

# PHA 5053 – PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

## Aula 7 – Formação de biofilme e Limpeza e Sanitização



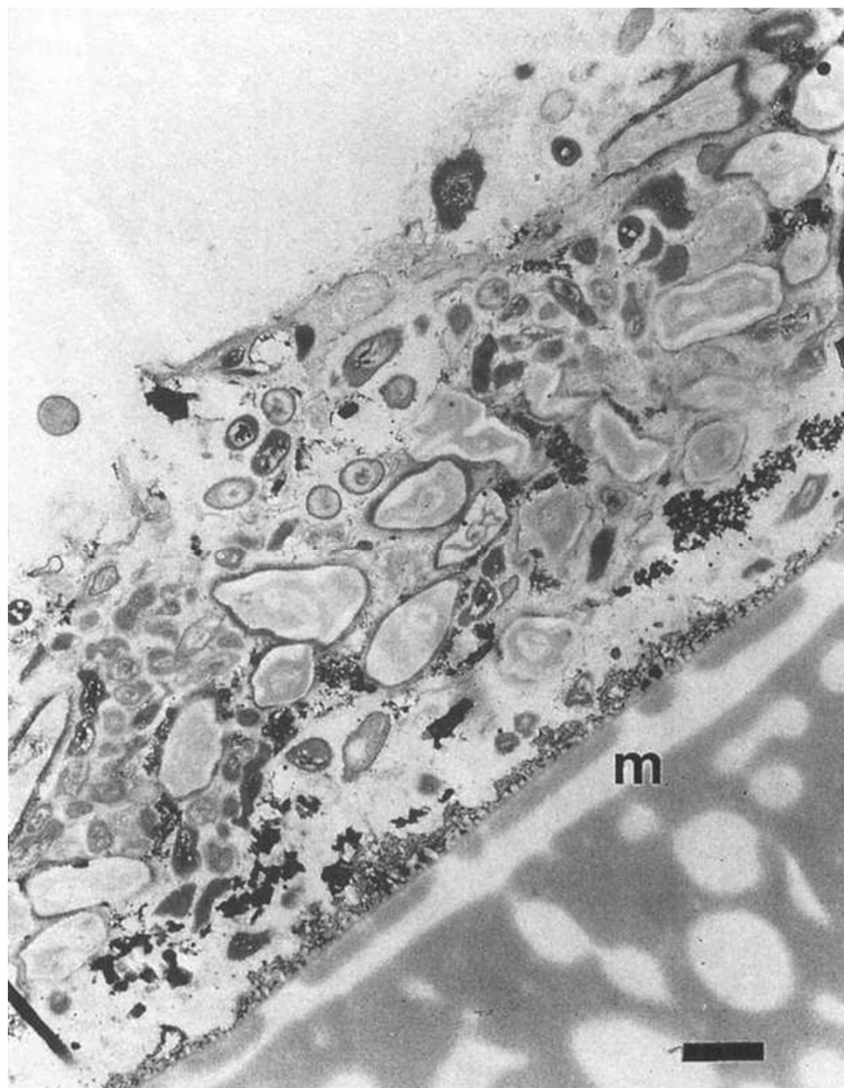
Prof.: José Carlos Mierzwa  
mierzwa@usp.br

# FORMAÇÃO DE BIOFILME

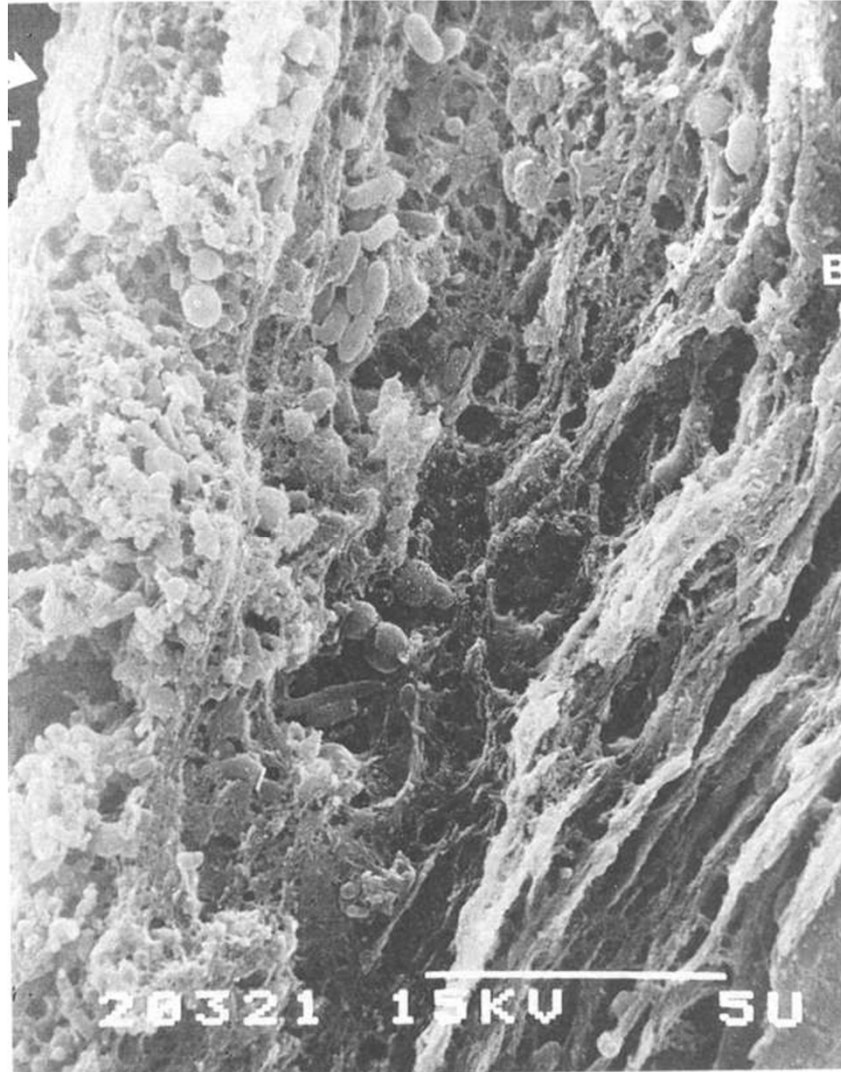
- É um problema crítico nos processos de separação por membranas;
- Refere-se à formação de uma camada viscosa sobre a superfície da membrana, resultante do acúmulo de microrganismos;
- É um processo resultante dos mecanismos de adesão e crescimento.

# FORMAÇÃO DE BIOFILME (CONT.)

- Adesão:
  - Mecanismo responsável pela fixação dos microrganismos na superfície da membrana;
- Crescimento:
  - Após a sua fixação os microrganismos se multiplicam utilizando os nutrientes que são transportados para superfície da membrana.



**Seção transversal de um biofilme formado sobre uma membrana de UF de polieteruréia (AWWA, 1996)**



**Seção transversal de um biofilme formado sobre uma membrana de OR de acetato de celulose (AWWA, 1996)**

## FORMAÇÃO DE BIOFILME (CONT.)

- O tratamento de grandes volumes de água em curto período de tempo exige elevada superfície de membrana;
- Isto favorece a ocorrência da adesão, pois os microrganismos têm maior disponibilidade de área para se fixarem.

## FORMAÇÃO DE BIOFILME (CONT.)

- A formação de biofilme é mais problemática que a ocorrência de depósitos coloidais, orgânicos, e incrustação.
- Microorganismos se multiplicam em progressão geométrica;
- Mesmo em águas com baixa contagem de microorganismos a formação de biofilme é inevitável.

Condicionalamento da superfície da membrana:

- Depósito de substâncias orgânicas;

Aproximação e adesão à superfície por mecanismos físico-químicos;

Fixação por meio da excreção de SPE;

Concentração de nutrientes;

Crescimento do biofilme por adesão de novas bactérias e reprodução;

Biofilme estabelecido.

## **ETAPAS DE FORMAÇÃO DO BIOFILME**



# Processo de formação do biofilme

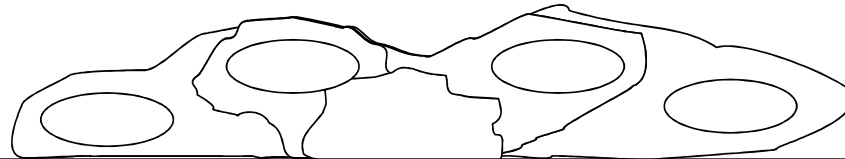
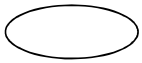
Condicionalamento da Membrana

Aproximação e fixação

Adesão

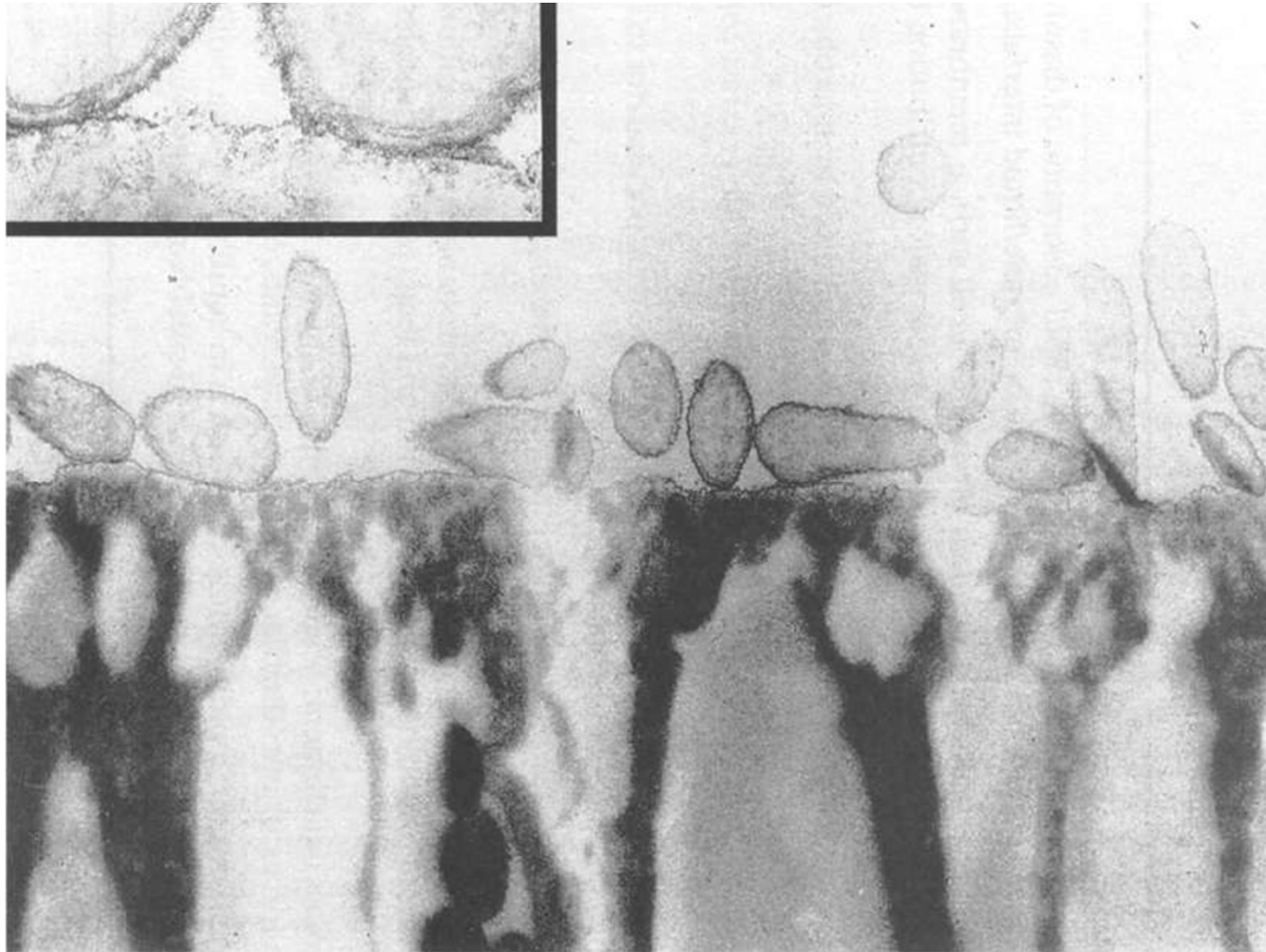
Crescimento

Bactéria



Membrana

Biofilme Estabelecido



**Representação do processo de formação de biofilme em uma membrana de OR (AWWA, 1996)**

# CONDIÇÕES ASSOCIADAS AO BIOFILME

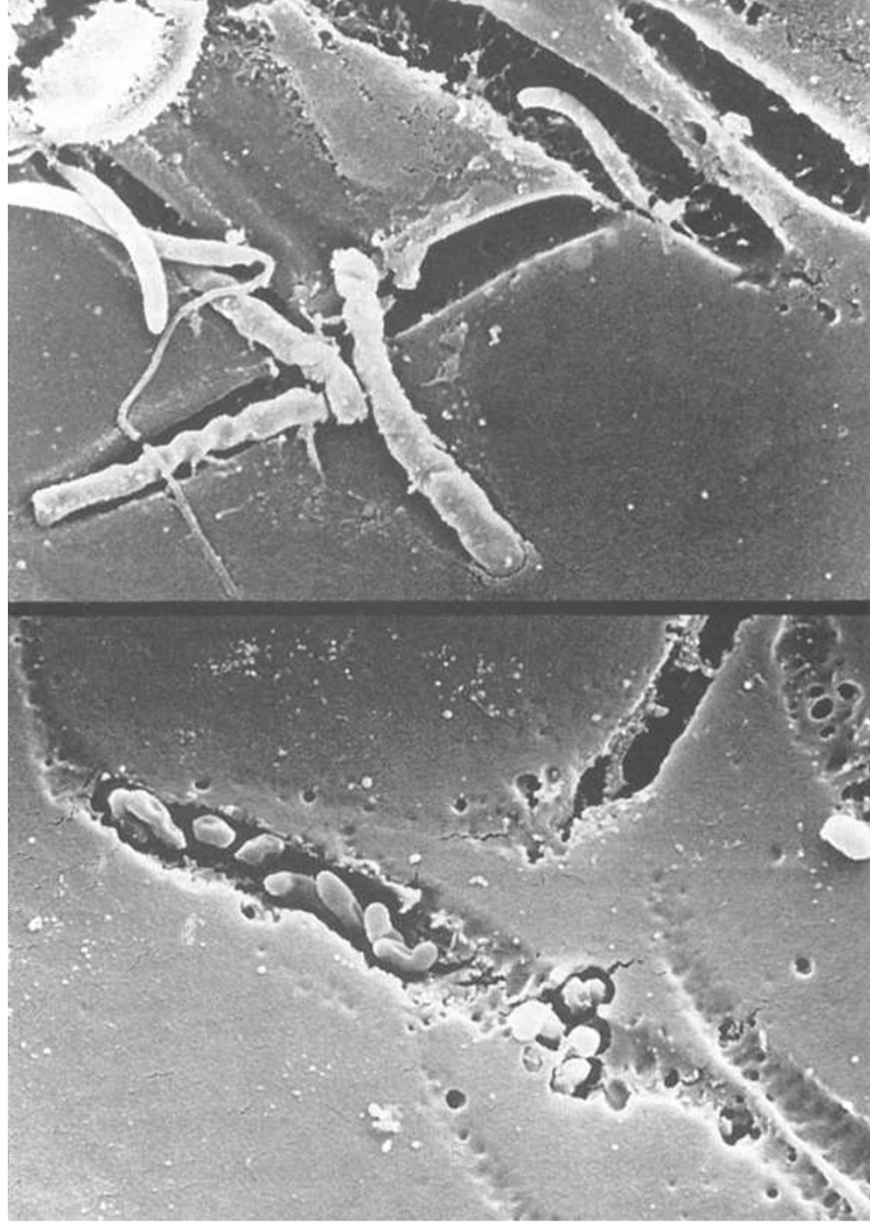
- Sólidos em suspensão em combinação com o biofilme pode resultar na formação de depósitos;
- Isto irá conduzir à perda da eficiência do sistema;
- O biofilme estabelecido serve como uma fonte de microrganismos para o sistema;
- A contagem microbiana é um indicativo da sua existência.

## CONDIÇÕES ASSOCIADAS AO BIOFILME (CONT.)

- Normalmente a relação entre a comunidade planctônica e bentônica é de mais de 1 para 1.000.000;
- Também é possível ocorrer a formação de biofilme na superfície em contato com o permeado;
- Esta condição é mais severa nos processos de MF, UF e ED;
- Alguns microrganismos são capazes de degradar as membranas e o adesivo utilizado na sua fabricação.

**Degradação de membranas de AC por  
dois tipos de microrganismos**

**(AWWA, 1996)**



## PRINCIPAIS EVENTOS NA FORMAÇÃO DE BIOFILME

<b>Evento</b>	<b>Tempo</b>	<b>Descrição</b>
Filme orgânico	Seg. ou min.	Condicionamento da membrana
Adesão física	Seg. ou min.	Fixação da bactéria pioneira
Síntese de SPE	Min. ou horas	Processo de adesão químico e aumento da estabilidade estrutural.
Proliferação	Min. Ou horas	Multiplicação celular utilizando nutrientes disponíveis.
Aprisionamento de partículas	Seg. ou min.	Efeito secundário da ocorrência do biofilme.
Adesão secundária	Dias ou sem.	Refere-se ao processo de aumento do biofilme .
Desprendimento	Dias ou sem.	Perda de células e biomassa do biofilme.

## FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESENVOLVIMENTO DO BIOFILME

- Poucos fatores afetam a formação do biofilme;
- A razão para isto é que os microrganismos:
  - Evoluíram para se adaptar as condições adversas do Planeta;
  - Desenvolveram estratégias especiais para sobreviver.

## FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESENVOLVIMENTO DO BIOFILME (CONT.)

◎ Os fatores que favorecem ou dificultam a formação de biofilme e a sua espessura são:

- Superfície disponível;
- Rugosidade do material:
  - Superfícies lisas retardam, mas não impedem a formação.
- Velocidade de escoamento:
  - Limita a espessura do biofilme;
  - Contudo a SPE minimiza os efeitos do escoamento.



## FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESENVOLVIMENTO DO BIOFILME (CONT.)

- Limitação de nutrientes:
  - Pode limitar o desenvolvimento dos microrganismos;
  - Contudo, mesmo quantidades diminutas de nutrientes podem ser suficientes para manter muitas bactérias;
  - Além disso, os nutrientes podem ser concentrados pela SPE excretada.

## CONSEQUÊNCIAS PARA OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

- Em qualquer situação a ocorrência de biofilme reduz o desempenho do sistema;
- Os seus efeitos são mais pronunciados em sistemas de NF e OR;
- A razão para isto é a pequena espessura e a fragilidade das membranas.

## CONSEQUÊNCIAS PARA OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (CONT.)

- O aumento no consumo de energia é o principal efeito sobre os sistemas;
- A redução do fluxo de água através da membrana pode ser rápida ou gradual, dependendo:
  - Das propriedades físico-químicas e microbiológicas;
  - Da configuração da membrana;
  - Da corrente de alimentação;
  - Do polímero;
  - Do biofilme.

# REDUÇÃO DO FLUXO DE PERMEADO

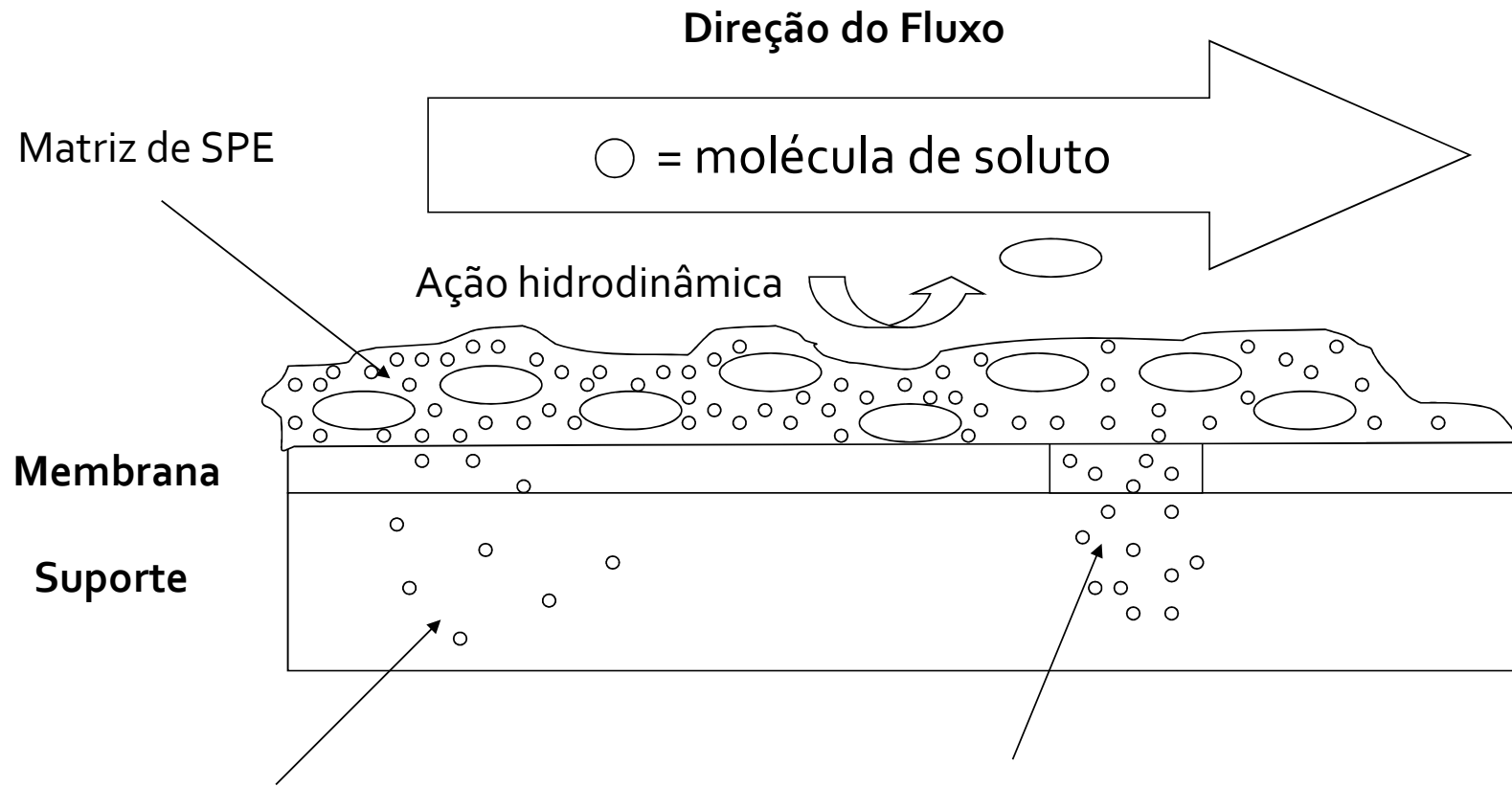
- Ocorre em duas fases:
  - Primeira fase: redução brusca relacionada aos mecanismos de adesão e proliferação;
  - Segunda fase: redução gradual do fluxo, associada ao equilíbrio entre a produção de SPE e sua remoção;
- Nos sistemas de MF a redução do fluxo resulta principalmente da SPE excretada;
  - Experimentos relacionados à alteração das propriedades da camada de SPE resultou no aumento de fluxo.

## AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

- A formação de biofilme aumenta a resistência ao escoamento tangencial á membrana;
- Isto resulta no aumento da perda de carga;
- Aumentos excessivos na perda de carga pode conduzir ao deslocamento da folhas de membrana (efeito telescópio):
  - Os fabricantes incluíram no projeto do módulo dispositivo para minimizar a ocorrência deste efeito.

# EFEITOS SOBRE A QUALIDADE DO PERMEADO

- Com a redução da turbulência o efeito de polarização de concentração é mais acentuado;
- Aumento na passagem de soluto através da membrana;
- A degradação da membrana ou do adesivo que as mantém unidas pode resultar na contaminação do permeado.



Aumento na passagem de soluto devido a polarização de concentração

Aumento na passagem de soluto devido a degradação da membrana

# INIBIÇÃO DO PROCESSO DE ADESÃO

- Pode ser uma boa estratégia para o controle da formação de biofilme;
- Pode-se utilizar métodos físicos ou químicos;
- Qualquer método que se utilize não irá impedir a formação do biofilme, mas sim retardar o seu desenvolvimento.



# MÉTODO QUÍMICO

- Alguns surfactantes e outros agentes químicos interferem no processo de adesão;
- O uso de tensoativos interfere na interação entre as bactérias e a membrana:
  - Ruptura ou enfraquecimento das ligações hidrofóbicas;
  - Ruptura de pontes de hidrogênio envolvidas na estabilização da estrutura de proteínas e outras moléculas.

## MÉTODOS QUÍMICOS (CONT.)

- A utilização de agentes surfactantes deve ser avaliada com critério;
- Alguns produtos podem alterar a capacidade de fluxo e separação das membranas;
- Existem limitações para uso em sistemas de tratamento de água e de efluentes.

# MÉTODOS FÍSICOS

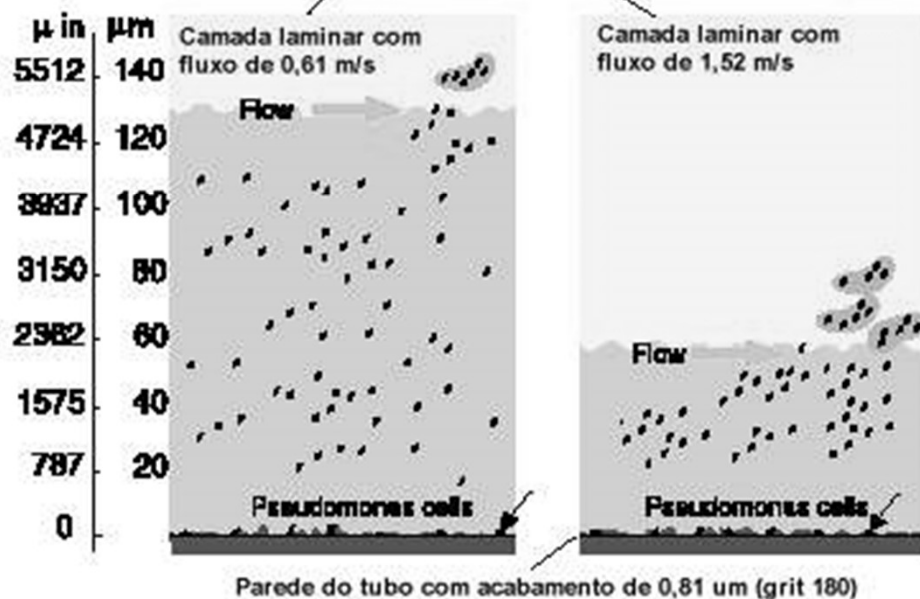
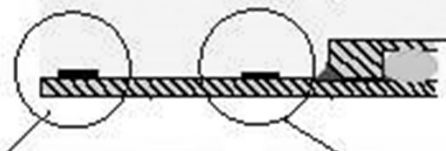
- Utilização de dispositivos que aumentam a turbulência;
- Uso de operações de contra lavagem com água ou ar, quando possível;
- Estes procedimentos podem ser menos efetivos que os químicos;
- A combinação de métodos físicos e químicos pode resultar em melhores resultados.

Fendas podem acumular água estagnada e ancorar microrganismos



FLOW →

ID of 1/2 Inch OD SS tube =  
0.428 Inches = 428,000  $\mu$  Inch



Biofilme com espessura maior que a da camada laminar será removido pelo fluxo. Maiores velocidade de escoamento reduzem a espessura do biofilme.

# OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO

- São necessárias pois os processos de formação de depósitos e biofilme são inevitáveis;
- A necessidade e frequência de realização são baseadas nos parâmetros operacionais do sistema:
  - Redução do fluxo de permeado;
  - Aumento da perda de carga;
  - Deterioração da qualidade do produto;
  - Aumento na contagem de microrganismos.

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- As características da corrente de alimentação e estratégias de pré-tratamento têm grande influência;
- Operações de limpeza e sanitização muito frequentes reduzem a vida útil da membrana;
- Isto reforça a necessidade de uma maior ênfase no de pré-tratamento e condições operacionais do sistema.

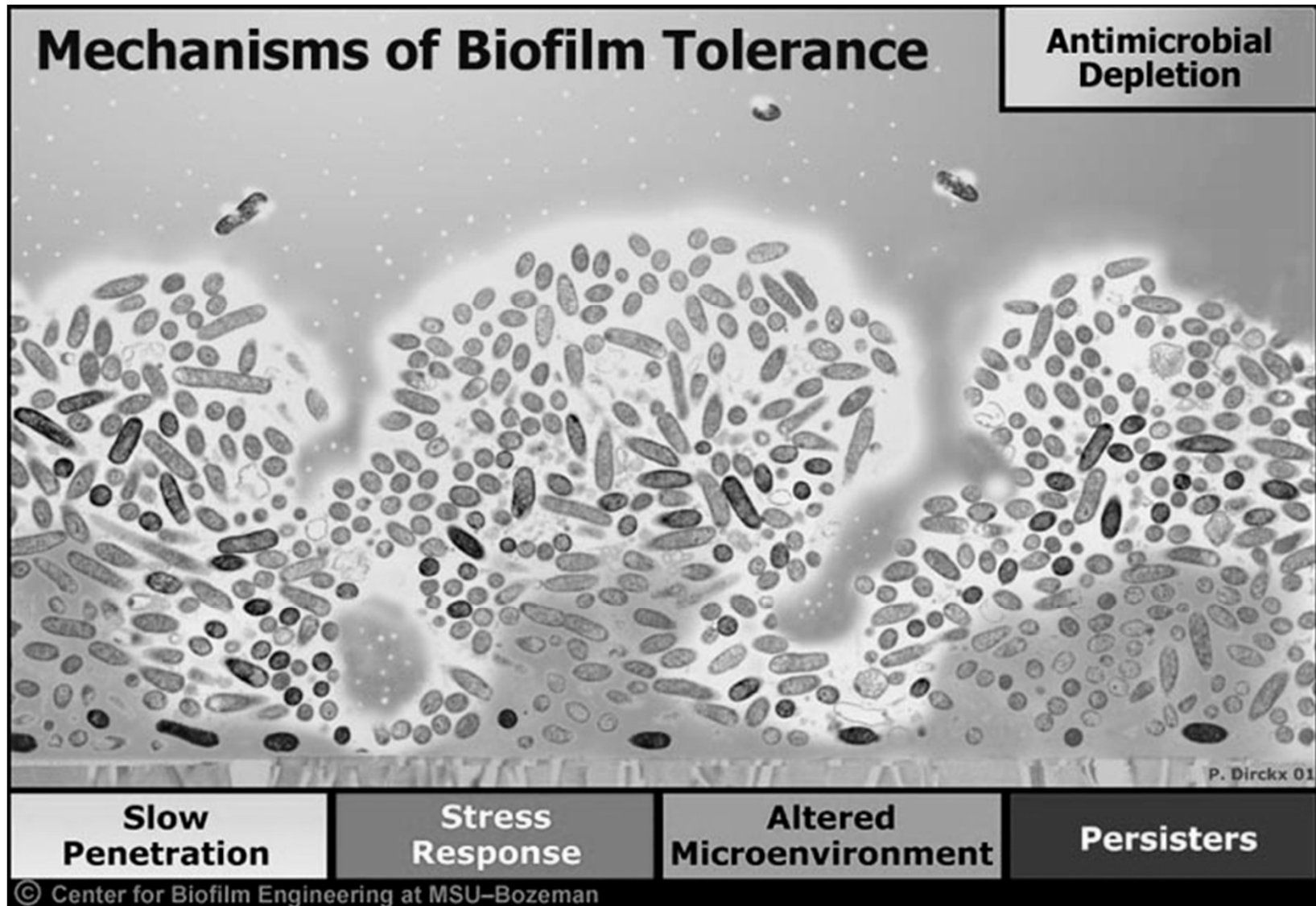
## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- ◎ As operações de limpeza e sanitização tem três objetivos:
- A limpeza física das membranas e demais componentes (ausência de impurezas visíveis);
  - A limpeza química (remoção de depósitos e incrustações);
  - A limpeza biológica (eliminação de microrganismos viáveis).

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- A operação de sanitização deve sempre ser precedida de uma limpeza química;
- Isto tem por finalidade garantir a máxima eficiência do agente de sanitização;
- É comum considerar que a membrana está limpa quando o fluxo original é restabelecido;
- Esta condição nem sempre é possível pois ocorre uma redução irreversível no fluxo, até que se atinja um valor estável.

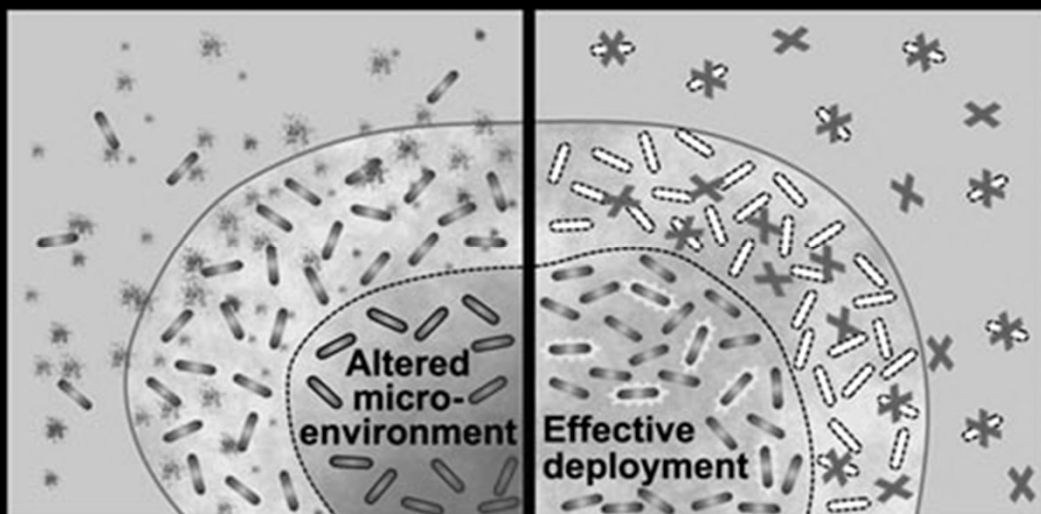




**Mecanismos de proteção contra o efeito dos sanitizantes**

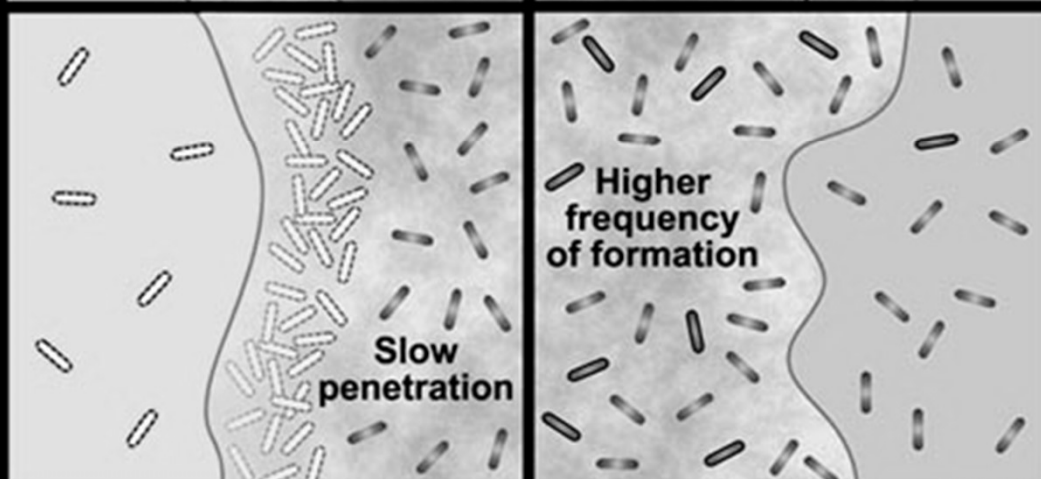
## Biofilm multicellularity results in better bacterial defenses

Nutrient depletion creates zones of altered activity.



Inner layers of biofilm cells have more time to initiate stress response.

Outer layers of biofilm cells absorb damage.



“Persister” cells may be present in higher numbers.

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- A obtenção de uma limpeza efetiva só é possível fornecendo-se três tipos de energia:
  - Energia química → na forma de detergentes e outros produtos que solubilizam ou dispersam os contaminantes;
  - Energia térmica → os agentes químicos têm sua eficiência aumentada com o aumento da temperatura;
  - Energia mecânica → promove o contato efetivo entre o agente de limpeza e a membrana.

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- O tempo de limpeza também afeta a eficiência do processo;
- Os fatores mais importantes para a definição do programa de limpeza e sanitização são:
  - Material das membranas → resistência das membranas aos agentes utilizados;
  - Condição de escoamento → regime turbulento ( $3000 < Re < 5000$ );

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- ⊙ Tempo de limpeza → na maioria dos casos um período de 30 a 60 minutos é suficiente para realizar a limpeza;
  - Pode ser necessário manter as membranas de molho, por um intervalo de tempo superior a uma hora.
  - Para a sanitização do sistema deve-se prever o mesmo intervalo de tempo.
- ⊙ Temperatura da solução de limpeza → como estas operações envolvem reações químicas, o aumento da temperatura melhora o desempenho do processo;
- ⊙ Qualidade da água → a água utilizada deve ter qualidade adequada, de maneira a não interferir no desempenho dos compostos utilizados.

## OPERAÇÕES DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO (CONT.)

- pH → o pH é um parâmetro importante para as operações de limpeza e geralmente é resultado do agente utilizado:
  - pH alcalino é utilizado para remover proteínas e outros compostos orgânicos;
  - pH ácido é indicado para contaminantes inorgânicos;
  - Valores extremos de pH também contribuem para a inativação de microrganismos.

# SANITIZAÇÃO

- ◎ O uso de sanitizantes tem por objetivo reduzir a concentração de microrganismos no sistema;
- ◎ Durante as operações de limpeza e sanitização pode-se obter as seguintes eficiências de remoção de microrganismos:
  - Enxágüe com água limpa → 90%;
  - Limpeza química → 99,9 %;
  - Sanitização → 99,999%.
- ◎ Deve-se ressaltar que cada tipo de microrganismo responde de maneira diferente a cada sanitizante.

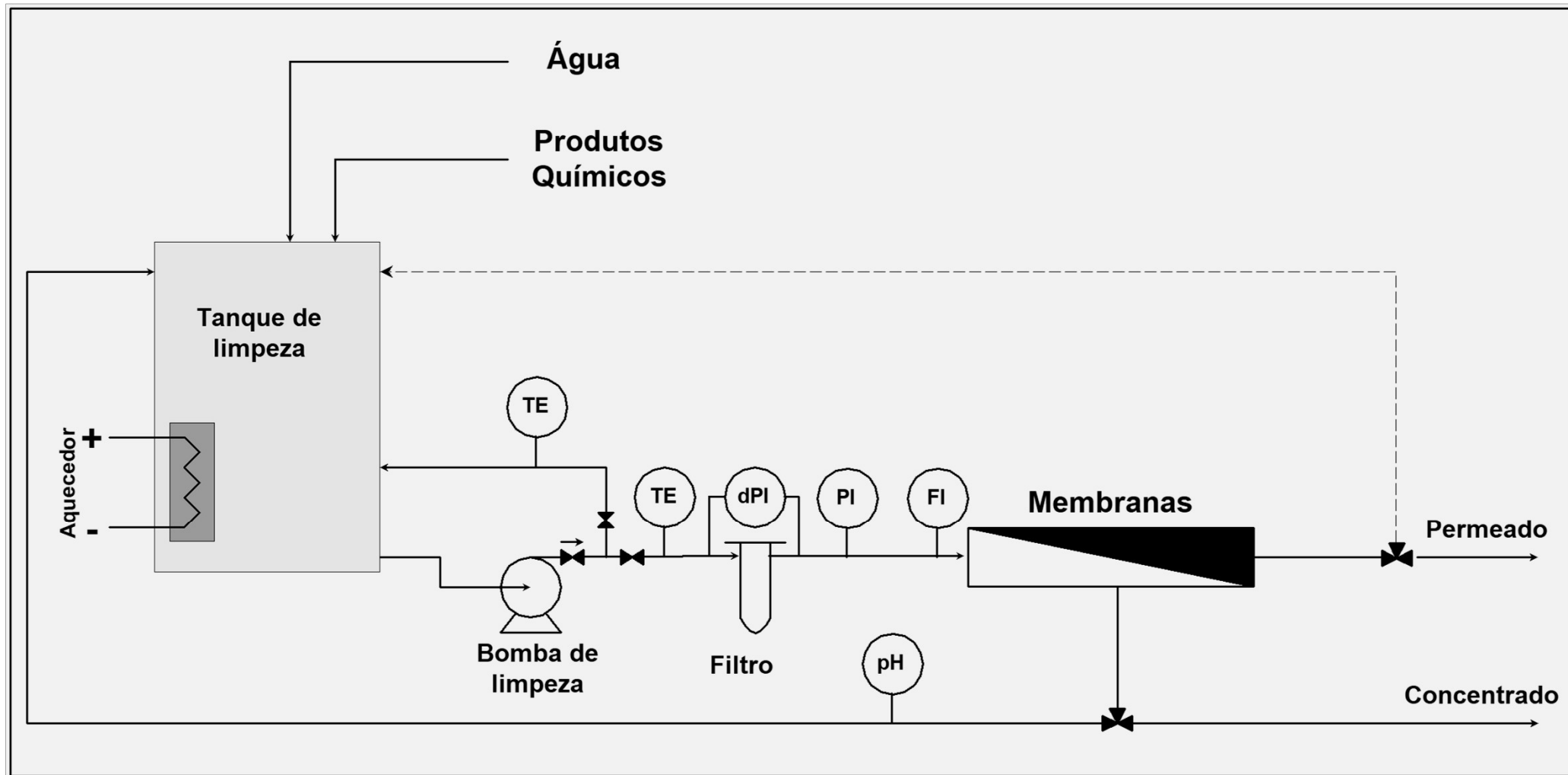
# SANITIZAÇÃO (CONT.)

- O tempo para sanitização depende da complexidade do sistema de água;
- Em alguns casos a sanitização deve ser feita manualmente;
- Após a sanitização deve-se fazer um enxágue com água limpa;
- Muitos produtos utilizados podem ser tóxicos;
- O processo de sanitização deve ser validado.



## ELEMENTOS DO SISTEMA DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO

- Nos sistemas que utilizam processos de separação por membranas deve ser previsto o subsistema de limpeza e sanitização;
- Este subsistema deve ser constituído de tanques de armazenagem, filtro, bomba, tubulação e válvulas;
- Caso a limpeza seja feita em temperatura superior à ambiente deve-se prever o sistema de aquecimento.



Representação esquemática do subsistema de limpeza e sanitização

# ELEMENTOS DO SISTEMA DE LIMPEZA E SANITIZAÇÃO

- O volume do agente de limpeza e sanitização deve ser suficiente para preencher todos os componentes do sistema;
- Geralmente considera-se o volume dos vasos de pressão, tubulações e filtros;
- A vazão da bomba de limpeza deve ser suficiente para promover um escoamento turbulento.

## AGENTES QUÍMICOS UTILIZADOS PARA OPERAÇÕES DE LIMPEZA DE SISTEMAS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.

<b>Agente de Limpeza</b>	<b>Aplicação</b>
<b>NaOH (0,1%) e Na-EDTA (0,1%) - pH = 12</b>	Remoção de biofilme; sílica, incrustação por sulfato e filmes orgânicos.
<b>NaOH (0,1 %) e Na-DBS (0,05%) - pH = 12</b>	Colóides inorgânicos, biofilme e filmes orgânicos.
<b>TPF-Na (1%), Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (1%) e Na-EDTA (1%)</b>	Biofilmes e filmes orgânicos.
<b>HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,2%)</b>	Incrustação por carbonato.
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (0,5%)</b>	Óxidos metálicos e incrustação por carbonato.

**Agentes químicos utilizados para operações de limpeza de sistemas de separação por membranas.**

<b>Agente de Limpeza</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Ácido Cítrico (2,0%)</b>	Óxidos metálicos e incrustação por carbonato.
<b>Ácido Sulfâmico (0,2%)</b>	Óxidos metálicos e incrustação por carbonato.
<b>Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub> - Hipossulfito de sódio (1%)</b>	Óxidos metálicos.

# AGENTES PARA SANITIZAÇÃO

<b>Agente de Sanitização</b>	<b>Observações</b>
Peróxido de Hidrogênio e ácido peracético (0,2% em pH entre 3 e 4)	Apresenta um ótimo efeito biocida, mas pode atacar as membranas.
Cloro e seus derivados.	É um agente amplamente utilizado no tratamento de água, pode atacar as membranas.

# OBSERVAÇÕES FINAIS

- Além dos produtos químicos mencionados, existem compostos especialmente formulados para operações de limpeza e sanitização;
- Os procedimentos de limpeza e sanitização devem ser desenvolvidos para cada condição específica,
- Devem ser seguidas as recomendações dos fornecedores de membranas.

## ATIVIDADE 4

- Procure na internet, página do *Sciencedirect*, um artigo que aborde o problema de formação de biofilme e depósitos em sistemas de separação por membranas para tratamento de água.
- Leia o artigo e faça uma avaliação crítica da abordagem utilizada para minimizar os efeitos negativos no desempenho do processo.