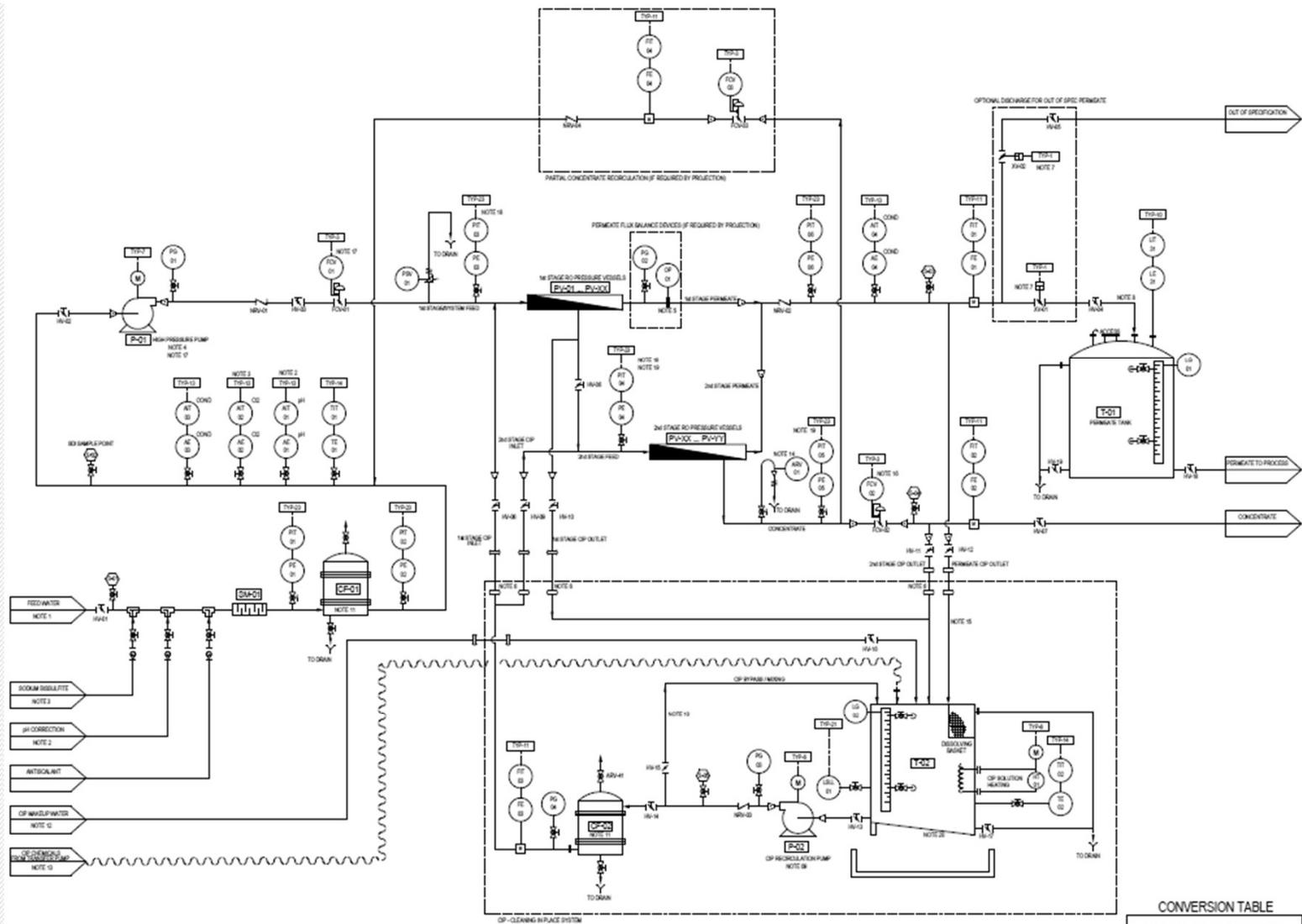
- **Controladores:**

- Recebem o sinal do transdutor e comparam com um valor pré-estabelecido (set-point), enviando ou não um sinal para o atuador.

- **Atuadores:**

- A partir do sinal recebido do controlador, atua no dispositivo final.

# Fluxograma de uma unidade de OR com elementos de Instrumentação e Controle



CONVERSION TABLE

SI/Metric to British/Imperial	
1.0 LMH	= 0.6 gfd
1.0 m3/h	= 4.4 gpm
1.0 L/h	= 6.3 gpd
1.0 m3	= 264 gal
1.0 L	= 0.26 gal
1.0 bar	= 14.5 psi
1.0 mm	= 0.04 inch