

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO DO SORO DO LEITE POR ULTRAFILTRAÇÃO, UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Data de aceite: 02/05/2023

Vinicius Holz Boemeke

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Câmpus Pelotas, Discente, Bacharelado em Engenharia Química Canguçu – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/3790811250020512>

Régis da Silva Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Câmpus Pelotas, Docente Orientador, Bacharelado em Engenharia Química Rio Grande – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/5446349260364884>

RESUMO: O soro de leite é um subproduto da fabricação de queijo, necessitando de tratamento para ser descartado. Na forma líquida, pode ser utilizado para fabricação de queijos frescos, bebida láctea e ração animal. Na forma de pó, suas aplicações aumentam, podendo ser usado como substituto do leite em pó em diversos produtos alimentares. A concentração do soro pode ser realizada através da ultrafiltração. Apesar das vantagens, este processo pode ser limitado pela polarização por concentração e pelo fouling. Desta

forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da concentração do soro do leite por ultrafiltração, em função da concentração da alimentação, temperatura, pressão e resistência da membrana, utilizando simulação computacional. A eficiência do processo de ultrafiltração do soro do leite em diferentes condições foi avaliada através dos valores de fluxo de permeado. Os resultados mostram que valores mais elevados de pressão aumentam o fluxo de permeado, enquanto pressões muito baixas podem levar o sistema ao equilíbrio antes do tempo sugerido para um ciclo de operação. Já a resistência característica da membrana pode levar aos maiores fluxos de permeado quando forem utilizadas membranas de alta permeabilidade. A elevação da temperatura de operação aumenta a quantidade de permeado, mas valores excessivos não são recomendados por causarem degradação do produto. O fluxo de permeado diminui com o aumento da concentração de alimentação, tornando o processo dependente das características do leite utilizado como matéria-prima e do processo de fabricação de queijo do qual o soro é obtido.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxo de permeado; frente de equilíbrio; fouling; Scilab.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE WHEY CONCENTRATION PROCESS BY ULTRAFILTRATION USING COMPUTER SIMULATION

ABSTRACT: Whey is a byproduct of cheese making, requiring treatment to be disposed. When is liquid, it can be used for the manufacture of fresh cheese, milk drink and animal feed. In powder form, its applications increase and can be used as a substitute for milk powder in various food products. The whey concentration can be performed by ultrafiltration. However, this process can be limited by concentration polarization and fouling. Thus, the objective of this research is evaluating the influence of whey concentration, membrane resistance, temperature and pressure of ultrafiltration operation, using computer simulation. The efficiency of the whey ultrafiltration process under different conditions was evaluated by permeate flow values. The results show that higher pressure values increase permeate flow, while very low pressures may take the system to equilibrium before the time suggested for an operating cycle. The characteristic membrane resistance can lead to higher permeate fluxes when high permeability membranes are used. Increasing the operating temperature improve the amount of permeate, but excessive values are not recommended as they cause product degradation. The permeate flow decreases with the increasing of initial whey concentration, making the process dependent on the milk characteristics and cheese production.

KEYWORDS: Permeate flow; equilibrium front; fouling; Scilab.

1 | INTRODUÇÃO

O soro de leite é um subproduto da fabricação de queijo, sendo a parte líquida do leite que se separa do coágulo devido a precipitação e remoção da caseína durante as etapas de corte, aquecimento, enformagem e prensagem. Em volume, representa cerca de 90% da matéria-prima utilizada, contendo cerca de 55% dos nutrientes do leite, entre eles lactose, proteínas solúveis, lipídeos e sais minerais (RECH, 2003).

Devido ao baixo valor comercial e dificuldade de armazenamento e conservação, o soro do leite muitas vezes é considerado um efluente. Em alguns casos, é descartado diretamente em rios ou a estação de tratamento não elimina corretamente a matéria orgânica presente. No Brasil, a Resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) exige o tratamento antes do descarte devido sua alta carga orgânica (SILVA et al., 2018).

Uma forma de evitar o descarte e a necessidade de tratamento de efluentes é a reutilização deste subproduto. O soro do leite na forma líquida, não é vantajoso para a indústria devido ao alto custo com transporte e risco de deterioração devido à grande atividade de água. Além disso, a grande quantidade de açúcar presente o torna não recomendável ao consumo humano direto, devido a problemas de intolerância. Sua utilização é limitada a ração animal, bebidas lácteas e ricota (WONG et al., 1999).

A concentração deste soro diminui problemas relacionados ao mesmo, além de que o fracionamento de seus componentes aumenta a possibilidade de aplicações (MILLER et al., 1999). Por não ser higroscópico, o soro pode ser utilizado como veículo de dispersão

em misturas secas como sorvetes, salgados e sobremesas. Se reduzido o teor de lactose, o soro pode ser utilizado em produtos industrializados como molhos, queijos e carnes quando se necessita uma quantidade menor desse açúcar e maior teor proteico. Já o soro desmineralizado pode ser utilizado para sobremesas e produtos de confeitaria, nesse caso o alto teor de lactose serve como fonte de carboidratos (LAGRANGE e DALLAS, 1997).

Apesar da baixa concentração de proteínas, o soro pode ser enriquecido por processos como filtração. Um derivado do soro que possui mais de 25% de proteínas em base seca é denominado concentrado proteico do soro (CPS). Se possuir mais de 90%, é classificado como isolado proteico do soro (IPS) (YADA, 2000). Esses produtos possuem diversas aplicações na indústria devido as propriedades funcionais que apresentam em diferentes concentrações proteicas, podendo substituir o leite em pó em algumas utilizações como produtos cárneos, panificação, biscoitos, sorvetes, bebidas, chocolates, fármacos, rações e suplementação alimentar esportiva e nutricional (NUNES et al., 2018).

O processamento do soro com objetivo de obtenção do produto concentrado pode ser realizado através de processos de separação por membranas, onde o líquido passa por membranas com microporos que permitem a separação de moléculas com alta seletividade, baixo consumo de energia e menor tempo comparado a outros processos. As técnicas mais utilizadas são a microfiltração, nanofiltração, ultrafiltração e osmose reversa (BOSCHI, 2006).

Apesar das vantagens, este processo pode ser limitado pela polarização por concentração, formação de uma camada limite de concentração causada pelo acúmulo de solutos na superfície da membrana. Além disso, pode ter sua eficiência afetada pelo fouling, sendo a adsorção de partículas na superfície ou no interior dos poros da membrana como resultado da utilização de condições operacionais inadequadas (BALDASSO, 2011).

A obtenção de concentrados proteicos é uma forma de valorização do soro do leite, devido as suas aplicações industriais. Tal processo tem sido realizado através da ultrafiltração pois retém completamente as proteínas do soro, eliminando quantidades maiores de lactose e sais minerais. Desta forma, o objetivo deste trabalho é a avaliação da influência das condições operacionais da ultrafiltração para obtenção de produto concentrado do soro de leite, através de simulação computacional.

2 | METODOLOGIA

A modelagem do processo de ultrafiltração utilizada foi proposta por Song e Wang (1997) que trata de forma detalhada a formação do fouling através do conceito de frente de equilíbrio. A fim de avaliar o desempenho da ultrafiltração na concentração do soro do leite, foi analisada a influência das seguintes condições de operação: concentração e fluxo de alimentação do soro de leite, temperatura e pressão de filtração. As simulações foram realizadas utilizando para cada variável três tratamentos diferentes, mantendo as demais

no valor médio.

As condições de operação avaliadas foram: pressões de 1 a 20 atm e temperaturas de 5 e 35°C, segundo a patente proposta por Buhler et al (1977), faixas que compreendem os valores utilizados também por Brião et al (2018). Estes valores de temperatura são indicados para que não ocorra degradação das proteínas devido ao calor. Com relação ao fluxo de alimentação, Buhler et al (1977) sugere entre 8 a 16 L.h⁻¹.m⁻², o que associado as demais condições utilizadas representa resistência da membrana de 2,28x10¹⁰ a 9,12x10¹¹ Pa.s.m⁻¹. A concentração de alimentação pode variar de 0,7 a 1,2%, conforme Baldasso (2011).

Os dados de entrada utilizados para as simulações, além das variáveis em estudo foram aquelas elencadas na Tabela 1. Estas grandezas previamente estabelecidas foram utilizadas para determinar o coeficiente de difusividade, a pressão crítica, a resistência da membrana desobstruída, o coeficiente de bloqueio do poro e a porosidade da torta.

Variável	Símbolo	Valor
Raio da partícula	a_p	6,93 nm
Concentração do gel	c_g	4,5%
Número crítico de filtração	N_{Fc}	0,24
Viscosidade da solução	μ	1,1.10 ⁻³ Pa.s ⁻¹
Taxa de cisalhamento	Y_0	10 ³ s ⁻¹
Comprimento do tubo	L	1 m
Constante de Boltzmann	k	1,38,10 ⁻²³ J/K

Tabela 1: Constantes da simulação

Para cada instante de tempo, foi calculada a localização da frente de equilíbrio e o fluxo médio do processo. A frente de equilíbrio foi avaliada até que essa atingisse o comprimento total da membrana. Já as simulações envolvendo o fluxo médio de equilíbrio foram realizadas até o período de 24 horas, já que são recomendadas limpezas diárias no equipamento, levando a tempos de operação ininterrupta inferiores a um dia. As simulações foram realizadas no software *Scilab*.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados da validação do modelo e da influência e das variáveis de processo de ultrafiltração do soro do leite para obtenção do concentrado proteico.

Validação

A validação do modelo foi verificada através da comparação da simulação do fluxo

volumétrico de permeado na região de não equilíbrio utilizando as condições e dados fornecidos por Song e Wang (1997). Comparando as Figuras 1 e 2, é possível observar que os obteve-se comportamentos semelhantes e diferença entre os resultados foi não significativa, apontando para a adequação do modelo utilizado.

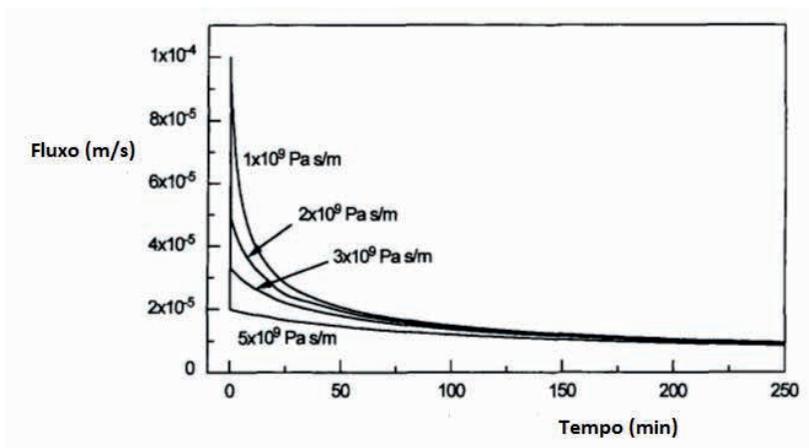


Figura 1: Simulação do fluxo volumétrico de não equilíbrio ao longo do tempo realizada por Song e Wang (1997).

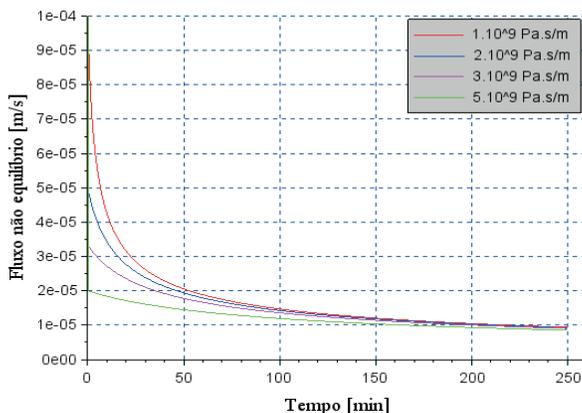


Figura 2: Validação do modelamento utilizado realizada em Scilab.

Efeitos da Pressão

A aplicação de pressões mais elevadas leva a tempos de equilíbrio maiores, já que esta é a força motriz responsável por vencer as resistências impostas pela membrana, pelo bloqueio dos poros e pela camada de torta formada, induzindo o fluxo de permeado, conforme pode ser observado na Figura 3. Este mesmo comportamento pode ser percebido pelos fluxos maiores de permeado ao longo do tempo para a pressão de 20 atm (Figura

4). Entretanto, não se deve aumentar em demasia os valores de pressão, pois um excesso pode causar compactação da torta e favorecer o processo de entupimento (ANADÃO, 2010). Este fenômeno não pode ser verificado através do modelo utilizado porque nele é considerada a incompressibilidade da torta.

Conforme a Figura 3, o sistema atinge o equilíbrio muito rapidamente quando utilizada a pressão mínima. Isso ocorre porque pressões menores provocam um fluxo inicial de permeado menor, mais próximo do valor de fluxo de equilíbrio, que independe da pressão.

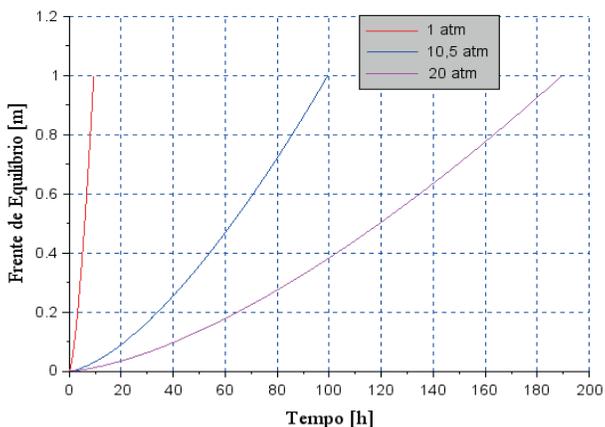


Figura 3: Posição da frente de equilíbrio ao longo do tempo para diferentes pressões.

Na Figura 4, em torno de 24 horas de operação, é possível observar que o sistema está distante do equilíbrio, permitindo a continuidade do processo. Entretanto, são recomendadas limpezas diárias na estrutura da membrana, isto porque se trabalha com derivados do leite que são altamente perecíveis e podem se tornar fonte de contaminação. Além disso, após 24 horas de trabalho na pressão máxima, há redução de cerca de 23,5% no valor do fluxo de permeado.

Ainda é possível observar que, para a menor pressão utilizada, o fluxo atinge o equilíbrio em período inferior a 24 horas, com característica ascendente durante o processo, ao contrário da tendência decrescente das demais simulações. Isso ocorre porque a baixa pressão induz um fluxo muito inferior àquele presente no equilíbrio que, segundo Geankoplis (1998), favorece o fluxo difusivo através da membrana. Sendo este fluxo difusivo, mais elevado que aquele dependente da pressão, o comportamento observado será o acréscimo do fluxo até um ponto de equilíbrio.

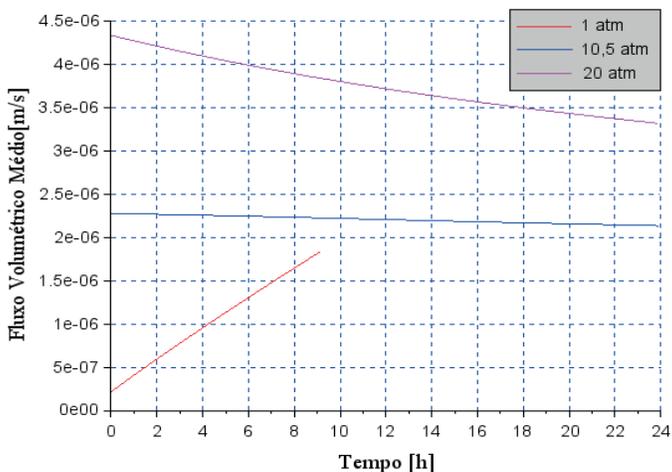


Figura 4: Fluxo volumétrico médio de permeado ao longo do tempo para diferentes pressões.

Efeitos da resistência da membrana

Ao contrário da pressão aplicada no processo, a resistência da membrana é a grandeza que se opõe ao fluxo de permeado. Tendo em vista que esta resistência está associada a características da própria membrana, como porosidade e distribuição simétrica ou assimétrica dos poros, ela não diz respeito às características da torta de material retido formado sobre ela ao longo do processo, logo, não tem influência no avanço da frente de equilíbrio.

Já em relação ao fluxo volumétrico médio, mostrado na Figura 5, menores resistências induzem um fluxo de permeado inicial mais elevado, que demora um tempo maior para atingir valores próximos ao equilíbrio. A resistência da membrana está associada às suas características, como tamanho e disposição dos poros e sua composição. Segundo Anadão (2010), maiores valores de fluxo podem ser atingidos com modificações na estrutura da membrana. Na indústria de laticínios, as membranas mais utilizadas são constituídas de poli(éter-sulfona), devido a características como resistência térmica e a acidez e facilidade de limpeza (LEITE et al., 2006).

Em seu trabalho, Marques (2017) utiliza diferentes concentrações de dopamina, que possui capacidade de polimerizar-se em atmosfera oxidante e interagir com a maioria das superfícies, como proposta de modificação das propriedades anti-incrustantes das membranas. Os resultados mostram que a concentração de dopamina influencia na permeabilidade inicial das membranas, que possuem relação inversa com sua resistência característica.

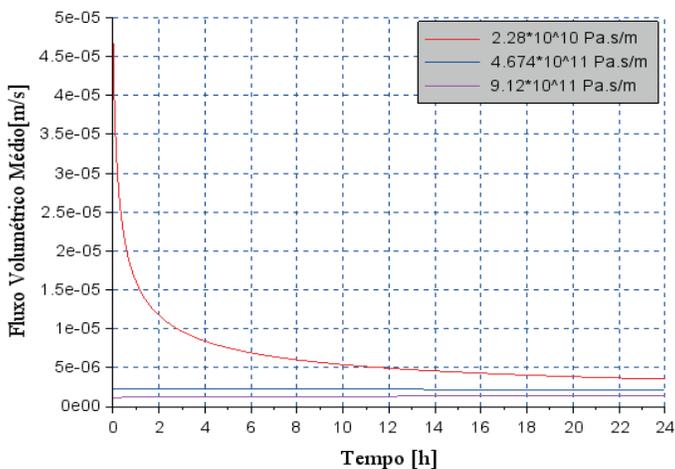


Figura 5: Fluxo volumétrico médio de permeado ao longo do tempo para diferentes resistências de membrana.

Efeitos da temperatura

O aumento da temperatura leva a redução do tempo de equilíbrio (Figura 6). Entretanto, pode-se observar que o equilíbrio é atingido em tempos muito superiores a 24 horas, tempo no qual é observado o equilíbrio apenas nos primeiros 10 cm de membrana e diferenças muito pequenas para as diferentes temperaturas.

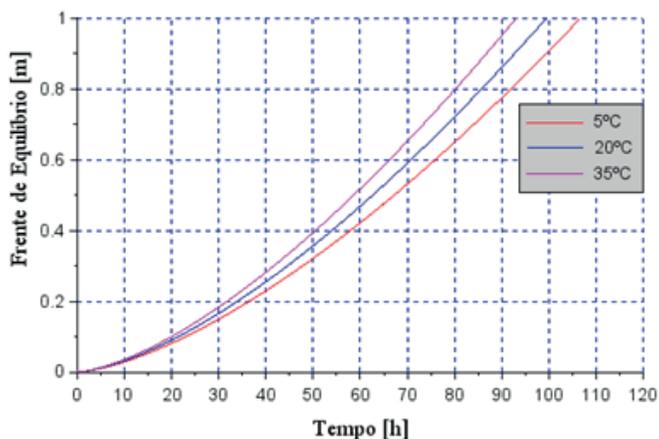


Figura 6: Posição da frente de equilíbrio ao longo do tempo para diferentes temperaturas.

Já o fluxo de equilíbrio é afetado pela temperatura através da difusividade, apresentando valores maiores para temperaturas mais elevadas ao final de 24 horas de operação, conforme Figura 7. O fluxo na temperatura de 35°C é cerca de 1,1% superior em

relação à temperatura de 20°C, o que representa uma vantagem. Na tentativa de explorar esta tendência, foi avaliada a operação a 70 °C, uma vez que esta é a temperatura na qual o soro do leite sai do pasteurizador, com o objetivo de conservar as condições responsáveis pelo controle da qualidade microbiológica do produto (KUIPERS, 1974).

Os resultados mostram um aumento de 2,8% no fluxo em relação a temperatura de 35°C. Entretanto, Buhler et al. (1977) não aconselham condição tão elevada, pois altas temperaturas podem ocasionar a degradação das estruturas proteicas presentes no soro, diminuindo a qualidade do produto obtido.

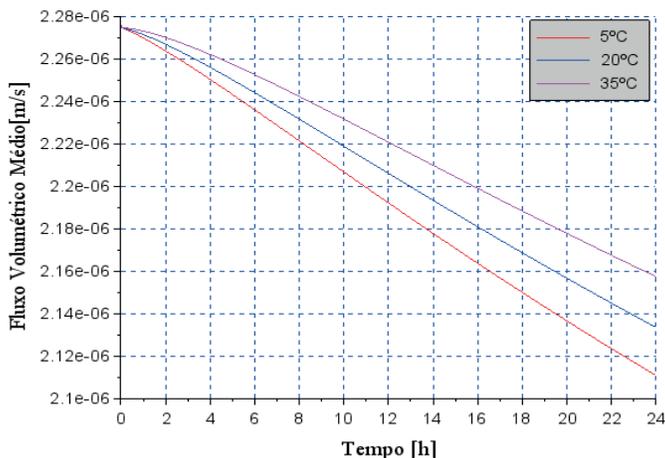


Figura 7: Fluxo volumétrico médio de permeado ao longo do tempo para diferentes temperaturas.

Efeitos da concentração inicial

O aumento da concentração alimentada promove redução do tempo para atingir o equilíbrio, conforme Figura 8. Como esperado, o fluxo de permeado é maior operando em concentrações menores de alimentação (Figura 9). Esta variável não interfere no fluxo inicial, porém modifica o comportamento em relação ao tempo, já que a alta concentração de sólidos influencia na penetração de partículas na estrutura da membrana, provocando o fouling e a formação de torta, gerando resistências adicionais no processo (HOLDICH, 2002).

Assim, espera-se maior eficiência de operação em soros menos concentrados em teor de proteínas. Entre as condições que influenciam esta composição estão a sazonalidade, a raça de bovino do qual foi obtido o leite e o tratamento que esta matéria-prima recebeu, como a pasteurização, homogeneização e o tipo de queijo que foi fabricado a partir dele.

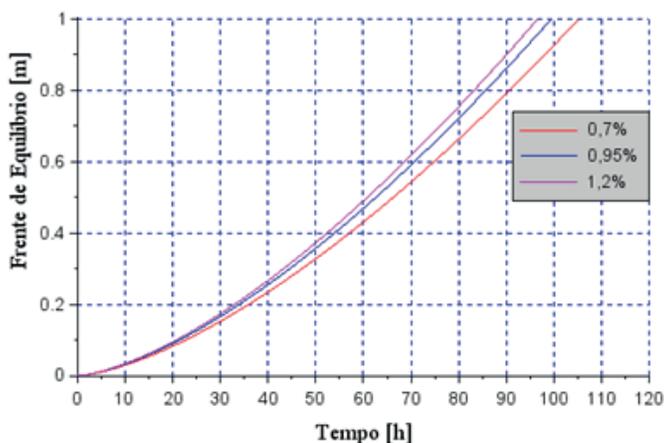


Figura 8: Posição da frente de equilíbrio ao longo tempo para diferentes concentrações de alimentação.

A partir da Figura 9, observa-se que a melhor condição foi a alimentação de 0,7%, com fluxo 5% maior em relação à concentração de 0,9%. Sendo possível observar uma pequena elevação no fluxo até aproximadamente 6 horas de simulação. Considerando que o fluxo médio depende das contribuições dos fluxos da zona de equilíbrio e de não-equilíbrio, nas horas iniciais de simulação, a redução de fluxo de não-equilíbrio devido a obstrução dos poros e formação da torta é superada pelo fluxo difusivo.

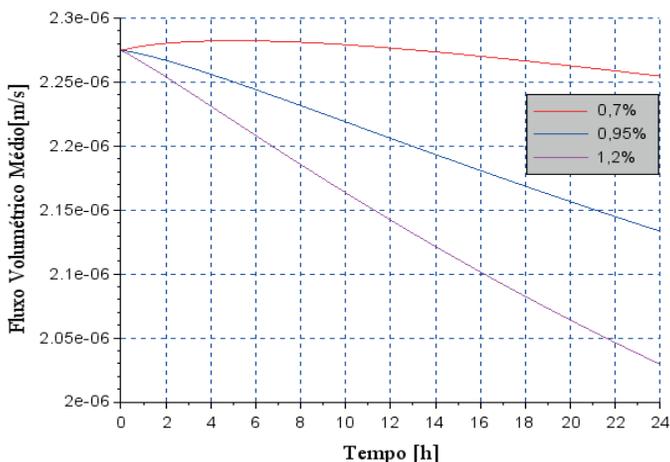


Figura 9: Fluxo volumétrico médio de permeado ao longo do tempo para diferentes concentrações de alimentação.

4 | CONCLUSÕES

Através das simulações realizadas, foram verificadas diferentes influências das variáveis analisadas sobre o fluxo volumétrico médio de permeado. Para a faixa de pressão estudada maiores valores de pressão resultaram em maior tempo para atingir o equilíbrio e maiores valores de fluxo no período de trabalho usual de 24 horas, representando a vantagem de maior processamento de soro no mesmo intervalo de tempo.

No estudo da resistência da membrana desobstruída, observou-se comportamento inverso à pressão. Em valores mais elevados, obteve-se menor tempo para total desenvolvimento da frente de equilíbrio e menores valores de fluxo.

Em relação a temperatura, seu aumento levou a menor tempo para atingir o equilíbrio e maiores fluxos de permeado no tempo de operação. O uso de temperaturas superiores a faixa indicada (5 a 35°C), tende a maximizar estes efeitos, entretanto, não é indicado por alguns autores pela possibilidade de alteração das características do produto.

A concentração de alimentação, mostrou melhores resultados em menores concentrações, onde foi observado maior tempo de equilíbrio e maiores valores de fluxo, com tendência ascendente nas primeiras horas de operação. A variação da quantidade de proteínas no soro poderia ser justificada por fatores relacionados a obtenção da matéria-prima, processamento e do método de fabricação do queijo.

REFERÊNCIAS

ANADÃO, P. **Ciência e Tecnologia de Membranas**. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

BALDASSO, C. **Fracionamento dos componentes do soro de leite através da tecnologia de separação por membranas**. 2011. 310p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) -Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio grande do Sul - Porto Alegre, 2011.

BOSCHI, J. R. **Concentração e purificação das proteínas do soro de queijo por ultrafiltração**. 2006. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2006.

BRIÃO, V. B. et al. **Bebida láctea de baixo teor de lactose adicionada com produtos da ultrafiltração do soro de leite e seu processo de obtenção 2018**, Brasil. BR 102016024530-3 A2. Depósito: 20/10/2016; Concessão: 02/05/2018.

BUHLER, M.; BOHREN, H.-U.; HODEL, T. **Ultrafiltration process for the recovery of proteins from milk 1977**, Suíça. 4,018,752. Depósito: 25/07/2974; Concessão: 04/04/1977.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª Edição ed. [s.l.] Compañia Editorial Continental, 1998.

HOLDICH, R. **Fundamentals of Particle Technology**. Loughborough: Midland Information Technology and Publishing, 2002.

KUIPERS, A. Method of preparing a protein concentrate from whey 1975. Alemanha. 3,930,039. Depósito: 25/041974; Concessão: 30/12/1975.

LAGRANGE, V.; DALLAS, P. Produtos de soro dos EUA: disponibilidade, recursos tecnológicos, aplicações. **Engenharia de Alimentos**, p. 27–29, 1997.

LEITE, Z. T. C. et al. Leite e alguns de seus derivados - da antiguidade à atualidade. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 876–880, junho 2006.

MARQUES, I. R. **Redução de incrustação proteica em membranas de ultrafiltração de poli(étersulfona) por deposição de dopamina e polietilenoimina**. 2017. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Centro tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2017.

MILLER, G.; JARVIS, J.; MCBEAN, L. **Handbook of Dairy Foods and Nutrition**. 2a Edição ed. Illinois: CRC Press LLC, 1999.

NUNES, L. A. et al. O Soro do leite, seus principais tratamentos e meios de valorização. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 301, março 2018.

RECH, R. **Estudo da produção de β -galactosidase por leveduras a partir do soro de queijo**. 2003. 86p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Biotecnologia do Estado do Rio Grande do Sul - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SILVA, R. R.; SIQUEIRA, E. Q.; NOGUEIRA, I. DE S. Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 217–228, abril 2018.

SONG, L.; WANG, L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: Experimental verification of fouling dynamics. **Journal of Membrane Science**, v. 160, n. 1, p. 41–50, setembro 1997.

WONG, N. P. et al. **Fundamentals of dairy chemistry**. Gaithersburg: Aspen Publishers Inc., 1999.

YADA, R. Y. **Proteins in Food Processing**. Cambridge: CRC Press LLC, 2000.