

# Ultrafiltração tangencial uma ferramenta tecnológica<sup>(1)</sup>

## *Tangential ultrafiltration a technological tool<sup>(1)</sup>*

José Waldir de Sousa Filho<sup>(2)</sup>; Marlei Barboza Pasotto<sup>(3)</sup>; Mônica Hitomi Okura<sup>(3, 4)</sup>.

<sup>(1)</sup>Trabalho do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

<sup>(2)</sup> Estudante de Pós-Graduação/Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica; Universidade Federal do Triângulo Mineiro; Uberaba, Minas Gerais; [josewaldir.engenharia@gmail.com](mailto:josewaldir.engenharia@gmail.com);

<sup>(3)</sup> Professor/ Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica; Universidade Federal do Triângulo Mineiro; Uberaba, Minas Gerais; [marlei.ufm@gmail.com](mailto:marlei.ufm@gmail.com); <sup>(4)</sup> [moni@mednet.com.br](mailto:moni@mednet.com.br).

**RESUMO:** Ultrafiltração é um importante método de separação por membranas que pode ser utilizado simultaneamente para purificar e concentrar compostos, tais como produtos proteicos, enzimas industriais e uma variedade de produtos alimentícios. É um processo mais rápido, eficiente e que requer menos energia em comparação com processos de separação convencionais. As membranas para ultrafiltração são de diferentes materiais, poliméricos ou cerâmicos, e são caracterizadas pela dimensão dos poros e seletividade. Possui limitações importantes de fluxo, sendo os principais fatores o *fouling* e a polarização por concentração. Por sua aplicação abrangente e para buscar métodos que otimizem o processo a Ultrafiltração é um vasto campo para inovação tecnológica.

**Termos de indexação:** Filtração Tangencial, Inovação Tecnológica, Ultrafiltração, Processos de separação.

**ABSTRACT:** *Ultrafiltration is an important separation process that can be used to simultaneously concentrate and purify compounds such as, protein products, industrial enzymes and a variety of food products. It is a faster, more efficient and requires less energy compared to conventional separation processes. The ultrafiltration membranes are made of different materials, polymer or ceramic, and are characterized by the pore size and selectivity. Has significant flow limitations, which the main factors are: fouling and concentration polarization. By your extensive application and to seek methods that optimize the process the Ultrafiltration is a vast field for technological innovation.*

**Index terms:** *Tangential filtration, Technological Innovation, Ultrafiltration, Separation Processes.*

## INTRODUÇÃO

A filtração na forma de escoamento tangencial à superfície do meio filtrante é uma das maneiras de operação que permite uma operação contínua, trazendo ganhos de produtividade relevantes a qualquer processo que necessite deste tipo de operação unitária. A ultrafiltração, por sua vez, se caracteriza por ser constituída de materiais com tamanho de poro controlado e definido, sendo, portanto utilizada simultaneamente para purificar e concentrar macro moléculas orgânicas, partículas, e coloides oriundos de amostras aquosas (DECLoux; TATOUD, 1999; FACCIOTTI et al., 2013; HENGL et al., 2013; HINKOVA et al., 2002a; HOLLAND et al., 2012; POWELL; TIMPERMAN, 2005). A associação de um material ultrafiltrante projetado para operar na forma tangencial traz vantagens significativas aos processos que requerem meios filtrantes com pequeno tamanho de poro. Na filtração tangencial alguns parâmetros devem ser analisados simultaneamente, tais como: tipo de membrana, diâmetro dos poros, velocidade da

filtração, temperatura, e pressão transmembrana (DECLoux; TATOUD, 1999).

A filtração tangencial pode ser utilizada com materiais de poros definidos. Para cada faixa de tamanho de poro, se define a aplicação quanto ao meio que estará sendo filtrado. Usualmente a nomenclatura das membranas segue Microfiltração (MF); Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose reversa (OR), e nesta ordenação é feita da maior faixa de tamanho de poro para a menor. Enquanto Ultra e microfiltração são utilizadas para, filtração de microrganismos, purificação de sucos, tratamento de efluentes, purificação de enzimas, pois são processos que retêm macromoléculas. A nanofiltração retém moléculas de baixa massa molecular e a osmose reversa as partículas iônicas. Para todos os casos os mecanismos de transferência de massa podem ser significativos no desempenho do processo e particularmente o fluxo de operação depende diretamente da diferença de pressão entre a membrana e inversamente das resistências que ocorrem no material filtrante. Fatores como polarização por concentração e o

entupimento denominado *fouling* são os pontos fracos do sistema, e, portanto devem ser minimizados e até evitados. Isso só é possível mediante o entendimento do processo de operação, bem como das circunstâncias que ocorre a filtração, o que leva um projeto de operação que viabilize o processo. Como o gradiente de pressão é a força motriz do processo e vai aumentando de acordo com a complexidade do sistema sendo menores pressões para microfiltração e ultrafiltração e maior pressão para nanofiltração e Osmose reversa, a definição deste gradiente é que permitirá a produtividade desejada aliada a uma menor perda por *fouling* e aumentando a vida útil do material filtrante. (GEANKOPLIS, 2012; MACCABE, et al., 2005).

A ultrafiltração com fluxo tangencial é uma amostra importante de técnicas de preparação que pode ser utilizada simultaneamente para purificar e concentrar traços de analitos de grandes volumes de soluções. É utilizada para recuperar biomoléculas tais como proteínas, vírus, células, e outras partículas de grandes volumes de solução aquosa, incluindo fonte tanto de água doce como de água salgada. Comparada com outras técnicas de purificação e concentração, precipitação, evaporação, e diálise, a ultrafiltração na forma de operação tangencial tem a capacidade de processar grandes volumes a altas taxas de velocidade sendo efetiva com baixas concentrações de analito (POWELL; TIMPERMAN, 2005).

Os filtros tangenciais, dada a sua configuração, são mais compactos e substituem de uma só vez várias etapas de purificação tradicional e têm baixo consumo de energia devido à boa relação entre a área de superfície das membranas, capacidade instalada e o comprimento do tubo (RAKIB et al., 2001). Os módulos de filtração tangencial são comumente apresentados em cartuchos circulares e placas planas.

Portanto, a Ultrafiltração no modo de filtração tangencial em que o escoamento do fluido é paralelo à superfície da membrana, permite, devido à alta velocidade, que ocorra o arraste dos solutos que tendem a se acumular na superfície, o que torna esse processo mais eficiente do que o convencional. Ainda, dado ao seu tamanho de poro característico, permite uma ampla aplicação nas indústrias química, farmacêutica, de alimentos e nos sistemas de despoluição e tratamento de água de abastecimento ou residuária (PAULSON, WILSON e SPATZ, 1984).

Este trabalho busca apresentar os principais conceitos e aplicações da filtração tangencial em processos das diferentes áreas tecnológicas. Isso pode contribuir com o estudo e projeto de ultrafiltros tangenciais como alternativa de processo trazendo inovação significativa aos setores que venham utilizar esta operação.

## REVISÃO TEÓRICA

### Filtração tangencial

A filtração de fluxo tangencial é realizada pela passagem de uma solução em fluxo paralelo, tangencial, à superfície de um material semipermeável ou poroso, também chamado meio filtrante, cujo tamanho de poro é bem definido. A **Figura 1** mostra esquematicamente a contraposição da filtração tangencial em relação à filtração convencional, chamada de *dead end*, e a **Figura 2** a nomenclatura de cada tipo de membrana em função de seu tamanho de poro (MASSÉ et al., 2011). A concepção deste tipo de filtração é baseada na intenção de fornecer tensão suficiente na superfície do meio filtrante, mantendo assim os sólidos e outras partículas retidas atingindo assim um valor máximo para a espessura de material acumulado que é chamada de torta de filtração. Com relação ao meio filtrante pode-se considerar que é confeccionado, usualmente, por material polimérico ou cerâmico e normalmente é referenciado como membrana de filtração. Usualmente a nomenclatura das membranas segue Microfiltração (MF); Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose reversa (OR), e nesta ordenação é feita da maior faixa de tamanho de poro para a menor (ACERO et al., 2009; HINKOVA et al., 2002b).

A filtração tangencial refere-se portanto à forma de escoamento da solução em relação à parede da membrana e ao permeado. A solução se faz passar tangencialmente à superfície da membrana e, devido à permeabilidade da membrana, o permeado escoar perpendicularmente à direção do fluxo da solução que tangencia a membrana, conforme **Figura 1A** (RATHORE; SHIRKE, 2011).

Conhecendo-se a teoria da filtração tangencial, pode-se, a partir de dados obtidos experimentalmente, em escala de bancada, dimensionar um conjunto de filtros, comumente encontrado no mercado, e comparar os resultados com uma operação em um filtro convencional. Obviamente, que no caso específico de operações com membranas de tamanho de poro reduzido, a filtração tangencial é a que viabiliza um processo em grande escala não havendo equivalente de aplicação de filtração convencional de escoamento perpendicular - *dead end*. (MACCABE, et AL. 2005; GEANKOPLIS, 2003).

### Fundamentos e teoria – a natureza da segunda membrana.

Durante um processo de filtração por membranas de UF ocorre a formação de uma película de material particulado sobre a superfície da membrana, esta película acaba atuando como

uma segunda membrana (BENITEZ et al., 2008; FERRER et al., 2000; ROSENBERG et al., 2009; VELA et al., 2005; WICKRAMASINGHE et al., 2010). A natureza da formação desta segunda membrana pode se dar pelos seguintes mecanismos: a) deposição de suspensões como proteínas ou coloides; b) adsorção não específica de compostos sobre a superfície da membrana e; c) retenção mecânica de micro agregados, que se formaram durante a passagem pela bomba onde sua natureza possa ter sido alterada devido à tensão cisalhante da bomba.

A segunda membrana pode ser classificada em três categorias:

Categoria 1 – Formação de uma camada de gel que se inicia no interior dos poros da membrana (polarização por formação de gel);

Categoria 2 – Suspensão de coloides que contribuem com a formação de uma camada sobre a membrana (coloides maiores que os poros da membrana). Esta formação pode ocorrer devido à rugosidade e adsorção na superfície;

Categoria 3 – Formação de camada por penetração parcial de moléculas no interior dos poros da membrana, permitindo que em regiões, onde não há penetração, a membrana permaneça com as suas características. Esta formação pode ocorrer por adsorção.

A formação de uma camada de material junto à membrana promove uma resistência adicional ao escoamento. No estado estacionário a difusão de massa da fase dispersa no seio da membrana fluida é igual ao fluxo convectivo de massa que atravessa a membrana, este mecanismo é ilustrado na **Figura 3** e representado através da Equação 1. As equações do processo estão descritas a seguir (ACERO et al., 2009; ACERO et al., 2010; ARUNKUMAR; ETZEL, 2012; BABEL; TAKIZAWA, 2010; BALAKRISHNAN et al., 1993; BENÍTEZ et al., 2007; BENITEZ et al., 2008; DERISZADEH et al., 2010; DIZON-MASPAT et al., 2011; FRAPPART et al., 2010; HEMAVATHI; RAGHAVARAO, 2010; HENGL et al., 2013; KANANI; GHOSH, 2006; LLANOS et al., 2009; LI, 2011; LOGINOV et al., 2011; MLAIK et al., 2011; NAMVAR et al., 2013; SAIDI et al., 2013; VON MEIEN; NOBREGA, 1994; VELA et al., 2005; ZURIAGA-AGUSTÍ et al., 2014):

$$J(x).C = D \cdot \left( \frac{dC}{dy} \right) \quad (1)$$

Em que:  $J(x)$  é o fluxo na direção  $x$ ,  $C$  é a concentração da fase dispersa,  $D$  é o coeficiente de difusividade e  $y$  é o vetor posição sobre a membrana. A integração da Equação 1 fornece:

$$J = \frac{D}{\delta(x)} \ln \left( \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \right) = k(x) \cdot \ln \left( \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \right) \quad (2)$$

Onde  $\delta(x)$  é a espessura de filme no local,  $k(x)$  é o coeficiente de transferência de massa,  $C_w$  e  $C_b$  são as concentrações na parede e no seio do fluido respectivamente. Com o transcorrer da filtração, a concentração  $C_w$ , aumenta até atingir um valor máximo  $C_g$  que é a concentração do gel formado.

Para escoamento com Reynolds ( $Re$ ) abaixo de 2.200 o coeficiente de transferência de massa pode ser calculado de acordo com uma modificação feita na Equação de Sherwood, Equação 3. Amplamente utilizada nos estudos de transferência de calor

$$Sh = 1,62 \left( Re \cdot Sc \cdot \frac{d}{L} \right)^{0,33} \quad (3)$$

Onde:  $Sh$  é o número de Sherwood,  $Sc$  o número de Schmidt,  $d$  é o diâmetro hidráulico e  $L$  é o comprimento.

O coeficiente  $k$  pode ser calculado, portanto, como apresentado na Equação 4.

$$k = 1,62 \left( \frac{vD^2}{Ld} \right)^{0,33} \quad (4)$$

Onde  $v$  é a velocidade de escoamento.

Para o caso de uma placa plana, a Equação 4 pode ser convenientemente representada pela Equação 5, ou simplificada pela Equação 6, em função da taxa de deformação na parede,  $\gamma_w$ .

$$k = 0,544 \left( \frac{D^2 \gamma_w}{x} \right)^{0,33} \quad (5)$$

$$k = C_1 \gamma_w^{0,33} \quad (6)$$

Onde:  $C_1$  é uma constante.

Para regime de escoamento turbulento ( $2.500 < Re < 10.000$ ), o coeficiente de transferência de massa é calculado de acordo com a Equação 7, para dutos, ou Equação 8 para placa plana.

$$k = 0,023 \left( \frac{v^{0,88} D^{0,67}}{\nu^{0,55} d^{0,12}} \right)^{0,33} \quad (7)$$

Onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

$$k = C_2 \gamma_w^{0,88} \quad (8)$$

Onde:  $C_2$  é uma constante

A Equação 2 não representa, em termos quantitativos, satisfatoriamente o comportamento dos dados experimentais para a filtração de colóides.

Assim sendo, os estudos podem ser realizados tomando como base as equações utilizadas para filtração convencional que apresentam uma pequena diferença com relação às utilizadas em filtração tangencial. No entanto, esta diferença é mais superficial que real.

O fluxo de permeado pela membrana é um resultado direto das resistências formadas pela estrutura da membrana, pelo material depositado em sua superfície (torta), além da força motriz que é o gradiente de pressão e a diferença de pressão osmótica entre a membrana. A equação geral, e simplificada em relação às resistências, que considera estas variáveis pode ser descrita através da Equação 9.

$$J = \frac{|\Delta P| - |\Delta \Pi|}{(R_f + R_t)\mu} \quad (9)$$

Com  $R_f$  e  $R_t$  sendo as resistências hidráulicas devido à membrana e à torta (gel e sólidos), respectivamente.

Se a membrana é utilizada na filtração de soluções puras, isentas ou com baixa concentração de sais, a Equação 9 se reduz à forma da Equação 10. Sendo assim, o fluxo,  $J$ , pode ser obtido então, através de procedimentos usuais de filtração, sendo, portanto, relacionado com a perda de carga no sistema ( $\Delta P$ -manométrico), que é usualmente tomada como sendo a pressão transmembrana (PTM), com as resistências encontradas pelo fluido ( $R$ ) e com a constante de permeabilidade da membrana Equação 10.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \sum R} \quad (10)$$

$$\text{Com } \sum R = R_f + R_t$$

A PTM pode ser entendida com a média da perda de carga no espaço percorrido pelo fluido menos a pressão do permeado (Figura 1A com todas as pressões manométricas)

$$\Delta P [\text{bar}] = [(P_1 + P_2)/2] - P_s \quad (11)$$

$R_t$  é função da resistência específica da torta,  $\alpha$ , da área de filtração,  $A$ , do volume filtrado  $V$  e do parâmetro  $w$ , que relaciona a massa de torta seca com o volume filtrado, tal como apresentado pela Equação 12.

$$R_t = \alpha \left( \frac{wV}{A} \right) \quad (12)$$

A resistência específica pode ser constante ou função da pressão (Equação 13).

$$\alpha = \alpha' \Delta P^S \quad (13)$$

Para material incompressível  $S$  é zero e para tortas extremamente compressíveis o índice  $S$  é igual à unidade. A resistência  $R_t$  é constante para uma dada solução.

O fluxo pode ser obtido em função da vazão volumétrica do sistema pela área de filtração conforme apresentado pela Equação 14.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

Assim a relação da pressão com as condições de operação pode ser obtida pela Equação 15.

$$\Delta P = \mu Q \frac{(R_t + R_f)}{A} \quad (15)$$

A Equação 15 pode ser combinada com a Equação 12 fornecendo a Equação 16.

$$\Delta P = \frac{\mu Q}{A} \left( \frac{\alpha w V}{A} + R_f \right) \quad (16)$$

Finalmente, a relação entre fluxo e perda de carga é dada conforme a Equação 17.

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \left( \frac{\alpha w V}{A} + R_f \right)} \quad (17)$$

Os sistemas de filtração tangencial por membranas podem ser avaliados com base em resultados que predigam a habilidade da membrana em reter compostos previamente definidos, promovendo assim uma eficiente separação. Este tipo de análise pode ser feito a partir do coeficiente de rejeição da membrana,  $\sigma$  que é definido como sendo:

$$\sigma = 1 - \frac{C_p}{C_i} \quad (18)$$

Onde:  $C_i$  é a concentração do produto de interesse retido pela filtração e  $C_p$  é a concentração do produto no permeado.

O fator de concentração volumétrico ( $F_C$ ) é outro que pode ser utilizado para a análise. Ele pode ser calculado em função dos volumes envolvidos no início ( $V_o$ ) e o volume no final da operação ( $V_f$ ) através da Equação 19.

$$F_C = \frac{V_o}{V_f} \quad (19)$$

Com base nestes dois fatores é possível prever o valor da concentração do final do retido de acordo com a Equação 20.

$$C_f = C_o \cdot (F_C)^\sigma \quad (20)$$

E ainda com os valores de  $F_C$  e  $\sigma$ , pode-se calcular o rendimento do processo (Equação 21).

$$R = (F_C)^{\sigma-1} \quad (21)$$

A filtração tangencial tem como principal característica possibilitar a operação com tempos prolongados onde a torta formada, que pode ser compressível, não interfira significativamente no processo quando os limites de perda de carga são respeitados. Deve-se ressaltar que para qualquer situação (MF, UF, NF) há necessidade de uma contínua manutenção nas membranas, cuja vida útil vai depender fortemente da composição da membrana, do material a ser filtrado e das condições operacionais impostas ao sistema. Uma vez tendo sido correta a definição do material que compõe a membrana e respeitado os limites de perda de carga imposta ao sistema, a longevidade tende a ser maior. Mesmo assim sempre se faz necessário a recuperação da membrana que deve seguir as especificações do fabricante.

Algumas definições importantes utilizadas em filtração tangencial:

Razão de conversão ( $R_C$ ) é a fração do fluxo de alimentação ( $F_i$ ) pelo fluxo de permeado ( $F$ )

$$R_C = F_i/F$$

Permeação aparente ( $P_{Ap}$ ) é a fração de um composto em particular que passa pela membrana pela fração deste composto que é concentrado pela retenção.

$$P_{Ap} = \frac{\text{(concentração filtrado, } C_p)}{\text{(concentração na alimentação, } C_i)}$$

Permeação intrínseca ( $P_i$ ): é a fração de um dado composto no permeado pela fração deste composto na parede da membrana.

$P_i = \frac{\text{(concentração no permeado, } C_p)}{\text{(concentração na parede da membrana, } C_w)}$

Com estas definições a rejeição pode ser calculada como:

$$\sigma = 1 - P_{Ap} \quad (22)$$

ou

$$\sigma = 1 - P_i \quad (23)$$

O diavolume (DV) é a medida da quantidade de fluido de lavagem utilizada durante a etapa de diafiltração. É o volume de fluido introduzido na unidade de filtração comparado com o volume de retido.

DV = volume de diafiltração durante a operação/volume de retido.

Com essas análises é possível se obter uma expressão para que se determine a concentração ótima de uma proteína ou colóide, inicialmente a uma massa  $M_p$  num volume  $V_o$ , que é concentrada em um processo de diafiltração utilizando uma membrana de ultrafiltração. (EYKAMP, 1997, GOLDBERG, 1997, Perry & Chilton, 1999, MACCABE, et AL. 2005; GEANKOPLIS, 2003)

### Aplicação de Ultrafiltração em processos

O uso de tecnologias de membrana em biosseparação de proteínas é indicador do aumento da atenção dedicada às várias vantagens sobre os processos tradicionais de purificação: alto rendimento, baixo capital investido e fácil transferência para produção comercial em larga escala (CASEY et al., 2011; GOLUNSKI et al., 2011; MOHANTY; GHOSH, 2007). Biosseparação de proteínas é desafio tecnológico, caro, e é atualmente o foco na bioindústria (DIZON-MASPAT et al., 2011; MOHANTY; GHOSH, 2007; MICHALSKY et al., 2009).

A tecnologia de Ultrafiltração consiste na aplicação de pressão hidrostática fazendo o líquido, permeado, fluir pelos poros da membrana. Os sólidos e grandes moléculas suspensas em solução são retidos, enquanto a água, de menor tamanho molecular, passa pelo poro da membrana pelo diferencial de pressão, também chamado de pressão transmembrana (CHAKRABORTY et al., 2014; PAULSON et al., 1984; TRES et al., 2009).

Decloux e Tatoud (1999), explicam que os métodos de filtração que utilizam membranas de fluxo tangencial consistem na separação dos sólidos dissolvidos ou em suspensão, em função do seu peso molecular e dimensão. Criando assim um gradiente de pressão entre a retenção e a permeabilidade, a membrana atua como filtro. As substâncias menores que os poros da membrana são permeadas como solvente, enquanto as

moléculas ou as partículas maiores são retidas como retentado (RATHORE; SHIRKE, 2011; TRES et al., 2010).

A ultrafiltração é um processo regido por pressão para remover solvente (normalmente água) e pequenos solutos (sais e açúcares) de grandes macromoléculas. Esse transporte de massa é dominado por convecção, a taxa de transporte de massa para ambos os produtos e pequenas impurezas é proporcional ao fluxo do filtrado e o correspondente coeficiente de peneiramento do soluto, que é igual a razão da concentração do soluto no filtrado pela concentração da solução alimentada (MEHTA; ZYDNEY, 2004).

Na filtração convencional, o fluido se movimenta na direção perpendicular à superfície da membrana. Com isso, pode ocorrer rapidamente o acúmulo de partículas na superfície da membrana, diminuindo sua eficiência. Dessa forma, é comum em processos contínuos optar-se pela filtração tangencial na qual o fluido se movimenta paralelamente à superfície da membrana sob ação de uma intensa força motriz, minimizando, o acúmulo de matéria na superfície da membrana (ARMOA; JAFELICCI JUNIOR, 2011).

O processo de ultrafiltração necessita de membranas com poros de diâmetro menores do que 100 nm (Rakib et al., 2001; TREFRY et al., 2010; WANG et al., 2011). Como resultante a pressão de trabalho deve estar entre 3 a 10 BAR. Esta tecnologia permite a separação de partículas fluidicas com dimensões e peso moleculares menores que as de corte da membrana. Os setores de desenvolvimento das indústrias utilizam este processo de separação para purificar e concentrar macromoléculas em soluções, especialmente soluções proteicas (HINKOVA et al., 2002a; MICHALSKY et al., 2009; RAKIB et al., 2001).

Ultrafiltração é normalmente utilizada para concentração de ampla variedade de produtos proteicos, incluindo terapêuticos recombinantes, enzimas industriais, e uma variedade de produtos alimentícios (ALVENTOSA-DELARA et al., 2013; GUO et al., 2009; MEHTA; ZYDNEY, 2004; RATHORE; SHIRKE, 2011; ZYDNEY, 2009), para tratamento de água (MA et al., 2013; MAJOUJI et al., 2012; SAEKI et al., 2013), na separação de metais de complexos orgânicos (GARCÍA-OTERO et al., 2013; GOVEIA et al., 2010; TONELLO et al., 2007), para clarificar o vinho branco (GARCÍA-MARTÍN et al., 2010), para clarificação de caldo de cana-de-açúcar (NENE et al., 2002), para clarificação de suco de limão (SAURA et al., 2011). Um dos maiores desafios encontrados por usuários de membranas de ultrafiltração é a grande dificuldade em comparar produtos de membrana proveniente de diferentes fabricantes e feitas de diversos materiais, poliméricos ou cerâmicos (MEHTA; ZYDNEY, 2004).

Associada a complexação, a ultrafiltração pode ser utilizada para concentrar íons metálicos quando polímeros hidrossolúveis são utilizados como agentes complexantes. Assim, por aumento artificial do tamanho dos microssolutos, como íons metálicos, por complexação em substratos moleculares adequados, a ultrafiltração se torna não exclusivamente reservada para o tratamento de soluções de macromoléculas e se torna além disso um processo seletivo. Embora complexação-ultrafiltração ainda não seja aplicada em escala industrial, o processo híbrido promete ser uma técnica sustentável para tratamento de água residuária graças a maior vantagem que é obtida pelo suficiente aumento do tamanho da molécula, metal-polímero complexo que pode ser concentrado por ultrafiltração para recuperação ou remoção em fase homogênea. Assim, os problemas encontrados com separação multifase podem ser evitados. (MIMOUNE; AMRANI, 2007)

Com alguma expectativa, o fracionamento de proteínas, por UF tangencial, em geral, ainda permanece impraticável ao menos que duas proteínas para ser separadas tenham pelo menos uma diferença de dez vezes em suas massas moleculares. Para entender a razão por trás dessa limitação, é imperativo considerar os fatores que seguem que governam a transmissão (ou rejeição) do comportamento do sistema de membranas:

- Propriedades da membrana, incluindo o peso molecular de corte (Molecular weight cut-off – MWCO) e o tipo de material;

- O sistema hidrodinâmico, o módulo da membrana, pressão aplicada e a velocidade tangencial da alimentação.

O MWCO para membranas especificado pelo fabricante não refere-se à retenção absoluta mas sim a um valor arbitrário na amplitude de 80 a 100% de retenção. Tal como, algo em torno de 0 a 20% de macromoléculas podem ser transmitidas pelo chamado “completo rejeitado” de membranas (BALAKRISHNAN et al., 1993; GYURA et al., 2004). Também membranas que separam somente solutos baseados em tamanhos (peneiramento) pode ser mais efetivos para fracionar misturas de macromoléculas com similares massas moleculares por introdução de grupos iônicos ou por alteração do equilíbrio hidrofóbico/hidrofílico na superfície da membrana. A escolha do material da membrana é importante, pois afeta a interação proteína-membrana e isto determina a extensão do *fouling* da membrana durante a separação de proteínas. (BALAKRISHNAN et al., 1993). O fluxograma do processo de filtração tangencial está demonstrado na **Figura 4**.

A ultrafiltração tem sido extensivamente estudada para determinar o fluxo transmembrana

para definir as equações inerentes ao processo, para identificar fatores que influenciam no fluxo, e caracterizar a força e fragilidades de várias composições, formas e construção de membranas (GOMES et al., 2010; POWELL; TIMPERMAN, 2005).

## Membranas

Ultrafiltração proporciona uma efetiva barreira para microrganismos, partículas suspensas e coloidais e é intensamente aplicada para tratamento de água potável. Sistema convencionais de UF são operados a pressão transmembrana por volta de 0,5-1,0 bar e requer bombeamento para operação e contracorrente (LIU et al., 2011; PETER-VARBANETS et al., 2010; WICKRAMASINGHE et al., 2010).

Membranas de ultrafiltração, com poros variando de  $1.10^{-9}$  a  $5.10^{-8}$  m, são capazes de reter espécies com peso molecular entre 300 e 500000 Da. A pressão fornecida é amplamente utilizada para fracionamento, purificação, separação e concentração de solutos solúveis em água ou materiais dispersos em água. Aplicações podem ser encontradas em áreas como a indústria química, metalurgia, indústria de papel, têxtil, couro, farmacêutica assim como na alimentícia. É estabelecido que macromoléculas, alvos para separação por membranas de ultrafiltração, tendem a ser adsorvidas na superfície e nos poros do material da membrana, que é muitas das vezes polimérico. A extensão da adsorção depende dos diferentes tipos de soluto macromolécula-membrana da interação polimérica como hidrofóbica/hidrofílica, ligações de hidrogênio, interações de Van der Waals e efeito eletrostático. Além do mais, devido a rejeição das macromoléculas pela membrana, existe uma camada de alta concentração próximo a superfície da membrana. Este fenômeno é comumente referido como polarização por concentração, que contribui para a formação de uma camada de gel na superfície da membrana que dificulta o fluxo através da membrana (HAMZA et al., 1997).

As membranas utilizadas em processos de filtração tangencial podem ser minerais ou orgânicas. As primeiras podem ser de carbono, alumínio, óxido de zircônio ou óxido de titânio, com ampla faixa de pH e temperatura entre 10 e 120°C. As membranas orgânicas são constituídas basicamente por acetato de celulose, polissulfonas, polietersulfona, poliamida, pH entre 2 e 12 e temperatura de 10 a 80°C (RAKIB et al., 2001).

A seleção da membrana é de fundamental importância para o processo de ultrafiltração, pois há uma grande variedade de composição de materiais, dimensões da membrana e tamanho dos poros. Membranas podem ser construídas de vários materiais, tais como celulose regenerada, acetato

de celulose, polissulfonas, e fluoropolímeros, levando a diferentes propriedades de adsorção e de estabilidade. As dimensões da membrana determina a área superficial ao qual a amostra é exposta e o volume retido no sistema da membrana. As membranas de ultrafiltração são caracterizadas pelo peso molecular de corte, o qual é comumente definido como o menor peso molecular que será 95% retido pela membrana durante a ultrafiltração. A seletividade das membranas de ultrafiltração é caracterizada pela determinação do rendimento de recuperação das moléculas como função do peso molecular (CHERKASOV et al., 1995; POWELL; TIMPERMAN, 2005; POLYAKOV; ZYDNEY, 2013; MEHTA; ZYDNEY, 2004). Para a eficiência na recuperação dos solutos, é imperativo que os poros da membrana sejam homogêneos e tenham distribuição uniforme tanto em tamanho quanto na forma. Além disso, a seletividade e a capacidade de retenção são afetadas por diferenças na forma, carga, e hidratação do soluto, assim como pela força iônica e pH (POWELL; TIMPERMAN, 2005; POLYAKOV; ZYDNEY, 2013; MEHTA; ZYDNEY, 2004). A modificação da superfície da membrana é significativo para melhorar sua seletividade (KIM et al., 2013).

Para processos tradicionais de ultrafiltração utilizados para concentração de proteínas, a seletividade é definida como a razão entre o fluxo de um pequeno soluto para a do produto/proteína de interesse e é, portanto igual ao inverso do coeficiente de peneiramento da proteína, assumindo esse igual a um (POLYAKOV; ZYDNEY, 2013).

Polietersulfona é um derivado intimamente relacionado ao polissulfonas que é totalmente desprovido de hidrocarbonetos alifáticos, e tem uma maior temperatura de transição vítrea de 230°C. Este é um excelente material de membranas para ultrafiltração devido ao filme e as propriedades de formação da membrana e à alta estabilidade mecânica e química, em adição o fato de serem comercialmente disponíveis e economicamente viáveis. (HAMZA et al., 1997; JANSEN et al., 2013). É um dos polímeros mais amplamente utilizados para fabricação de membranas de ultrafiltração. Uma membrana de ultrafiltração de polietersulfona melhorada com menos *fouling* poderá ter fortes impactos econômicos na indústria de membranas (HAMZA et al., 1997).

As membranas podem ser parcialmente ou totalmente seletivas (HENDRIX et al., 2013; SANTOS et al., 2001; VON MEIEN; NOBREGA, 1994). Em ambos os casos, uma plotagem do fluxo de permeado versus a diferença de pressão transmembrana tem três regiões distintas. A primeira delas é a amplitude da baixa pressão, onde o fluxo de permeado aumenta linearmente com a diferença de pressão transmembrana, é conhecido como região de filtração. Para pressões moderadas uma relação não linear é observada. A altas

pressões o fluxo de permeado permanece constante com o aumento da pressão transmembrana. Isto é conhecido como região de limitação de fluxo. Este comportamento é relacionado à adsorção, bloqueio dos poros, formação de gel, e polarização por concentração. (VON MEIEN; NOBREGA, 1994)

A ultrafiltração que depende do uso de membranas semipermeáveis tem o potencial de reduzir significativamente o custo da biosseparação. Tais processos de biosseparação são escaláveis por conta de sua natureza modular e pode dar alto rendimento de produto e baixo custo de operação e manutenção. Tradicionalmente, ultrafiltração tem principalmente sido utilizada para concentração de proteínas e dessalinização. Recentes estudos têm mostrado que a UF pode ser utilizada com potencial para alta resolução de fracionamento de proteínas. Alta resolução de fracionamento de proteínas com peso molecular próximos podem ser atingidos baseados em tamanho e carga e em alguns casos interações afins por ajuste adequado do pH da solução de alimentação e da concentração de sal, e nas condições de operação tais como fluxo e sistema hidrodinâmico. Todavia, tem havido pequenos avanços na transferência dessas vantagens para escala comercial: a principal razão é a inadequação de configurações UF utilizados atualmente e modos de operação para o fracionamento de alta resolução. (MOHANTY; GHOSH, 2007).

Os resultados apresentados demonstram que a relação entre seletividade e permeabilidade durante o processo de Ultrafiltração (UF) pode ser matematicamente descrito por acoplamento de modelos existentes para estérico/eletrostática rejeição do soluto com modelos apropriados para incrustações baseado em diferentes mecanismos de incrustações, tais como bloqueio e constrições dos poros. Os resultados também demonstram que a relação seletividade permeabilidade para a membrana limpa é insuficiente para caracterizar o desempenho durante os processos de UF reais. Em particular, a análise da relação citada para a membrana limpa ignora as mudanças na seletividade e fluxo de permeação, devido à formação de depósitos de proteínas durante o processo de membrana. A evolução do tempo ou seletividade curvas de seletividade/permeabilidade depende fortemente do mecanismo de incrustação subjacente, bem como a razão entre o soluto e os raios dos poros e o soluto subjacente e as distribuições de tamanho de poro. Além disso, o comportamento global é uma função da capacidade da membrana para capturar solutos pelas paredes dos poros, isto é a força e a cinética de adsorção de proteínas. Isto sugere que dados experimentais para a variação de seletividade da membrana e fluxo de permeação com o tempo pode fornecer informações importantes sobre as propriedades da membrana e solução de alimentação, bem como os

mecanismos que regem o comportamento das incrustações. Esta informação pode permitir o desenho de membranas de ultrafiltração e mais eficientes processos para aplicações específicas (POLYAKOV; ZYDNEY, 2013).

A análise da seletividade-permeabilidade fornece um quadro de que pode ser utilizada para analisar o desempenho de novas membranas de ultrafiltração. Isso foi demonstrado utilizando um protótipo com membranas de ultrafiltração sendo essa atacada com radical de ácido sulfônico para regenerar compostos existentes na membrana celulósica. Essa modificação de cargas na membrana fornece uma melhor combinação de fatores de separação e de permeabilidade do que os existentes nas membranas de ultrafiltração devido a forte repulsão eletrostática da parte negativa da proteína da porção negativa da membrana. O desempenho dessas membranas de cargas modificadas também excede o que poderia se esperar para membranas tendo mais estreita distribuição dos tamanhos de poros, sugerindo que a adição de cargas elétricas pode ser muito mais efetiva do que tentativas de controle do tamanho dos poros da membrana. (MEHTA; ZYDNEY, 2004).

#### **Limitações – *fouling* e polarização por concentração**

A polarização e o *fouling* são reconhecidos por serem os maiores problemas encontrados no processo de ultrafiltração. Ultrafiltração convencional é realizada a constante pressão transmembrana e os efeitos de *fouling* e polarização são observados através da redução do fluxo de permeado com o tempo. O declínio do fluxo de permeado com o tempo a pressão constante é difícil de modelar devido à natureza dinâmica oriunda da constante mudança no transporte convectivo das proteínas pela membrana: um fator que tem potencial para afetar e se estende a ambos, polarização e *fouling* na membrana. (ACERO et al., 2010; AHMAD et al., 2012; ALVENTOSA-DELARA et al., 2013; ARMOA; JAFELICCI JUNIOR, 2011; HENGL et al., 2013; KANANI; GHOSH, 2006; KHAYAT et al., 1997; LINARES et al., 2013; ROSENBERG et al., 2009; ROSSI et al., 2008; VELA et al., 2005).

Os principais contribuintes para o *fouling* incluem uma variedade de contaminantes tais como partículas de matéria em suspensão (orgânico ou inorgânico), de matéria orgânica dissolvida, os sólidos dissolvidos, e organismos biológicos. Outro significativo fator que afeta o desempenho das membranas é método utilizado para estocar e transporta-las (LAWLER et al., 2013; HAMZA et al., 1997; PALENCIA et al., 2013; POLYAKOV; ZYDNEY, 2013; STRIEMER et al., 2007).

A hidrodinâmica do sistema, pressão aplicada e a configuração da membrana, tem uma forte



influência na polarização da superfície da membrana. Isso, por sua vez, afeta o comportamento de rejeição da membrana. O fenômeno de polarização, que leva a limitação do fluxo para uma determinada velocidade tangencial, é particularmente de interesse durante a separação de proteínas. (BALAKRISHNAN et al., 1993; KHAYAT et al., 1997)

Medições de retenção de solutos são geralmente consideradas como umas das mais importantes técnicas para caracterizar a distribuição por tamanho de poros nas membranas de UF. Ainda são muitas as dificuldades envolvendo mecanismos de retenção, tais como polarização por concentração, distribuição do peso molecular e adsorção. Outro ponto de possível ocorrência é o da indução de fluxo por deformação do polímero flexível que são utilizados como modelos de retenção. Uma importante aplicação industrial de membranas de ultrafiltração são encontradas nos laticínios, onde ultrafiltração é utilizada para concentrar proteínas. (BEERLAGE et al., 1996)

Todavia, o maior desafio para a aplicação de tecnologia de membranas em diferentes escalas é o *fouling*, que causa uma grande redução na produtividade, conduzindo a um severo declínio no fluxo da filtração. O *fouling* é um assunto complexo. Geralmente, matéria orgânica dissolvida (DOMs) incluem substâncias húmicas, proteínas, polissacarídeos são reconhecidos por serem os maiores causadores de *fouling* que bloqueiam os poros das membranas e reduzem o fluxo de permeado. O estágio inicial da filtração é principalmente controlado pela interação proteína-membrana (hidrofóbica, eletrostática, comportamento de agregação), mas nos estágios posteriores, as interações proteína-proteína (camada de torta) dominam a comportamento do *fouling* (XIAO et al., 2013; PETER-VARBANETS et al., 2010).

O consenso geral parece ser que o *fouling* pode ser causado por um ou mais fatores dos relacionados a seguir: superfície de adsorção/deposição do soluto; gradual, irreversível mudança na camada de polarização (tais como a consolidação da torta); adsorção/deposição de soluto dentro da membrana (KIM et al., 1991; (PETER-VARBANETS et al., 2010). No processo de *biofouling*, microrganismos tendem a aderir à superfície da membrana, excretando substâncias extracelulares poliméricas que levam a severas reduções do fluxo. Assim, *biofouling* é considerado um fator limitante durante o processo de filtração por membranas como a ultrafiltração, nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO) (PETER-VARBANETS et al., 2010; YU et al., 2014).

Conforme o soluto vai se tornando mais concentrado, efeitos de polarização na superfície da membrana podem levar a precipitação e aumento do entupimento. Para minimizar o efeito *fouling*, é

importante manter altas taxa de fluxo da solução paralelo à superfície da membrana. Em altas taxas de fluxo, a maioria da solução não passa pelos poros da membrana, mas é reciclada através do sistema de ultrafiltração, conduzindo ao aumento do tempo de processo. Quando a permeabilidade específica cai abaixo de certo nível, geralmente é necessário realizar a limpeza da membrana através de tratamento químico para melhorar o fluxo e o desempenho. Ultrafiltração é utilizada simultaneamente para purificar e concentrar macro moléculas orgânicas, partículas, e coloides oriundos de amostras aquosas (POWELL; TIMPERMAN, 2005).

Em várias misturas de dois compostos orgânicos de mesma concentração, o aumento da resistência do *fouling* é proporcional ao aumento de pequenas moléculas. Com isso, pequenas moléculas tem efeito maior no comportamento do *fouling*. Ou seja, a resistência do *fouling* aumenta com o acréscimo de pequenas moléculas e com o aumento da densidade negativa da solução (XIAO et al., 2013).

O declínio do fluxo tem um significativo impacto negativo na viabilidade e econômico do processo de ultrafiltração por membranas e por esta razão medidas devem ser tomadas para prevenir ou minimizar sua ocorrência. Vários meios são empregados para minimizar o *fouling*. Basicamente eles são ou procedimentos operacionais aplicados durante o processo de ultrafiltração ou modificações fundamentais objetivando o material da membrana. Procedimentos operacionais incluem: ajuste das condições operacionais tais como pH, temperatura e concentração; emprego de pré-tratamento apropriado combinado com seleção adequada dos módulos de membranas; limpeza do sistema de membrana através da utilização de agentes de limpeza ácidos e/ou alcalinos. Modificações na membrana são abordagens fundamentais desde que é o centro ao redor de desenvolvimento químico de modificações do material da membrana que é menos suscetível ao *fouling*, enquanto procedimentos operacionais pode ainda ser usados quando necessário (HAMZA et al., 1997).

Uma maneira de evitar os problemas causados pelo *fouling* pelo uso de proteínas é utilizar polímeros sintéticos como modelos para soluções diluídas. Quase todas as caracterizações de retenção têm sido realizadas utilizando sistemas aquosos. É muito comum que o comportamento de retenção e de adsorção de polímeros em soluções orgânicas difere do comportamento de soluções aquosa. Os mais frequentes polímeros utilizados para caracterização de membranas são os dextranos solúveis em água e polietilenoglicóis (PEG), devido à viabilidade econômica em diversos comprimentos e distribuição de peso molecular. Existem várias demandas que devem ser atendidas para medidas confiáveis de retenção com macromoléculas flexíveis: adsorção deve ser

excluída; polarização por concentração deve ser minimizada; a interação soluto-solvente deve ser compreendida e a interação específica do solvente deve ser minimizada (BEERLAGE et al., 1996).

O aumento exponencial da viscosidade na interface solução-membrana é o principal fator para o aumento do coeficiente de rejeição. Os efeitos conformacionais das macromoléculas, devido à pressão osmótica e tensão de cisalhamento, não são marcantes nessa região. Além do mais, a polarização por concentração na interface solução-membrana funcionaria como uma resistência extra para o transporte, que é devido a alta viscosidade da solução, mantendo em mente que não ocorre formação de gel sobre as condições experimentais apresentadas no trabalho. (VON MEIEN; NOBREGA; 1994).

As camadas de polarização são construídas muito rapidamente no início do processo e posteriormente se mantém razoavelmente constante. O rápido declínio inicial no fluxo é atribuído à polarização negligenciando o *fouling*. Na sequência o declínio mais gradual no fluxo é atribuído ao *fouling* da membrana sobre constantes condições de polarização. Ultrafiltração sobre pressão constante o fluxo decresce continuamente e conseqüentemente pode se supor que poderia ser causada pela pressão osmótica e pela taxa de *fouling* da membrana (KANANI; GHOSH, 2006).

## DISCUSSÃO

A UF por escoamento tangencial pode ser aplicada de forma emergente como pré-tratamento, nos processos que utilizam osmose reversa (OR) como é o caso da desinfecção da água, e avanços industriais e tratamento de água residuária. Outros campos comuns de UF como indústria alimentícia e farmacêutica será um desafio para membranas convertidas devido a aplicação dessas indústrias serem não sanitárias para a sua utilização e a relevante presença de agências reguladoras (LAWLER et al., 2013).

Powell e Timperman (2005), utilizaram membranas Pall (Ann Arbor, MI) Centramate de 10 kDa e avaliaram o fluxo tangencial da membrana de ultrafiltração para a separação de Lysozima e alfa lactalbumina, pois possuem massa molecular relativamente baixa (aproximadamente 14 kDa) próximo de 10 kDa que é o tamanho de corte das membranas utilizadas, o que aumenta a probabilidade de qualquer agente bloquear a superfície e serem desorvidos durante o processo, passando pela superfície da membrana e serem minimamente retidos.

Polyakov e Zydny (2013), examinaram as teorias correntes do bloqueio completo e constrição dos poros e avaliaram os efeitos desses fenômenos de incrustação no transporte de massa na superfície da membrana e, por sua vez, o equilíbrio entre

seletividade e permeabilidade destas membranas de UF.

Kanani e Ghosh (2006), realizaram um experimento com albumina de soro humano com membranas com tamanho de poro 30 kDa de polietersulfona (PES). Com isso puderam prever o declínio do fluxo do permeado sobre pressão constante e também explicar a inter-relação entre o fluxo, polarização e *fouling* da membrana. Esse último se mostrou o principal fator para queda do fluxo de permeado para a faixa de pressão transmembrana utilizada. Os efeitos da pressão osmótica mostraram-se significantes somente na parte inicial do processo de ultrafiltração onde a pressão permanece constante.

Balakrishnan et al. (1993), estudaram a transferência de diversas proteínas através de membranas hidrofílicas em um sistema de filtros com escoamento de fluxo rotativo. O objetivo desse trabalho era estender a transferência de proteínas de baixo peso molecular (< 20 kDa) através de membranas de UF. Mais especificamente, a transferência de proteínas como uma função da pressão transmembrana (TMP), a rotação da membrana e a massa molecular de corte também foram estudados. As membranas utilizadas foram com MWCO de 10 a 100 kDa. São membranas anisotrópicas de poliácridonitrila hidrofílica com um suporte de tecido de polipropileno.

Xiao et al. (2013), investigaram as características do *fouling* em membranas de UF utilizando como soluto, ácido húmico, soro de albumina bovina, e alginato de sódio. O objetivo foi revelar os fatores chave que governam o comportamento de *fouling* com uma combinação de substratos. Ênfase foi dada em encontrar a relação entre resistência ao *fouling* e as propriedades das soluções. A distribuição da massa molecular da solução e as interações eletrostáticas entre substratos no *fouling* e, substratos no *fouling* e membranas foram utilizados para explicar o comportamento do *fouling*.

Hamza et al. (1997), desenvolveram membranas de ultrafiltração de polietersulfona modificadas utilizando modificações nas macromoléculas da superfície. As membranas de ultrafiltração foram preparadas utilizando técnicas de inversão de fases. As performances das membranas modificadas e não modificadas foram controladas e subsequente avaliadas com tratamento através de emulsões óleo/água e também com água pura. A performance da membrana é caracterizada em termos de taxa de permeação da água pura (PWP), taxa de produto quando óleo/água são utilizados como alimentação (PR), assim como a separação do óleo. O modelo resistente é utilizado para quantificar o efeito das modificações das moléculas da superfície na camada de gel nas membranas que foram avaliadas. A incorporação de macromoléculas de superfície modificada em filmes de polietersulfona resultam em produção de filmes de superfície mais

hidrofóbicos. Isso refletiu no aumento do valor do ângulo de contato da associação. O recuo do ângulo de contato medido sugere que o caráter hidrofóbico foi ainda mantido depois da exposição dos filmes à água.

Mimoune e Amrani (2007), testaram a adequação de uma membrana de ultrafiltração orgânica hidrofóbica em polietersulfona para remover íons cúprico de soluções aquosas utilizando álcool polivinílico (PVA) como agente complexante macromolecular. É digno de nota que o PVA forma um complexo estável com íons cúprico e o equilíbrio na formação do complexo PVA e íons cúprico em água é obtido em somente 5 minutos. A natureza hidrofóbica das membranas de polietersulfona fazem com que sejam suscetíveis ao *fouling*. Todavia, membranas de polietersulfonas tem excelente estabilidade química, mecânica e térmica. Além do mais, o uso de membranas hidrofóbicas como as de polietersulfona são mais apropriadas do que as hidrofílicas para recuperação de PVA por ultrafiltração. Os autores estudaram ainda a modificação da superfície da membrana assim que é posta em contato com a primeira solução ultrafiltrada de álcool polivinílico. Este comportamento pode ser explicado pela adsorção macromolecular que ocorre rapidamente e uniformemente em toda a superfície sólida em contato com a solução aquosa de polímero hidrofílico e pelo modo de adsorção do polímero.

O estudo mostrou o comportamento hidrodinâmico de membranas orgânicas de ultrafiltração utilizadas na concentração de soluções aquosas de complexos macromoleculares de íons cúpricos e a adaptação para aplicação específica. Mostrou que a superfície das membranas são modificadas logo que são postas em contato com qualquer solução macromolecular e que o fluxo através da membrana modificada pode ser melhorado através da limpeza com cloro. Em seguida demonstrou a concentração relativa das espécies em solução, o pH e a força iônica do meio como influência do fluxo através da membrana quando solução cúprica do macrocomplexo são ultrafiltrados. O fluxo é assim aprimorado quando o pH de formação do complexo é alcançado. O efeito contrário se observa pelo aumento da força iônica do meio que agem em favor da redução da viscosidade do meio mas também em favor do aumento do fenômeno de formação da camada de polarização por concentração. Finalmente mostrou que o macrocomplexo cúprico é mais efetivamente concentrado quando o pH de formação é alcançado e que é possível encontrar as melhores condições de operação sem afetar a taxa de rejeição por uma judiciosa escolha da pressão aplicada e da relativa concentração das espécies em solução. (MIMOUNE; AMRANI, 2007)

Pellegrin et al. (2013), realizaram experimentos específicos e caracterizações foram projetadas e utilizados para ir além no entendimento do mecanismo molecular da degradação induzida pelo hipoclorito nas membranas de fibra oca PES/PVP. Conhecendo que na maioria dos casos a deterioração das propriedades macroscópicas dos polímeros são resultados de modificações de suas estruturas químicas, o objetivo desse trabalho foi estudar e elucidar o mecanismo de degradação das fibras a nível molecular e correlacionar essas modificações com as propriedades macroscópicas.

Os comportamentos do fluxo e da retenção da solução diluída de poliestireno em acetato de etila utilizando membranas poliimidadas foram descritos. Atenção especial foi dada a indução do fluxo por deformação das cadeias do polímero que são flexíveis durante os mecanismos de retenção. (BEERLAGE et al., 1996)

Peter-Varbanets et al. (2010), investigaram o comportamento do *fouling* diretamente na ultrafiltração *dead end* com água de superfície sem tratamento sobre condições de ultra-baixa pressão (40-110 mbar) O foco na estrutura da camada de *fouling* e os impactos na resistência hidráulica da camada de *fouling* durante longos períodos de operação. A atividade biológica na camada e sua influência sobre essa camada também foram estudadas.

O uso de membranas de UF de fibras ocas está se tornando um método altamente popular para produção de água potável. Com o intuito de evitar entupimento e contaminação bacteriana, são necessárias implantação de lavagens para limpar as membranas. Tais limpezas podem ser alcançadas por contracorrente e por procedimentos de limpeza química utilizando ácido hidrocloreto, hidróxido de sódio, e oxidantes como peróxido de hidrogênio ou hipoclorito de sódio. Este é de longe o mais comumente reagente de limpeza utilizado. Todavia, as grandes instalações para tratamento de água parecem ser sujeitas as falhas na membrana e perda da integridade de forma bastante regular o que conduz, em alguns casos, frequência de falhas tão elevadas como uma ruptura de fibras ocas por módulo ao ano. O pH da solução de hipoclorito de sódio é de crucial importância em relação a eficiência de limpeza e do fenômeno de degradação da membrana e deve ser precisamente investigado. Comumente, membranas de polietersulfonas (PES) são modificadas com aditivos poliméricos tais como poli (N-vinil pirrolidona) (PVP) de modo a aumentar a hidrofiliabilidade e ajustar a estrutura porosa da membrana. O hipoclorito de sódio tem forte impacto sobre o aditivo PVP levando ao aumento da permeabilidade da membrana a água pura. PES são comumente consideradas como um polímero de alta resistência a oxidantes e tolerante a uma ampla faixa de pH (de 2 a 12). Todavia, há alguns impactos concernentes a adição de solução de

hipoclorito de sódio as membranas PES, pois provocam cisão nas cadeias éter-sulfônicas (PELLEGRIN et al., 2013).

Niemistö et al. (2013), analisaram a viabilidade da desidratação do etanol para utilização como combustível em veículos automotores com a utilização de membranas, por filtração com carbono ativado e evaporadores equipados com membranas de PVA – álcool polivinílico com ligações hidrofílicas cruzadas.

A Ultrafiltração com membranas cerâmicas para tratamento de efluentes analisando poros, pressão transmembrana e concentração da alimentação foi estudada com simulação de resíduos de indústria têxtil. Com isso, observou que maiores diâmetros de poros possibilitam a maior absorção de solutos provocando o declínio do fluxo por um maior entupimento da membrana, *fouling*, assim como o aumento da concentração da alimentação. No entanto, a eficiência de separação foi de 98,5%. Essa eficiência foi atribuída à dinâmica estabelecida na membrana pela camada de torta, que governou a performance do processo em termos de rejeição e seletividade (ZURIAGA-AGUSTÍ et al., 2014).

Um ensaio teórico da utilização de ultrafiltração, realizado por Khosa et al. (2014), para remoção de íons de metais pesados ( $Pb^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$ ) de soluções aquosas utilizando biopolímeros de sericina foi estudado observando que pH básico auxilia na taxa de remoção.

Nogueira e Venturini filho (2007), utilizaram a UF para clarificar o caldo de cana-de-açúcar em membranas cerâmicas com a finalidade de remover sua turbidez e cor com taxas de remoção respectivamente de 99,99% e 98,57%.

As aplicações da UF por escoamento tangencial é emergente, tendo em vista a gama de aplicação. Se outrora o custo destas membranas inviabilizava sua aplicação, hoje com o crescente número de empresas que confeccionam membranas de material polimérico e cerâmico este fator já não é limitante. Efetivamente a limitação está no projeto, instalação e operação dos sistemas. Particularmente no que se refere a projeto, é notório destacar, a necessidade de se definir valores de área instalada dos filtros bem como pressões de operação, que permitam uma eficiente operação do processo.

## CONCLUSÕES

A ultrafiltração é um processo de separação com ampla utilização na indústria, tendo potencial para redução do custo da produção. Por isso, caracteriza-se como um importante objeto de estudo para inovações tecnológicas. Tem sido extensivamente analisada para determinar o fluxo transmembrana, para proposição de modelos matemáticos para definir as equações inerentes ao processo, para identificar e desenvolver

metodologias que amenizem os fatores que influenciam no fluxo como *fouling* e polarização da membrana. Também para caracterizar a força e as fragilidades de várias composições, formas e construção de membranas.

## REFERÊNCIAS

ACERO, J. L. et al. Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse. **Journal of Hazardous Materials**. Badajoz, p. 390-398. 16 dez. 2009.

ACERO, J. L. et al. Retention of emerging micropollutants from UP water and a municipal secondary effluent by ultrafiltration and nanofiltration. **Chemical Engineering Journal**. Badajoz, p. 264-272. 24 jul. 2010.

AHMAD, A. L. et al. Crossflow microfiltration of microalgae biomass for biofuel production. **Desalination**. Pulau Pinang, p. 65-70. 24 jul. 2012.

ALVENTOSA-DELARA, E. et al. Study and optimization of the ultrasound-enhanced cleaning of an ultrafiltration ceramic membrane through a combined experimental-statistical approach. **Ultrasonics Sonochemistry**. Valencia, p. 1222-1234. 04 nov. 2013.

ARAÚJO, F. A. Dantas de. Processo de clarificação do caldo de cana pelo método da bicarbonatação. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, dez. 2007.

ARMOA, M. H.; JAFELICCI JUNIOR, M.. Princípios e aplicações de processos de separação por membranas inorgânicas. **Ciência & Tecnologia**. Jaboticabal, p. 80-97. jan. 2011.

ARUNKUMAR, A.; ETZEL, M. R.. Fractionation of lactalbumin from b-lactoglobulin using positively charged tangential flow ultrafiltration membranes. **Separation and Purification Technology**. Madison, p. 121-128. 27 dez. 2012.

BABEL, S.; TAKIZAWA, S.. Microfiltration membrane fouling and cake behavior during algal filtration. **Desalination**. Tokyo, p. 46-51. 25 jun. 2010.

BALAKRISHNAN, M.; AGARWAL, G. P.; COONEY, C. L.. Study of protein transmission through ultrafiltration membranes. **Journal of Membrane Science**. New Delhi, p. 111-128. 16 jun. 1993.

BEERLAGE, M. A. M. et al. Non-aqueous retention measurements: ultrafiltration behaviour of polystyrene solutions and colloidal silver particles. **Journal of Membrane Science**. Twente, p. 259-273. 03 abr. 1996.

BENÍTEZ, F. J. et al. Elimination of organic matter present in wastewaters from the cork industry by membrane filtration. **Journal Of Chemical Technology and Biotechnology**. Badajoz, p. 309-316. 11 dez. 2007.

BENITEZ, F. J. et al. Removal of phenyl-urea herbicides in ultrapure water by ultrafiltration and nanofiltration

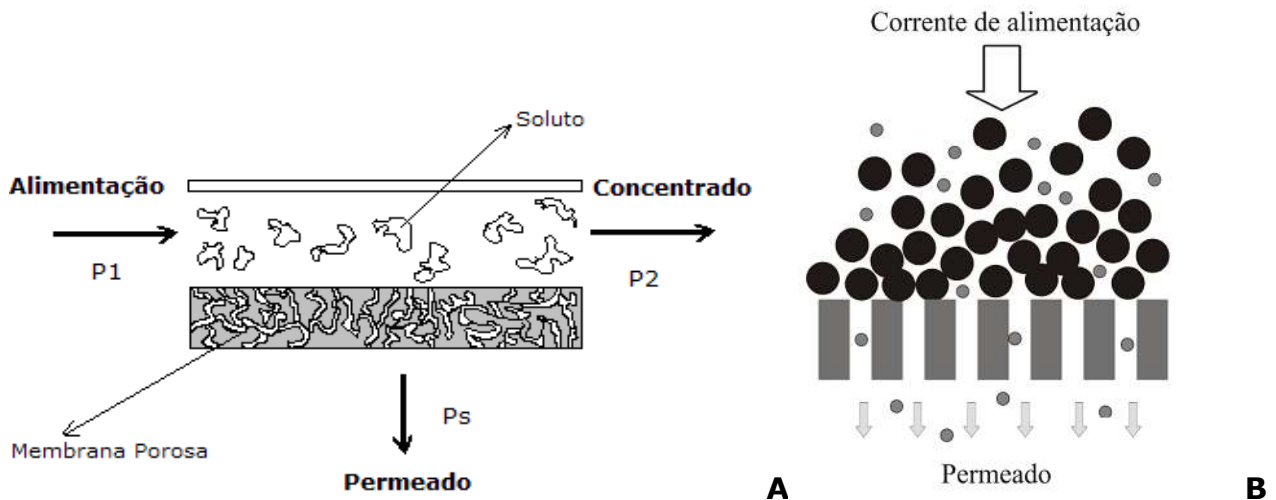
- processes. **Water Research**. Badajoz, p. 267-276. 08 out. 2008.
- CASEY, C. et al. Protein concentration with single-pass tangential flow filtration (SPTFF). **Journal of Membrane Science**. Northborough, p. 82-88. 10 set. 2011.
- CHAKRABORTY, S. et al. Experimental analysis, modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solutions by polymer-enhanced ultrafiltration. **Journal Of Membrane Science**. Rende, p. 139-154. 21 jan. 2014.
- CHERKASOV, A. N.; TSAREVA, S. V.; POLOTSKY, A. E.. Selective properties of ultrafiltration membranes from the standpoint of concentration polarization and adsorption phenomena. **Journal of Membrane Science**. St. Petersburg, p. 157-164. 31 jan. 1995.
- DECLoux, M.; TATOUD, L. Importance of the control mode in ultrafiltration: case of raw cane sugar remelt. **Journal of Food Engineering**. Massy Cedex, p. 119-126. 06 dez. 1999.
- DERISZADEH, A.; HUSEIN, M. M.; HARDING, T. G.. Produced water treatment by micellar-enhanced ultrafiltration. **Environmental Science & Technology**. Calgary, p. 1767-1772. 20 jan. 2010.
- DIZON-MASPAT, Jemelle et al. Single Pass Tangential Flow Filtration to Debottleneck Downstream Processing for Therapeutic Antibody Production. **Biotechnology and Bioengineering**. Oceanside, p. 962-970. 17 nov. 2011.
- FACCIOTTI, M. et al. Deposition of thin ultrafiltration membranes on commercial SiC microfiltration tubes. **Ceramics International**. Aalborg, p. 3277-3285. 01 out. 2013.
- FERRER, Y. et al. Study of filter cake formation mechanisms during tangential filtration of dust-laden gases at high temperature. **Powder Technology**. Le Bourget Du Lac Cedex, p. 197-204. 07 jul. 2000.
- FRAPPART, Matthieu et al. Influence of hydrodynamics in tangential and dynamic ultrafiltration systems for microalgae separation. **Desalination**. Nantes, p. 279-283. 15 set. 2010.
- GARCÍA-MARTÍN, Noemi et al. Sugar reduction in musts with nanofiltration membranes to obtain low alcohol-content wines. **Separation and Purification Technology**. Valladolid, p. 158-170. 06 out. 2010.
- GARCÍA-OTERO, N. et al. Evaluation of tangentialflow ultrafiltration procedures to assess trace metals bound to marine dissolved organic matter. **Microchemical Journal**. Santiago de Compostela, p. 501-509. 18 jun. 2013.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles**: includes unit operations. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2012.
- GOLUNSKI, S. et al. Ethanol precipitation and ultrafiltration of inulinases from *Kluyveromyces marxianus*. **Separation and Purification Technology**. Erechim, p. 261-265. 17 fev. 2011.
- GOMES, M. C. S. et al. Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membranes. **Journal of Membrane Science**. Paraná, p. 271-276. 13 fev. 2010.
- GOVEIA, D. et al. Approach combining on-line metal exchange and tangential-flow ultrafiltration for in-situ characterization of metal species in humic hydrocolloids. **Analytical & Bioanalytical Chemistry**. Sorocaba, p. 851-860. 12 mar. 2010.
- GUO, Y. et al. Purification of anatis herpesvirus 1 particles by tangential-flow ultrafiltration and sucrose gradient ultracentrifugation. **Journal of Virological Methods**. Yaan, p. 1-6. 17 jan. 2009.
- GYURA; SERES, Z.; ESZTERLE, M. Influence of operation parameters on separation of green syrup colored matter from sugar beet by ultra and nanofiltration. **Journal of Food Engineering**. Novi Sad, p. 89-96. 24 fev. 2004.
- HEMAVATHI, A. B.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.. Membrane Processing for Purification and Concentration of  $\beta$ -glycosidases from Barley (*Hordeum vulgare*). **Biotechnology and Bioprocess Engineering**. Mysore, p. 282-290. 28 out. 2010.
- HAMZA et al. Development of membranes with low surface energy to reduce the fouling in ultrafiltration applications. **Journal of Membrane Science**. Ottawa, p. 217-227. 11 fev. 1997.
- HENDRIX, K. et al. Synthesis of modified poly(ether ether ketone) polymer for the preparation of ultrafiltration and nanofiltration membranes via phase inversion. **Journal of Membrane Science**. Heverlee, p. 96-106. 17 jul. 2013.
- HENGL, N. et al. A new way to apply ultrasound in cross-flow ultrafiltration: Application to colloidal suspensions. **Ultrasonics Sonochemistry**. Grenoble, p. 1018-1025. 21 nov. 2013.
- HINKOVA, A. et al. Mineral membrane filtration in refinement of starch hydrolysates. **Journal of Food Engineering**. Prague, p. 521-526. 01 ago. 2002a.
- HINKOVA, A. et al. Potentials of separation membranes in the sugar industry. **Separation and Purification Technology**. Prague, p. 101-110. jan. 2002b.
- HOLLAND, B.; KACKMAR, J.; CORREDIG, M.. Short communication: Isolation of a whey fraction rich in  $\alpha$ -lactalbumin from skim milk using tangential flow ultrafiltration. **Journal of Dairy Science**. Ontario, p. 5604-5607. 20 maio 2012.
- JANSEN, J. C. et al. Influence of the blend composition on the properties and separation performance of novel solvent resistant polyphenylsulfone/polyimide nanofiltration membranes. **Journal of Membrane Science**. Leuven, p. 107-118. 16 jul. 2013.

- KANANI, D. M.; GHOSH, R. A constant flux based mathematical model for predicting permeate flux decline in constant pressure protein ultrafiltration. **Journal of Membrane Science**, Hamilton, p. 207-215. 30 dez. 2006.
- KASTER, B. **Efeitos das condições operacionais na microfiltração do suco de maçã**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- KHAYAT, C. et al. Evaluation of physico-chemical interactions in cross-flow filtration in the particular case of mineral membranes and sugar remelts. **Journal of Membrane Science**. Massy Cedex, p. 219-230. 12 ago. 1997.
- KHOSA, M. A.; SHAH, S. S.; FENG, X.. Metal sericin complexation and ultrafiltration of heavy metals from aqueous solution. **Chemical Engineering Journal**. Alberta, p. 446-456. 06 fev. 2014.
- KIM, Do-hyeong et al. Development of thin anion-exchange pore-filled membranes for high diffusion dialysis performance. **Journal of Membrane Science**. Dongnam-gu, p. 80-86. 16 jul. 2013.
- KIM, K. J. et al. Fouling mechanisms of membranes during protein ultrafiltration. **Journal of Membrane Science**. Kensington, p. 79-91. 15 nov. 1991.
- LAWLER, W. et al. Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes. **Journal of Membrane Science**, Sydney, p. 203-211. 12 jul. 2013.
- LI, H. Pilot-scale isolation of bioactive extracellular polymeric substances from cell-free media of mass microalgal cultures using tangential-flow ultrafiltration. **Process Biochemistry**. Wuhan, p. 1104-1109. 26 jan. 2011.
- LINARES, R. V. et al. Water harvesting from municipal wastewater via osmotic gradient: An evaluation of process performance. **Journal of Membrane Science**. Jeddah, p. 50-56. 17 jul. 2013.
- LIU, P. et al. Hollow-fiber ultrafiltration for simultaneous recovery of viruses, bacteria and parasites from reclaimed water. **Journal of Microbiological Methods**. Atlanta, p. 155-161. 12 nov. 2011.
- LLANOS, J. et al. Water-soluble polymer ultrafiltration process at pilot scale:: Study of hydrodynamics and factors limiting flux. **Journal of Membrane Science**. Ciudad Real, p. 37-45. 27 maio 2009.
- LOGINOV, M. et al. Comparison of dead-end ultrafiltration behaviour and filtrate quality of sugar beet juices obtained by conventional and "cold" PEF-assisted diffusion. **Journal of Membrane Science**. Campiègne Cedex, p. 273-283. 13 maio 2011.
- MA, B. et al. Effect of low dosage of coagulant on the ultrafiltration membrane performance in feedwater treatment. **Water Research**. Beijing, p. 277-283. 07 nov. 2013.
- MACCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. New York: Mcgraw-hill's, 2005.
- MAJOULI, A. et al. Elaboration of new tubular ceramic membrane from local Moroccan Perlite for microfiltration process. Application to treatment of industrial wastewaters. **Ceramics International**. Mohammedia, p. 4295-4303. 10 fev. 2012.
- MASSÉ, A. et al. Dead-end and tangential ultrafiltration of natural salted water: Influence of operating parameters on specific energy consumption. **Journal of Membrane Science**. Saint-nazaire Cédex, p. 192-198. 07 jul. 2011.
- MEHTA, A.; ZYDNEY, A. L.. Permeability and selectivity analysis for ultrafiltration membranes. **Journal of Membrane Science**. Park, p. 245-249. 23 nov. 2004.
- MICHALSKY, R. et al. Purification of the baculovirus *Autographa californica* nucleopolyhedrovirus by tangential flow ultrafiltration. **Desalination**. Kansas, p. 694-700. 09 fev. 2009.
- MIMOUNE, S.; AMRANI, F. Experimental study of metal ions removal from aqueous solutions by complexation-ultrafiltration. **Journal of Membrane Science**. Algiers, p. 92-98. 07 abr. 2007.
- MLAIK, N. et al. Combined biological processing and microfiltration in the treatment of unhairing wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**. Sfax, p. 226-234. 02 jul. 2011.
- MOHANTY, K.; GHOSH, R. Novel tangential-flow countercurrent cascade ultrafiltration configuration for continuous purification of humanized monoclonal antibody. **Journal of Membrane Science**. Hamilton, p. 117-125. 15 set. 2007.
- NAMVAR, A. et al. Extraction of *Bacillus* endospores from water, apple juice concentrate, raw milk and lettuce rinse solutions using tangential flow filtration. **Food Control**. Alberta, p. 632-637. 15 jan. 2013.
- NENE, S. et al. Membrane distillation for the concentration of raw cane-sugar syrup and membrane clarified sugarcane juice. **Desalination**. Pune, p. 157-160. 2 abr. 2002.
- NIEMISTÖ, J. et al. Pilot study of bioethanol dehydration with polyvinyl alcohol membranes. **Journal of Membrane Science**. Oulu, p. 119-127. 16 jul. 2013.
- NOGUEIRA, A. M. P.; VENTURINI FILHO, W. G. Clarificação de caldo de cana por Micro e Ultrafiltração: Comprovação de viabilidade técnica em experimentos preliminares. **Brazilian Journal of Food Technology**. Botucatu, p. 57-62. 29 mar. 2007.
- PALENCIA, M.; RIVAS, B. L.; VALLE, H. Size separation of silver nanoparticles by dead-end ultrafiltration: Description of fouling mechanism by pore blocking

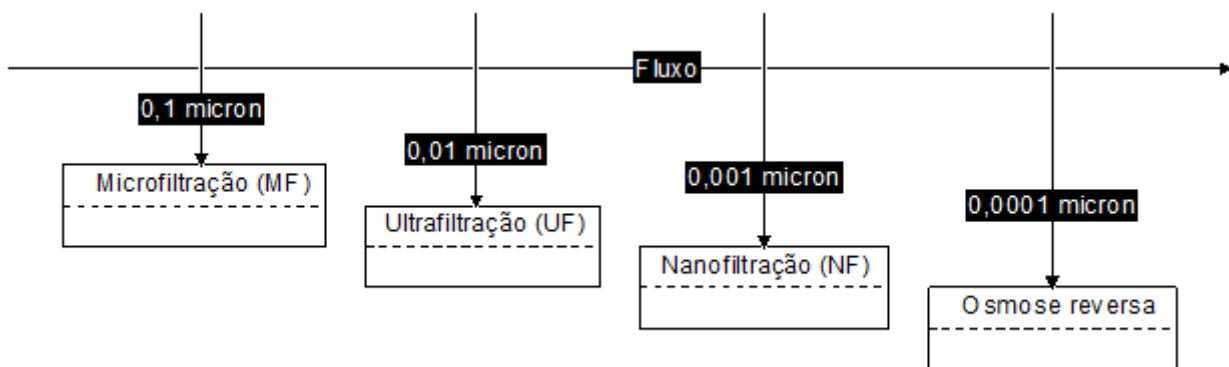
- model. **Journal of Membrane Science**. Concepción, p. 7-14. 27 dez. 2013.
- PAULSON, D.J.; WILSON, R.L.; SPATZ, D.D. Crossflow membrane technology and its applications. **Food Technology**, v.12, p.77-87, 1984.
- PELLEGRIN, B. et al. Multi-scale analysis of hypochlorite induce PES/PVP ultrafiltration membranes degradation. **Journal of Membrane Science**. Toulouse, p. 287-296. 18 jul. 2013.
- PETER-VARBANETS, M. et al. Stabilization of flux during dead-end ultra-low pressure ultrafiltration. **Water Research**. Dübendorf, p. 3607-3616. 24 abr. 2010.
- POLYAKOV, Y. S.; ZYDNEY, A. L.. Ultrafiltration membrane performance: Effects of pore blockage/constriction. **Journal of Membrane Science**, Ashland, p. 106-120. 05 fev. 2013.
- POWELL, M. J.; TIMPERMAN, A. T. Quantitative analysis of protein recovery from dilute, large volume samples by tangential flow ultrafiltration. **Journal of Membrane Science**. Morgantown, p. 227-236. 09 fev. 2005.
- PRATI, P.; MORETTI, R. H. Study of clarification process of sugar cane juice for consumption. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, p. 776-783. 25 set. 2009.
- RAKIB, S. et al. New porous ceramics for tangential filtration. **Separation and Purification Technology**. Montpellier, p. 385-390. jan. 2001.
- RATHORE, A. S.; SHIRKE, A. Recent developments in membrane-based separations in biotechnology processes: review. **Preparative Biochemistry & Biotechnology**. New Delhi, p. 398-421. jan. 2011.
- ROSENBERG, E. et al. Ultrafiltration concentration of monoclonal antibody solutions: Development of an optimized method minimizing aggregation. **Journal of Membrane Science**. Penzberg, p. 50-59. 21 jun. 2009.
- ROSSI, N. et al. Arthrospira platensis harvesting with membranes: Fouling phenomenon with limiting and critical flux. **Bioresource Technology**. Nantes, p. 6162-6167. 22 jan. 2008.
- SAEKI, D. et al. Stabilization of layer-by-layer assembled nanofiltration membranes by crosslinking via amide bond formation and siloxane bond formation. **Journal of Membrane Science**. Kobe, p. 128-133. 16 jul. 2013.
- SAIDI, S. et al. Fractionation of a tuna dark muscle hydrolysate by a two-step membrane process. **Separation and Purification Technology**. Montpellier, p. 28-36. 09 fev. 2013.
- SANTOS, L. R. B. et al. Influence of membrane-solution interface on the selectivity of SnO<sub>2</sub> ultrafiltration membranes. **Separation and Purification Technology**. Araraquara, p. 17-22. jan. 2001.
- SAURA, D. et al. Separation of aromatics compounds during the clarification of lemon juice by cross-flow filtration. **Industrial Crops and Products**. Alicante, p. 543-548. 14 dez. 2011.
- SAXENA, A. et al. Membrane-based techniques for the separation and purification of proteins: An overview. **Advances In Colloid And Interface Science**. Gujarat, p. 1-22. 05 ago. 2008.
- STRIEMER, C. C. et al. Charge and size based separation of macromolecules using ultrathin silicon membranes. **Nature**. Rochester, p. 749-753. 15 fev. 2007.
- TONELLO, P. S. et al. Use of diffusive gradients in thin films and tangential flow ultrafiltration for fractionation of Al(III) and Cu(II) in organic-rich river waters. **Analytica Chimica Acta**. Rio Claro, p. 162-168. 26 jul. 2007.
- TREFRY, J. C. et al. Size selection and concentration of silver nanoparticles by tangential flow ultrafiltration for SERS-based biosensors. **Journal of American Chemical Society**. Dayton, p. 10970-10972. 26 jul. 2010.
- TRES, M. V. et al. Separation of n-butane from soybean oil mixtures using membrane processes. **Journal of Membrane Science**. Erechim, p. 141-146. 20 fev. 2009.
- TRES, M. V. et al. Characterization of polymeric membranes used in vegetable oil/organic solvents separation. **Journal of Membrane Science**. Erechim, p. 495-500. 13 jul. 2010.
- VELA, M. C. V. et al. Crossflow ultrafiltration of cake forming solutes: a non-steady state model. **Desalination**. Valencia, p. 347-356. 10 mar. 2005.
- VON MEIEN, O. F.; NOBREGA, R.. Ultrafiltration model for partial solute rejection in the limiting flux region. **Journal of Membrane Science**. Rio de Janeiro, p. 277-287. 06 jun. 1994.
- WANG, Q.; SAMITSU, S.; ICHINOSE, I. Ultrafiltration membranes composed of highly cross-linked cationic polymer gel: the network structure and superior separation performance. **Advanced Materials**. Tsukuba, p. 2004-2008. jan. 2011.
- WICKRAMASINGHE, S. R. et al. Understanding virus filtration membrane performance. **Journal of Membrane Science**. Fort Collins, p. 160-169. 15 set. 2010.
- XIAO, F. et al. Identification of key factors affecting the organic fouling on low-pressure ultrafiltration membranes. **Journal of Membrane Science**, Beijing, p. 144-152. 20 jul. 2013.
- YU, W. et al. Investigation of pre-coagulation and powder activate carbon adsorption on ultrafiltration membrane fouling. **Journal of Membrane Science**. Beijing, p. 157-168. 11 fev. 2014.
- ZURIAGA-AGUSTÍ, E. et al. Performance of ceramic ultrafiltration membranes and fouling behavior of a dye-polysaccharide binary system. **Water Research**. Valencia, p. 199-210. 07 fev. 2014.

ZYDNEY, A. L.. Membrane Technology for Purification of Therapeutic Proteins. **Biotechnology and Bioengineering**. Park, p. 227-230. 23 fev. 2009.

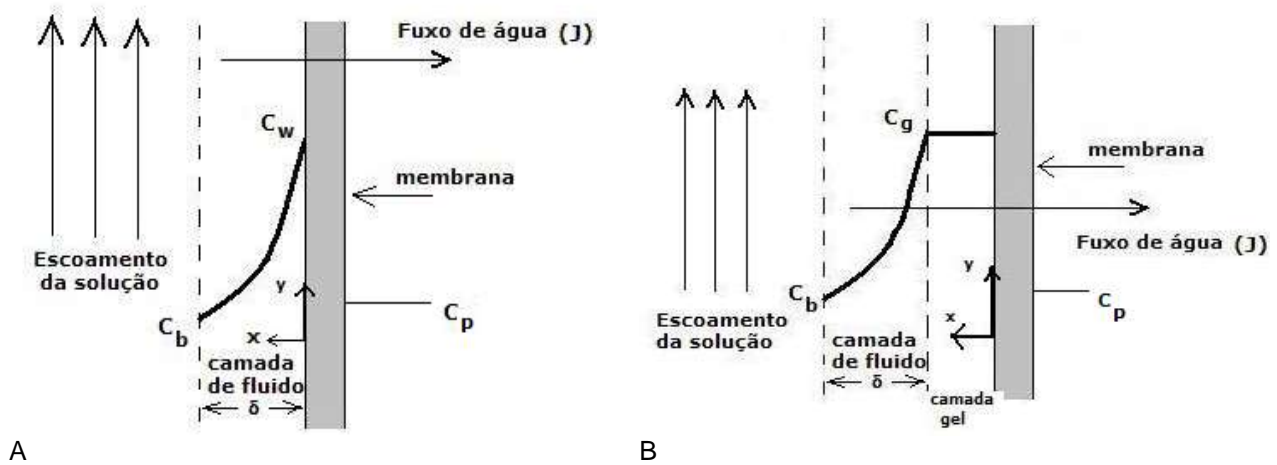




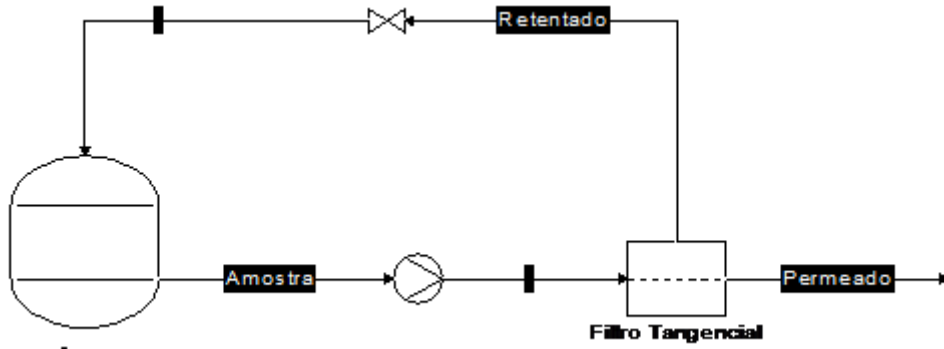
**Figura 1** - Métodos de filtração: fluxo tangencial (A); fluxo normal ou *dead end* (B).  
**Fonte:** Adaptado (KASTER, 2009; SAXENA et al., 2008).



**Figura 2:** Classificação da filtração tangencial.  
**Fonte:** Adaptado (SAXENA et al., 2008).



**Figura 3** – Esquema de polarização macromolecular (A) e polarização em gel (B) na superfície de uma membrana de ultrafiltração.  
**Fonte** – Adaptado (MACCABE et al., 2005; GEANKOPLIS, 2003)



**Tanque Armazenagem**

Figura 4: Esquema da filtração tangencial.

Fonte: Dos Autores, 2014.