



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA – CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ISRAEL JONATHAN MENEZES PRAXEDES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA PARA DIFERENTES
GEOMETRIAS DE ESPAÇADORES**

CARAÚBAS – RN

2023

ISRAEL JONATHAN MENEZES PRAXEDES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA PARA DIFERENTES
GEOMETRIAS DE ESPAÇADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido (UFERSA) como requisito
para obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Diego David Silva
Diniz - UFERSA

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P919e Praxedes, Israel Jonathan Menezes.
ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO
PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA
PARA DIFERENTES GEOMETRIAS DE ESPAÇADORES /
Israel Jonathan Menezes Praxedes. - 2023.
67 f. : il.

Orientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2023.

1. Dessalinização. 2. Osmose reversa. 3.
Espaçadores de alimentação. I. Diniz, Diego David
Silva, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ISRAEL JONATHAN MENEZES PRAXEDES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO PROCESSO DE
DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA PARA DIFERENTES
GEOMETRIAS DE ESPAÇADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido (UFERSA), como requisito
para obtenção do título de Engenharia
Mecânica.

Defendida em: 19 / maio / 2023

BANCA EXAMINADORA

**DIEGO DAVID
SILVA DINIZ:**

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA DINIZ:
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ, [REDACTED]
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do
Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.05.24 20:02:47-03'00'
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.4

Diego David Silva Diniz, Prof. Dr.

Presidente

Assinado de forma digital por
ITALLA MEDEIROS
BEZERRA [REDACTED]
Dados: 2023.05.24 18:29:03
-03'00'

Ítalla Medeiros Bezerra, Prof^a. Dr^a.

Membro Examinador

Assinado de forma digital por
JACKSON DE BRITO
SIMÕES [REDACTED]
Dados: 2023.05.24 19:01:57 -03'00'

Jackson De Brito Simões, Prof. Dr.

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, minha mãe Maria Irinea de Menezes Praxedes e meu pai Josiram Praxedes de Oliveira, por todo o amor e carinho e que sempre estiveram me incentivando nos estudos. Ao meu irmão, José Manoel Menezes Praxedes por todos os momentos de alegria e companheirismo. A minha tia Lucivânia Praxedes por ter sido sempre minha segunda mãe e pelo grande apoio em todas as minhas jornadas, amo muito todos vocês.

Agradeço ao meu professor orientador Diego David Silva Diniz por toda a ajuda para desenvolver esse trabalho e todo o ensinamento e conselhos repassados durante todo o período da graduação. Sendo sempre um grande profissional.

Agradeço à Banca Examinadora Ítalla Medeiros Bezerra e Jackson De Brito Simões pela disponibilidade para avaliação deste trabalho e pela experiência durante o curso.

Aos meus colegas de curso Matheus Thomas e Paulo Francisco, por estarmos desde o início do curso estudando, compartilhando alegrias e frustrações juntos com muita amizade.

Agradeço a minha namorada Mayna Alcantara por todo o carinho e está ao meu lado sempre presente em todos os momentos me auxiliando e me apoiando

Agradeço também aos meus amigos que ajudaram de forma direto ou indiretamente para realizar esse trabalho. Em especial Layane Araújo, Gilsomaro Barbosa e Pamela Cristina que estiveram presentes desde o início dessa trajetória.

Agradeço a todos de coração!

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, a comunidade científica vem se intensificando cada vez mais a preocupação com a escassez hídrica e a busca de meios que possam contornar e diminuir esse problema no planeta, em foco na região semiáridas, com o objetivo principal de tornar a água imprópria para consumo em água potável. Há alguns anos vem sendo estudado e implantado tecnologias e equipamentos de dessalinização por osmose reversa que é um processo físico-químico e mecânico, onde é caracterizado pela separação do soluto de um solvente através de uma membrana seletora semipermeável, com auxílio de uma bomba no canal de alimentação aplicando uma pressão capaz de superar a pressão osmótica tornando possível mudar a direção do fluxo natural do solvente através da membrana seletora. Esse processo possui algumas limitações, e um dos grandes problemas desse processo é que surge uma camada de concentração do soluto, gerando uma camada polarizada e, conseqüentemente, a formação de incrustação, diminuindo a vida útil dos equipamentos. Para diminuir esses efeitos negativos nos modelos atuais, são utilizados espaçadores para promover uma turbulência no fluxo de alimentação do fluido e diminuir a camada de concentração na membrana. O uso de diferentes geometrias dos espaçadores para esse estudo e seus efeitos no canal de alimentação mostrou bastante eficiência acarretando a um aumento do fluxo de permeado através da membrana, sendo possível quantificar as eficiências de cada geometria através do uso de parâmetros, como a Razão de Performance do Espaçador e a perda de pressão por unidade de comprimento. Ao analisar esses parâmetros, nas geometrias estudadas, foi observado que os espaçadores do tipo losango tiveram melhores performances de processo.

Palavras-chave: Dessalinização; Osmose reversa; Espaçadores de alimentação;

ABSTRACT

Over the last decades, the scientific community has been increasingly intensifying its concern with the scarcity of water and the search for means that can circumvent and reduce this problem on the planet, particularly in the semi-arid region, with the main objective of turning water unsuitable for consumption into drinking water. For some years now reverse osmosis desalination technologies and equipment have been studied and implemented. Reverse osmosis is a physical-chemical and mechanical process, characterized by the separation of solutes from solvents through a semi-permeable selective membrane, with the aid of a pump in the feed channel applying a pressure capable of overcoming the osmotic pressure, making it possible to change the direction of the solvent's natural flow through the selective membrane. This process has some limitations, and one of the major problems of this process is that a solute concentration layer appears, generating a polarized layer and, consequently, the formation of fouling, decreasing the equipment's lifetime. To reduce these negative effects in current models, spacers are used to promote turbulence in the fluid feed flow and reduce the concentration layer on the membrane. The use of different spacer geometries for this study and their effects on the feed channel has shown to be very efficient leading to an increase in permeate flux through the membrane, and it is possible to quantify the efficiencies of each geometry through the use of parameters such as the Spacer Performance Ratio and the pressure loss per unit length. By analyzing these parameters, in the geometries studied, it was observed that the diamond spacers had better process performances.

Keywords: Desalination; Reverse Osmosis; Feed spacers;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de filtração cruzada.	16
Figura 2 - Representação da relação entre osmose (a), equilíbrio osmótico (b) e osmose reversa (c).....	18
Figura 3 - Representação do Processo de Separação por Membrana.....	19
Figura 4 - Esquema de um processo de Osmose Reversa.	19
Figura 5 - Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose reversa.	21
Figura 6 - Declínio do fluxo permeado com o tempo.	22
Figura 7 - Tipos de incrustação	23
Figura 8 - Representação esquemática da polarização de concentração.	24
Figura 9 - Métodos utilizados para redução da polarização de concentração e incrustações.	25
Figura 10 - Formas básicas de redes comerciais de espaçadores.....	26
Figura 11 - Simulações mostrando a vorticidade instantânea nas simulações com os números de Reynolds de 70 (a), 90 (b), 110 (c), e 170 (d).	29
Figura 12 - Comparação dos resultados em termos de coeficiente de transferência de massa.....	30
Figura 13 - Esquematização do perfil de concentração na membrana.....	31
Figura 14 - Curvas de concentração utilizando o Spiegler e o Kedem modelo e fluxo constante ao longo da membrana.	33
Figura 15 - Mecanismo de permeação. (a) membranas porosas e (b) membranas densas.....	34
Figura 16 - Fluxograma para resolução de um problema utilizando CFD.	37
Figura 17 - Objeto de estudo.	38
Figura 18 - Fluxograma para o estudo proposto.....	39
Figura 19 - Geometria do canal sem espaçador.....	40
Figura 20 - Geometria dos espaçadores.	41
Figura 21 - Refinamento da malha próximo à área da membrana.	42
Figura 22 - Blocação e refinamento e nas regiões próximas ao espaçador.	42
Figura 23 - Fluxograma dos procedimentos de solução acoplados com as UDFs. ...	46
Figura 24 - Distribuição de velocidade no canal de alimentação.....	48
Figura 25 - Distribuição da fração mássica do soluto no canal de alimentação.	49
Figura 26 - Espessura da camada polarizada.	49
Figura 27 - Perfis de um fluxo permeado com e sem espaçador do tipo quadrado..	50
Figura 28 - Representação esquemática dos espaçadores no canal de alimentação com arranjo submerso.....	50
Figura 29 - Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador circular. ...	51
Figura 30 - Fração mássica para domínio com espaçador circular.	52
Figura 31 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.	52
Figura 32 - Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador triangular.	53
Figura 33 - Fração mássica para domínio com espaçador triangular.....	54
Figura 34 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.	54
Figura 35 - Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador quadrilátero.	55

Figura 36 - Fração mássica para domínio com espaçador quadrilátero.....	55
Figura 37 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.....	56
Figura 38 - Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador tipo losango.	57
Figura 39 - Fração mássica para domínio com espaçador tipo losango.	57
Figura 40 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.....	58
Figura 41 - Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador hexagonal.	59
Figura 42 - Fração mássica para domínio com espaçador hexagonal.	59
Figura 43 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.....	60
Figura 44 - Valores médios de SPMP dos espaçadores estudados.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
	2.1 OBJETIVO GERAL	14
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
	3.1 DESSALINIZAÇÃO	15
	3.2 OSMOSE E OSMOSE REVERSA (OR).....	17
	3.3 MEMBRANAS SEMIPERMEÁVEIS	20
	3.4 FATORES QUE LIMITAM A OPERAÇÃO DA MEMBRANA	21
	3.4.1 Incrustação da membrana	21
	3.4.2 Polarização de concentração	23
	3.5 MÉTODOS PARA REDUZIR A POLARIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E A INCRUSTAÇÃO.....	24
	3.6 TECNOLOGIA CFD E ESTUDO DOS ESPAÇADORES	27
	3.6.1 Aplicações de cfd em processos psm.....	28
	3.7 MODELOS TEÓRICOS PARA MEMBRANAS	30
	3.7.1 Teoria do filme	30
	3.7.2 Modelo de transporte <i>spiegler-kedem</i>.....	32
	3.7.3 Modelos de membrana não porosa ou densa.....	33
4	METODOLOGIA.....	36
	4.1 METODOLOGIA CFD	36
	4.2 PROBLEMA FÍSICO E OBJETO DE ESTUDO	38
	4.3 PARAMETROS GEOMÉTRICOS	38
	4.3.1 Geometria dos canais de alimentação.....	39
	4.3.2 Geometria dos espaçadores	40
	4.4 GERAÇÃO DAS MALHAS NUMÉRICAS	41
	4.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DA SOLUÇÃO.....	43
	4.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO	43
	4.7 MÉTODOS PARA A SIMULAÇÃO	46
	4.8 MÉTODOS NUMÉRICOS	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
	5.1 ANÁLISE HIDRODINÂMICA	48
	5.2 GEOMETRIA COM ESPAÇADORES	50

5.2.1	Espaçador do tipo círculo	51
5.2.2	Espaçador do tipo triângulo.....	53
5.2.3	Espaçador do tipo quadrado.....	55
5.2.4	Espaçador do tipo losango	56
5.2.5	Espaçador do tipo hexágono	58
5.3	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS ESPAÇADORES	60
6	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, por consequência das constantes mudanças climáticas no planeta, vem se intensificando cada vez mais a preocupação com a escassez hídrica nas regiões semiáridas do planeta em que tem como principal característica o baixo nível de índice pluviual, pelas suas condições físicos-climáticas com longos e frequentes períodos de secas.

Já na região semiárida brasileira, segundo Moreira (2016) além do baixo nível pluviual, outros fatores como as condições geológicas influenciam e afetam a escassez nessas regiões, pois possui uma estrutura que não permite acumular a água no subsolo de forma satisfatória. O outro fator é o excesso de teor de sais presente no solo, em torno de mais de 1000 mg/l, deixando a água imprópria para o consumo (SUASSUNA, 1999).

Segundo o relatório da Organização Mundial de Saúde (WHO; UNICEF, 2019), em 2017, aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas, equivalente a 29,3% da população mundial, não tem disponibilidade de água potável de qualidade nos lugares onde vivem. Dessa forma, tais pessoas ficam sujeitas a utilizar fontes de água não tratada ou precisam realizar longos percursos para chegar em fontes de água potável.

Com esses dados foram realizados diversos estudos para poder contornar e diminuir esse problema e uma das soluções é o uso de dessalinização para tornar águas salobras em potáveis. Existem diferentes processos de dessalinização, entre eles os mais comuns são: vaporização, destilação, eletrodialise e por osmose reversa.

Hoje, um dos processos de dessalinização mais populares é chamado de osmose reversa, o qual é um processo físico-químico e mecânico, onde consegue separar um solvente do soluto, ou seja, separar a água dos sais encontrados na mistura. Isso é possível, aplicando uma pressão maior do que a pressão osmótica, o que possibilita mudar a direção do fluxo típico do solvente através da membrana semipermeável, assim permitindo a passagem da água (DINIZ, 2021).

Nas décadas mais recentes, os processos de Separação por Membranas (PSM) cresceram significativamente. A sua capacidade de se adequar a uma vasta

gama de aplicações explica o porquê que esse método recebeu bastante atenção e tornou-se bastante atraente quando se referem à tratamento de água e efluentes (ALVEZ, 2006).

Acredita-se que o método dessalinização por osmose reversa através da membrana, entre os processos empregados para dessalinização, seja considerado o mais amplamente utilizado globalmente (53% do total, aproximadamente). Isso porque ele consegue rejeitar praticamente todo o material dissoluto presente na água, resultando em salinidade concentrada e uma água com baixa quantidade de sal (SOUSA, 2013).

Os setores industriais e de tratamento de água adotaram com bastante aceitação a Osmose Reversa, com sua aplicação mais comum sendo a remoção de contaminantes indesejáveis.

Em comparação com os processos convencionais de dessalinização, a técnica de osmose reversa tem algumas vantagens, e atualmente é a melhor alternativa disponível para algumas regiões. Dentre as vantagens, podem-se destacar: baixo custo de investimento, baixo consumo energético, ocupa área muito reduzida para instalação, possui um aproveitamento dos efluentes, a água de qualidade produzida de forma constante e contínuo, possui uma boa flexibilidade para futuras instalações e sua taxa de rejeição chega a 99,4% (MOURA *et al.*, 2008).

Um dos grandes problemas no processo de dessalinização por osmose reversa está relacionado à vida útil das membranas semipermeáveis nos equipamentos, afetando a produtividade do sistema, pois, durante esse processo é formado uma camada com alta concentração do soluto na superfície da membrana, em que é chamada de incrustação e isso provoca uma queda do fluxo permeado.

Relacionado a esse fenômeno, já foram realizados diversos estudos para poder diminuir esse problema e aumentar a eficiência do sistema. Uma das técnicas estudadas é o uso de espaçadores para provocar turbulência no escoamento, gerando perturbações e assim podendo ajudar a diminuir essa camada de soluto ao longo da membrana, diminuindo também o efeito da incrustação e aumentando o fluxo.

A utilização de espaçadores como promotores de turbulência permite a criação de fluxo turbulento que, além de aumentar o fluxo permeável, também pode ajudar a reduzir as camadas limite e reduzir os problemas de incrustação. Porém, esses espaçadores promovem também um aumento da queda de pressão e, conseqüentemente, da energia utilizada, o que pode contribuir para a formação de crostas em áreas próximas devido aos pontos de estagnação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do escoamento fluidodinâmico presente no processo de dessalinização de águas salobras via osmose reversa causado por diferentes geometrias dos espaçadores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre dessalinização e simulação numérica;
- Definir um modelo matemático capaz de prever o processo de dessalinização via osmose reversa, empregando as equações de conservação de massa, momento linear e transporte de espécie;
- Comparar e avaliar a influência de diferentes formas geométricas dos espaçadores;
- Comparar o modelo proposto com resultados encontrados na literatura.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DESSALINIZAÇÃO

O processo de dessalinização é um método usado para tratar a água para eliminar minerais que se dissolveram nela e produzir água de boa qualidade e adequada para o consumo humano. Pode ser considerada natural quando analisada pelo processo de evaporação da água do mar e condensação das nuvens de chuva, porém hoje vem se intensificando o processo de dessalinização praticado pelo homem.

Sousa (2013) diz que, as principais tecnologias utilizadas para este processo são classificadas em dois métodos: os térmicos, caracterizado pelas mudanças de fases e o método da Separação por Membrana que é um processo sem mudança de fase e com uso de uma membrana seletiva.

Em suma, o processo de separação térmica refere-se a uma técnica que envolve os fenômenos primários, que envolve a evaporação da água para a atmosfera e quando atinge o ponto de orvalho ocorre a condensação, considerada uma das tecnologias mais antigas para a remoção de sais de águas salinas.

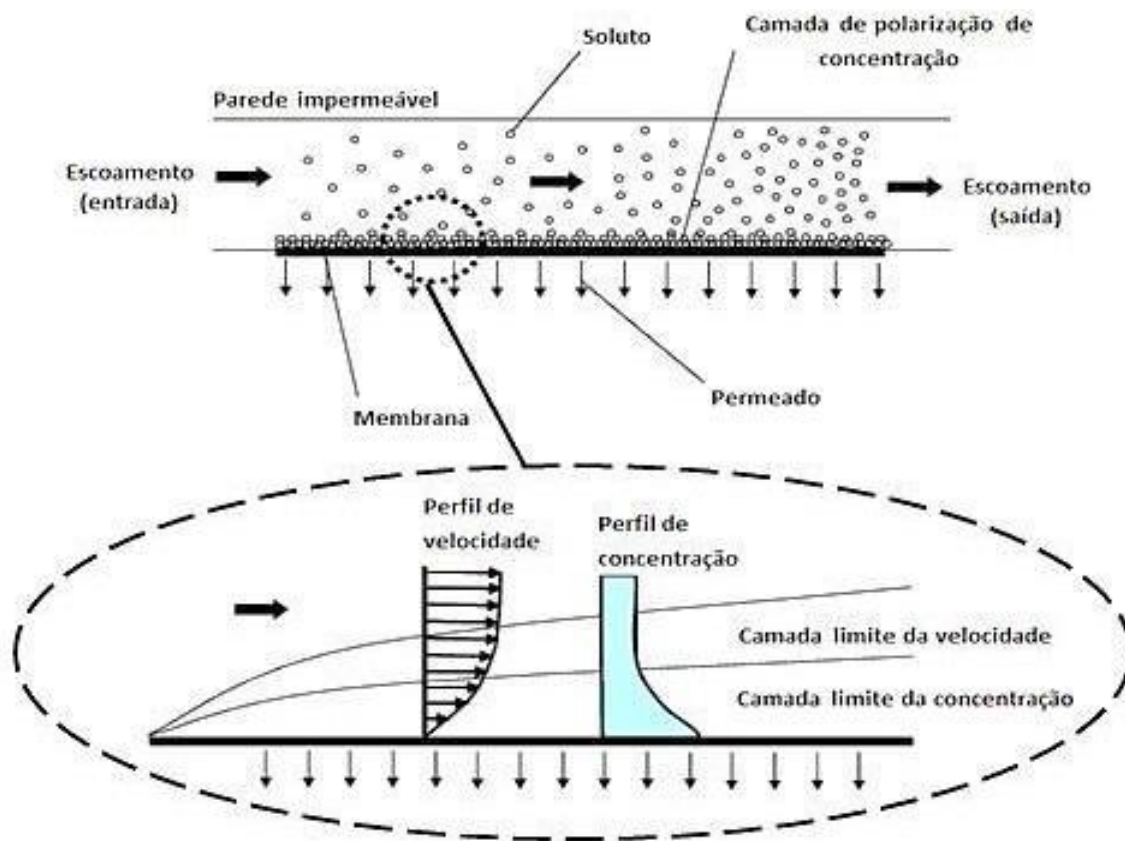
Já segundo método de dessalinização, os Processos de Separação por Membrana empregam membranas no processo de seleção com base nas características dos constituintes que quer rejeitar. É a principal tecnologia que vem se destacando cada vez mais para o tratamento de água.

Para Porciúncula (2007), as membranas podem ser consideradas barreiras segregadoras que separam duas fases distintas, limitando total ou parcialmente o movimento de um, ou mais componentes através dessas fases. Existem vários processos baseados em membrana, mas todos eles compartilham a mesma característica, sendo a capacidade de reter um ou mais componentes enquanto o resto passa.

Segundo Farrel (2008), os processos de separação por membrana são realizados através da filtração de fluxo cruzado (Figura 1), em que a solução flui

paralelamente à superfície da membrana e o permeado move-se perpendicularmente ao escoamento de entrada.

Figura 1 - Esquema representativo de filtração cruzada.



Fonte: Farrel (2008).

A Tabela 1 mostra alguns dos principais processos de separação que são encontrados em escala comercial.

Tabela 1 - Processo de Separação por Membranas comerciais.

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	MATERIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA	APLICAÇÕES
MICROFILTRAÇÃO (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em Suspensão, Bactérias PM > 500.000 (0,01 μ m)	Água e Sólidos Dissolvidos	Esterilização Bacteriana, Clarificação de Vinhos e Cervejas, Oxigenação do Sangue.
ULTRAFILTRAÇÃO (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Colóides, Macromoléculas PM > 5000	Água (Solvente), Sais Solúveis de Baixo Peso Molecular	Fracionamento e concentração de Proteínas, Recuperação de Pigmentos.

Continuação da tabela

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	MATERIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA	APLICAÇÕES
NANOFILTRAÇÃO (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de Peso Molecular Médio $500 < PM < 2000$	Água, Sais e Moléculas de Baixo Peso Molecular	Purificação de Enzimas, Bioreatores e Membranas.
OSMOSE INVERSA (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo Material Solúvel ou em Suspensão	Água (Solvente)	Dessalinização de Águas, Concentração de suco de Frutas.
DIALISE (D)	ΔC	Moléculas de PM > 5000	Íons e Orgânicos de Baixo Peso Molecular	Hemodiálise (Rim Artificial), Recuperação de NaOH.
ELETRODIÁLISE (ED)	ΔV	Macromoléculas e Compostos não Iônicos.	Íons	Concentrações de Soluções Salinas, Purificação de Águas.
PERMEAÇÃO DE GASES (PG)	$\Delta P \Rightarrow \Delta C$	Gás Menos Permeável	Gás Mais Permeável	Recuperação de Hidrogênio, Separação CO_2/CH_4
PERVAPORAÇÃO (PV)	Pressão de Vapor	Líquido Menos Permeável	Líquido Mais Permeável	Desidratação de Alcoois.

Fonte: Adaptada de Moura *et al.* (2008).

Apesar das grandes vantagens no uso da tecnologia do processo de Separação por Membrana, existem algumas limitações, que dificultam o fluxo de permeado através da membrana durante a operação. Esses problemas estão relacionados à polarização de concentração e à formação de incrustações diminuindo também a vida útil do equipamento (DINIZ, 2021).

Os PSM também podem ser classificados em diferentes métodos, entre eles os mais conhecidos são a eletrodiálise e a osmose reversa.

3.2 OSMOSE E OSMOSE REVERSA (OR)

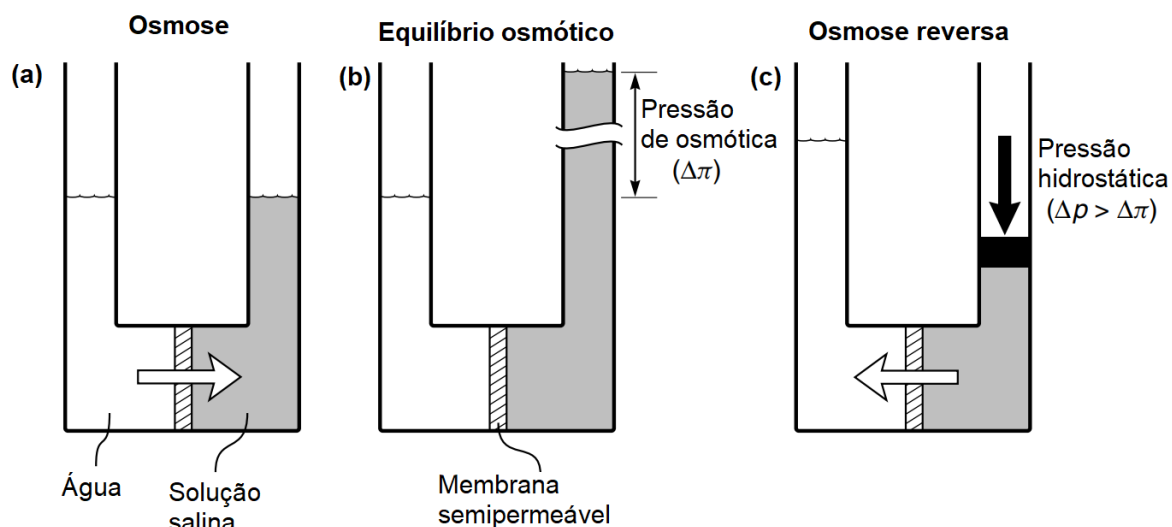
Osmose é um fenômeno físico-químico de ocorrência natural quando dois líquidos com diferentes níveis de concentração de sal em solução são separados por uma membrana semipermeável. Durante esse processo, o solvente do líquido mais

diluído naturalmente se difunde através da membrana em direção ao mais concentrado. O processo continua até chegar a um ponto de equilíbrio quando as colunas da solução mais concentradas e diluídas ficam posicionadas um mais alto que o outro. Esta diferença de altura entre as colunas é conhecida como pressão osmótica (MOURA *et al.*, 2008).

Baker (2004) enfatiza que em termos simples, se uma membrana separar a água pura de uma solução salina, a água fluirá através do filtro do lado mais puro para o lado salgado (Figura 2(a)). Este processo é chamado de osmose normal.

Quando uma quantidade adequada de pressão hidrostática é aplicada no lado salgado da membrana, o fluxo de água pode ser retardado e eventualmente parado. A pressão hidrostática necessária para parar o fluxo de água é conhecida como pressão osmótica. Quando é aplicada uma pressão superior à pressão osmótica ao lado mais salgado da membrana, o fluxo de água é invertido e começa a fluir do lado salgado para o lado puro da solução da membrana como mostra na Figura 2(c). A inversão da osmose é o nome da técnica, que é um método crucial para produzir água pura a partir de soluções salinas (BAKER, 2004).

Figura 2 – Representação da relação entre osmose (a), equilíbrio osmótico (b) e osmose reversa (c).

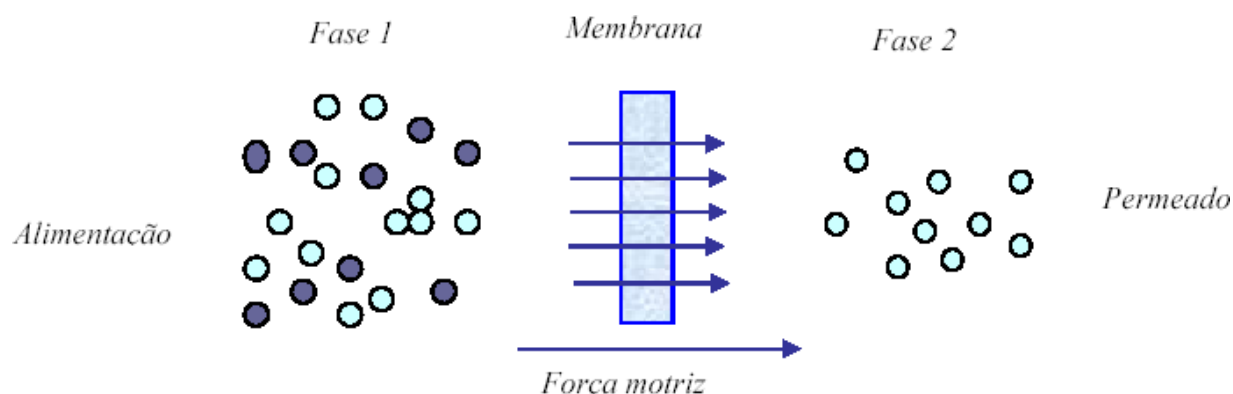


Fonte: Adaptada de BAKER (2004).

Ou seja, quando uma pressão maior do que a pressão osmótica da solução é aplicada na direção do fluxo o sentido do solvente que passa pela membrana é

invertido e a água muda da solução mais concentrada para a solução menos concentrada, como mostra na Figura 3, daí vem a denominação de Osmose Reversa (OR) (SOUSA, 2013).

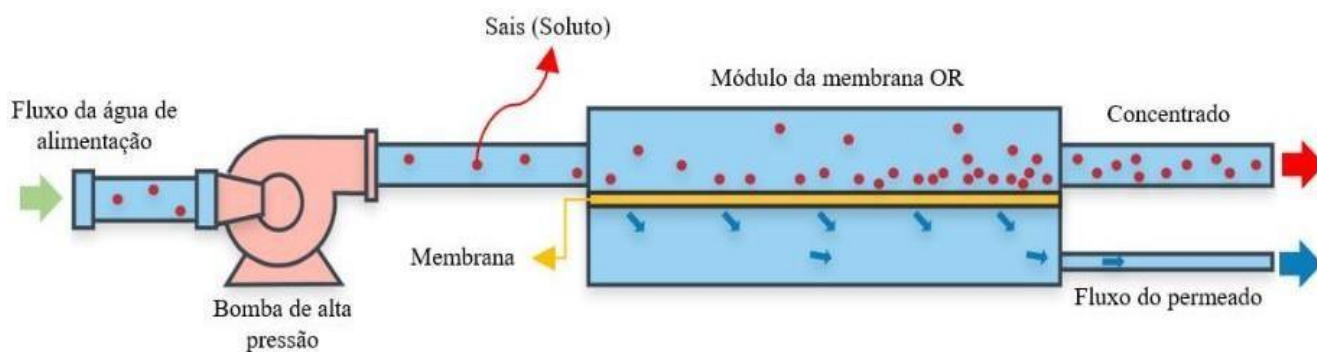
Figura 3 – Representação do Processo de Separação por Membrana.



Fonte: Moura *et al.* (2008).

Silva (2012) cita que, o processo de Osmose Reversa envolve bombear água salgada altamente concentrada sobre as membranas seletivas, a fim de reverter o processo de osmose natural, onde requer uma pressão mecânica maior do que a pressão osmótica. A Figura 4 representa o processo de Osmose Reversa utilizando uma bomba para obter uma pressão maior que a osmótica. A maioria dos contaminantes na água, incluindo vírus e bactérias, são retidos pela membrana.

Figura 4 - Esquema de um processo de Osmose Reversa.



Fonte: Diniz(2021).

Essa força motriz causada pela diferença entre pressões locais e osmóticas

resulta no aumento da concentração na superfície da membrana, causando uma diferença de pressão e, assim, o fluxo de permeação diminui. Todo esse fenômeno também é conhecido como Polarização da Concentração (PC) (SILVA, 2012).

Com isso aparecem problemas que afetam a produtividade do sistema durante o processo de dessalinização, como as incrustações. Estes, por si só, são fenômenos fenomenológicos capazes de causar uma diminuição no fluxo de permeação e/ou um aumento na passagem de sais com o tempo. A incrustação são os materiais que ficam suspensos na água e se instalam na superfície da membrana (MOURA *et al.*, 2008).

3.3 MEMBRANAS SEMIPERMEÁVEIS

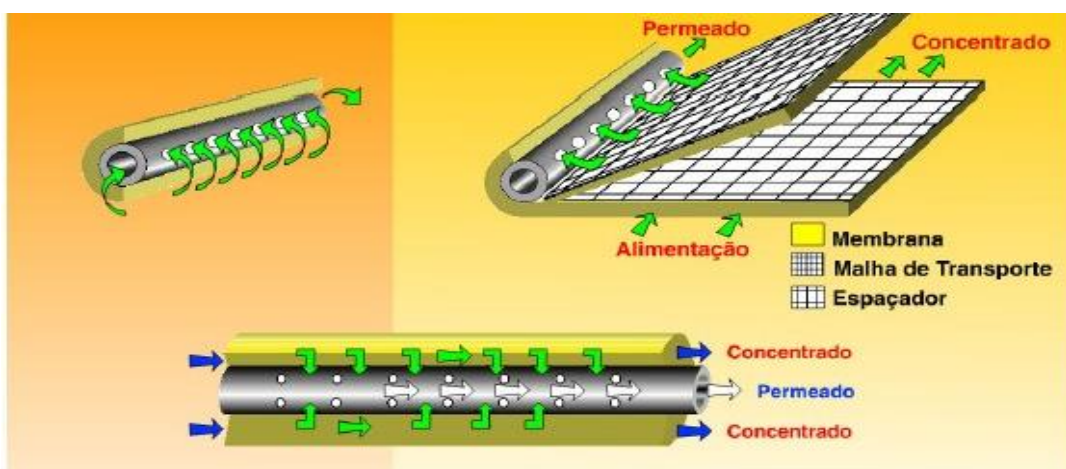
Segundo Moura *et al.* (2008), as membranas semipermeáveis são membranas que podem ser encontradas na natureza que permitem a passagem apenas de líquidos ou solventes, mas não de sais ou solutos dissolvidos nela.

As membranas são um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento do processo de osmose reversa e podem ser representadas de diversas formas.

As membranas podem ser porosas ou não-porosas, ser simétrica ou assimétrica, em relação à morfologia. E pode ser biológica ou sintética quanto em relação a sua natureza (Porciúncula, 2007).

As membranas, conforme observado na Figura 5, são utilizadas em escalas industriais na dessalinização para obter água potável de forma econômica principalmente para as indústrias e para isso utilizam métodos de empacotamento que são chamados de módulos de membrana que podem ser classificadas em tipo chapa, tipo fibroso e tipo espiral, onde esse é o mais encontrado nas indústrias que utilizam a osmose reversa.

Figura 5 - Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose reversa.



Fonte: Adaptada de Moura *et al.* (2008).

Um dos elementos que compõem o módulo espiral que afeta diretamente o desempenho da membrana são os espaçadores que também são conhecidos como promotores de turbulência. Além disso, incentiva um aumento no transporte de massa, reduzindo a concentração de solução na parede e incrustações (DINIZ, 2021).

3.4 FATORES QUE LIMITAM A OPERAÇÃO DA MEMBRANA

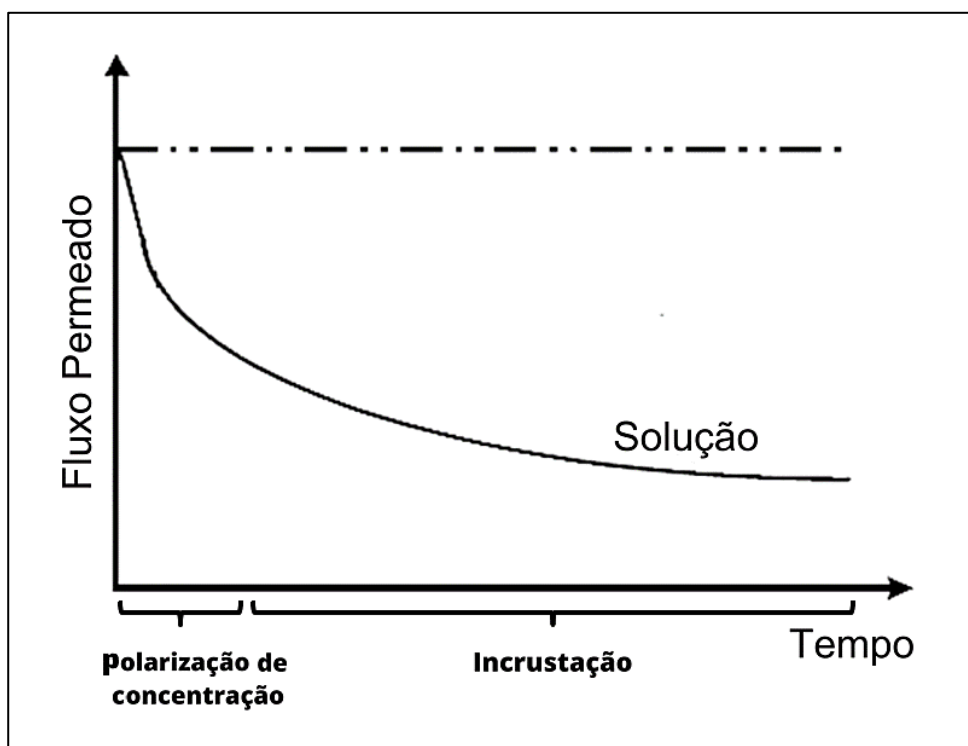
O principal e o mais importante fator que restringe o uso de filtragem por membrana é a diminuição do fluxo durante um processo de separação, o que significa que o fluxo que passa através da membrana diminuirá drasticamente ao longo do tempo (DINIZ, 2021). A redução do fluxo pode ser atribuída a dois fatores: a incrustação da membrana e a polarização de concentração.

3.4.1 Incrustação da Membrana

Para Silva (2012), a interação entre a membrana e a solução além de ocorrer na interface entre a solução da membrana e a superfície e também pode incluir o interior da membrana durante o tempo de operação de um sistema de osmose reversa, essas interações causam algumas alterações na membrana que limitam o transporte do solvente através dela.

Essas alterações são chamadas de incrustação e pode reduzir drasticamente o fluxo de permeado, além de aumentar o custo de operação e diminuir o tempo de vida útil da membrana sendo considerado um fenômeno irreversível e que ocorre de forma lenta e gradual como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Declínio do fluxo permeado com o tempo.



Fonte: Adaptado de BAKER (2004).

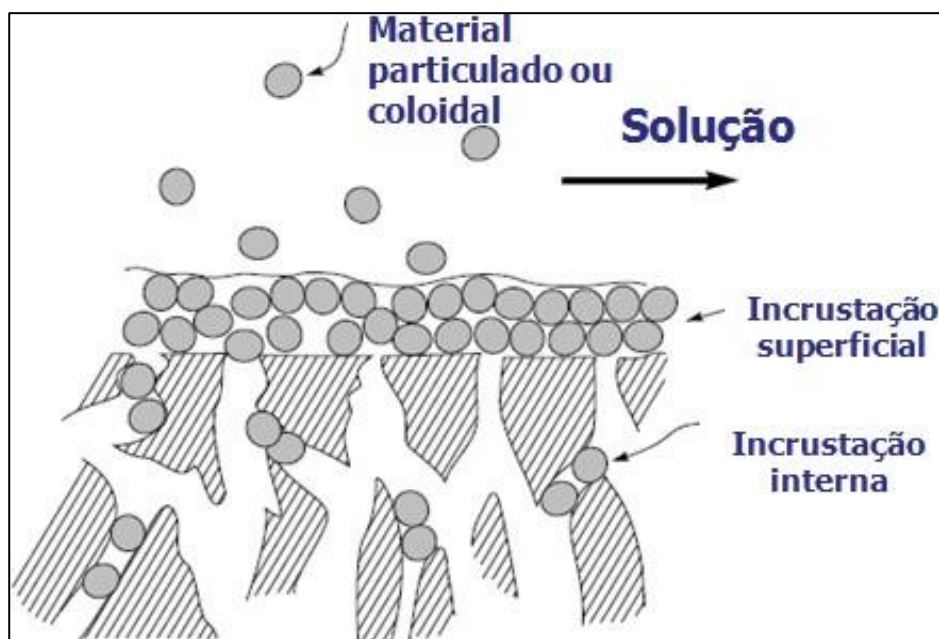
Durante um processo normal, as membranas para os processos de osmose reversa são suscetíveis à incrustação por material suspenso ou solúvel presente na alimentação da água ao longo do funcionamento regular e por um longo período (FRISCHKORN & ROCHA NETO, 2009).

Alvez (2006) cita que existe diferentes formas de incrustação, as mais comuns são as incrustações externas e internas, representadas na Figura 7, onde as externas, ou superficiais, leva a formação de uma camada na superfície da membrana, porém é possível controlar através de métodos de processos fluidodinâmicos.

E as incrustações internas, onde são geradas por interações físico-químico soluto-membrana, que formam bloqueios total ou parcial dos poros e não pode ser

revertido por processos fluidodinâmicos.

Figura 7 – Tipos de incrustação



Fonte: França Neta (2009).

As incrustações podem ser classificadas por quatro categorias: depósitos inorgânicos (*scaling*), colóides (*fouling* coloidal), sólidos em suspensão e material biológico (*biofouling*) (MOURA *et al.* 2008).

3.4.2 Polarização de Concentração

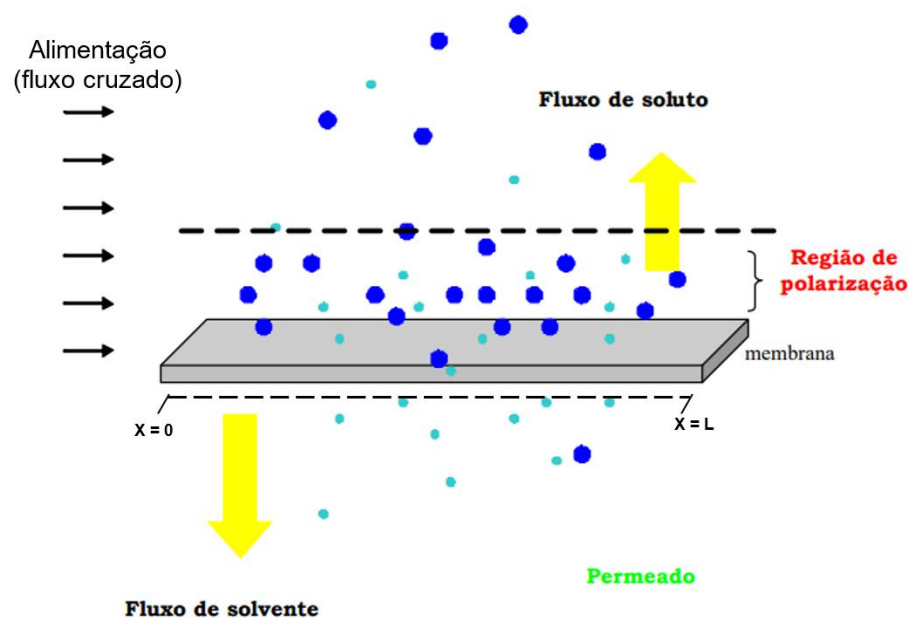
Outro dos principais fatores que causam o aumento da resistência ao fluxo é a polarização da concentração (Figura 8).

Esse processo é o precursor da formação de incrustações e é um fenômeno inerente ao processo de osmose reversa, em que desde o início do processo já começa a formar essa camada polarizada, devido a presença da seletividade da membrana.

Alves e Filho (2006) enfatiza que pelo fato de que as membranas são semipermeáveis, ou que elas permitem que um ou mais componentes passem preferencialmente sobre outros, faz com que a concentração de solução na superfície

da membrana seja diferente do que é no meio do fluido no fluxo de alimentação.

Figura 8 – Representação esquemática da polarização de concentração.



Fonte: Adaptado de Alves e Filho (2006).

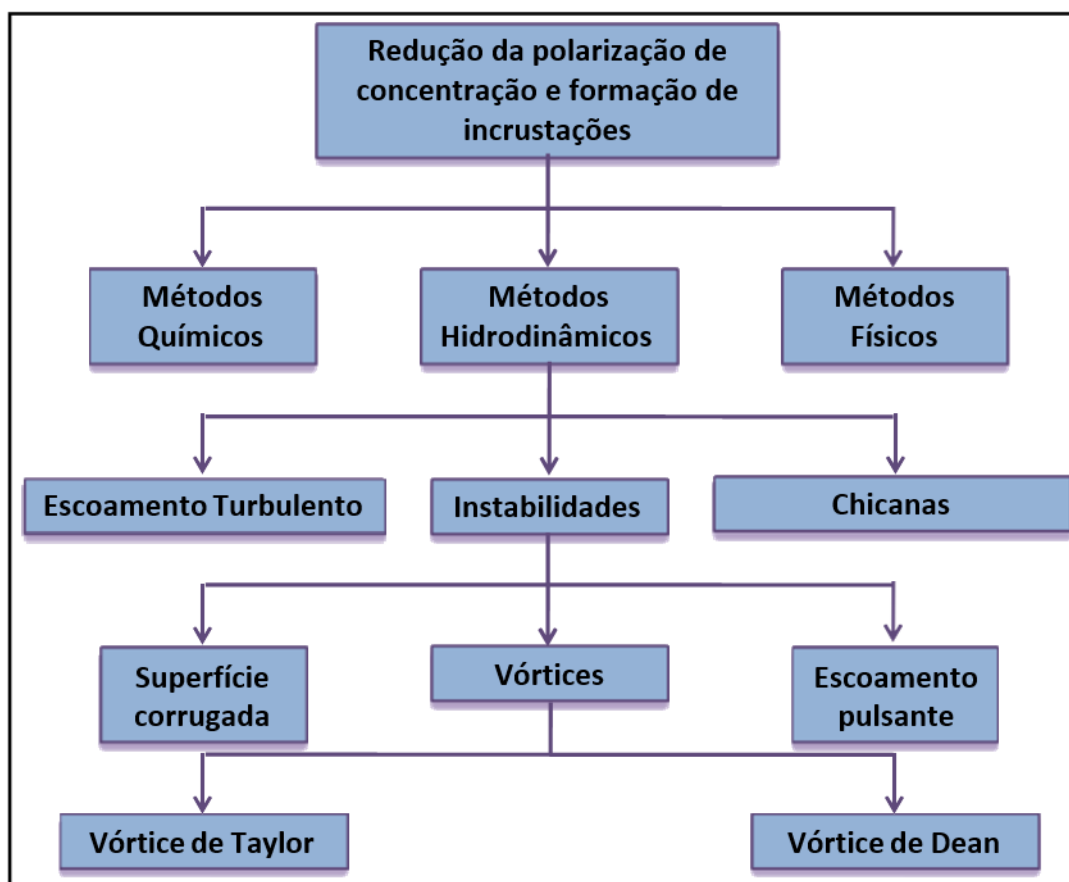
Saeed (2012) cita que quase todos os processos de Separação por Membrana são afetados pela polarização da concentração. No caso de operações de OR, o desenvolvimento de uma camada de solução concentrada na superfície da membrana resulta em uma pressão osmótica elevada em relação ao resto da membrana, necessitando de uma pressão operacional mais alta para superar a pressão osmótica elevada.

3.5 MÉTODOS PARA REDUZIR A POLARIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E A INCRUSTAÇÃO

Reduzindo a formação da camada de polarização da concentração e da incrustação, aumenta a eficiência do sistema e para isso existem alguns métodos como o químico, físico e o hidrodinâmico que tem como intuito de combater essa camada polarizada.

A Figura 9 mostra um resumo dos métodos capazes de reduzir a polarização de concentração e a formação de incrustação.

Figura 9 – Métodos utilizados para redução da polarização de concentração e incrustações.



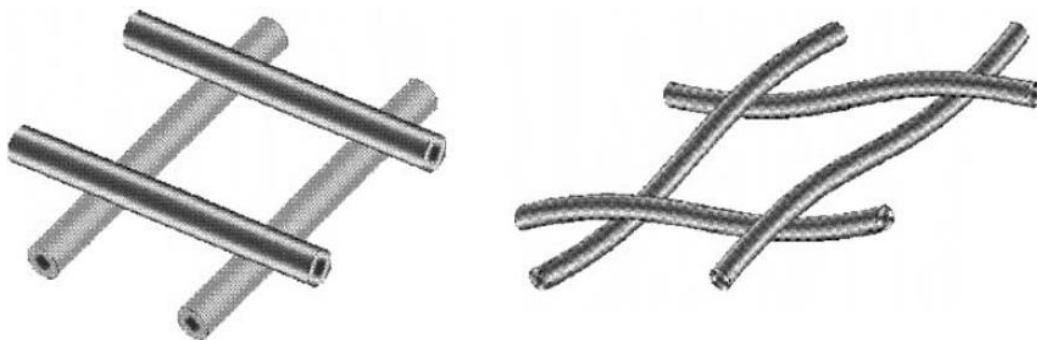
Fonte: França Neta (2009).

Um dos métodos mais utilizados são os métodos hidrodinâmicos. O uso de chicanas ou promotores de turbulência, como espaçadores, entre as membranas são propostas para aumentar o fluxo permeável enquanto se tenta diminuir a camada polarizada (FRANÇA NETA, 2009).

Essas alternativas incentivam mudanças nas propriedades do fluxo de alimentação, resultando em um aumento no cisalhamento imposto nas proximidades da superfície da membrana. Isso resultará num aumento no fluxo permeado e um melhor combate contra a polarização e a incrustação.

Para esse método, uma das alternativas é o uso de espaçadores (Figura 10), que no canal de alimentação além de manter as camadas da membrana separadas, proporcionando uma passagem para o fluxo, mas também afeta significativamente os padrões de fluxo e concentração no canal de alimentação (SAEED, 2012).

Figura 10 - Formas básicas de redes comerciais de espaçadores.



Fonte: Adaptado por Sousa (2013).

O autor Diniz (2021) reforça citando que o uso dos geradores de turbulência, proporcionam altas velocidades de fluxo cruzado, aumentando assim o coeficiente da transferência de massa que alterará a hidrodinâmica do local, formando um fluxo turbulento com vórtices, como o de Taylor e Decano, que terá como consequência a diminuição da polarização de concentração e incrustações.

Os espaçadores no canal de alimentação podem ser responsáveis pela queda de pressão e criação de zonas de fluxo limitado próximo onde eles se encontram, porém os espaçadores são responsáveis por promover a mistura entre o fluido e os elementos fluidos adjacente à superfície da membrana. (SAEED, 2012).

Existem muitos tipos diferentes de espaçadores, e a eficácia dos filamentos varia dependendo do tamanho da malha, da altura do canal, do ângulo entre os filamentos, e da direção do escoamento.

Os autores Shakaib, Hasani e Mahmood (2007) citam em seu trabalho que os parâmetros de fluxo e concentração nos canais de membrana dependem de algumas propriedades da solução, como a difusão, viscosidade e a densidade, além disso, os parâmetros geométricos dos espaçadores, como o comprimento do espaçador, sua seção transversal, seu espaçamento entre filamentos adjacentes e seu ângulo entre dois filamentos também têm um impacto significativo na eficiência do processo porque afetam as taxas de fluxo e concentração.

Em relação a eficiência dos espaçadores Al-Amshawee e colaboradores (2022) explicam sobre o parâmetro de vaziosidade, onde caracteriza

os efeitos dos espaçadores perante a perda de carga, pois um espaçador com um índice de espaços vagos baixo aumenta o arrasto, exigindo uma taxa de fluxo alta o suficiente para superar a resistência do fluxo. A vaziosidade (ϵ) pode ser calculada usando a Equação 1 que é definida como a proporção do volume vazio, levando em consideração o diâmetro dos filamentos e o tamanho da malha.

$$\epsilon = \frac{\text{Volume vazio}}{\text{Volume total}} = \frac{V_{total} - V_{espaçador}}{V_{total}} \quad (1)$$

3.6 TECNOLOGIA CFD E ESTUDO DOS ESPAÇADORES

Em geral, há três formas de abordar um problema que envolve a mecânica dos fluidos e processos de transferência de calor e massa: métodos analíticos, numéricos e experimentais.

Porciúncula (2007) cita em seu trabalho que os métodos analíticos são aqueles que são utilizados para obter soluções de forma fechada a partir de equações diferenciais, podendo ser expressas como funções matemáticas bem conhecidas, porém são utilizados em casos muito simples. Em relação ao método numérico, tratam-se de questões com níveis de complexidade mais elevados em condições mais desafiadoras e os métodos experimentais, por sua vez, lidam com sistemas reais, porém apresentam um único caminho possível.

Os recentes avanços científicos e tecnológicos promoveram uma evolução no processamento dos computadores e tem produzido um aumento no uso da simulação fluidodinâmica computacional (Porciúncula, 2007). Sendo possível prever e descrever melhor o comportamento que pode ocorrer durante o processo de separação de membranas por osmose reversa, utilizando métodos numéricos.

Diniz (2021) cita que, apesar de um sistema de separação de membranas por osmose inversa poder ser modelado computacionalmente de forma bidimensional ou tridimensional, a maioria dos trabalhos na literatura escolhe por utilizar um modelo unidimensional ou bidimensional devido a custos computacionais e requisitos de

tempo mais baixos atrelado a quantidade de elementos de malhas presente em cada um desses casos.

Diniz (2021) fala que quando comparado com estudos experimentais, o método computacional permite a modificação de alguns parâmetros internos do processo e a avaliação do seu impacto no desempenho do equipamento, permitindo a otimização da eficiência do processo e a minimização das suas limitações num período de tempo mais curto e a um custo menor.

Sousa (2013) também enfatiza na sua obra que os métodos experimentais fornecem a informação mais fiel sobre um processo físico através de medições do mundo real, mas na grande maioria dos casos, as réplicas do mundo real são proibitivamente caras e, em muitos casos, impossíveis.

3.6.1 Aplicações de CFD em processos PSM

Fletcher e Wiley (2004) investigaram os efeitos das forças de campo na inversão da osmose e na separação do sal da água num módulo planar. Utilizando o CFX 4, descobriram que estes efeitos das forças só são significativos a baixas taxas de alimentação, é necessário condições que a concentração de sal na superfície da membrana é fortemente influenciada pela força gravitacional quando o módulo é apontado na direção do canal vertical.

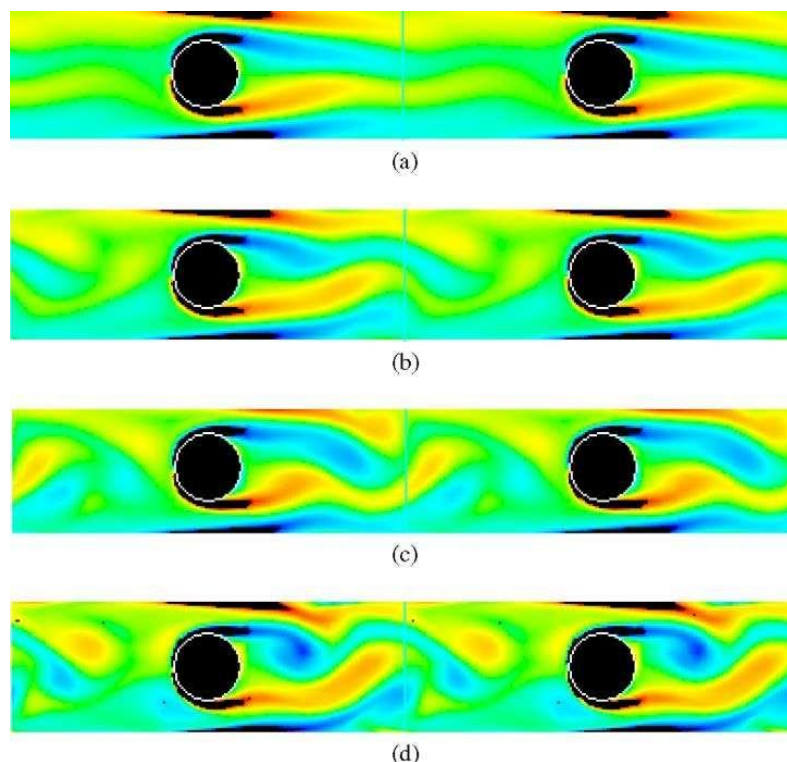
Os efeitos dos promotores de turbulência em canais podem ser vistos em estudos como Cao Wiley e Fane. (2001) que utilizou o programa ANSYS FLUENT 4.0. Os espaçadores foram empregados para aumentar a eficiência da transferência de massa da solução, melhorando o limite de concentração polarizada. Um perfil de velocidade parabólica completamente desenvolvido foi assumido na seção de entrada do canal. E foram utilizadas várias configurações de espaçadores, alternando entre submerso e zigue-zague.

Koutsou, Yiantsios e Karabelas (2004) também estudaram o uso de espaçadores dentro do canal de alimentação. Foram utilizadas diferentes

configurações de malha a fim de testar a capacidade de resposta dos resultados ao refinamento da malha. A simulação foi realizada utilizando o programa FLUENT 6.0.12 com vários valores de número Reynolds.

A Figura 11 indica que nos Reynolds mais altos aparecem vórtices com origem nas paredes.

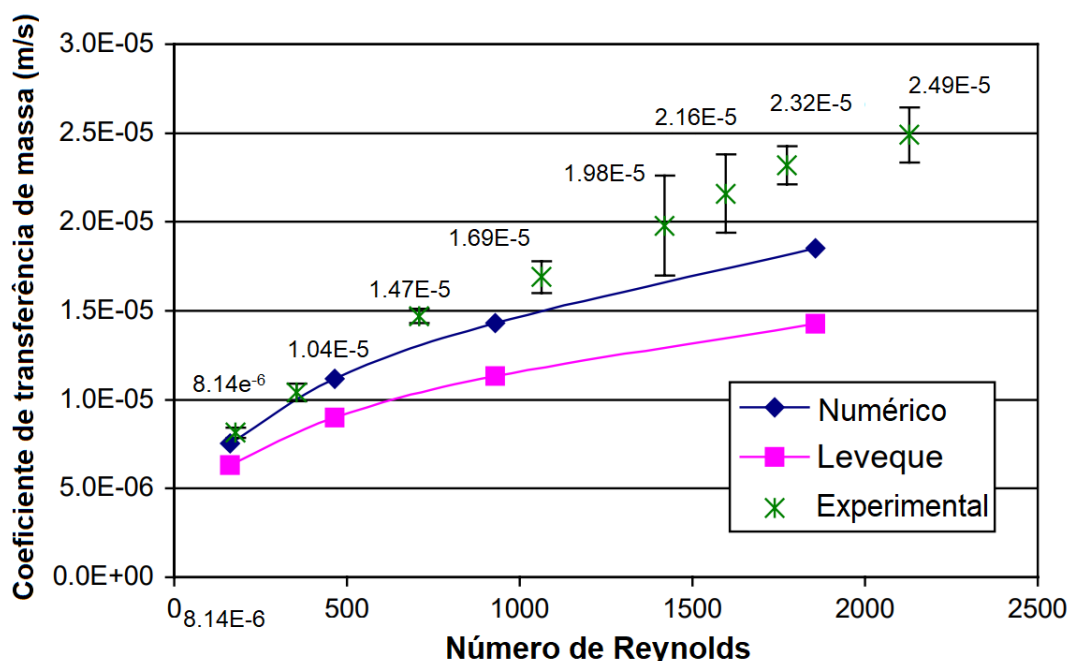
Figura 11 - Simulações mostrando a vorticidade instantânea nas simulações com os números de Reynolds de 70 (a), 90 (b), 110 (c), e 170 (d).



Fonte: Koutsou, Yiantsios e Karabelas (2004).

Liu, Peng e Vane (2004) examinaram a eficiência da transferência de massa na pervaporação do tricloroetano a partir da água, utilizando o *software* FLUENT 6.0, sem e com o uso de chicanas (promotores), respectivamente. Os resultados sugeriram que estas obstruções aumentaram o coeficiente de transferência de massa da mesma forma que o previsto pela teoria e pelos resultados experimentais. No entanto, os valores obtidos através da simulação diferiram um pouco dos obtidos experimentalmente para valores de Reynolds mais elevados, como mostrava na Figura 12.

Figura 12 - Comparação dos resultados em termos de coeficiente de transferência de massa.



Fonte: Adaptado de Liu, Peng e Vane 2004).

3.7 MODELOS TEÓRICOS PARA MEMBRANAS

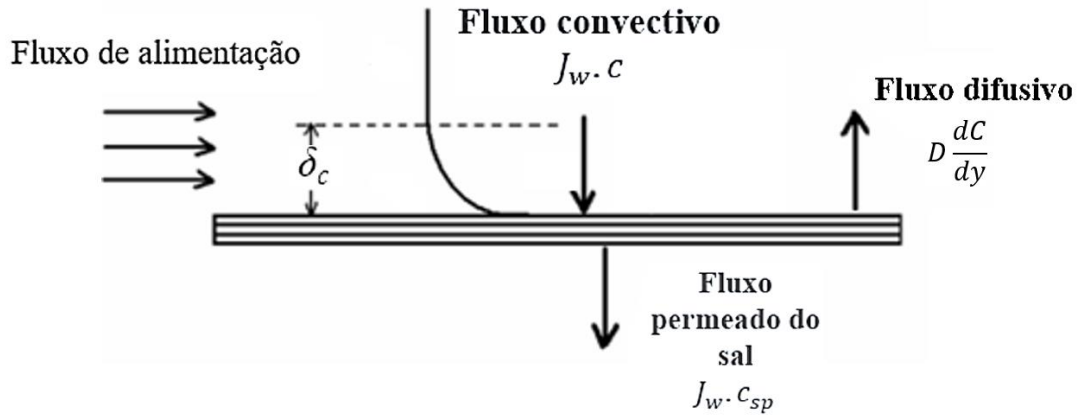
3.7.1 Teoria do Filme

A teoria do filme baseia-se no equilíbrio de massa do solvente próximo da membrana e é aplicada devido à sua simplicidade e previsão razoável do coeficiente de transferência de massa e concentração de solvente na superfície da membrana (SAEED, 2012).

Saeed (2012) também explica que, sempre que se inicia um processo de filtração, a solução fica acumulado na superfície da membrana, aumentando a concentração da solução gradualmente até que o regime permanente seja alcançado atingindo uma condição estável.

Os termos necessários para que a solução esteja em equilíbrio com a função da membrana em condições estáveis são mostrados na Figura 13.

Figura 13 - Esquemática do perfil de concentração na membrana.



Fonte: Adaptado de Saeed (2012).

Matematicamente, este fenômeno é expressado da seguinte forma (Equação 2):

$$J_w C_{sp} = J_w C + D \frac{dC}{dy} \quad (2)$$

onde C é a concentração de soluto na camada limite, C_{sp} é a concentração de soluto no permeado, D é a difusividade do soluto na solução e y é a distância a partir da superfície da membrana.

O modelo do filme tem em conta esta diferença de concentração e considera o fator da polarização de concentração no cálculo do fluxo.

Um procedimento para estimar a espessura da camada do filme pode ser calculada usando a Equação 3 para um fluxo laminar completamente desenvolvida em um canal retangular fino (KIM; HOEK, 2005).

$$\frac{\delta(x)}{x} = 1,475 \left(\frac{h}{x} \right)^{2/3} \left(\frac{D}{u_{max} h} \right)^{1/3} \quad (3)$$

onde x é a coordenada longitudinal, h é a metade da altura do canal de alimentação e u_{max} representa a velocidade máxima do fluxo no centro do canal.

Kim e Heok (2005) citam que muitos pesquisadores descobriram que a aplicabilidade da teoria do filme é justificada a sistemas de OR em condições de baixo

fluxo de permeação e alta velocidade de fluxo cruzado, que acontece na maioria das aplicações práticas.

3.7.2 Modelo de Transporte *Spiegler-Kedem*

Ghorbani, Bayati e Kikhavani (2019) cita em seu trabalho que investigadores como Kedem e Katchalsky (1963) e Spiegler e Kedem (1966), propuseram a caracterização dos mecanismos de transporte da OR utilizando equações baseadas na termodinâmica do não reversível.

Assim, pode-se ser observada, que eles consideraram a membrana como sendo uma "caixa preta" num sentido formal. As Equações 4 e 5 de transporte fornecidas pelo modelo são dadas da seguinte forma.

$$J_w = L_p(\Delta p - \sigma \Delta \pi) \quad (4)$$

$$N_s = B \Delta \pi + J_w(1 - \sigma)(c_s)_{Avg} \quad (5)$$

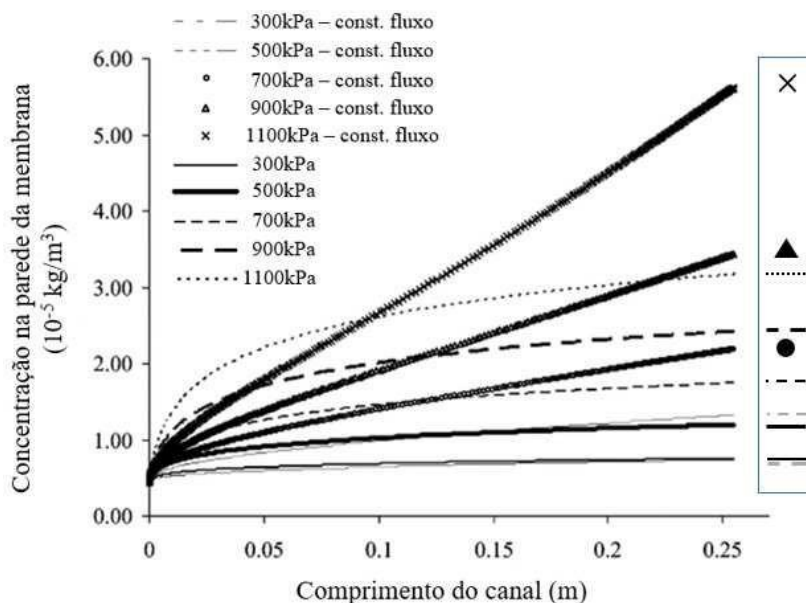
onde J_w é o fluxo do solvente (água) e N_s do soluto (sal), L_p é a permeabilidade do solvente através da membrana, P é a pressão aplicada, $\Delta \pi$ é a diferença de pressão osmótica entre as superfícies da membrana e σ é o coeficiente de reflexão.

Segundo Khalaf (2008), o coeficiente de reflexo representa a rejeição intrínseca do sal pela membrana, mas quando a rejeição da salinidade é superior a 0,98, o que é típico das separações de salinidade por osmose reversa, o pressuposto é que o σ do sal é igual à unidade.

O modelo de Spiegler e Kedem é frequentemente utilizado para descrever e analisar processos de separação por osmose reversa (OR) e nanofiltração (NF).

Nas suas simulações PSM, Ahmad e Lau (2007) utilizaram o modelo Spiegler e Kedem. Como resultado revelou que a aplicação de diferentes pressões pode afetar a forma como a camada polarizada de concentração se comporta como mostra na Figura 14 (DINIZ, 2021).

Figura 14 - Curvas de concentração utilizando o Spiegler e o Kedem modelo e fluxo constante ao longo da membrana.



Fonte: Adaptado por Diniz (2021).

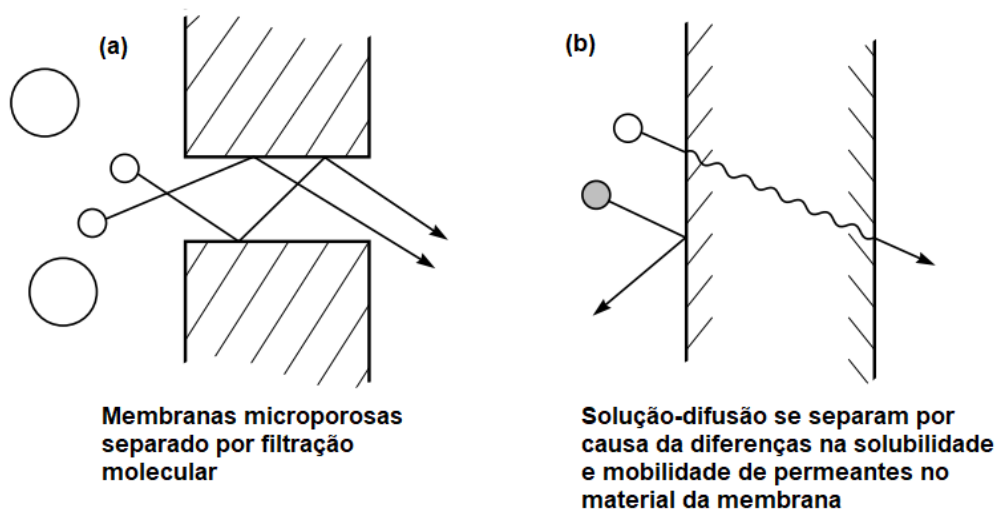
De acordo com Saeed (2012), o modelo Spiegler-Kedem combinado com o modelo teórico do filme prevê o coeficiente de transferência de massa com maior precisão do que o modelo de solução-difusão acoplado ao modelo teórico do filme. O autor também menciona que Gupta *et al.* (2007) utilizaram várias soluções de sal diluído nas suas experiências para determinar o parâmetro de polarização de concentração, o coeficiente de reflexo e a permeabilidade da solução para sistemas OR e NF.

3.7.3 Modelos de membrana não porosa ou densa

Baker (2004) explica em sua obra que a característica mais significativa das membranas em processos de separação é a sua capacidade de controlar a permeação de várias espécies.

Existem dois modelos que descrevem o processo de permeação por meio de membranas (Figura 15). O primeiro modelo descreve um escoamento capilar via membranas porosas enquanto o segundo modelo é utilizado para membranas densas e considera o mecanismo de sorção-difusão.

Figura 15 - Mecanismo de permeação. (a) membranas porosas e (b) membranas densas.



Fonte: Adaptado de BAKER, 2004.

Um destes modelos mecânicos é a membrana não porosa ou densa. Baseia-se na ideia de que as membranas não têm poros reais e observáveis, mas sim que a solução da membrana é transportada de um lado da membrana para o outro por mecanismos de convecção e/ou difusão no interior dos espaços intersticiais das cadeias poliméricas (DINIZ, 2021).

Baker (2004) também enfatiza no seu trabalho que no modelo solução-difusão, as espécies permeantes dissolvem-se no material da membrana e dispersam-se para uma região de menor concentração. Devido as diferenças na solubilidade e dispersão dos compostos constituintes, bem como na composição da membrana, a alimentação é quebrada.

Os modelos de membranas densas ou não porosa mais comuns são solução-difusão. (SD), solução-difusão estendido (ESD), e solução-difusão-imperfeição (SDI).

O modelo de solução-difusão (SD) é um dos modelos mais frequentemente utilizados para caracterizar membranas de osmose reversível. Matematicamente, o modelo de SD é dado pelas Equações 6 e 7 para caracterizar o fluxo de água e solvente.

$$J_w = A(\Delta p - \Delta \pi) = \frac{c_{wm} D_{wm} \bar{V}_w}{\Delta x R_c T} (\Delta p - \Delta \pi) \quad (6)$$

$$J_s = B(c_{sm} - c_{sp}) = \frac{D_{sm}K_s}{\Delta x}(c_{sm} - c_{sp}) \quad (7)$$

onde c_{wm} é a concentração de água na membrana e $\bar{V}_w$ é o volume molar do solvente. R_c e T significam uma constante universal e temperatura absoluta, respectivamente. Em contraste, D_{wm} e D_{sm} são responsáveis pela determinação das difusividades do solvente e do soluto dentro da membrana e A e B são suas permeabilidades.

Com base no modelo SD, a Equação 8 pode ser usada para determinar a rejeição de sal (R) (WANG *et al.*, 2014).

$$R = \frac{J_w}{J_w + B} \quad (8)$$

O modelo de transporte, que se baseia no modelo SD e aplica os efeitos da polarização da concentração através de uma equação, tem sido utilizado com sucesso para prever os resultados dos fluxos em várias condições induzidas pelo sistema (DINIZ, 2021).

Baseado no modelo ESD (Equação 9), é possível determinar a rejeição do soluto que a membrana consegue exercer.

$$\frac{1}{R} = 1 + \frac{B}{A(\Delta p - \Delta \pi)} \quad (9)$$

Já a rejeição do soluto pela membrana baseada no modelo SDI pode ser dado pela Equação 10.

$$\frac{1}{R} = 1 + \frac{B}{A(\Delta p - \Delta \pi)} + \frac{K_1 \Delta p}{A(\Delta p - \Delta \pi)} \quad (10)$$

Tanto Dijkstra *et al.* (2006) como Fierro *et al.* (2012) demonstraram excelentes ajustes de dados experimentais com os do modelo, o que levou ao seu sucesso na utilização do modelo SDI. Porém, o modelo ainda possui algumas limitações.

4 METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA CFD

Atualmente, uma vasta gama de programas e pacotes de computador desenvolvidos por grandes empresas são utilizados na solução de um grande número de problemas.

Com o desenvolvimento da tecnologia, a modelagem numérica surgiu como uma possibilidade muito interessante, uma vez que reduz drasticamente os custos, o tempo e os riscos operacionais de experiências repetidas.

O modelo da fluidodinâmica computacional ou também conhecido como *Computational Fluid Dynamic* (CFD) é uma das técnicas numéricas frequentemente utilizadas para analisar as características de escoamento e o seu comportamento hidrodinâmico.

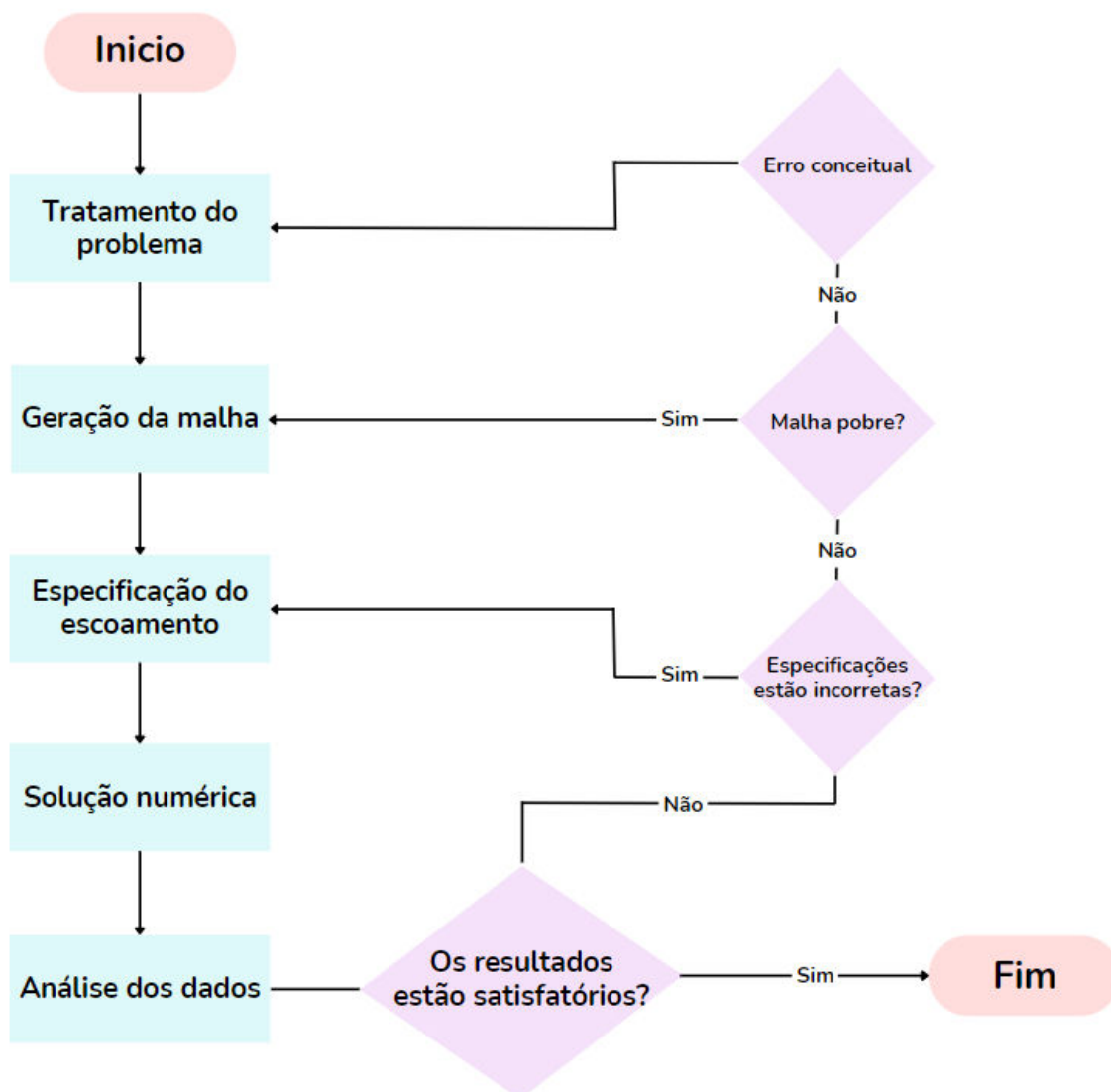
A análise do CFD é interessante porque permite prever o comportamento de um sistema físico ou físico-químico, correlacionando parâmetros e detalhando o desempenho de sistemas específicos que são desafiantes de avaliar experimentalmente (FRANÇA NETA, 2009).

É crucial enfatizar que muitos problemas não podem ser facilmente resolvidos apenas seguindo um conjunto de regras simples, e que muitas considerações feitas para uma questão podem não ser apropriadas para outra.

A pesquisa neste trabalho está ligada à modelagem e simulação de um domínio de estudo capaz de prever os fenômenos físicos presentes em um modelo de permeação com membrana de osmose reversa.

O processo de resolução de um problema físico usando CFD pode ser resumido pelo fluxograma mostrado na Figura 16, que foi proposto por SHAW (1992), e que mostra uma série de passos que devem ser seguidos para se obter a solução.

Figura 16 - Fluxograma para resolução de um problema utilizando CFD.

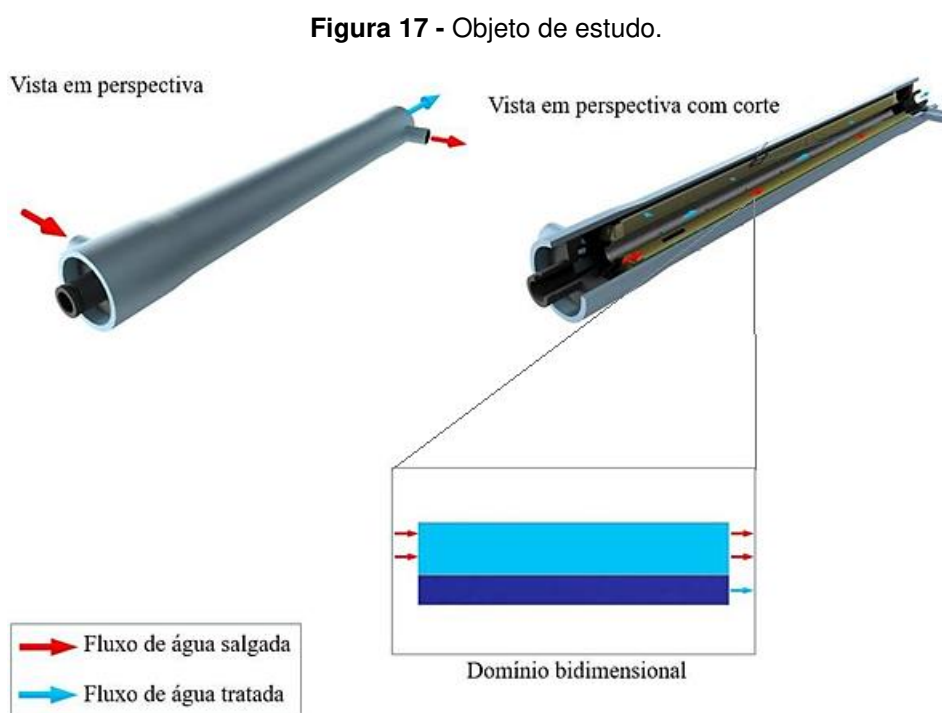


Fonte: Adaptado de SHAW (1992).

Os *softwares* escolhidos para a realização desse trabalho foram: ANSYS ICEM CFD e o ANSYS FLUENT. Onde o ICEM CFD foi para a construção das malhas e do domínio, e já o FLUENT, um programa que pode simular o fluxo de fluido e a transferência de massa em geometrias bi e tridimensionais, discretizando as equações de conservação usando o método de volumes finitos, foi para realizar a solução numérica dos modelos e análise de resultados. As simplificações adotadas e a modelagem da geometria permitiram gerar a malha numérica necessária para a utilização do Método de Volumes Finitos.

4.2 PROBLEMA FISICO E OBJETO DE ESTUDO

O estudo analisa o processo de separação por osmose reversa, e o objeto de estudo é um modelo de permeação em forma de espiral (Figura 17) com uma membrana composta que inclui uma película fina de poliamida (TFC). Essa escolha do objeto de estudo foi dada como base do trabalho de Diniz (2021) onde justifica-se pelo fato de ser o mais popular e dominante no mercado, tanto em termos de forma como de tipo de material de membrana (ISMAIL; KHULBE; MATSUURA, 2018; OREN; BIESHEUVEL, 2018).



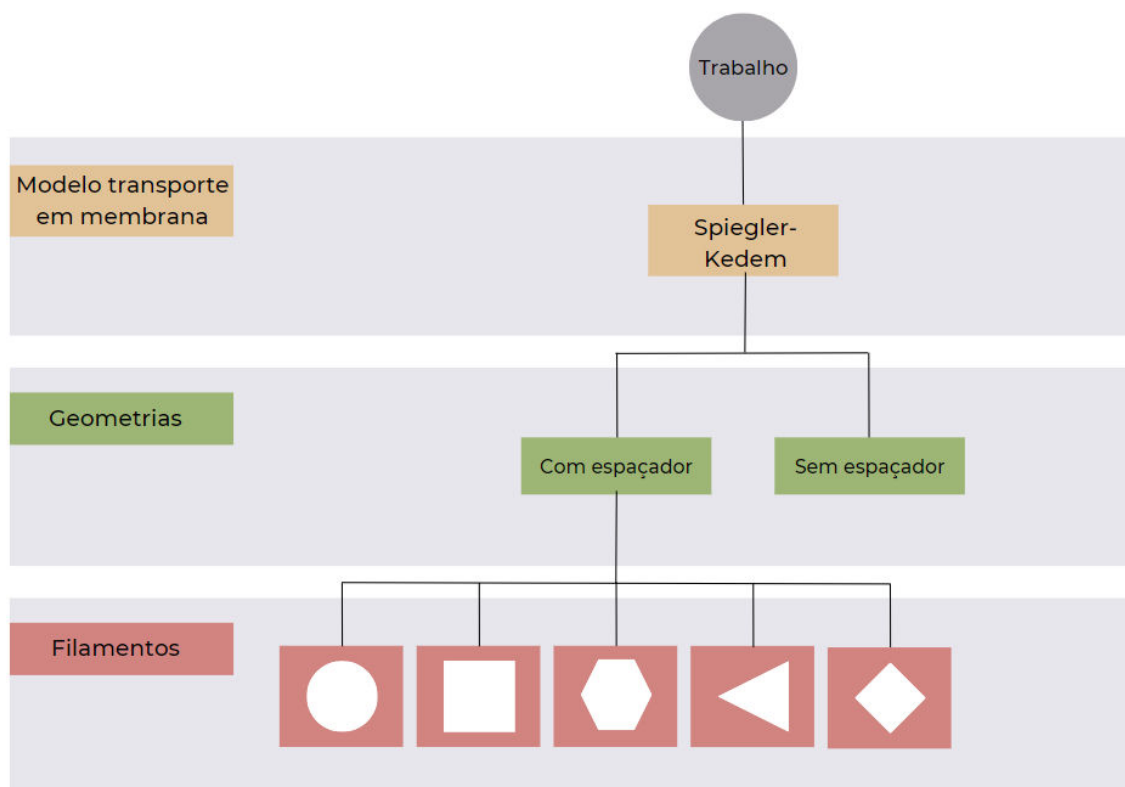
Fonte: Diniz (2021).

4.3 PARAMETROS GEOMÉTRICOS

Este trabalho possui estudos propostos baseados em domínios bidimensionais, onde apresenta propostas com suas características peculiares de cada simulação entre as diferentes geometrias dos espaçadores. A Figura 18 mostra um fluxograma que representa o procedimento que foi utilizado neste trabalho.

Para criar os domínios em estudo foi utilizado o *software* ANSYS ICEM CFD, que permite visualizar, dimensionar as geometrias aplicadas, e caracterizar cada região ou zona de interesse.

Figura 18 - Fluxograma para o estudo proposto.



Fonte: Própria do autor.

Após os estudos, começaram as fases de desenvolvimento da geometria do componente e criação das malhas numéricas.

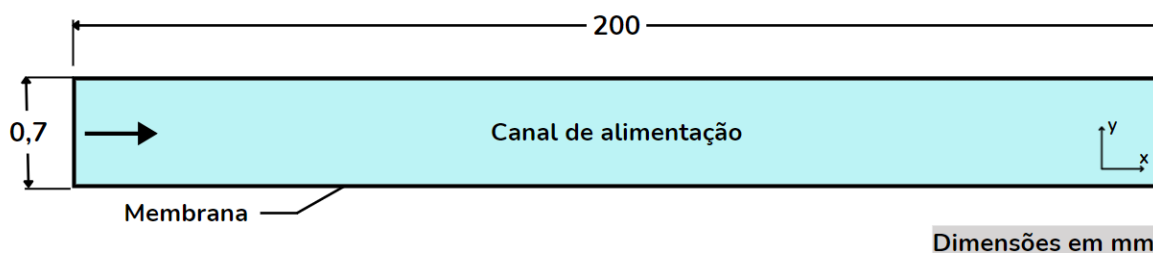
4.3.1 Geometria dos canais de alimentação

Neste estudo, foi construída uma geometria com um canal vazio (sem o uso de espaçador), e cinco canais com geometrias diferentes de espaçador, dispostos com arranjo do tipo submerso para realização das simulações.

Primeiro foi feita uma geometria sem espaçadores com dimensões de 200 mm de comprimento e 0,7 mm de altura, utilizada para análise fluidodinâmica do processo.

Onde é constituída pelo canal de alimentação e composto por uma interface, que contém o efeito da membrana, como mostra na Figura 19. As dimensões adotadas nesse trabalho foram baseadas no trabalho de Diniz (2021), Ahmad *et al.* (2005b) e De Pinho; Semião; Geraldês (2002). A seta preta indica o sentido do escoamento.

Figura 19 - Geometria do canal sem espaçador.



Fonte: Própria do autor.

Em relação a todas as geometrias com espaçadores, as dimensões principais são de 69 mm comprimento e 2 mm de altura do canal de alimentação com 5 espaçadores para cada caso. Além disso, uma outra geometria sem os espaçadores foi criada com as mesmas dimensões para realizar as comparações dos resultados.

As construções propostas foram baseadas em relações adimensionais entre os valores do tamanho do canal e as suas dimensões do espaçador. Estas relações podem ser encontradas nas obras de Amokrane *et al.* (2016), Keir (2012), Schwinge, Wiley e Fletcher (2002) e Fimbres-Weihs, Wiley e Fletcher (2006).

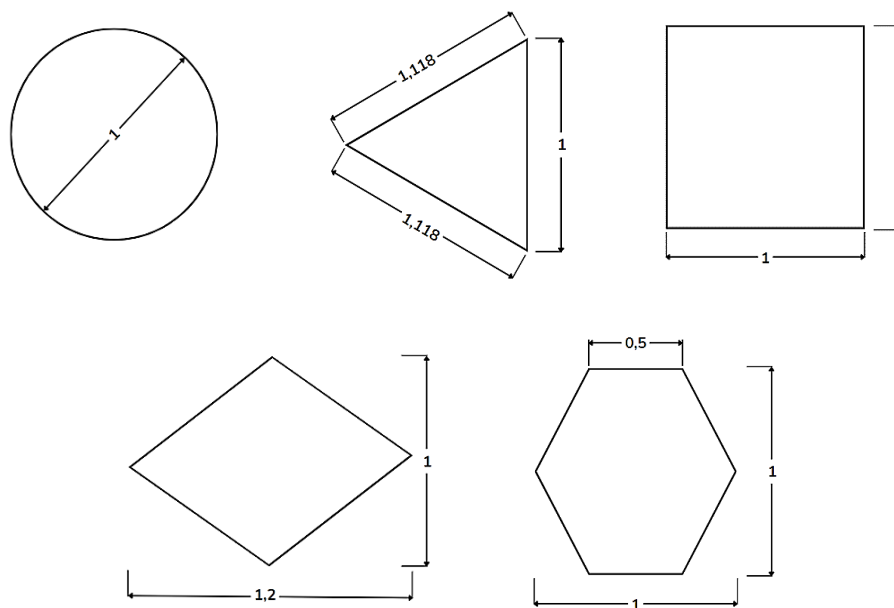
Com base no trabalho de Diniz (2021) e nas relações das dimensões foram construídas com os valores da distância entre o início do canal da alimentação e o centroide do primeiro filamento de 12 mm, distância entre os centroides dos espaçadores de 8 mm e a distância entre o centroide do último filamento e o fim do canal da alimentação de 25 mm.

4.3.2 Geometria dos espaçadores

Os cinco tipos diferentes de espaçadores utilizados têm as formas de círculo, triângulo isósceles, losango, quadrado, e hexágono convexo, cujas dimensões

internas são mostradas na Figura 20.

Figura 20 - Geometria dos espaçadores.



Fonte: Própria do autor.

4.4 GERAÇÃO DAS MALHAS NUMÉRICAS

Os modelos de domínio computacional foram construídos utilizando o *software* ANSYS ICEM CFD 15.0 porque, ao utilizar finitos de volumes como método de discretização para resolver equações, torna-se necessário construir um modelo de domínio numérico para cada domínio em estudo.

Após a realização das geometrias, foram definidas as zonas de entrada e saída do fluido, paredes e a interface com as condições de membrana, em seguida, foi feito a blocagem, o pré-meshs e a conversão do elemento de saída da malha do arquivo para o ANSYS FLUENT.

Para a construção das malhas, existe uma peculiaridade, pois há uma necessidade de um aumento de densidade de números de células próximas tanto da superfície da membrana quanto dos espaçadores, devido à presença de fatores que causa um maior gradiente nos constituintes variáveis do processo, como por exemplo

a polarização da concentração.

Os trabalhos dos autores Ahmad *et al.* (2005a), Amokrane, Sadaoui e Dudeck (2015) e Keir (2012). Ahmad e Lau (2007) recomendam que a altura da primeira célula mais próxima das superfícies deve ter magnitudes inferiores a $2,5 \times 10^{-7}$ metros.

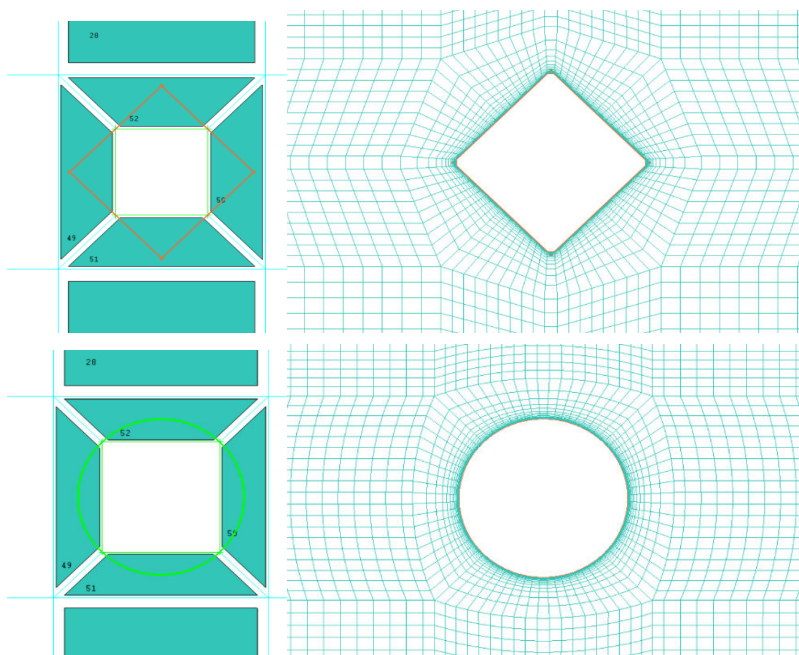
A Figura 21 destaca as regiões de refinamento da malha próximas à área em que o efeito da membrana e a Figura 22 mostra as regiões próximas as superfícies dos espaçadores com suas malhas refinadas.

Figura 21 - Refinamento da malha próximo à área da membrana.



Fonte: Própria do autor.

Figura 22 – Blocagem e refinamento e nas regiões próximas ao espaçador.



Fonte: Própria do autor.

Para avaliar a qualidade das malhas, foi usado o critério de *quality* do ICEM CFD, sendo que as malhas mostraram valores acima de 0,8 sendo considerados satisfatórios, conforme o trabalho de Diniz (2021).

4.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DA SOLUÇÃO

Neste presente trabalho, o estudo consta com uma solução que escorre pelo canal de alimentação e pela membrana, onde essa solução é composto por água e cloreto de sódio (NaCl). Considerou-se as características físicas desse tipo de solução aquosa que variam de acordo com a fração mássica (m_a) a uma temperatura de $25 \pm 0,5$ °C e utilizando um parâmetro com o número de Reynolds no *inlet* de 70 para todos os domínios.

Geraldes, Semião e De Pinho (2001) sugeriram equações que representam a densidade (ρ), a viscosidade (μ) e a difusividade (D_{AB}) da solução em uma densidade para uma fração mássica do cloreto de sódio menor que 0,09 kg/kg. Tais valores podem ser observadas nas Equações 11 - 13.

$$\rho = 997,1(1 + 0,696m_a) \quad (11)$$

$$\mu = 0,89(1 + 1,63m_a)10^{-3} \quad (12)$$

$$D_{AB} = \begin{cases} 1,61(1 - 14m_a)10^{-9}, & m_a < 0,006 \\ 1,45 \times 10^{-9}, & m_a < 0,006 \end{cases} \quad (13)$$

Para implementar essas propriedades físicas no ANSYS *Fluent*, foi necessário criar rotinas de *User Defined Function* (UDF) em linguagem C para cada característica física da solução. Onde essas rotinas foram, então, integradas ao modelo de estudo do software.

4.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno de entrada (*inlet*) são definidas pela entrada de um

escoamento totalmente desenvolvido com uma certa fração mássica do NaCl (Equação 14).

$$inlet \left\{ \begin{array}{l} u = 6V_m \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \\ v = 0 \\ m_a = m_a^{inlet} \end{array} \right. \quad (14)$$

Em que V_m é a velocidade média de entrada indicada pelo número de Reynolds na frente de entrada. Foi escolhido um valor da fração mássica do NaCl de $m_a = 0,002$ kg/kg, tal valor foi tirado como base dos trabalhos de Amokrane *et al.* (2016) e (2015) e Fletcher e Wiley (2004).

A Equação 15 é usada para encontrar a velocidade média, utilizando o número de Reynolds (Re).

$$V_m = \frac{Re * 0,89(1 + 1,63m_a^{inlet}) \times 10^{-3}}{h * 997,1(1 + 0,69m_a^{inlet})} \quad (15)$$

Para as condições de saída (Equação 16) foi usada a condição *pressure outlet*, aplicando uma pressão p_a^{outlet} na saída do canal, essa condição considera o escoamento do fluxo totalmente desenvolvido assim como a distribuição da fração mássica.

$$outlet \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial m_a}{\partial x} = 0 \\ p = p_{atm} \end{array} \right. \quad (16)$$

Para as condições de contorno para as paredes ou *wall* é considerado o fato de não haver escorregamento e que as paredes são impermeáveis (Equação 17).

$$wall \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = 0 \\ \frac{\partial m_a}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

Nos casos das geometrias com espaçadores, suas superfícies foram modeladas de forma semelhante às propriedades das paredes, ou seja, como impermeáveis e sem escorregamento (Equação 18).

$$espac \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = 0 \\ \frac{\partial m_a}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

Já as condições de contorno para a membrana foram primeiramente determinadas como uma parede semipermeável, sem escorregamento e baseou-se na modelagem mostrada no trabalho de Amokrane *et al.* (2016). Seguindo o autor, foram obtidos dados experimentalmente para uma solução aquosa de NaCl em um canal de membrana vazio, como $\Delta p = 8,103 \times 10^5$ Pa e uma fração de massa de 0,002 kg/kg. Os valores são da rejeição de sal $R = 0,99$ e a constante da resistência da membrana $R_m = 1,562 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$.

Utilizando as equações baseadas na teoria do filme do modelo de Spiegler-Kedem, as condições aplicadas na superfície da membrana foram utilizadas pela equação que vincula a polarização da concentração e o fluxo permeado que pode ser observada na Equação 19.

$$memb \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ J_v = \frac{1}{R_m \mu} (\Delta P - \Delta \pi) \\ J_v R m_a = -D_{AB} \frac{\partial m_a}{\partial y} \end{array} \right. \quad (19)$$

Onde J_v é o fluxo de permeado que varia ao longo da parede da membrana de acordo com a pressão transmembrana ΔP e a pressão osmótica $\Delta \pi$ e μ é a viscosidade

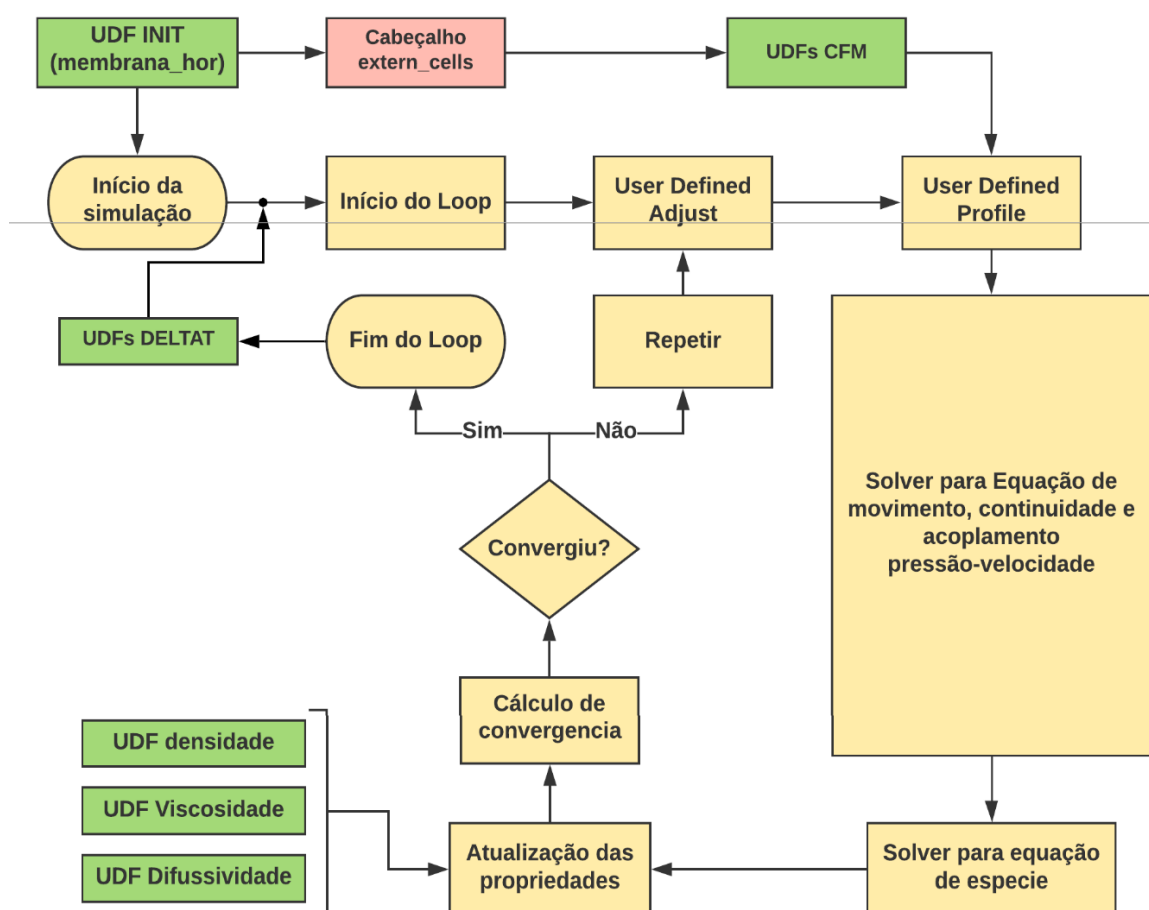
dinâmica da água pura.

4.7 METODOS PARA A SIMULAÇÃO

O programa ANSYS FLUENT tem limitações na implementação de equações para caracterizar algumas ações no solucionador, como ilustração, o uso de uma equação para descrever as características físicas de um fluido (DINIZ, 2021). Com isso, foi preciso ter o conhecimento e o uso das UDFs, como implementar e desenvolver a sua estrutura de código.

A Figura 23 mostra uma série de etapas que foram executadas pelo *software* escolhido.

Figura 23 – Fluxograma dos procedimentos de solução acoplados com as UDFs.



Fonte: Diniz (2021).

Segundo Diniz esse fluxograma mostra onde cada UDF criado, em verde, é incorporado, junto com os procedimentos para a solução do solver baseado em pressão mostrados em amarelo. Esse fluxograma ajuda a entender como os UDFs afetam a solução e como o solucionador lida com eles, bem como a entender a estrutura na qual um UDF deve ser programado.

Essa estrutura organizacional foi usada em todos os casos propostos para este trabalho.

4.8 MÉTODOS NUMÉRICOS

Seguindo a linha de raciocínio dos autores Ahmad *et al.* (2005a), Sousa (2013), Amokrane *et al.* (2015) e Diniz (2021) que usaram os métodos de soluções numéricas escolhidas para problemas com dessalinização de água por membrana, para esse trabalho foi utilizado os seguintes métodos.

Para a discretização espacial foi utilizado os métodos: *Least Squares Cell-Based* para determinação do gradiente, para discretização das equações de pressão e momento foi utilizado o *Upwind* de segunda ordem e para a discretização das equações de espécie foi utilizado o método *Upwind* de primeira ordem.

E por fim foi selecionado o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), que trabalha na fase relacionada à solução das equações de movimento e da equação de média, foi escolhido.

Em relação a modelagem matemática todos os domínios realizados nesse estudo foram tratados em regime permanente, considerando um processo isotérmico e adiabático e o efeito da gravidade foi desprezado.

Nas simulações as condições iniciais na solução foram com valores de velocidade inicial adotados para as células na zona de alimentação e a fração mássica de NaCl com um valor de zero e o número iterações escolhido de 10000 e um critério de convergência de 1×10^{-7} , onde apresentava bons resultados.

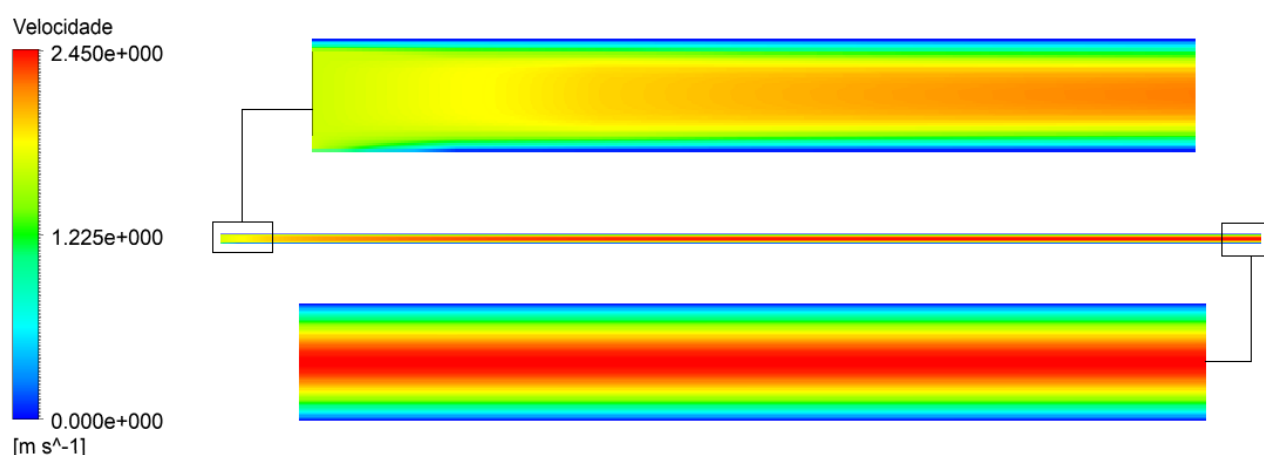
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Primeiro foram realizadas simulações com o domínio 2D sem espaçador para analisar a distribuição de velocidades no canal de alimentação, para este trabalho foi optado, como padrão, na entrada do canal um número de Reynolds de 70.

É possível perceber que a velocidade do fluido se encontra nula quando está em contato com a superfície e que, desde a entrada, o fluido vai se estabilizando ao longo do canal de alimentação e os maiores valores de velocidade se encontram ao centro do canal, conforme mostra na Figura 24.

Figura 24 – Distribuição de velocidade no canal de alimentação.



Fonte: Própria do autor.

Com esse domínio é possível observar os efeitos hidrodinâmicos e as características de um perfil de velocidade laminar clássico sob efeitos viscosos das paredes, apresentando um comportamento parabólico se desenvolvendo ao longo do canal de alimentação.

Observa-se que há variação da fração mássica ao longo do canal no domínio 2D sem espaçador (Figura 25), onde é possível encontrar um gradiente de concentração do sal na região da membrana.

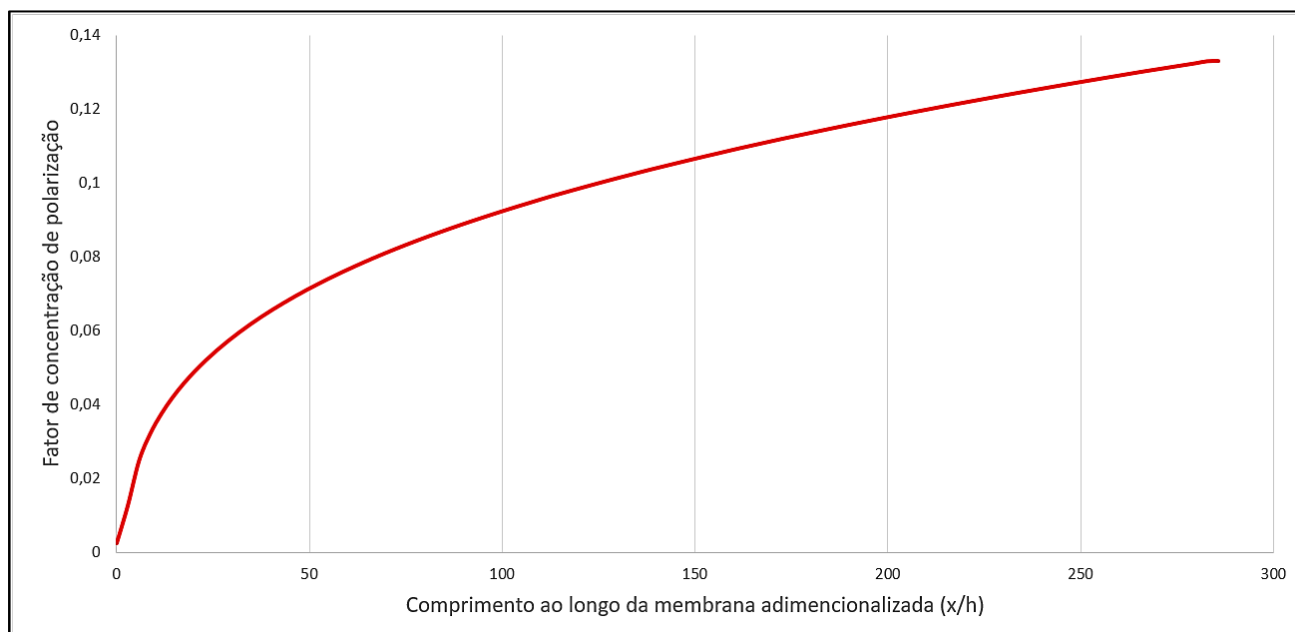
Figura 25 – Distribuição da fração mássica do soluto no canal de alimentação.



Fonte: Própria do autor.

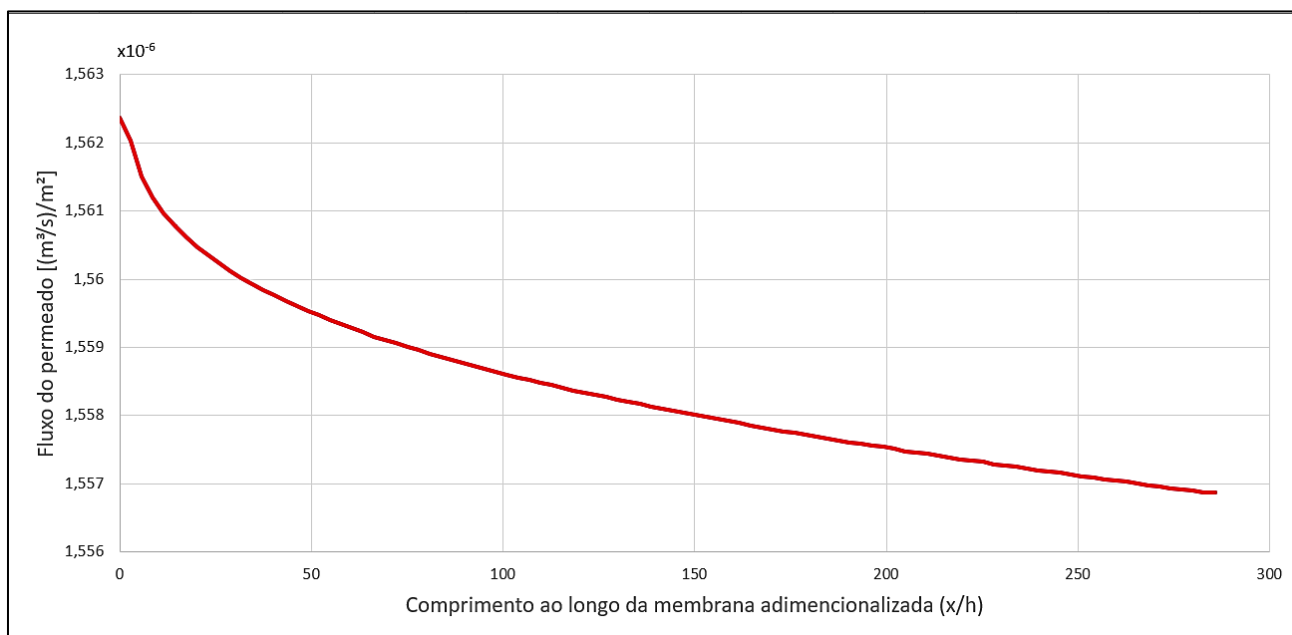
Nas Figura 26 e 27, é possível observar o comportamento do fato de concentração em função do comprimento adimensional da membrana (x/h) e o fluxo permeado no canal sem o espaçador, respectivamente.

Figura 26 – Espessura da camada polarizada.



Fonte: Própria do autor.

Figura 27 - Perfil do fluxo permeado sem espaçador.

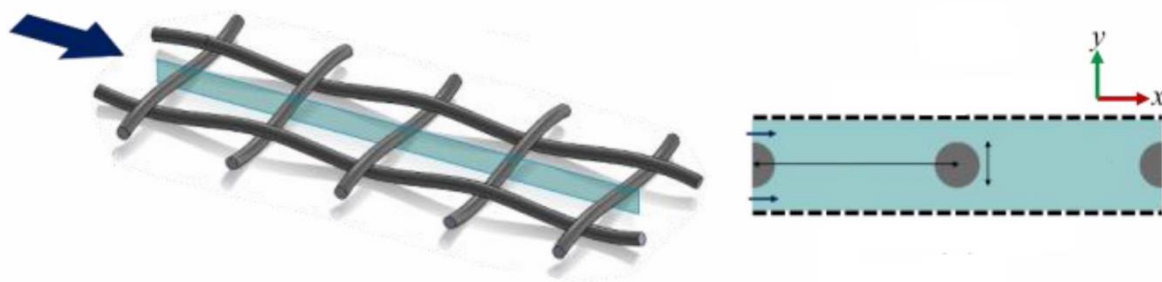


Fonte: Própria do autor.

5.2 GEOMETRIA COM ESPAÇADORES

Os resultados nesse tópico foram obtidos por simulações que utilizaram um domínio bidimensional com os espaçadores dispostos em arranjo do tipo submerso, como mostra a Figura 28. No início, foi empregado um perfil parabólico totalmente desenvolvido com um número de Reynolds de 70 e uma fração mássica de 0,002.

Figura 28 – Representação esquemática dos espaçadores no canal de alimentação com arranjo submerso.



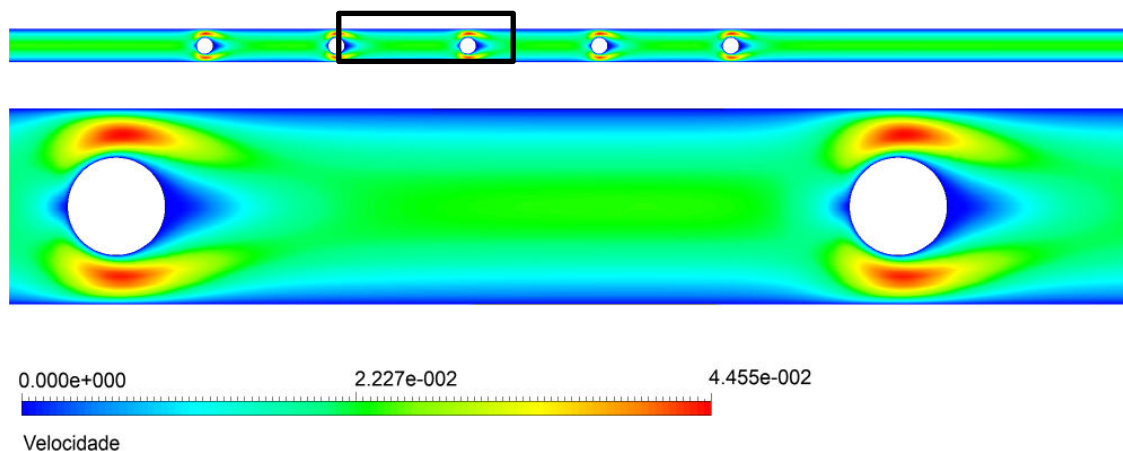
Fonte: Adaptado de Gu (2021).

Nas subseções seguintes é possível comparar aos resultados de uma distribuição para um canal sem espaçador, onde a presença de espaçadores no domínio causa uma mudança no campo de velocidade.

5.2.1 Espaçador do tipo círculo

Para o caso com espaçadores do tipo circular são apresentados o campo de velocidade (Figura 29) e fração mássica (Figura 30) presentes nos canais de alimentação.

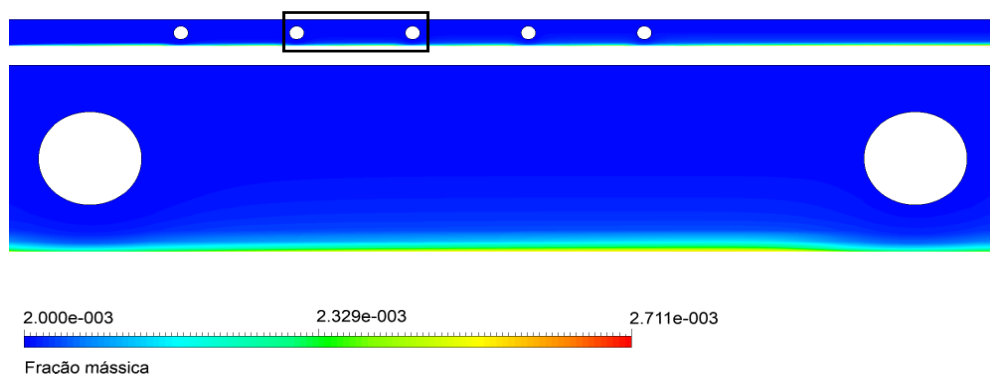
Figura 29 – Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador circular.



Fonte: Própria do autor.

É possível observar na Figura 29 que a presença dos espaçadores gera um estrangulamento no fluxo de alimentação, resultando em um campo local de alta velocidade que aumenta a força de arrasto da solução nas vizinhanças da superfície da membrana e, como resultado, causa a sua limpeza. Porém, devido à baixa pressão e o formato do escoamento que se forma imediatamente após o espaçador, o fluxo tem a tendência de se alinhar no meio do canal, formando uma região de esteira ou “calda de cometa”, desacelerando-o e reduzindo o efeito do arrasto próximo à membrana. Isso estimula o acúmulo da solução entre os filamentos na região seguinte, o que aumenta a espessura da camada de concentração polarizada. Tais efeitos também podem ser observadas no trabalho de Diniz (2021).

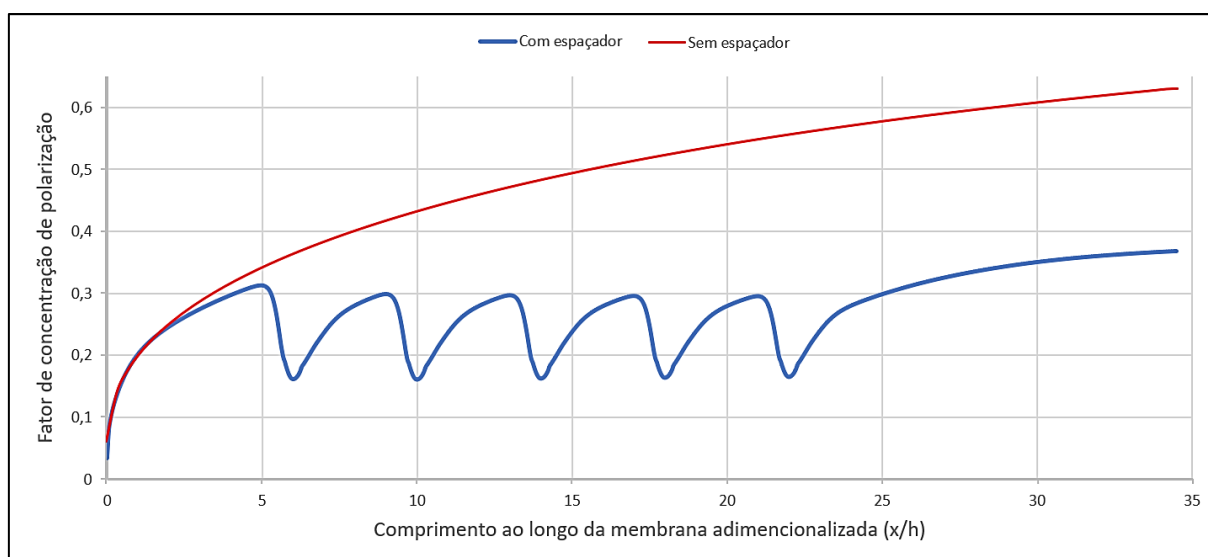
Figura 30 – Fração mássica para domínio com espaçador circular.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 31 apresenta a comparação do fator de concentração de polarização (Γ) do caso em questão com o domínio sem o uso de espaçadores em função do comprimento adimensional ao longo da superfície da membrana.

Figura 31 – Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.



Fonte: Própria do autor.

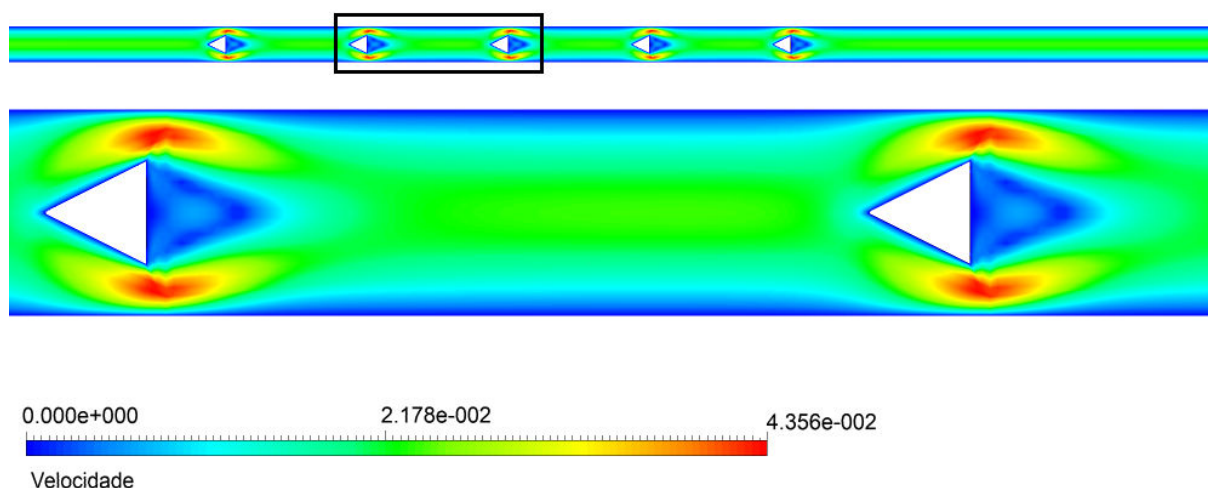
É possível observar, comparando as curvas, o efeito dos espaçadores causando uma mudança no comportamento mássico do escoamento e causando uma diminuição no fator de concentração de polarização, ocasionando a diminuição da concentração do soluto na membrana. Tal comportamento é observado por Ahmad, Lau e Abu Bakar (2005) e os resultados se assemelham aos obtidos nos trabalhos de Diniz (2021).

Utilizando a métrica da média do fator de concentração de polarização para os casos com espaçadores circulares, foi possível quantificar esse efeito, produzindo valores medianos de 0,01065065 para a curva com espaçador e 0,017757 para a curva sem o uso de espaçadores, obtendo uma redução de 40% nos valores de $\Gamma_{\text{méd}}$ ao longo da superfície. Já em relação da perda por unidade de comprimento (P/L) causada pela presença dos espaçadores, o valor é de 138,58 Pa/m, que corresponde a 3,38 vezes o valor sem o uso de espaçadores.

5.2.2 Espaçador do tipo triângulo

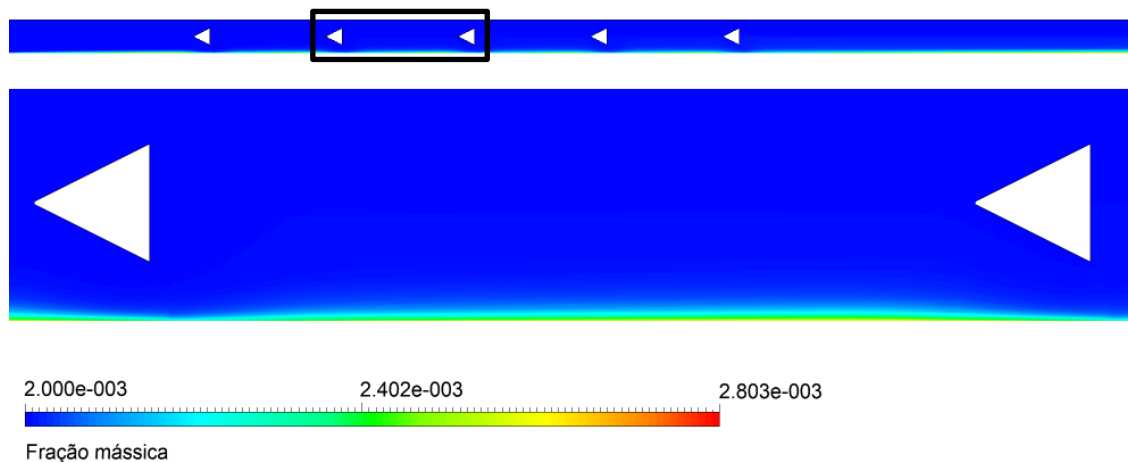
Para o caso com espaçadores do tipo triangular são expressadas nas Figuras 32 e 33, onde mostra o campo de velocidade e fração mássica, respectivamente, presentes nos canais de alimentação.

Figura 32 – Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador triangular.



Fonte: Própria do autor.

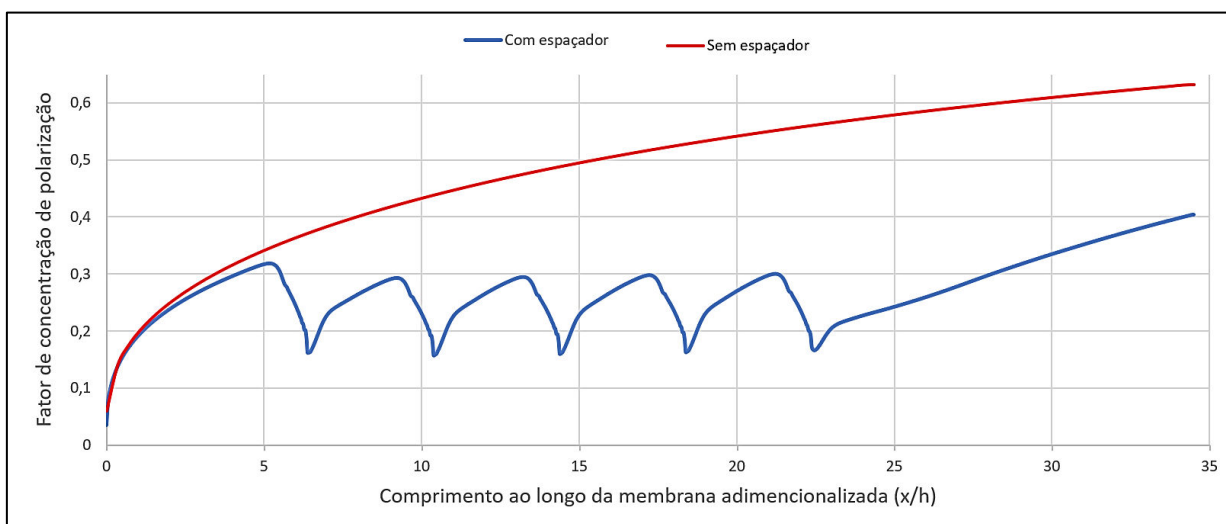
Figura 33 – Fração mássica para domínio com espaçador triangular.



Fonte: Própria do autor.

A comparação do fator de concentração de polarização e ao longo da superfície da membrana com e sem espaçador para esse caso é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.



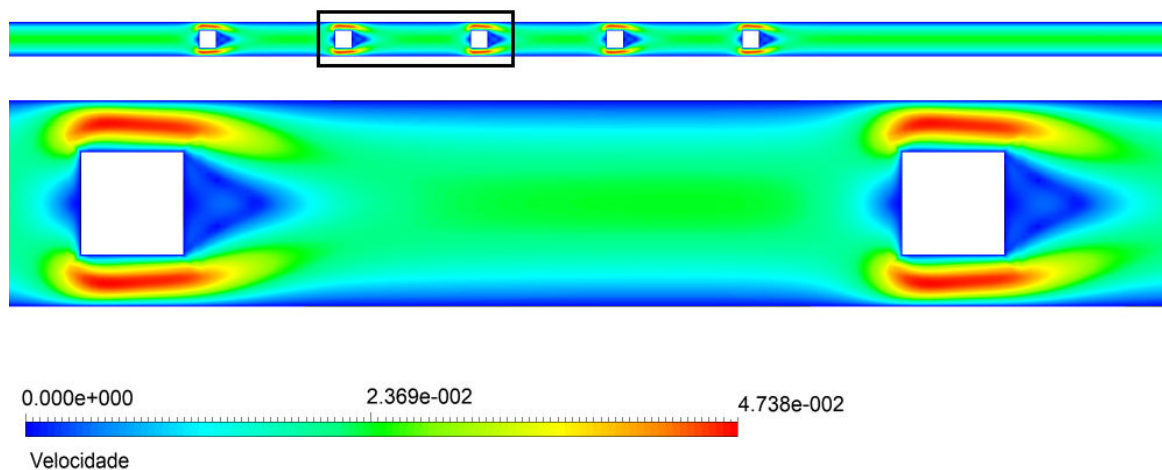
Fonte: Própria do autor.

Empregando a métrica do fator de concentração de polarização para o uso dos espaçadores triangulares, foi dado valores medianos de 0,0111262 com o uso dos espaçadores obtendo uma redução de 37% nos valores de Γ ao longo da superfície e uma perda de carga por unidade de comprimento (P/L) de 145,04 Pa/m que é cerca de 3,54 vezes sem o uso de espaçadores.

5.2.3 Espaçador do tipo quadrado

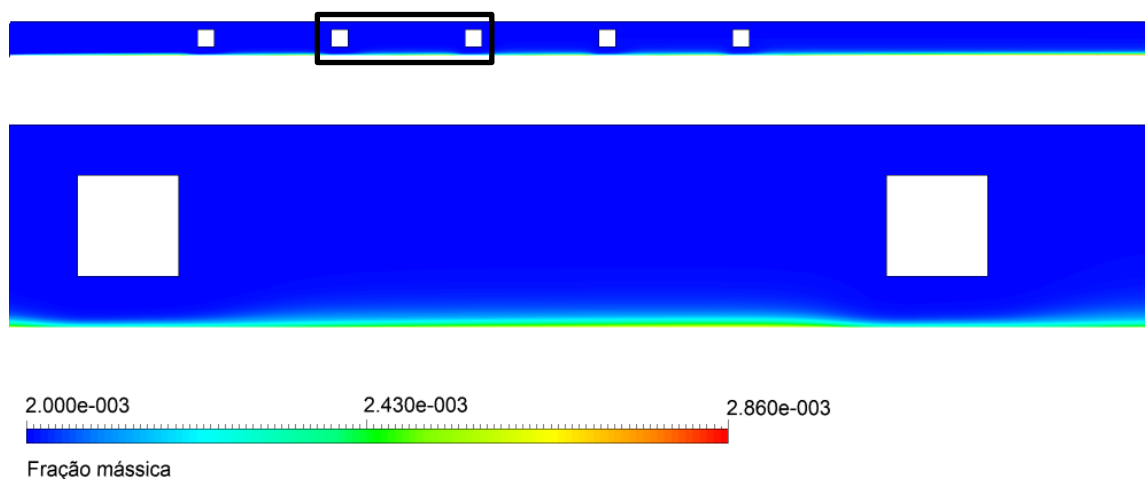
As Figuras 35 e 36 para o caso com espaçadores com a geometria do tipo quadrado ilustram os campos de velocidades e a distribuição de fração mássica, respectivamente.

Figura 35 – Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador quadrilátero.



Fonte: Própria do autor.

Figura 36 – Fração mássica para domínio com espaçador quadrilátero.

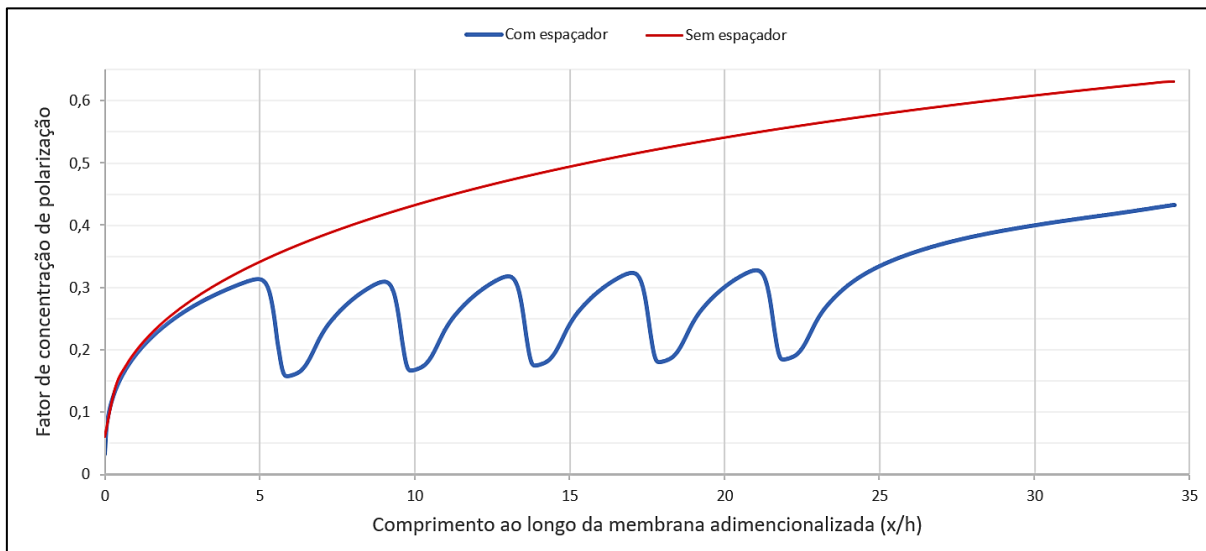


Fonte: Própria do autor.

Já a Figura 37 mostra a comparação do fator de concentração de polarização

com e sem espaçador quadrado ao longo do comprimento da membrana no canal de alimentação.

Figura 37 – Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.



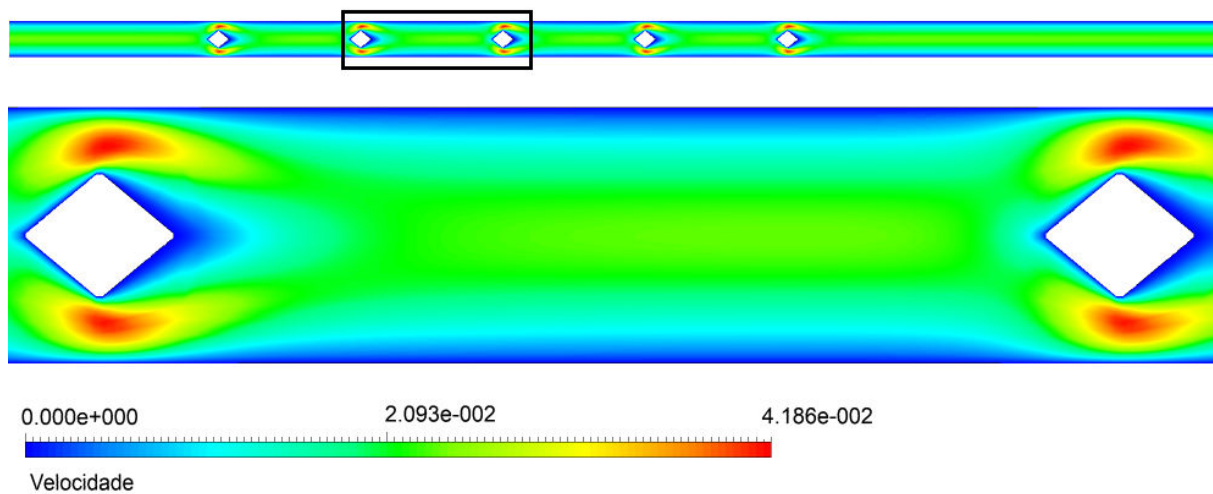
Fonte: Própria do autor.

Já para casos de espaçadores do tipo quadrado, a métrica do fator de concentração de polarização foi de valores medianos equivalente a 0,0125729, que corresponde à apenas uma redução de 29% nos valores de Γ ao longo da superfície em comparação sem os espaçadores, a sua perda de carga por unidade de comprimento (P/L) causada pela presença dos espaçadores, o valor é de 217,4 Pa/m que é 5,30 vezes o valor sem os espaçadores.

5.2.4 Espaçador do tipo losango

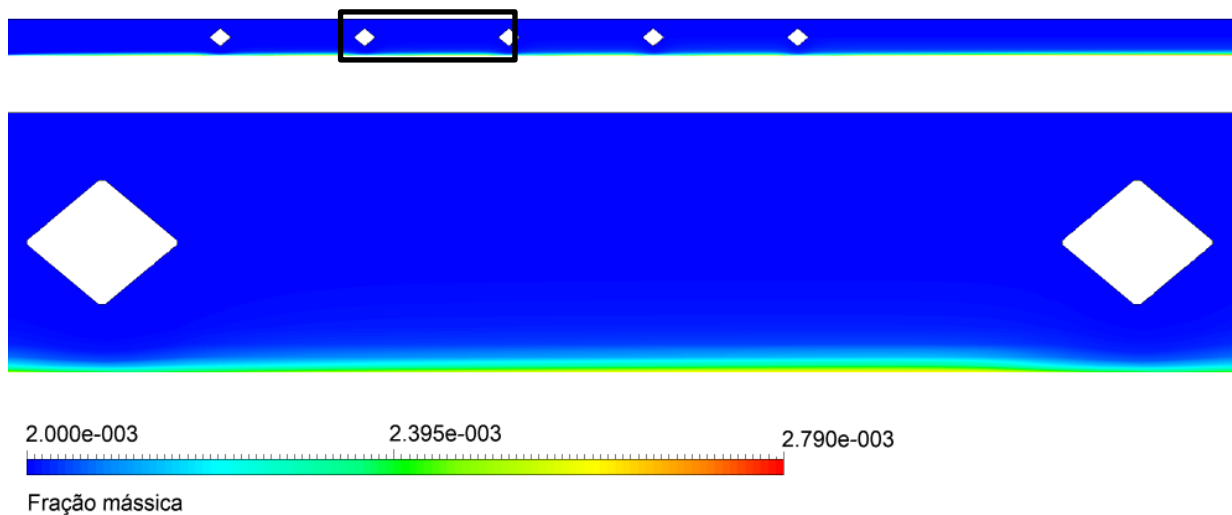
Para os casos com promotores com formas de losangos foram apresentadas as distribuições de velocidade e fração mássica do soluto nas Figuras 38 e 39 respectivamente.

Figura 38 – Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador tipo losango.



Fonte: Própria do autor.

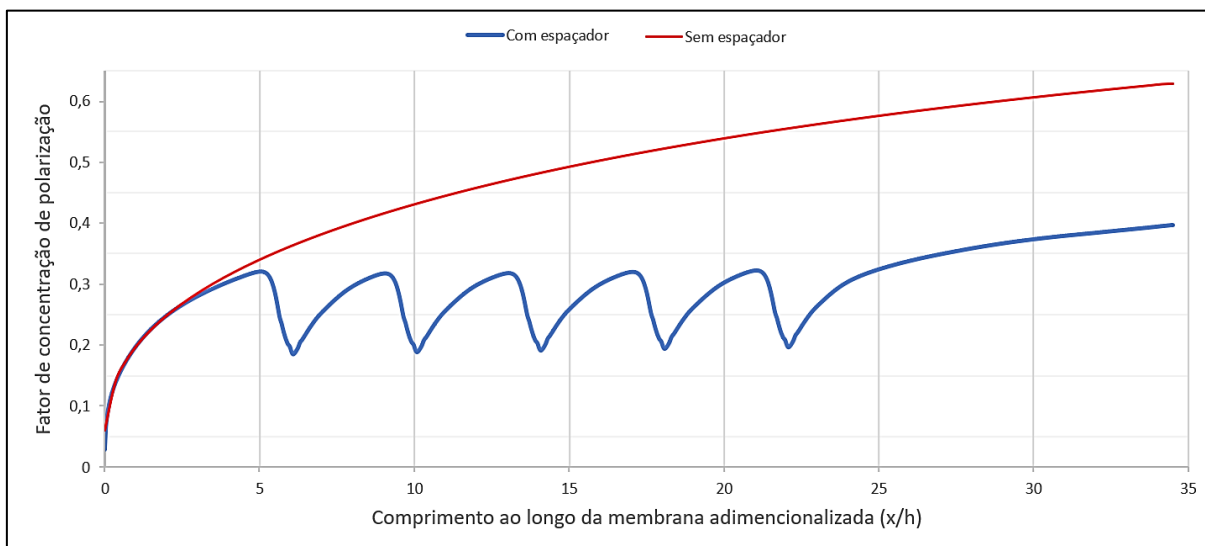
Figura 39 – Fração mássica para domínio com espaçador tipo losango.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 40 apresentam as curvas do fator Γ para o espaçador do tipo losango.

Figura 40 - Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.



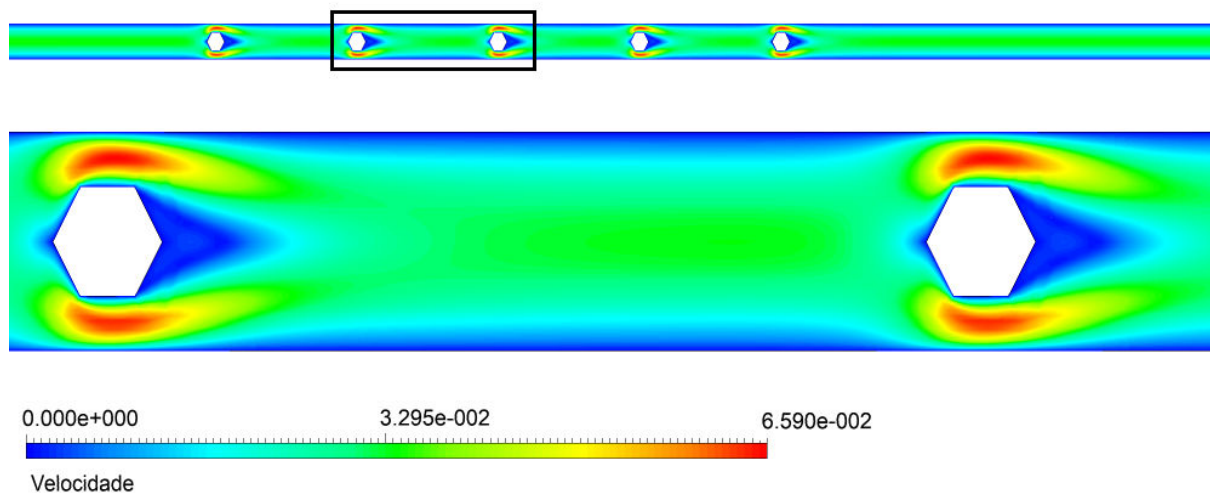
Fonte: Própria do autor.

Para o uso dos espaçadores do tipo losango métrica SPMP obteve valores medianos de Γ ao longo da superfície de 0,0159217, onde corresponde à uma redução de 10% em relação aos valores sem o uso de espaçadores. A perda de pressão por unidade de comprimento obteve o valor é de 117,0404 Pa/m com o uso dos espaçadores que é apenas 2,85 vezes o valor sem os espaçadores.

5.2.5 Espaçador do tipo hexágono

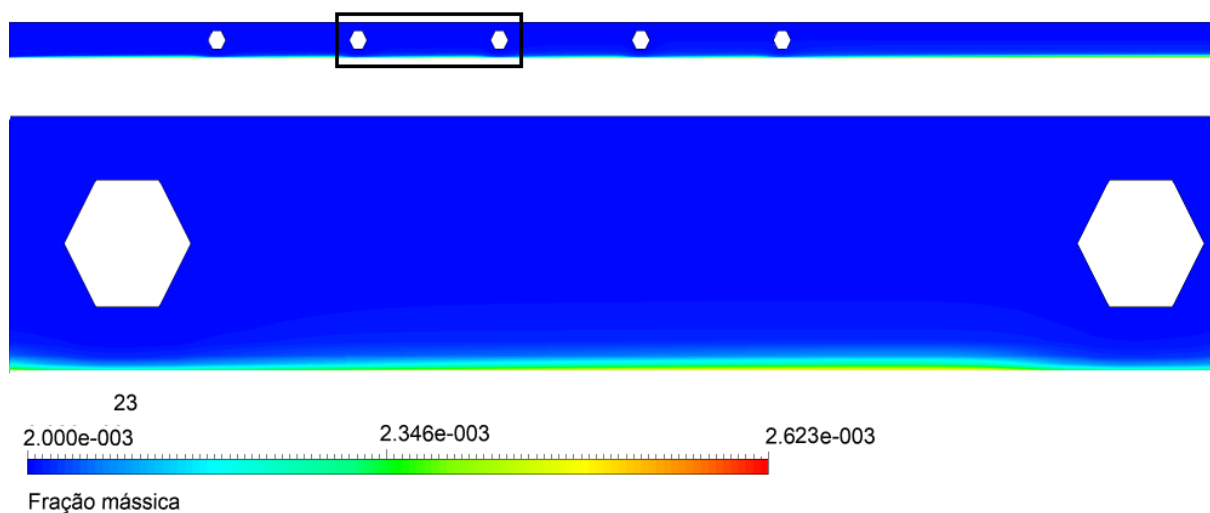
Por fim também foi analisado o caso com o uso de promotores com formas hexagonais. Referente a essa geometria foram obtidos os campos de velocidade (Figura 41) e de fração mássica do soluto (Figura 42).

Figura 41 – Campo de velocidade em m/s para domínio com espaçador hexagonal.



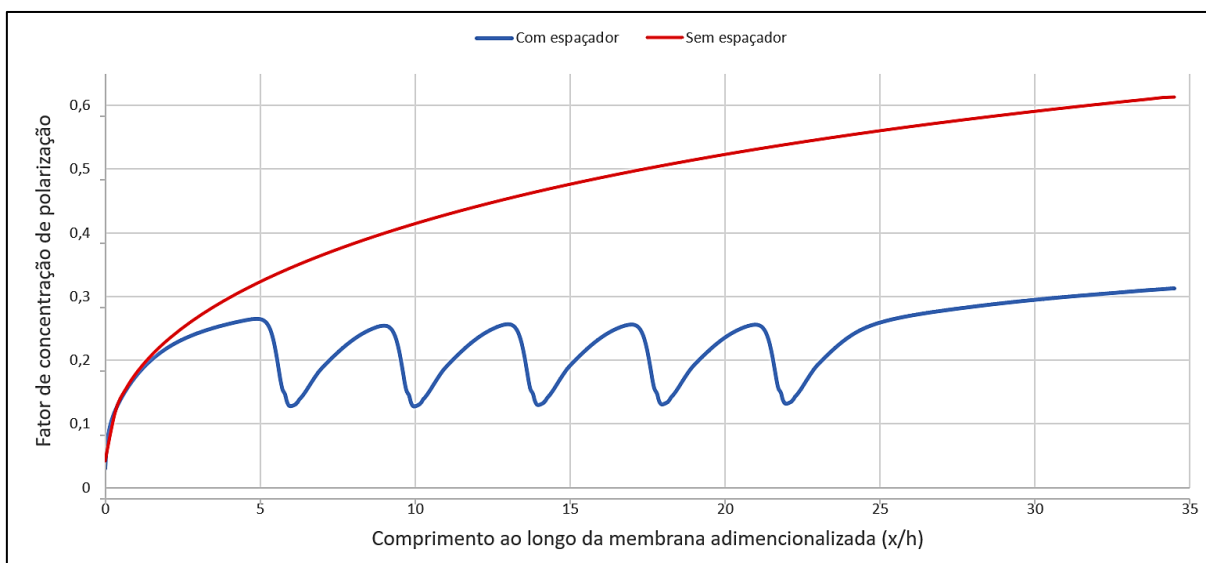
Fonte: Própria do autor.

Figura 42 – Fração mássica para domínio com espaçador hexagonal.



Fonte: Própria do autor.

O parâmetro do fator Γ é mostrado na Figura 43 para o caso de geometria com e sem o espaçador hexagonal, ambos com as mesmas condições de confinamento.

Figura 43 – Curvas do fator Γ para domínio com e sem espaçador.

Fonte: Própria do autor.

Por fim, calculando o SPMP do caso que possui espaçadores de geometria hexagonais o valor de médio de Γ ao longo da superfície, alcançou valores de 0,0079702 para as curvas com os espaçadores que é uma redução de 55% do fator comparando com um canal sem o espaçador. Com uma perda de pressão por unidade de comprimento de 717,4 Pa/m que é 5,82 vezes o valor sem o uso de espaçadores.

5.3 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS ESPAÇADORES

Pana analisar o desempenho dos arranjos e das geometrias dos espaçadores foi utilizado a métricas da Razão de Performance do Espaçador (SPMP), que é calculada por meio da Equação 20, de acordo com Schwinge, Wiley e Fletcher (2002).

$$SPMP = \frac{\Delta c_{\text{espaçador}} / \Delta c_{\text{sem espaçador}}}{\Delta P_{\text{espaçador}} / \Delta P_{\text{sem espaçador}}} \quad (20)$$

onde Δc representa a diferença de concentração da fração mássica e ΔP é a diferença de pressão entre a saída e entrada do canal de alimentação. Um espaçador é dito como mais eficiente quando apresenta o maior valor SPMP dentre os promotores analisados.

A Tabela 2 mostra os valores da diferença da fração mássica, a perda de pressão por unidade de comprimento (P/L) encontrado e o SPMP calculado para cada caso.

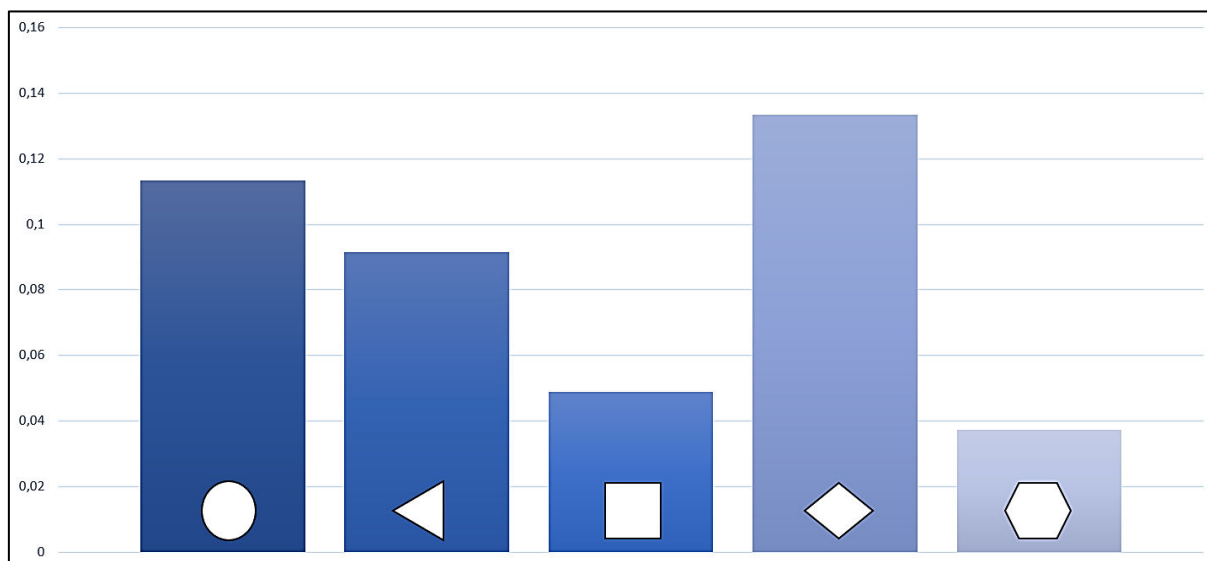
Tabela 2 - Valores SPMP para os casos com arranjos submersos

Geometria	Δc	$\Delta P/L$	SPMP
Sem espaçador	$6,38 \times 10^{-3}$	41,03	-
Circulo	$2,44 \times 10^{-3}$	138,58	0,1134103
Triangulo	$2,06 \times 10^{-3}$	145,04	0,0914635
Quadrado	$1,65 \times 10^{-3}$	217,43	0,0487999
Losango	$2,43 \times 10^{-3}$	117,04	0,1334301
Hexágono	$1,39 \times 10^{-3}$	238,98	0,0343110

Fonte: Própria do autor.

A Figura 44 resume os valores médios dos parâmetros SPMP para as geometrias de espaçadores estudados

Figura 44 – Valores médios de SPMP dos espaçadores estudados.



Fonte: Própria do autor.

Ao comparar os dados obtidos pelos parâmetros SPMP da Figura 43, é possível observar que a geometria do espaçador do tipo losango obteve os valores mais

satisfatórios, juntamente com os promotores circulares.

Com os valores das áreas das seções transversais para as diferentes geometrias e utilizando um mesmo parâmetro de profundidade para todos os casos foi possível justificar os resultados obtidos, seguindo a equação da vaziosidade (Equação 1) citada na seção 3.5 pelos autores Al-Amshawee *et al.* (2022).

Os resultados também estão de encontro com o que Schwinge, Wiley e Fletcher (2002) citam em seu trabalho. Onde os valores do SPMP aumentam para filamentos com diâmetros menores para qualquer configuração, porque comparado com o canal vazio, a perda de pressão diminui significativamente com a área do filamento.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, as técnicas de CFD foram usadas para estudar e prever o comportamento hidrodinâmico em canais de alimentação de uma membrana de dessalinização com espaços de filamentos de diferentes geometrias posicionados em um arranjo submerso e através do escoamento, além de poder analisar a camada de polarização por concentração, que é uma característica do processo de dessalinização por membrana. Foi possível pontuar as seguintes conclusões.

- Ao comparar as curvas, é possível ver o efeito benéfico dos espaçadores na luta contra a camada polarizada
- Os valores obtidos pelo parâmetro SPMP revelaram que as geometrias estudadas os espaçadores do tipo losangos e círculos foram as que apresentaram melhores resultados dentre os casos.
- Proporcionou ao acadêmico um abrangente conhecimento teórico e prático sobre o processo de dessalinização utilizando o processo de Osmose Reversa, o uso das técnicas e métodos CFD, bem como sobre sua aplicabilidade no campo da fluidodinâmica computacional.
- Estes resultados ressaltam uma importante constatação que a presença dos espaçadores conduz a um aumento do fluxo de permeado através da membrana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, A. L. L.; LAU, K. K.; BAKAR, M. Z. Z. Ab.; SHUKOR, S. R. Abd. Modified Boundary Condition for Membrane Wall Concentration Prediction in Narrow Membrane Channel. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, [s. l.], v. 1, n. 1, 2005. a.
- AHMAD, A. L. L.; LAU, K. K.; BAKAR, M. Z. Z. Ab.; SHUKOR, S. R. Abd. Integrated CFD simulation of concentration polarization in narrow membrane channel. *Computers e Chemical Engineering*, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 2087–2095, 2005. b.
- AHMAD, A. L.; LAU, K. K. Modeling, Simulation, and Experimental Validation for Aqueous Solutions Flowing in Nanofiltration Membrane Channel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 46, p. 1316–1325, 2007.
- Alves, Thais de Lima. Filho, Olavo Barbosa. Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação. DCMM- PUC-Rio. 210p. Tese de Doutorado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006
- AL-AMSHAWEE, Sajjad Khudhur Abbas; HUSAIN, Mohamed Saad Bala; YUNUS, Mohd Yusri Bin Mohd; AZMIN, Nor Fadhilah Mohamed; LEKAN, Oladosu Temidayo. Extruded and overlapped geometries of feed spacers for solution mixing in electrochemical reactors and electrodialysis-related processes. *Chemical Engineering Communications*. Pahang, Malásia, p. 1-25. fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00986445.2022.2042271>. Acesso em: 06 maio 2022.
- AMOKRANE, M.; SADAoui, D.; KOUTSOU, C. P.; KARABELAS, A. J.; DUDECK, M. A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 477, p. 139–150, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738814008655>>
- AMOKRANE, Mounir; SADAoui, Djamel; DUDECK, Michel; KOUTSOU, Chrysafenia P. New spacer designs for the performance improvement of the zigzag spacer configuration in spiral-wound membrane modules. *Desalination and Water Treatment*, [s.l.], v. 57, n. 12, p. 5266–5274, 2016.
- BAKER, R. W. *Membrane Technology and Applications*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 0-470-85445-6.
- CAO, Z.; WILEY, D. E.; FANE, A. G. CFD simulations of net-type turbulence promoters in a narrow channel. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 185, n. 2, p. 157–176, 2001.
- DE PINHO, Maria Norberta; SEMIÃO, Viriato; GERALDES, Vítor. Integrated modeling of transport processes in fluid/nanofiltration membrane systems. *Journal of Membrane*

Science, [s. l.], v. 206, n. 1–2, p. 189–200, 2002.

DINIZ, D. D. S., Estudo da fluidodinâmica da dessalinização das águas salobras via osmose reversa: modelagem e simulação. 2021. 248f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2021.

FARREL, Kevin J. Reduced membrane fouling potential by tailored fluidstructure, 2008.

FIMBRES-WEIHS, G. A.; WILEY, D. E.; FLETCHER, D. F. Unsteady flows with mass transfer in narrow zigzag spacer-filled channels: A numerical study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 45, p. 6594–6603, 2006.

FLETCHER, D. F.; WILEY, D. E. A computational fluids dynamics study of buoyancy effects in reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 245, n. 1–2, p. 175–181, 2004.

FRANÇA NETA, Luzia Sergina De. Análise de técnicas de caracterização da transferência de massa em módulos de microfiltração. 2009. Universidade Federal do Rio De Janeiro, [s. l.], 2009.

FRISCHKORN, H.; ROCHA NETO, J. L. Osmose Reversa: Limpeza química em membranas de dessalinizadores do Ceará. *Rev. Tecnol., Fortaleza*, v.30, n.1, p. 61-76, 2009.

Geraldes, V. Flow and mass transfer modelling of nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 191(1-2), 109–128. 2001 .doi:10.1016/s0376-7388(01)00458-6

GERALDES, Vítor; SEMIÃO, Viriato; DE PINHO, Maria Norberta. Flow and mass transfer modelling of nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 191, n. 1–2, p. 109–128, 2001.

GHORBANI, Asma; BAYATI, Behrouz; KIKHAVANI, Tavan. MODELLING ION TRANSPORT IN AN AMINE SOLUTION THROUGH A NANOFILTRATION MEMBRANE. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. Fapunifesp, p. 1667-1677. Não é um mês valido! 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590%2F0104-6632.20190364s20190068>. Acesso em: 14 abr. 2022.

Gu, B.; Adjiman, C.S.; Xu, X.Y. Correlations for Concentration Polarization and Pressure Drop in Spacer-Filled RO Membrane Modules Based on CFD Simulations. *Membranes* 2021, 11, 338. <https://doi.org/10.3390/membranes11050338>

ISMAIL, Fauzi; KHULBE, Kailash Chandra; MATSUURA, Takeshi. Reverse Osmosis. Cambridge: Elsevier, 2018. v. 1

KEIR, Gregory Peter. Coupled modelling of hydrodynamics and mass transfer in membrane filtration by. *Separation and Purification Technology*, [s. l.], n. Hons I, 2012.

KHALAF, T. Y. Estimation of Concentration Polarization Using the Combined Film theory/ Spiegler-Kedem Model and Empirical Correlation. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 322–328, 2008. Disponível em: <https://nahje.com/index.php/main/article/view/527>. Acesso em: 16 apr. 2023.

KIM, Suhan; HOEK, Eric M. V. Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes. *Desalination*, [s. l.], v. 186, n. 1–3, p. 111–128, 2005.

KOUTSOU, C. P.; YIANTSIOS, S. G.; KARABELAS, A. J. Numerical simulation of the flow in a plane-channel containing a periodic array of cylindrical turbulence promoters. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 231, n. 1–2, p. 81–90, 2004.

LIU, S.X.; PENG, M.; VANE, L.M. CFD modeling of pervaporative on mass transfer in the boundary layer. *Journal of Membrane Science*, v. 59, p. 5853-5857, 2004.

MOREIRA, André. Impactos físico-químicos da disposição de rejeito de dessalinizadores das águas de poços em solos do oeste potiguar. 2016. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [s. l.], 2016.

MOURA, J. P.; MONTEIRO, G. S.; SILVA, J. N.; PINTO, F. A.; FRANÇA, K. P. Aplicações Do Processo De Osmose Reversa Para O Aproveitamento De Água Salobra Do Semi-Árido Nordeste. *Revista águas subterrâneas*, [s. l.], 2008.

OREN, Y. S.; BIESHEUVEL, P. M. Theory of Ion and Water Transport in Reverse-Osmosis Membranes. *Physical Review Applied*, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 024034, 2018.

DE MOURA, J. P.; MONTEIRO, G.; SILVA, J.; PINTO, F.; FRANÇA, K. APLICAÇÕES DO PROCESSO DE OSMOSE REVERSA PARA O APROVEITAMENTO DE ÁGUA SALOBRA DO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2008.

PORCIÚNCULA, C. B. da. Simulação Fluidodinâmica Computacional de Processos de Separação Por Membranas. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SAEED, Asiem. Effect of feed channel spacer geometry on hydrodynamics and mass transport in membrane modules. 2012. [s. l.], 2012.

SCHWINGE, J.; WILEY, D. E.; FLETCHER, D. F. Simulation of the flow around spacer filaments between channel walls. 2. Mass-transfer enhancement. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, [s. l.], v. 41, n. 19, p. 4879–4888, 2002

SILVA, Gustavo Lima. Fator de polarização e coeficiente de permeabilidade em um sistema de osmose reversa acionado por gerador fotovoltaico. 2012. Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2012.

SOUSA, Paula Cristina dos Santos. Estudo da hidrodinâmica em canais de

alimentação de uma membrana de dessalinização. 2013. Universidade De Trás-Os-Montes E Alto Douro, [s. l.], 2013.

SUASSUNA, João. Água potável no semi-árido: escassez anunciada. [s. l.], 1999. p. 1–4. Disponível em: <http://www.fundaj.gov.br>.

SHAKAIB, M.; HASANI, S. M. F.; & MAHMOOD, M. Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling. *Journal of Membrane Science*, 297(1-2), 74–89. 2007. doi: 10.1016/j.memsci.2007.03.010

SHAW, C.T. Using Computational Fluid Dynamics. Department of Engineering. University of Warwick – Prentice Hall – 1992.

WHO; UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019. [s. l.], 2019.