



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Unidade Acadêmica de Engenharia Química
Programa de Pós-graduação em Engenharia Química
Laboratório de Referência em Dessalinização

Mestrando

Osmar Batista de Souza Neto

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE MEMBRANAS PARA
DIFERENTES GRADIENTES DE CONCENTRAÇÕES DE SAIS DISSOLVIDOS NAS
ÁGUAS DE ALIMENTAÇÃO SOB PRESSÃO CONSTANTE**

Campina Grande – PB

2024

OSMAR BATISTA DE SOUZA NETO

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE MEMBRANAS PARA
DIFERENTES GRADIENTES DE CONCENTRAÇÕES DE SAIS DISSOLVIDOS NAS
ÁGUAS DE ALIMENTAÇÃO SOB PRESSÃO CONSTANTE**

Dissertação apresentada a Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Kepler Borges França (PhD)

Campina Grande – PB

2024

S729d

Souza Neto, Osmar Batista de.

Desempenho de um sistema híbrido de membranas para diferentes gradientes de concentrações de sais dissolvidos nas águas de alimentação sob pressão constante / Osmar Batista de Souza Neto. – Campina Grande, 2024.

72 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França".

Referências.

1. Sistema de Híbrido de Membranas. 2. Dessalinização. 3. Osmose Inversa. 4. Ultrafiltração. 5. Monitoramento de Operação. I. França, Kepler Borges. II. Título.

CDU 678.7(043)

OSMAR BATISTA DE SOUZA NETO

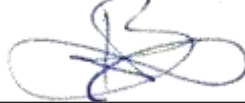
**DESEMPENHO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE MEMBRANAS PARA
DIFERENTES GRADIENTES DE CONCENTRAÇÕES DE SAIS DISSOLVIDOS NAS
ÁGUAS DE ALIMENTAÇÃO SOB PRESSÃO CONSTANTE**

Dissertação apresentada a Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Kepler Borges França (PhD)

Avaliado em 06/05/2024

BANCA EXAMINADORA



Prof. Kepler Borges França (PhD)
(UAEQ/CCT/UFCG) – Orientador



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
(UAEQ/CCT/UFCG) – Examinador



Dra. Bruna da Silveira Guimarães
(CCT/UFCG) – Examinadora

“Dedico este trabalho, em especial, aos meus pais, Aliomar e Ayra, por todo apoio e incentivo nesta longa jornada de estudos. Eles, que em muitas situações, acreditaram mais do que eu mesmo no meu potencial”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui.

Aos meus pais, Aliomar e Ayra, que se dedicaram, sacrificaram, abdicaram de tempo e muitos projetos pessoais para que eu tivesse a oportunidade de estudar e ter uma formação profissional.

Ao meu orientador, Kepler Borges França, por ter me orientado durante o desenvolvimento do presente trabalho, sempre atencioso para me auxiliar.

A Mayara, João, Maiza, Roberto, Bruna, Carolina por todo apoio, companheirismo e troca de conhecimento.

Aos companheiros da oficina, Wellerson e Welber. Por todo apoio, dedicação e parceria.

Aos meus irmãos, Aliomar Júnior e Yara, pela amizade e apoio. Aos meus familiares, pelo afeto e admiração.

A Kelly e Edileuza, pelo apoio e cuidado.

Aos meus amigos, por cada conselho, companheirismo, noites de estudos e baladas. Que nossa amizade prevaleça cada vez mais forte.

A todos os membros do LABDES, por se fazerem presentes direta ou indiretamente sempre que a necessidade surge.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que este dia chegasse, depois de uma longa caminhada. Muito obrigado!

RESUMO

A água é um recurso natural muito importante para a vida de todas as espécies que habitam a terra. No entanto, está sendo afetada devido às mudanças climáticas, baixa qualidade e quantidade. O presente trabalho visa estudar o desempenho de um sistema híbrido de membranas ultrafiltração/osmose inversa, para fins de tratamento de águas salobras, em que o concentrado gerado em cada experimento, serve como alimentação dos experimentos subsequentes. Os experimentos para diferentes concentrações de sais no sistema híbrido, foram conduzidos no Centro de Testes de Tecnologia de Dessalinização (CTTD) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) acampado no âmbito do LABDES/UFCG, com processos de transferência de massa, na concepção de tratamentos de águas com tecnologia tendo membranas poliméricas, somando com o aprendizado das caracterização de águas dos processos, através de análises físico químicas, bacteriológicas e pressão de operação. A pressão de operação trabalhada nos experimentos foi de 7,12 kgf/cm², simulada pelo *Winflows 4.03*, sob as condições da qualidade de água que alimenta o experimento 01. Observou-se que o custo da água produzida pelo sistema híbrido de membranas dependeu do nível da concentração de sais dissolvidos da água de alimentação. O experimento 01 que apresenta uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, foi o experimento com maior eficiência do sistema e menor custo de produção, tendo uma taxa de recuperação de água tratada de 24,86% e um custo de produção de 2,77 R\$/m³.

Palavras-chave: Sistema de membranas, osmose inversa, ultrafiltração, dessalinização, monitoramento de operação.

ABSTRACT

Water is a very important natural resource for the life of all species inhabiting the earth. However, it is being affected due to climate change, low quality, and quantity. The present work aims to evaluate the performance of a hybrid system of ultrafiltration/reverse osmosis membranes, for the treatment of brackish waters, in which the concentrate generated in each experiment serves as the feed for subsequent experiments. The experiments for different concentrations of salts in the hybrid system were conducted at the Desalination Technology Testing Center (CTTD) of the Ministry of Science, Technology, and Innovation (MCTI) housed within LABDES/UFCG, with mass transfer processes, in the design of water treatments with technology involving polymeric membranes, combined with the learning of water characterization processes, through physical-chemical and bacteriological analyses, and operating pressure. The operating pressure used in the experiments was 7.12 kgf/cm², simulated by *Winflows 4.03*, under the conditions of water quality feeding experiment 01. It was observed that the cost of water produced by the hybrid membrane system depended on the level of concentration of dissolved salts in the feed water. Experiment 01, which has a TDS feed of 1,775.62 mg/L, was the experiment with the highest system efficiency and the lowest production cost, with a treated water recovery rate of 24.86% and a production cost of 2.77 R\$/m³.

Keywords: Membrane system, Reverse osmosis, Ultrafiltration, Desalination, Operation monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Processo térmico de dessalinização.....	4
Figura 02. Processo de separação por membranas.	5
Figura 03. Processo da O.I	7
Figura 04. Tanques de fibra de vidro de 5.000 litros do sistema de dessalinização.....	16
Figura 05. Sistema composto por membranas de ultrafiltração/inversa.....	17
Figura 06. Etapas do processo de membranas de UF/O.I	18
Figura 07. Laudo da simulação do <i>software Winflows 4.03</i>	21
Figura 08. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 1.775,62 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	23
Figura 09. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 2.589,98 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	23
Figura 10. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 3.249,09 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	24
Figura 11. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 4.207,9mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	24
Figura 12. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 5.554,0 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	25
Figura 13. Variação da cor do concentrado e permeado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 que apresentam uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, 2.589,98 mg/L, 3.249,09 mg/L, 4.207,9 mg/L e 5.554,0 mg/L, respectivamente, em função do tempo de operação	28
Figura 14. Variação da turbidez do concentrado e permeado dos Experimento 01, 02, 03, 04 e 05 que apresentam uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, 2.589,98 mg/L, 3.249,09 mg/L, 4.207,9 mg/L e 5.554,0 mg/L, respectivamente, em função do tempo de operação	29
Figura 15. Variação de pHc e pHp do experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.	30
Figura 16. Variação do pHc e pHp do experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.	31

Figura 17. Variação do pHc e pHp do experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.	31
Figura 18. Variação do pHc e pHp do experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.	32
Figura 19. Variação do pHc e pHp do experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.	32
Figura 20. Variação da Kc e Kp do experimento 01, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 3,39 mS/cm, em função do tempo de operação.	33
Figura 21. Variação da Kc e Kp do experimento 02, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 4,85 mS/cm, em função do tempo de operação.	33
Figura 22. Variação da Kc e Kp do experimento 03, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 5,71 mS/cm, em função do tempo de operação.	34
Figura 23. Variação da Kc e Kp do experimento 04, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 6,35 mS/cm, em função do tempo de operação.	34
Figura 24. Variação da Kc e Kp do experimento 05, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 7,05 mS/cm, em função do tempo de operação.	35
Figura 25. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.	36
Figura 26. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.	36
Figura 27. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.	37
Figura 28. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.	37
Figura 29. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.	38
Figura 30. Variação da Qc e Qp do Experimento 01, apresentando uma alimentação de STD	

igual à 1.775,62 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	40
Figura 31. Variação da Qc e Qp do Experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	40
Figura 32. Variação da Qc e Qp do Experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	41
Figura 33. Variação da Qc e Qp do Experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	41
Figura 34. Variação da Qc e Qp do Experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	41
Figura 35. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.....	42
Figura 36. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.....	43
Figura 37. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.....	43
Figura 38. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.....	44
Figura 39. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.....	44
Figura 40. Análises bacteriológicas da Alimentação, Concentrado e Permeado referente aos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05	46
Figura 41. Variação do consumo específico de energia dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm ²	47
Figura 42. Análises bacteriológicas com ausência de Escherichia coli, observada através da luz negra, para as águas de alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Diferentes concentrações de STD para cada experimento	16
Tabela 02. Taxa de extração do STD para os Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.....	22
Tabela 03. Taxa de remoção da cor e turbidez dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.....	27
Tabela 04. Taxa de recuperação (TR%) de água tratada dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.....	39
Tabela 05. Consumo específico de energia e custo de produção para os Experimentos 01, 02, 03, 04, 05.	48
Tabela 06. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.01.....	59
Tabela 07. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.02.....	57
Tabela 08. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.03.....	58
Tabela 09. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.04.....	59
Tabela 10. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.05.....	60
Tabela 11. Análises bacteriológicas do EXP.01.....	61
Tabela 12. Análises bacteriológicas do EXP.02.....	62
Tabela 13. Análises bacteriológicas do EXP.03.....	63
Tabela 14. Análises bacteriológicas do EXP.04.....	64
Tabela 15. Análises bacteriológicas do EXP.05.....	65
Tabela 16. Parâmetros físico-químico e variáveis de médias para o EXP.01.	68
Tabela 17. Parâmetros físico-químico e variáveis de médias para o EXP.02.	68
Tabela 18. Parâmetros físico-químico e variáveis de médias para o EXP.03	69
Tabela 19. Parâmetros físico-químico e variáveis de médias para o EXP.04.	71
Tabela 20. Parâmetros físico-químico e variáveis de médias para o EXP.05	72

LISTA DE ABREVIATURAS

A.P	Água do Poço
A.T	Água Tratada
Alim.	Alimentação
Cor_c	Cor do concentrado (mg Pt–Co/L)
Cor_p	Cor do permeado (mg Pt–Co/L)
CEE	Consumo específico de energia (kWh/m ³)
CO₂	Dióxido de Carbono
C.P	Custo de produção (R\$/m ³)
F₁	Pressão de entrada do filtro (kgf/cm ²)
F₂	Pressão de saída do filtro (kgf/cm ²)
K_c	Condutividade elétrica do concentrado (mS/cm)
K_p	Condutividade elétrica do permeado (μS/cm)
O.I	Osmose Inversa
P	Pressão/ões
P₁	Pressão de entrada dos elementos de membranas (kgf/cm ²)
P₂	Pressão de saída dos elementos de membranas (kgf/cm ²)
pH	Potencial hidrogeniônico
pH_c	Potencial hidrogeniônico do concentrado
pH_p	Potencial hidrogeniônico do permeado
Q	Vazão/ões
Q_c	Vazão do concentrado (L/h)
Q_p	Vazão do permeado (L/h)
T_a	Temperatura da alimentação (°C)
T_c	Temperatura do concentrado (°C)
T_p	Temperatura do permeado (°C)
Tur C	Turbidez do concentrado (NTU)
Tur P	Turbidez do permeado (NTU)
UF	Ultrafiltração

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μS/cm	Mili Siemens por centímetro
mS/cm	Micro Siemens por centímetro
kgf/cm²	Quilograma força por centímetro quadrado
L/h	Litro por hora
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
mg Pt– Co/L	Platina-cobalto por litro
mg/L	Miligrama por litro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Sistemas de Dessalinização	4
2.1.1 Processo de Dessalinização Térmica.....	4
2.1.2 Processos de Dessalinização por Membranas	5
2.1.2.1 Microfiltração (MF)	5
2.1.2.2 Ultrafiltração (UF)	6
2.1.2.3 Nanofiltração	6
2.1.2.4 Osmose Inversa (O.I)	6
2.1.2.5 Eletrodíálise.....	7
2.2 Balanço de Massa	8
2.3 Taxa de Extração de Sais (TES%)	8
2.4 Recuperação	9
2.5 Consumo de Energia	9
2.6 Parâmetros de Qualidade	9
2.6.1 Concentração de STD e Condutividade Elétrica.....	9
2.6.2 Turbidez	10
2.6.3 Cor da Água	10
2.6.4 pH.....	10
2.6.5 Alcalinidade	11
2.6.6 Dureza Total.....	11
2.6.7 Cloretos	11
2.6.8 Sulfatos.....	11
2.6.9 Análise Bacteriológica	11
2.7 Fatores que Afetam o Desempenho da Membrana de O.I.	12
2.7.1 Polarização por Concentração	12
2.7.2 <i>Fouling</i>	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 Materiais	14
3.2 Métodos	14
3.2.2 Etapas do Sistema de Membranas: UF/O.I	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Taxa de Extração de Sais (TES%)	23
4.2 Cor e turbidez	25

4.3 Potencial Hidrogeniônico	30
4.4 Condutividade.....	33
4.5 Pressão.....	36
4.6 Vazão	39
4.7 Temperatura	43
4.8 Análises Bacteriológicas.....	45
4.2.10 Custo de Produção	50
5. CONCLUSÃO	52
6. PERSPECTIVAS FUTURAS	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – Análises físico-químicas das águas de alimentação, permeado e concentrado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 realizados no sistema híbrido de membranas de dessalinização do LABDES	59
APÊNDICE B – Análises bacteriológicas das amostras de águas da alimentação, permeado e concentrado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 realizados no sistema híbrido de membranas de dessalinização do LABDES	63
APÊNDICE C – Parâmetros físico-químico e das variáveis de medidas coletadas durante os Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.....	68

1. INTRODUÇÃO

A água é considerada um elemento de suma importância, já que praticamente todos os processos industriais, fisiológicos, animal ou vegetal, são atendidos de forma direta ou indireta por ela. No entanto, a escassez de água vem se tornando um desafio significativo em regiões secas, onde fatores como a falta de chuva e o aumento demográfico resultam em disponibilidade mínima de água por pessoa.

De acordo com MMA (2018), cerca de 70% da superfície terrestre é coberta por água. No entanto, a maior parte dessa porcentagem, precisamente 97,5% de toda a água, apresenta-se com características salinas, enquanto apenas 2,5% é de natureza doce. Dentro dessa pequena fração de água doce, aproximadamente 68,9% encontra seu lugar em geleiras, calotas polares e áreas montanhosas. Outros 29,9% estão reservados nas profundezas subterrâneas, enquanto uma parcela mínima de 0,9% é encontrada nos solos e pântanos. Uma proporção extremamente pequena, apenas 0,3%, compreende a porção superficial de água doce, que se faz presente nos leitos dos rios e nas extensões dos lagos.

Diante da crescente e exigente demanda por água potável, surge uma inquietação em identificar uma tecnologia alternativa para a obtenção de água própria para consumo humano. Duas principais tecnologias alternativas para a dessalinização é: a térmica e a filtração em membranas. Os métodos térmicos operam com base no uso de calor para evaporar a água e separá-la dos sais. Por outro lado, a técnica de filtração em membranas, que é amplamente adotada comercialmente, utiliza propriedades específicas de determinados polímeros para permitir que um solvente - como a água - passe através deles, separando-o do soluto, que pode incluir sais, vírus e bactérias. Esse processo é impulsionado por alta pressão, que força o solvente a passar pelas membranas gerando a corrente do permeado e do concentrado (TWDB, 2020).

Um dos primeiros relatos conhecidos desse processo de dessalinização foi feito por Basílio de Cesareia, descrevendo como a água do mar era aquecida em jarros, com esponjas naturais colocadas nas suas bocas para posteriormente retirar a água destilada. Embora já existiam técnicas de destilação em pequena escala, naquela época, os navegadores as utilizavam para evitar o armazenamento de grandes estoques de água potável durante viagens longas. (ARAÚJO, ROSA, OLIVEIRA, 2021).

A dessalinização é um procedimento de purificação empregado em águas salobras ou salinas, provenientes tanto de fontes subterrâneas como do oceano. Essa avançada técnica tem aplicação global na geração de novas reservas de água potável. No ano de 2019, a contagem

das usinas de dessalinização - abrangendo água subterrânea salobra e água do mar - ultrapassou 20.000 em todo o mundo, com uma capacidade instalada que totalizou proporcionalmente a 106,7 milhões de metros cúbicos por ano (TWDB, 2020).

Nos Estados Unidos, aproximadamente 72% das usinas de dessalinização empregam a tecnologia de osmose inversa (filtração em membranas), conforme relatado pela TWDB em 2020. A osmose inversa representa cerca de 60% da capacidade global instalada para a produção de água dessalinizada. Esse fato é atribuído, segundo Mishra (2018), às vantagens inerentes à osmose inversa em comparação com as alternativas disponíveis atualmente. Isso inclui considerações sobre custos, eficiência energética, possibilidade de integração com fontes de energia renovável, como energia eólica e solar, flexibilidade na expansão da capacidade e a capacidade de ser combinada com outras tecnologias de tratamento de água.

No Brasil, a tecnologia de dessalinização vem sendo implantada desde os anos de 1990, como uma resposta às demandas crescentes por água potável em regiões com escassez hídrica. Utilizando tecnologias de osmose inversa, projetos de dessalinização foram implementados em diversas áreas, principalmente em regiões semiáridas. O Programa Água Doce (PAD), criado em 2004, é uma iniciativa do Governo Federal que visa estabelecer uma política pública permanente de acesso à água de qualidade para o consumo humano por meio do aproveitamento sustentável de águas subterrâneas, incorporando cuidados técnicos, ambientais e sociais na implantação e gestão de sistemas de dessalinização. Essas iniciativas visam transformar a água salobra em água potável, proporcionando uma fonte mais confiável e sustentável para as comunidades locais (MIDR, 2023).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe estudar o desempenho de um sistema híbrido de membranas de ultrafiltração/osmose inversa para diferentes gradientes de concentrações de sais dissolvidos nas águas de alimentação sob pressão constante. No qual, foi escolhida uma mistura 50% água de poço do LABDES e 50% da água de abastecimento da estação de tratamento do estado da Paraíba para alimentar o primeiro experimento, em que o concentrado gerado no tratamento da água misturada vai servir como fonte de alimentação do experimento subsequente. Esse volume de (50/50)% foi escolhido, com o intuito de aumentar as concentrações de sais nas águas de alimentação nos experimentos, sem sobrecarregar as membranas com águas de concentrações de sais muito elevadas.

1.1 Objetivo Geral

Estudar o desempenho de um sistema híbrido de membranas poliméricas de ultrafiltração/osmose inversa para fins de tratamentos de águas salobras e poluídas para diferentes níveis de concentrações de sais sob pressão de operação constante.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a água misturada (50% água de poço do LABDES e 50% da água de abastecimento da estação de tratamento do estado da Paraíba) que irá alimentar o primeiro experimento, determinar a pressão de operação do sistema e analisar o desempenho e a qualidade do permeado/concentrado do sistema em termos de análises físico-químicas e bacteriológicas em função do aumento da concentração de sais da água de alimentação do sistema;
- Estudar os efeitos de extrações de sais, valores das recuperações de águas tratadas, consumo de energia e custo de produção diante o aumento das concentrações de sais nas águas de alimentação de cada experimento sob pressão de operação constante.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas de Dessalinização

Segundo KIMURA (1995), a dessalinização apresenta na remoção ou diminuição da concentração de sais e sólidos presentes na água salgada (seja do mar ou salobra), gerando água doce de qualidade para ser consumida ou ser usada em diversas áreas. Além da redução dos minerais, esse procedimento também é capaz de remover componentes químicos, orgânicos e biológicos.

De acordo com o artigo "Brackish Water Dessalination: Status and Challenges" de Ghaffour et al., publicado em 2013, algumas das principais abordagens para a dessalinização de águas salobras incluem: processos de dessalinização térmica (destilação) e processo de dessalinização por membranas.

2.1.1 Processo de Dessalinização Térmica

A dessalinização térmica de água é um processo essencial para a obtenção de água doce a partir de fontes de água com alta concentração de sais e minerais naturais. Essa técnica desempenha um papel crucial em regiões onde a disponibilidade de água potável é um desafio significativo. Através da destilação, é possível separar eficazmente a água dos sais, produzindo água purificada e pronta para consumo.

A Figura 01 abaixo, mostra o procedimento da dessalinização térmica que envolve uma etapa física de evaporação e subsequente condensação. Nesse método, a água de origem é aquecida até que alcance o ponto de ebulição, onde o vapor gerado é resfriado e transformado novamente em água, apresentando uma concentração mínima de Sólidos Totais Dissolvidos (STD). Enquanto isso, a solução salina altamente concentrada permanece no recipiente que foi aquecido, sendo considerada como um subproduto residual.

Figura 01. Processo térmico de dessalinização.



Fonte: Igui ecologia, 2023.

Os processos térmicos mais empregados na dessalinização incluem a destilação de alcances múltiplos, a destilação de efeitos múltiplos, a evaporação por compressão de vapor e o uso de lagoas de evaporação (SHATAT e RIFFAT, 2012).

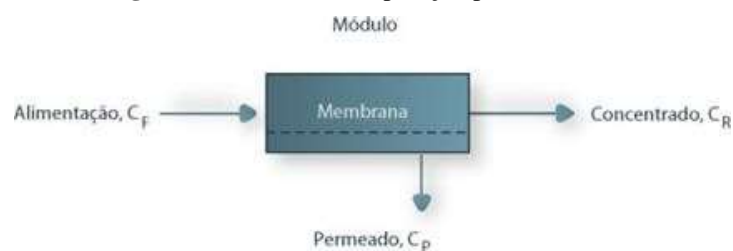
2.1.2 Processos de Dessalinização por Membranas

O processo de dessalinização por membranas tem se destacado como uma abordagem eficiente para a purificação e separação de substâncias em diversas aplicações industriais e ambientais. A eficiência desse método é evidenciada por sua capacidade de realizar separações com alta seletividade e baixo consumo de energia (BAKER, 2004).

De acordo com um estudo controlado por Baker em seu trabalho "Membrane Technology and Applications" (2004), as membranas oferecem uma alternativa promissora para separação de componentes em líquidos devido à sua eficiência, escalabilidade e menor demanda energética em comparação com outros métodos tradicionais.

Este processo de filtragem e dessalinização por membranas é realizado por meio de fluxo tangencial, conhecido como "filtração em fluxo cruzado". Nesse método, a solução aquosa se move paralelamente à superfície da membrana, enquanto o permeado é mantido perpendicularmente a ela. Ao longo desse procedimento, a corrente retida ou concentrada passa a conter solutos e partículas que foram rejeitadas pela membrana. Por outro lado, o permeado é composto por uma solução clarificada que foi permeada pela membrana (MULDER, 1999). A Figura 02, mostra o processo de separação por membranas.

Figura 02. Processo de separação por membranas.



Fonte: Processo de separação, 2023.

Dentre os processos de separação por membranas salienta-se, a de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa e eletrodialise. Cada uma com suas características e aplicações específicas.

2.1.2.1 Microfiltração (MF)

De acordo com Coppen (2004), as membranas de microfiltração operam por meio de uma filtração que leva em consideração o tamanho das partículas, apresentando geralmente

poros com dimensões variando entre 0,1 e 10 μm . Nesse intervalo, são eficazes na remoção de contaminantes como sílica em forma coloidal, óleos, vírus e bactérias.

A microfiltração é fundamentada em um processo dinâmico de filtração mecânica, empregando membranas que permitem uma separação seletiva, purificação e concentração de substâncias orgânicas de peso molecular elevado. Uma característica notável é a sua capacidade de alcançar essa seletividade com pressões relativamente baixas, geralmente na faixa de 0,2 a 0,5 bar, o que resulta em um consumo de energia reduzido para operar o sistema (COPPEN, 2004).

2.1.2.2 Ultrafiltração (UF)

A membrana de ultrafiltração é uma estrutura permeável que se destaca pela sua capacidade de separar coloides, material particulado, microrganismos e moléculas dissolvidas de alto peso molecular (OLIVEIRA, 2010). Esta tecnologia é amplamente utilizada em diversas aplicações industriais e científicas para a purificação e separação de componentes em soluções líquidas.

Esta tecnologia oferece poros com diâmetros entre 1 e 100 nanômetro, os quais, quando comparados aos poros de outras tecnologias que operam com pressão, são mais estreitos. Devido ao tamanho reduzido dos poros na membrana, é exigida uma força motriz mais substancial para alcançar fluxos permeados suficientemente elevados para viabilizar sua aplicação em escala industrial. Por consequência, as diferenças de pressão através da membrana variam tipicamente entre 2 e 10 bar (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

2.1.2.3 Nanofiltração

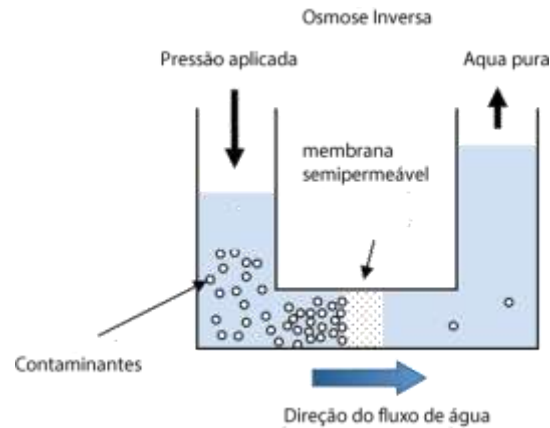
É um tipo de membrana semipermeável que apresenta poros de tamanho intermediário, situados na faixa de 1 a 100 nanômetros. Essa tecnologia de separação é empregada para reter íons e moléculas de maior peso molecular, enquanto permite a passagem de íons de menor tamanho e solutos de menor massa molecular. A membrana de nanofiltração é frequentemente utilizada em aplicações que requerem separação mais seletiva do que a ultrafiltração, mas menos restritiva do que a osmose reversa (MULDER, 1996).

2.1.2.4 Osmose Inversa (O.I)

As membranas de osmose inversa são uma tecnologia de separação amplamente utilizada para purificação de água e tratamento de fluidos em diversos setores industriais. Elas desempenham um papel crucial na produção de água potável a partir de fontes de água salina

ou contaminada, bem como na remoção de poluentes e íons poluentes de processos industriais (GEISE; LEE; MILLER; FREEMAN, 2021). A Figura 03, mostra o processo da O.I.

Figura 03. Processo de O.I.



Fonte: Lenntech, 2023.

O princípio básico da osmose inversa envolve a aplicação de pressão à solução a ser tratada, forçando a solução aquosa, a passar através de uma membrana semipermeável, enquanto os solutos são retidos. A membrana possui poros extremamente pequenos, que permitem apenas a passagem de água, restringindo a passagem de íons, partículas e outras impurezas (GEISE; LEE; MILLER; FREEMAN, 2021).

Durante operação normal, por um período prolongado de tempo, membranas de osmose inversa são sujeitas à incrustação por material suspenso ou solúvel presente na água de alimentação, diminuindo assim sua eficiência. Exemplos comuns de incrustações são carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, óxidos de metais, sílica, e depósitos orgânicos ou biológicos.

A eliminação de incrustações é efetuada pela limpeza química, preventivamente, pela mudança das condições de operação.

2.1.2.5 Eletrodialise

Uma membrana de eletrodialise é um componente essencial em processos de separação eletroquímica, que envolvem a migração de íons através de membranas carregadas eletricamente sob a influência de um campo elétrico. Essas membranas são projetadas para permitir o transporte seletivo de íons, contribuindo para a purificação de soluções e a remoção de contaminantes carregados. A eletrodialise também é utilizada em aplicações como dessalinização de água salobra e produção de produtos químicos (STRATHMANN, 2011).

2.2 Balanço de Massa

Um balanço de massa em um sistema de osmose inversa é uma avaliação das quantidades de água e solutos (substâncias dissolvidas) que entram e saem do sistema. Esse tipo de análise é importante para entender como o processo de osmose inversa afeta a concentração de solutos e a produção de água purificada.

Para realizar um balanço de massa em um sistema de osmose inversa, deve-se considerar as seguintes informações:

- A taxa de entrada de água de alimentação (Q_a), que é a quantidade de água que entra no sistema.
- A taxa de produção de permeado (Q_p), que é a quantidade de água purificada produzida.
- A taxa de produção de concentrado (Q_c), que é a quantidade de água concentrada gerada.
- A concentração inicial de solutos na água de alimentação (C_a).
- A concentração final de solutos no permeado (C_p).

O balanço de massa pode ser expresso pela seguinte equação simplificada:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (1)$$

2.3 Taxa de Extração de Sais (TES%)

A taxa de rejeição de sais é um parâmetro importante em processos de filtração por membranas, especialmente em sistemas de O.I e UF. Ela se refere à eficácia da membrana em reter íons e emissão dissolvidas, impedindo que eles passem de um lado da membrana para o outro. Geralmente expressa em porcentagem, a taxa de rejeição de sais é um indicador da capacidade da membrana de separar componentes imunológicos de uma solução.

$$TES(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

TES = Taxa de Extração de Sais (%).

C_a = Concentração de Alimentação (mg/L).

C_p = Concentração de Permeado (mg/L).

A taxa de rejeição de sais é influenciada por vários fatores, como o tamanho dos poros da membrana, a pressão de operação, as propriedades das soluções e a configuração do sistema. Membranas com poros menores têm maior probabilidade de reter íons e permanecerem, sofreram em taxas de rejeição mais elevadas (ELIMELECH E PHILLIP, 2011).

2.4 Recuperação

A recuperação de água em sistemas de O.I refere-se à quantidade de água tratada que pode ser obtida em relação à quantidade de água de alimentação.

$$TR(\%) = \frac{Q_p}{Q_a} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

TR = Taxa de Recuperação do Sistema (%).

Q_a = Vazão de Alimentação (L/h).

Q_p = Vazão de Permeado (L/h).

Q_c = Vazão do Concentrado (L/h).

2.5 Consumo de Energia

Vários fatores podem influenciar o consumo de energia em um sistema de O.I, incluindo o tamanho do sistema, a pressão operacional, a salinidade da água de alimentação e a eficiência do sistema.

O consumo de energia específico de um sistema de dessalinização pode ser determinado através da seguinte fórmula:

$$CEE = \frac{E}{V} \quad (4)$$

Em que:

CEE = é o consumo de energia específico em kWh/m³ (quilowatt-hora por metro cúbico),

E = é o total de energia consumida pelo sistema em kWh,

V = é o volume total de água dessalinizada produzido pelo sistema em metros cúbicos (m³).

Essa medida expressa a quantidade de energia necessária para produzir um metro cúbico de água dessalinizada e é útil para avaliar a eficiência energética do sistema.

2.6 Parâmetros de Qualidade

3.6.1 Concentração de STD e Condutividade Elétrica

STD é um parâmetro importante na análise da qualidade de água e refere-se à quantidade total de substâncias sólidas presentes em uma solução aquosa que passa por um processo de

filtração para remoção de partículas suspensas. Essas substâncias podem incluir sais minerais, íons metálicos, compostos orgânicos e outros materiais sólidos na água (APHA, AWWA, WEF, 2017).

A condutividade elétrica, é uma propriedade física que mede a capacidade de um material ou substância conduzir eletricidade. Essa propriedade está intimamente relacionada à quantidade de íons livres ou cargas elétricas presentes em uma solução, líquido ou material sólido. Quanto mais íons livres um material tem, maior será sua condutividade elétrica.

2.6.2 Turbidez

A turbidez da água é uma medida que avalia a claridade ou transparência de uma amostra de água, indicando o grau de presença de partícula em suspensão. Essas partículas podem incluir sedimentos, detritos, matéria orgânica e microrganismos, que dispersam a luz incidente, tornando a água turva. A turbidez é uma característica importante da qualidade da água, pois afeta a penetração da luz, o equilíbrio térmico, a vida permanece e a capacidade de processos de tratamento (NARDY, 2020).

2.6.3 Cor da Água

A cor da água é avaliada sem a remoção das partículas suspensas presentes nela, o que faz com que seja influenciada pela turbidez. A presença de partículas em suspensão, como sedimentos ou outros materiais orgânicos, pode alterar a cor da água de forma significativa. Portanto, a cor aparente da água não é apenas o resultado da interação da luz com as chamadas de água, mas também da interação com as impurezas presentes.

A água pura, na ausência de impurezas, tende a parecer incolor a olho nu. No entanto, quando se trata de grandes corpos de água, como oceanos, lagos e rios, vários fatores podem contribuir para uma aparência diferenciada. Diante a portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, o valor máximo permissível para cor em amostras de águas é de 15 mg Pt–Co/L.

2.6.4 pH

O pH da água desempenha um papel significativo na acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa. O termo "pH" significa "potencial hidrogeniônico" e é uma medida quantitativa da concentração de íons de hidrogênio (H^+) presentes na água. Essa escala de pH varia de 0 a 14, com valores abaixo de 7 indicando acidez, valores acima de 7 indicando alcalinidade e valor 7 representando neutralidade.

A produtividade do pH é essencial em muitos contextos, como na análise da qualidade

da água, em processos industriais, na agricultura e na pesquisa científica. O pH afeta diretamente a solubilidade e a atividade de muitas substâncias químicas na água, influenciando assim uma ampla gama de reações químicas e biológicas.

2.6.5 Alcalinidade

A alcalinidade da água é uma característica que se refere à capacidade de uma solução aquosa resistir a mudanças no pH quando ácidos são adicionadas a ela. É um parâmetro importante na química da água, pois está relacionado à presença de íons que podem neutralizar os efeitos de recebimento, ajudando a manter um pH relativamente estável.

2.6.6 Dureza Total

A dureza total da água é uma característica importante que se refere à concentração de íons de cálcio e magnésio dissolvidos na água. Esses íons são os principais responsáveis pela dureza da água, e sua presença pode ter várias estratégias para diversos usos, como consumo humano, processos industriais e operações domésticas.

2.6.7 Cloretos

Os cloretos são comumente encontrados na natureza sob a forma de sais diferentes, incluindo o cloreto de sódio (NaCl), o cloreto de potássio (KCl) e os sais de cálcio (CaCl₂). Os oceanos, em particular, abrigam a maior proporção desses sais (INFOPÉDIA, 2023). Altas concentrações do íon cloreto na água podem ser prejudiciais à saúde, causando problemas cardíacos e renais.

2.6.8 Sulfatos

Os sulfatos são íons compostos por um átomo de enxofre (S) ligado a quatro átomos de oxigênio (O), formando a estrutura química SO₄²⁻. Esses íons desempenham um papel significativo na química da água e são importantes em diversos aspectos, incluindo geologia, saúde pública e processos industriais.

A presença de sulfatos em níveis elevados pode estar associada a problemas de gosto e odor na água potável. Já na indústria, pode ser usado positivamente na forma de coagulantes para tratamentos de água.

2.6.9 Análise Bacteriológica

A análise bacteriológica da água é um procedimento fundamental para garantir a qualidade e a segurança da água que consumimos e utilizamos em nossas atividades diárias.

Esta análise é realizada para detectar e quantificar a presença de bactérias patogênicas (causadoras de doenças) e indicadoras de contaminação fecal, que podem ser indicativas da presença de patógenos perigosos (Saraiva, et al., 2020).

A água contaminada por bactérias patogênicas, como *Escherichia coli*, *Salmonella* e *Campylobacter*, pode causar doenças graves, incluindo gastroenterites, infecções intestinais e até mesmo doenças transmitidas pela água, como a cólera. A análise bacteriológica ajuda a identificar a presença dessas bactérias antes que elas causem problemas de saúde em comunidades.

2.7 Fatores que Afetam o Desempenho da Membrana de O.I.

São diversos os desafios que podem surgir durante o funcionamento de um sistema de O.I, abrangendo questões como a polarização por concentração, a formação de depósitos de sais, *fouling*.

As características das membranas de O.I são determinadas com base em sua performance. Os parâmetros que definem o desempenho das membranas de O.I incluem a taxa de fluxo de água através delas, a quantidade de água permeada e a capacidade de reter sais sustentáveis na solução.

2.7.1 Polarização por Concentração

A polarização por concentração é um fenômeno que ocorre em sistemas de membranas, como membranas de O.I e UF, durante o processo de filtração ou separação de componentes em uma solução líquida. Esse fenômeno está relacionado à distribuição desigual de solutos ao longo da superfície da membrana durante a operação. Com essa restrição de alguns solutos, os mesmos vão se acumulando na superfície das membranas formando uma camada de polarização por concentração (Habert et al., 2006).

Essa camada de polarização de concentração pode levar a uma redução na taxa de transferência de massa através da membrana. Como a diferença de concentração entre o fluido próximo à membrana e o resto do fluido aumenta, a transferência de solutos através da membrana fica mais lenta. Isso pode resultar em uma diminuição do fluxo permeado, afetando a eficiência do processo de separação ou filtração.

2.7.2 Fouling

O "*fouling*", também conhecido como incrustação ou entupimento, é um fenômeno que pode ocorrer em sistemas de O.I e que afeta o seu desempenho. Esse processo envolve a

contaminação de partículas, materiais orgânicos, sais precipitados e micro-organismos na superfície da membrana.

O entupimento pode resultar em diversos problemas, como diminuição do fluxo de água permeada, aumento da pressão de operação, redução da taxa de remoção de contaminantes e necessidade de limpeza frequente da membrana. Isso não apenas aumenta os custos operacionais, mas também pode causar danos à membrana e resultar em tempos de inatividade não planejados (Habert et al., 2006).

Para combater o entupimento, são empregadas diversas estratégias, incluindo o uso de pré-tratamentos para remover partículas e materiais orgânicos da água de alimentação, a aplicação de produtos químicos anti-incrustantes e o uso de técnicas de limpeza, como a lavagem química e a limpeza por retrolavagem. Além disso, o desenvolvimento de membranas com superfícies mais hidrofílicas ou modificações na estrutura da membrana também visa minimizar o acúmulo de contaminantes e organismos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata dos materiais e métodos que constituem os fundamentos principais deste trabalho, fornecendo uma visão geral das técnicas, equipamentos e procedimentos utilizados para conduzir a pesquisa.

3.1 Materiais

Para a realização dos experimentos, foi necessário utilizar os instrumentos e vidrarias mencionados abaixo:

- Cronômetro do celular;
- Estufa de cultura e bacteriologia - Qualxtron
- Condutivímetro – DL 150 da Del LAB;
- pHmetro digital AT - 355 da ALFAKIT;
- 2.100 P Turbidímetro da HACH;
- Portable Colorímetro da AKSO;
- Béqueres de 50, 100 e 200 ml;
- Fotômetro de chama – 910M da ANALYSER;
- Espectrofotômetro DR 5000 da HACH;
- Picetas de 500 ml;
- Agitador de Tubos AP56 da PHOENIX;
- Suporte Universal;
- Pipetas de 5, 10, 25 e 50 mL e;
- Bureta de 10 mL;

3.2 Métodos

Refere-se à metodologia dos experimentos realizados no sistema de membranas com diferentes concentrações de sais dissolvidos nas águas de alimentação.

Os experimentos no sistema de membranas foram conduzidos no Centro de Testes de Tecnologia de Dessalinização (CTTD) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) acampado no âmbito do Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES/UFCG), com processos de transferência de massa, na concepção de tratamentos de águas com tecnologia tendo membranas poliméricas, somando com o aprendizado das caracterização de águas dos processos, através de análises físico químicas e bacteriológicas.

Antes de dar início aos experimentos no CTTD, foi utilizado um *software Winflows 4.03*

para estudar as condições de operação do sistema com uma mistura de 50% água de poço do LABDES/UFCG e 50% da água de abastecimento da estação de tratamento do estado da Paraíba (Água da torneira – A.T). Inicialmente, foi realizada uma caracterização da água misturada por meio de uma análise físico-química, conforme mostra na Tabela 01. A qual os dados das análises foi inserido no *Winflows 4.03* para realizar a simulação e determinar a pressão de operação necessária para realizar o primeiro experimento.

Tabela 01. Análises físico-químicas da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.01.

LAUDO N.º.: 01/2023		Resp. pela coleta: CTTD			
Município: Campina Grande - PB		Vazão (*): 2000 L/h			
Procedência: 50% Água do poço/ 50% água tratada – Experimento 01					
PARÂMETROS					
	Alim.	Conc.	Perm.	VPM (**)	TES (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	3.390,00	4.086,00	46	--	--
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0 °C	7,29	7,36	6,0	6,0 a 9,0	--
Turbidez, (uT)	3,31	2,85	0,90	5,0	72,80
Cor, Unidade Hazen (mg Pt–Co/L).	7	5	1,0	15,0	85,71
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	55,5	67,46	0,64	--	98,85
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	83,93	102,5	0,88	--	98,95
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	418,15	509,89	4,54	300	98,91
Sódio (Na ⁺), mg/L	479,59	584,74	5,6	200	98,83
Potássio (K ⁺), mg/L	1,96	2,38	0,03	--	98,46
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	0,2	-
Ferro Total, mg/L	0,12	0,15	0,002	0,3	98,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	53,40	64,92	0,87	--	98,37
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	53,40	64,92	0,87	--	98,37
CO ₂ livre (mg/L)	3,65	3,68	3,54	--	3,02
Sulfato (SO ₄ ⁻)	63,2	77,28	0,38	250,0	99,40
Fósforo Total, mg/L	0,2	0,25	0,01	--	95,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.008,35	1.229,49	11,84	250,0	98,82
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,03	0,04	0	10,0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,005	0,005	0	1,0	100,0
Amônia (NH ₃), mg/L	0,56	0,65	0,02	1,2	96,42
Sílica, mg/L (SiO ₂)	29	35,38	0,34	--	98,83
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,83	-0,64	-6,03	≤ 0	--
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	1.775,62	2.165,32	20,70	500,0	98,83

VMP (**) Valor Máximo Permitido à cada mg/L de acordo com a portaria 888/2021.

Para simular a pressão de operação do sistema de membranas de O.I no *Winflows 4.03*, foram inseridos os parâmetros relevantes do sistema. Isso incluiu a geometria das membranas, o tipo da água de alimentação, as especificações das membranas (área, vazão e fluxo), a vazão de alimentação que será utilizada nos experimentos (2.000 L/h) e as características da água de alimentação.

Diante a simulação, a pressão de operação média encontrada para realizar o primeiro experimento foi de 7,1 kgf/cm², a qual também foi utilizada para diferentes concentrações de sais dissolvidos na água de alimentação do sistema, conforme mostra as análises físico-químicas em Apêndice A.

O estudo do desempenho do sistema de membranas se dá através da taxa de extração de sais (TES%), cor, turbidez, pH, condutividade, taxa de recuperação de água tratada (TR%), análises bacteriológicas e custo de produção (C.P). Conforme calculadas pelas equações (1), (2), (3) e (4) especificadas no capítulo do referencial teórico.

As análises físico-químicas e bacteriológicas das amostras de águas dos experimentos foram realizadas de acordo com os procedimentos analíticos de referência estabelecidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, edição 2023, no âmbito do LABDES.

Durante os experimentos, também foi monitorado a temperatura da água de alimentação, do concentrado e do permeado, além das pressões de entrada e saída do filtro e das membranas de O.I. Isso nos permitiu observar o comportamento desses parâmetros ao longo dos experimentos.

3.2.1 Descrição do Sistema de UF e O.I.

A Figura 04 e 05 é do sistema composto de tanques/válvulas/filtro/membranas que foi utilizado no presente trabalho.

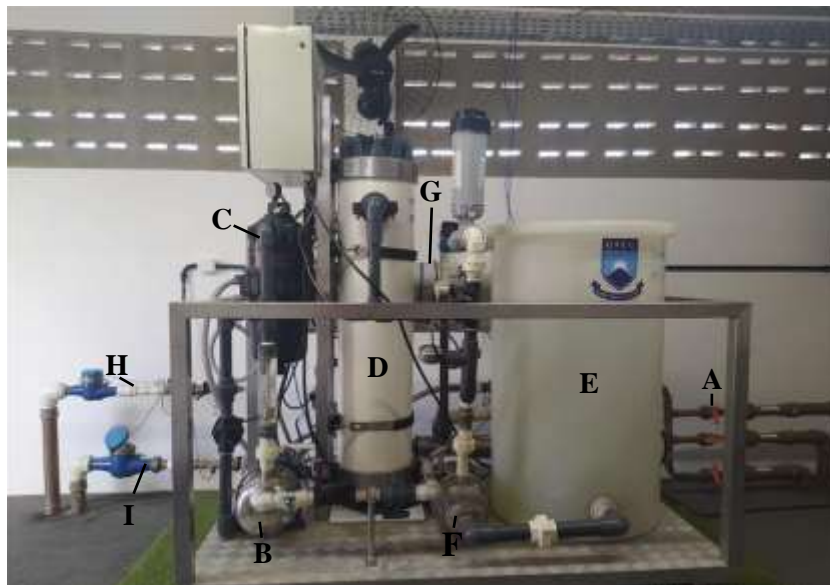
Figura 04. Tanques de fibra de vidro de 5.000 litros do sistema de dessalinização.



T1 – Tanque 01
T2 – Tanque 02
T3 – Tanque 03

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Figura 05. Sistema composto por membranas de ultrafiltração (UF)/osmose inversa (O.I.).



A – Válvulas.
B – Bomba MCS-NX.
C – Filtro Alfa Matic.
D – Membrana de Ultrafiltração.
E – Tanque de Retrolavagem.
F – bomba ME- HI 5420.
G – Elementos de membranas de O.I.
H – Corrente do Permeado.
I – Corrente do Concentrado.

Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A alimentação do sistema provém de um tanque (T1), conforme mostra na Figura 04, com capacidade de 5.000 litros. Além deste, existem mais dois tanques (T2 e T3), cada um com a mesma capacidade volumétrica. Onde, T2 recebe a água do permeado, enquanto T3 é abastecido com o concentrado. Conforme ilustra a Figura 05, é possível observar a presença de três válvulas (**A**) posicionadas na extremidade inferior direita. Estas válvulas desempenham a função de permitir a seleção do tanque a ser empregado para alimentar o sistema.

A água da alimentação é fornecida à uma bomba centrífuga Eletroplas modelo MCS-

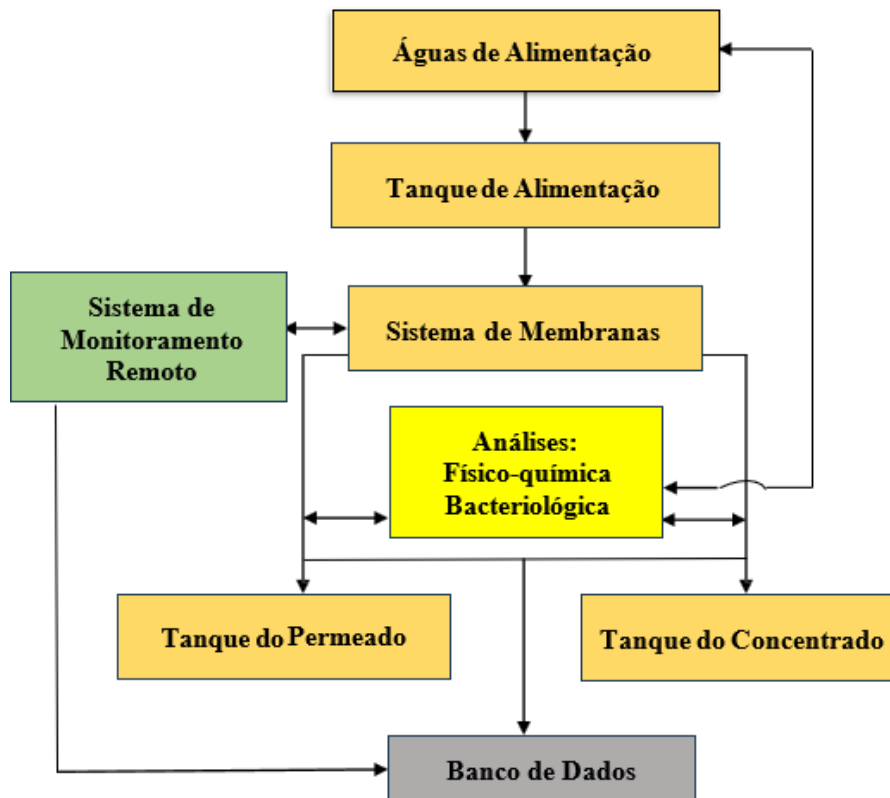
NX **(B)**, com uma potência de 1,0 CV. Essa bomba é responsável por impulsionar a água para o processo de pré-tratamento, que é o filtro a disco autolimpante da Alfa Matic **(C)**, com o modelo 20540-A e uma malha de 130 μm .

A água bruta, após o pré-tratamento, é encaminhada para um elemento de membrana de UF em forma de fibra de oca **(D)**, desenvolvido pela LENNTECH. Esse elemento possui uma área de 38 m². O permeado produzido por essa membrana segue um trajeto duplo. Uma fração do permeado é direcionado para um tanque **(E)** de 160 litros, utilizado para a retrolavagem da própria membrana. A retrolavagem acontece a cada 40 minutos de experimento, onde uma bomba multiestágios da WEG, modelo ME- HI 5420 **(F)**, com potência de 2,0 CV, é empregada. A outra fração do permeado, é direcionado para alimentar os elementos de membranas de O.I (modelo AG4040C) **(G)**, na configuração de espiral com um diâmetro de 4 polegadas e uma área de 8,4 m², produzida pela SUEZ. A bomba empregada para a alimentação das membranas de O.I, foi uma de alta pressão da WEG, modelo BT4-0510E12, com potência de 1,0 CV. As membranas de O.I, gera permeado **(H)** e concentrado **(I)** que segue para os tanques de armazenamento.

3.2.2 Etapas do Sistema de Membranas: UF/O.I.

Na Figura 06, está apresentado as etapas que ilustra o processo integrado do sistema de membranas de UF/O.I para obtenção de água própria para consumo.

Figura 06. Etapas do processo de membranas de UF/O.I.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

De início, encheu-se o tanque de alimentação com uma água misturada (50% A.P e 50% A.T) que alimentou o primeiro experimento. Posteriormente, foi realizada a caracterização da água misturada via análise físico-química (Tabela 01). A pressão sugerida pelo *software* para o primeiro experimento foi de 7,1 kgf/cm² e foi aplicada nos demais experimentos com diferentes níveis de concentrações de sais dissolvidos na água de alimentação. O concentrado gerado no primeiro experimento serviu como fonte de alimentação do segundo experimento, e assim sucessivamente para os experimentos seguintes. No CTTD possui um *software* próprio, que monitora através de sensores, as variáveis de medidas, em termos de pressão, vazão, produção de água potável e consumo de energia elétrica, durante o processo de tratamento da água em estudo, os quais são armazenados no banco de dados.

Durante os experimentos, as coletas de amostras de água ocorreu em intervalos específicos para análises físico-químicas. Nos primeiros 30 minutos, as amostras foram coletadas a cada 5 minutos nos pontos de alimentação, permeado e concentrado. Após esse período inicial, as amostras foram coletadas a cada 15 minutos, totalizando um tempo de operação do sistema de 120 minutos. No final de cada experimento, foram retiradas duas amostras da alimentação, permeado e concentrado para análises físico-químicas e


bacteriológicas. Todos os dados coletados foram adicionados a uma planilha e os gráficos correspondentes foram plotados na seção de resultados e discussão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são avaliados e discutidos os resultados obtidos durante o presente estudo. A realização dos experimentos permitiu analisar o desempenho do sistema híbrido de membranas em relação à qualidade e produção de água tratada, bem como ao consumo de energia, sob cinco diferentes níveis de concentração de sais dissolvidos na água de alimentação.

A pressão de operação foi determinada somente para o primeiro experimento, onde a alimentação do sistema apresentava uma água misturada, contendo 50% A.P e 50% A.T. Com o intuito de avaliar o desempenho do sistema, manteve-se a pressão de operação para os experimentos subsequentes igual à do primeiro experimento. No entanto, aumentou-se a concentração de sais dissolvidos nas águas de alimentação. A pressão média determinada foi de 7,1 kgf/cm². O laudo do resultado da simulação feita no *software* está representado na Tabela 02. Diante o laudo apresentado na Tabela 02, com a pressão de operação simulada de 7,1 kgf/cm², trabalhando no sistema com a água de alimentação utilizada no primeiro experimento, o sistema é capaz de alcançar uma taxa de recuperação de água tratada de 25%. Partindo para o primeiro experimento realizado no CTTD, temos que a recuperação média de água tratada obtida foi de 24,86%, conforme Apêndice C. Ao calcular a porcentagem de erro entre a taxa de recuperação simulada e a taxa de recuperação do experimento, foi encontrada uma diferença de 0,56%. Evidenciando que a pressão de operação simulada para o primeiro experimento foi eficaz na prática, e a qualidade da água tratada foi muito boa, obtendo-se uma concentração de TDS de 20,70 mg/L, conforme Tabela 01. Diante da Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, pode-se ter em uma amostra de água uma concentração de até 500 mg/L.

Tabela 02. Laudo da simulação do software Winflows 4.03.

SUEZ Water Technologies & Solutions								
Winflows Version 4.03				DataBase Version 4,03				
Results Summary								
Flow Data		m3/hr		Analytical Data		mg/L		
Raw Feed:		2,00		Raw Feed TDS		1791,97		
Product:		0,50		Product TDS		19,31		
Concentrate:		1,50		Concentrate TDS		2181,17		
System Data				Single Pass Design				
Temperature:	°C	RO-1: 25,00				System Rec. 25%		
Average Flux (lmh), Pass and Stage								
Pass	Average		Stage 1	Stage 2				
Pass 1	21,53		22,01	21,06				
Array Data								
				Pass 1				
Recovery %:	25,00	Conc. TDS(mg/l):	2181,17	Conc. Flow:	1,50 m3/hr			
Stage	Total		Element Type	Flow, m3/hr		Pressure, kg/(cm)2		Perm TDS mg/l
	Housing	Element		Feed	Perm	Feed	DP	
1	1	1	AG4040C	2,00	0,15	7,09	0,12	17,84
2	1	1	AG4040C	1,92	0,15	7,10	0,11	20,84
Total	2	2						
Analytical data								
Cation	mg/l			Anion	mg/l			
	Product	Feed	Conc		Product	Feed	Conc	
Ca	0,59	55,50	67,56	SO4	0,36	63,20	77,00	
Mg	0,81	83,93	102,18	Cl	10,94	1008,35	1227,35	
Na	5,31	484,30	589,48	F	0,00	0,00	0,00	
K	0,02	1,96	2,39	NO3	0,00	0,03	0,04	
NH4	0,02	0,56	0,68	Br	0,00	0,00	0,00	
Ba	0,00	0,00	0,00	PO4	0,00	0,20	0,24	
Sr	0,00	0,00	0,00	B	0,00	0,00	0,00	
Fe	0,00	0,12	0,15	SiO2	0,30	29,00	35,30	
Mn	0,00	0,00	0,00	H2S	0,00	0,00	0,00	
TDS mg/l	19,31	1791,97	2181,17	HCO3	0,95	64,72	78,67	
pH	5,55	7,29	7,36	CO2	4,19	4,31	4,35	
				CO3	0,00	0,10	0,14	
Saturation Data								
BaSO4 %	0,00	0,00	0,00	CaF2 %	0,00	0,00	0,00	
CaSO4 %	0,00	0,66	0,85	SiO2 %	0,18	23,14	28,15	
SrSO4 %	0,00	0,00	0,00	LSI	-5,99	-0,74	-0,54	
Struvite %	0,00	0,00	0,00	Pi kg/(cm)	0,02	1,34	1,63	

Fonte: Winflows 4.03, 2024.

Diante cada experimento, avaliou-se a performance do sistema híbrido de membranas através da taxa de extração de sais (TES%), cor, pH, condutividade, pressão de entrada e saída do filtro e das membranas de O.I, taxa de recuperação (TR%), temperaturas, análises bacteriológicas e custo de produção (C.P).

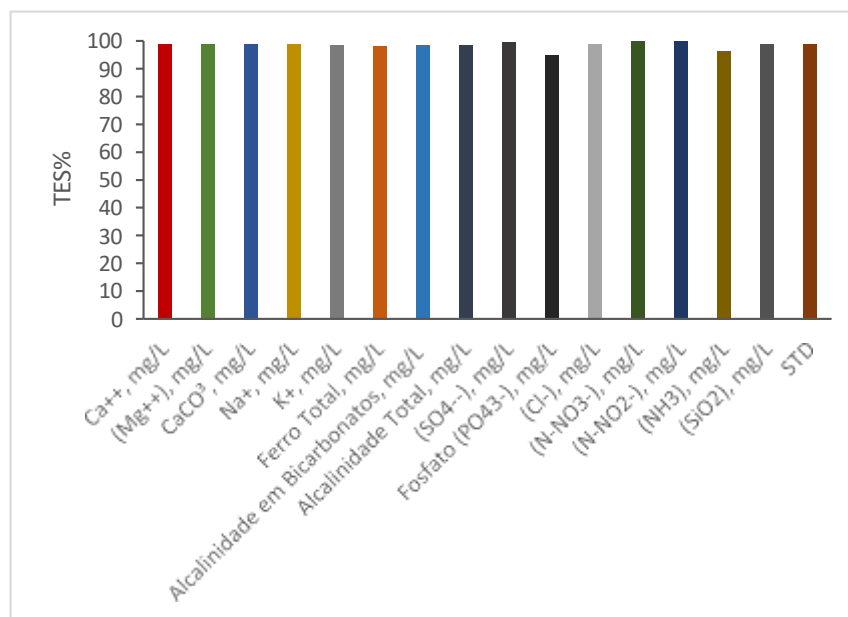
4.1 Taxa de Extração de Sais (TES%)

Nas Figuras 08, 09, 10, 11 e 12 estão representados os valores das TES% em função dos íons presentes nas águas de alimentação da unidade de dessalinização, durante os respectivos experimentos. A TES% foi calculada pela Equação 2, a partir dos resultados das análises físico-química da alimentação e permeado, conforme ilustrados na Tabela 01 e Apêndice A.

Esses resultados indicam com o aumento da concentração de sais no meio aquoso, a TES% diminuiu para alguns elementos. Isso pode acontecer, devido ao aumento da pressão osmótica de acordo com o aumento das concentrações de sais na água e a utilizando a mesma pressão de operação para todos os experimentos. Como também, por íons e impurezas retidos que podem acumular-se na superfície da membrana, tendendo a diminuir a eficiência do processo.

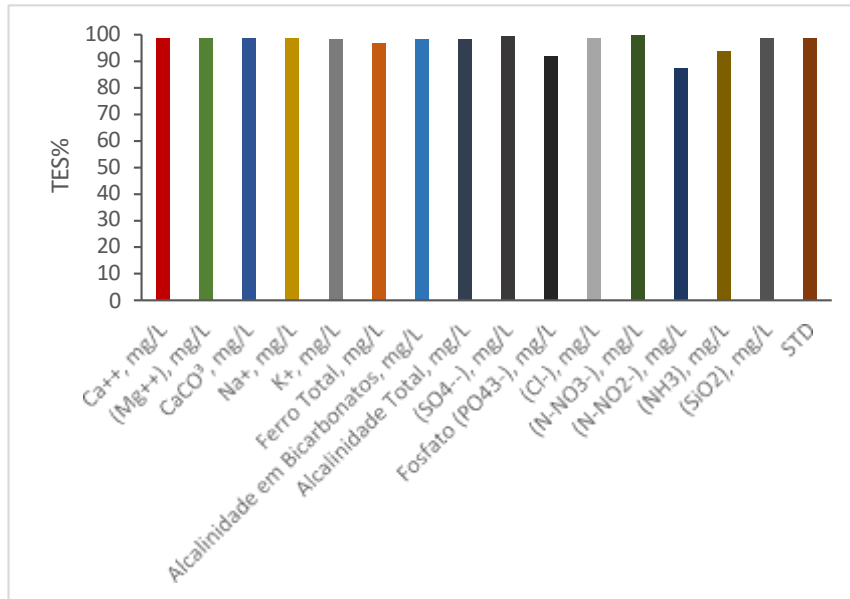
O sistema em estudo demonstra ser eficaz na TES% de águas com baixas concentrações de sais. Embora sua eficiência diminua ao lidar com águas de maiores concentrações, os resultados das análises indicam que a água permeada através do sistema de membranas está em conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Legislação Brasileira, especificamente a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, como mostra no Apêndice A, no qual diz que o valor máximo permissível de STD em amostra de água para uso humano é de 500 mg/L.

Figura 08. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 1.775,62 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



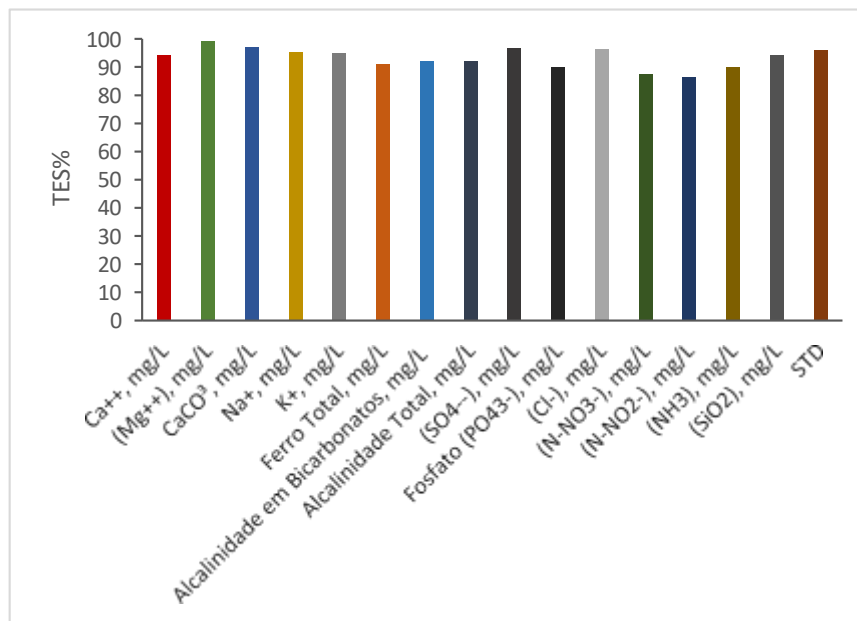
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 09. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 2.589,98 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



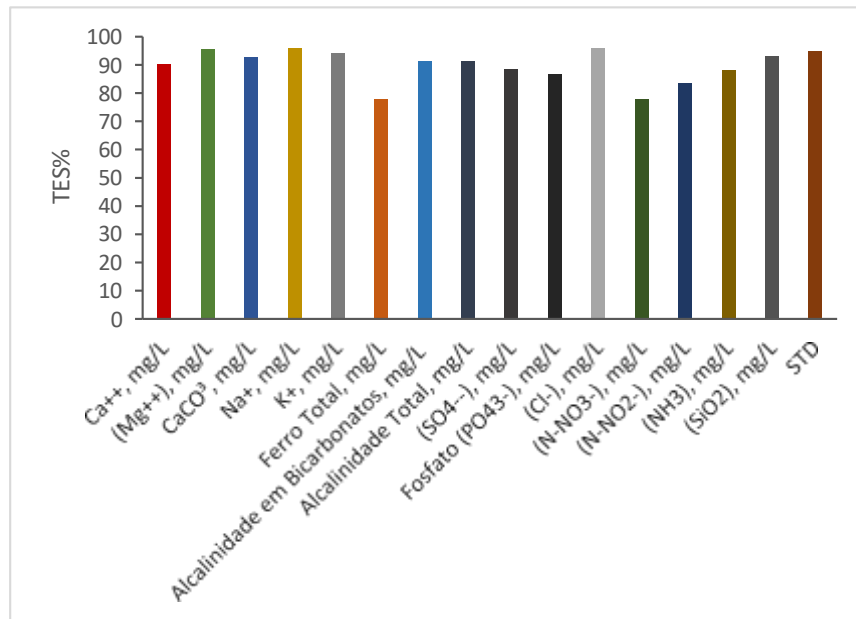
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 10. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 3.249,09 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



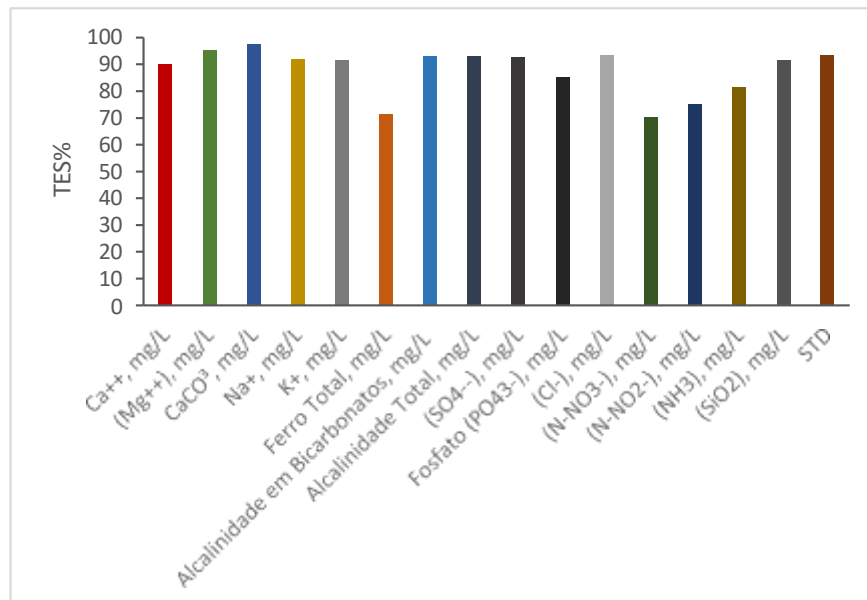
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 11. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 4.207,9mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 12. Variação da TES% para cada componente presente na alimentação, apresentando um STD de 5.554,0 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 Cor e turbidez

As Figuras 13 e 14 ilustram o comportamento das curvas da cor e turbidez do permeado e concentrado em função do tempo durante os experimentos de dessalinização. Foram coletadas amostras para analisar a cada 5 minutos durante os primeiros 30 minutos de operação, para

obter uma melhor avaliação e estabilidade dos resultados. Para o valor no tempo igual a zero ($t=0$), tem-se os valores da cor e turbidez das águas de alimentação.

De acordo com a portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, o valor máximo permissível para turbidez e cor em amostras de águas com padrão de potabilidade é de 5 NTU e 15 mg Pt-Co/L, respectivamente.

Em que:

COR C – Cor do Concentrado.

COR P – Cor do Permeado.

TUR C – Turbidez do concentrado.

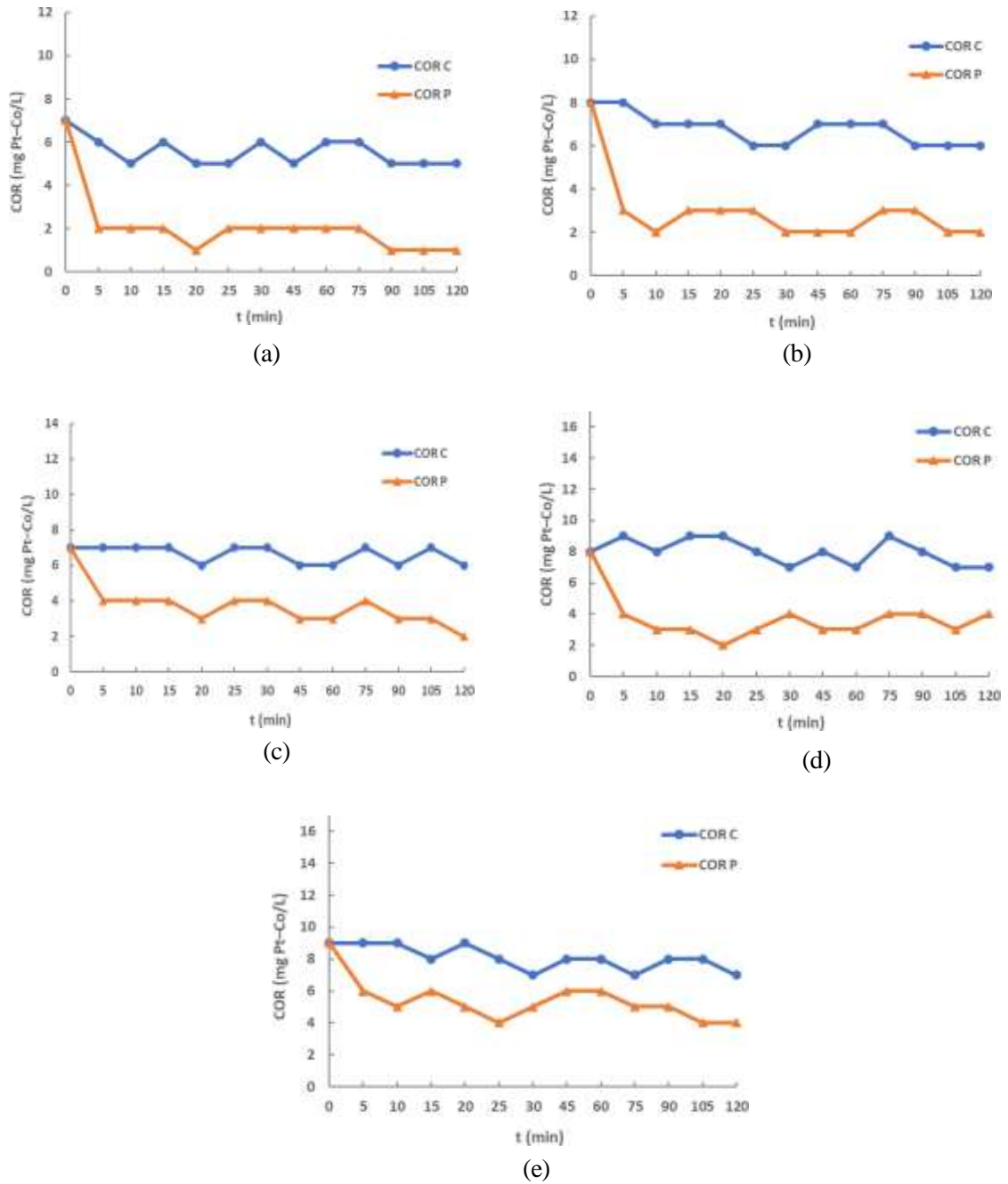
TUR P – Turbidez do permeado.

- (a) Variação da cor do concentrado e permeado do experimento 01, que apresenta uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.
- (b) Variação da cor do concentrado e permeado do experimento 02, que apresenta uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.
- (c) Variação da cor do concentrado e permeado do experimento 03, que apresenta uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.
- (d) Variação da cor do concentrado e permeado do experimento 04, que apresenta uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.
- (e) Variação da cor do concentrado e permeado do experimento 05, que apresenta uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.
- (f) Variação da TUR C e TUR P do experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.
- (g) Variação da TUR C e TUR P do experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.
- (h) Variação da TUR C e TUR P do experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de

operação.

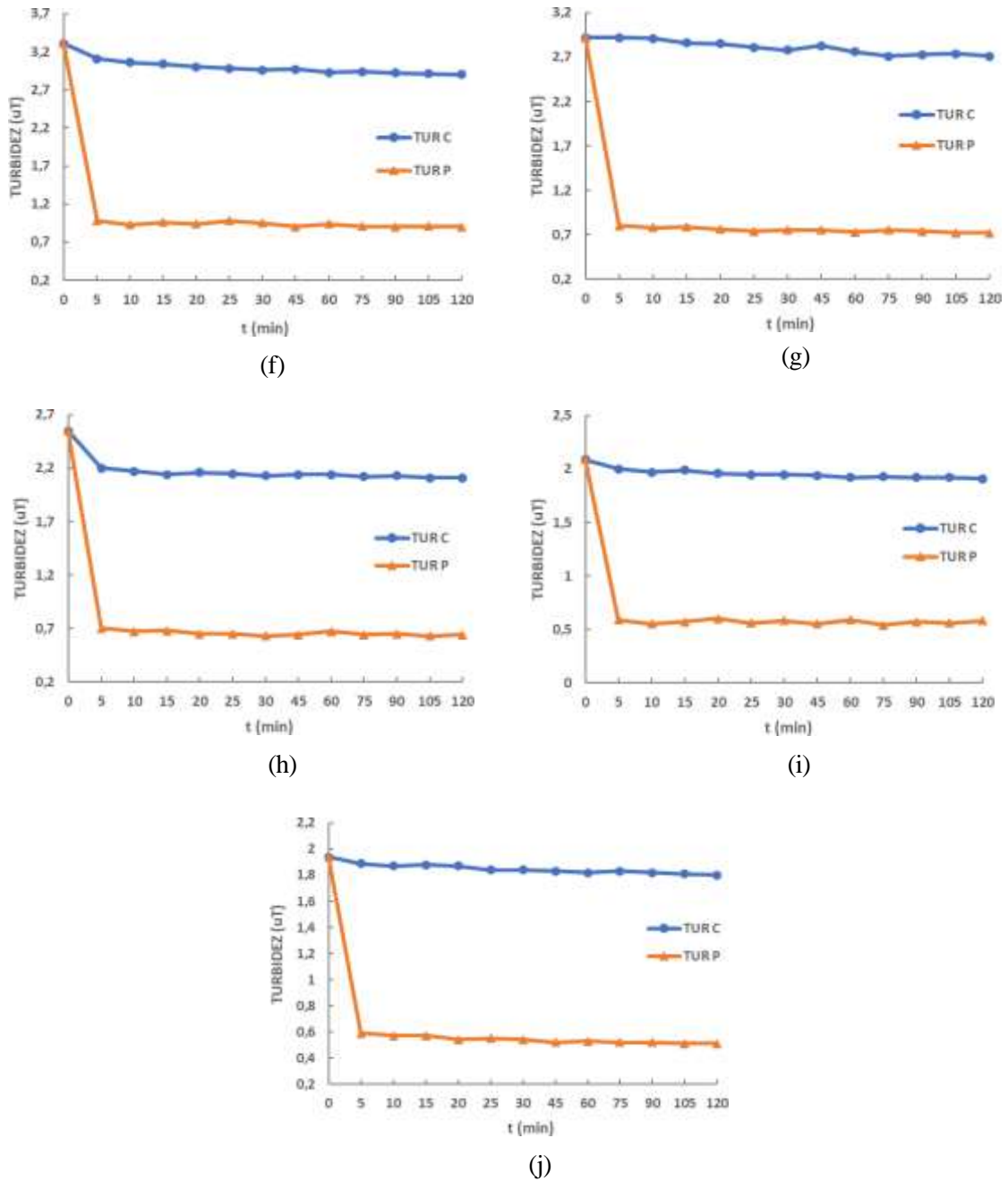
- (i) Variação da TUR C e TUR P do experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.
- (j) Variação do TUR C e TUR P do experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.

Figura 13. Variação da cor do concentrado e permeado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 que apresentam uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, 2.589,98 mg/L, 3.249,09 mg/L, 4.207,9 mg/L e 5.554,0 mg/L, respectivamente, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 14. Variação da turbidez do concentrado e permeado dos Experimento 01, 02, 03, 04 e 05 que apresentam uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, 2.589,98 mg/L, 3.249,09 mg/L, 4.207,9 mg/L e 5.554,0 mg/L, respectivamente, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Diante das Figuras 13 e 14, nota-se que tanto a cor e a turbidez do permeado quanto a do concentrado diminuíram em comparação ao valor da cor de alimentação que se encontra no tempo igual a zero. Essa diminuição da cor e turbidez durante os experimentos podem ocorrer devido ao filtro empregado no sistema, como também a membrana de UF que pode reter as partículas, colóides, micro-organismos que estejam presentes nas águas de alimentação do

sistema.

Além disso, houve oscilações nas curvas da cor durante os experimentos, principalmente na curva do concentrado, o que pode ser indicativo de mudanças na concentração de sólidos suspensos, matéria orgânica ou compostos orgânicos dissolvidos.

A maior porcentagem de remoção de cor e turbidez ocorreu no experimento 01, com 85,71% para a cor e 75,34% para a turbidez, conforme mostrado na Tabela 03.

Tabela 03. Taxa de remoção da cor e turbidez dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.

Experimentos	STD (mg/L)	Taxa de remoção da cor (%)	Taxa de remoção da turbidez (%)
01	1.775,62	85,71	75,34
02	2.589,98	62,5	72,80
03	3.249,09	77,4	75,29
04	4.207,90	70,0	72,24
05	5.554,0	60,0	72,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além disso, é importante destacar que essa redução de cor e turbidez resulta em um valor final dentro dos limites permitidos pela portaria 888/2021 do Ministério da Saúde (Apêndice A), garantindo a conformidade com os padrões de qualidade de água estabelecidos.

4.3 Potencial Hidrogeniônico

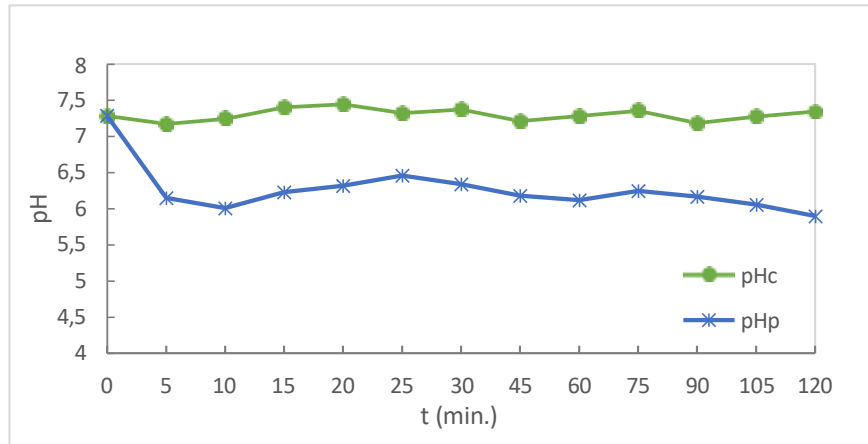
As Figuras 15, 16, 17, 18 e 19, mostra o comportamento da curva do pH em relação ao tempo de operação do sistema de membranas. Para o $t=0$, temos o valor do pH de alimentação.

Em que:

pH_c – Potencial Hidrogeniônico do Concentrado;

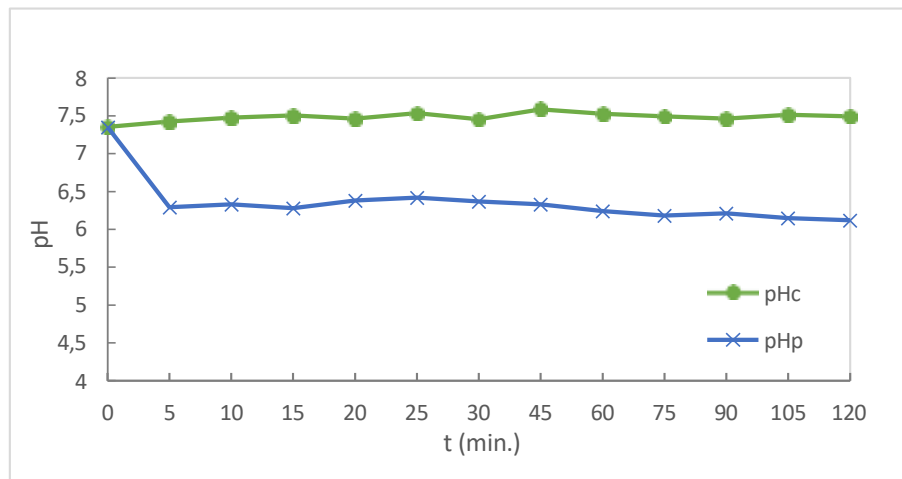
pH_p – Potencial Hidrogeniônico do Permeado.

Figura 15. Variação de pHc e pHp do experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.



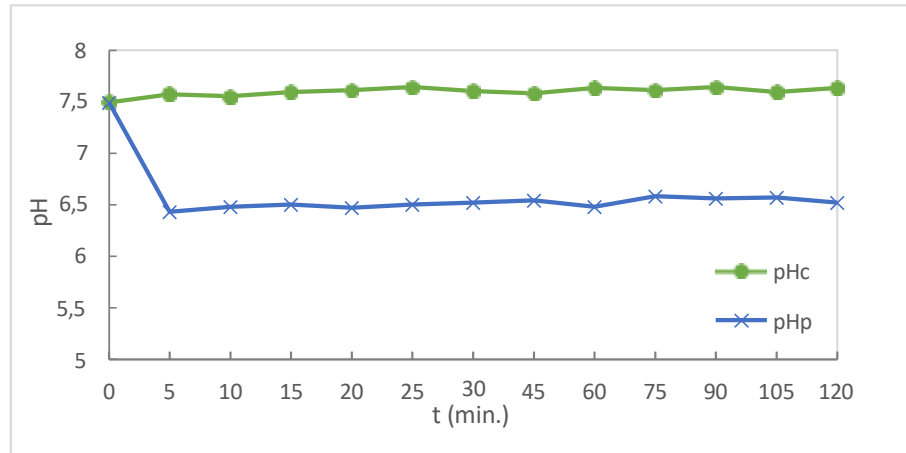
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 16. Variação do pHc e pHp do experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.



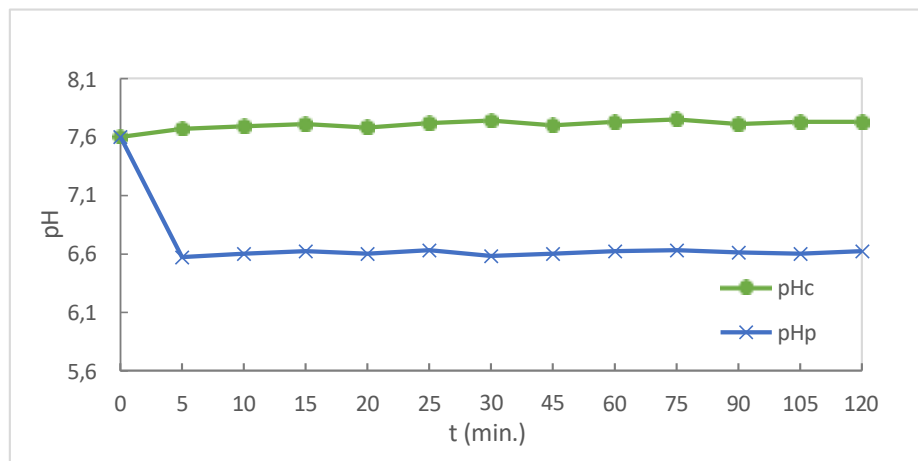
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 17. Variação do pHc e pHp do experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.



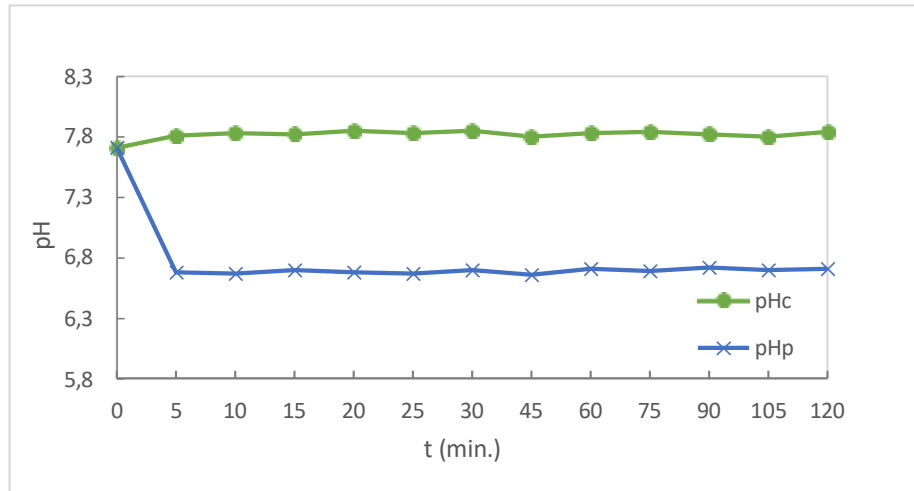
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 18. Variação do pHc e pHp do experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 19. Variação do pHc e pHp do experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observando-se as Figuras 15, 16, 17, 18 e 19, conclui-se que as curvas do permeado teve uma diminuição significativa e a do concentrado um aumento, comparado ao valor do pH de alimentação conforme ilustra no t=0 do gráfico. Isso pode ocorrer, devido ao sistema de membranas gerar duas correntes de águas, uma com maior concentração de sais e outra com menor concentração de sais dissolvidos no meio aquoso. Influenciando assim, diretamente na diminuição e ao aumento do pH. Baseado nos experimentos, esse fenômeno ocorreu independentemente da concentração da água de alimentação.

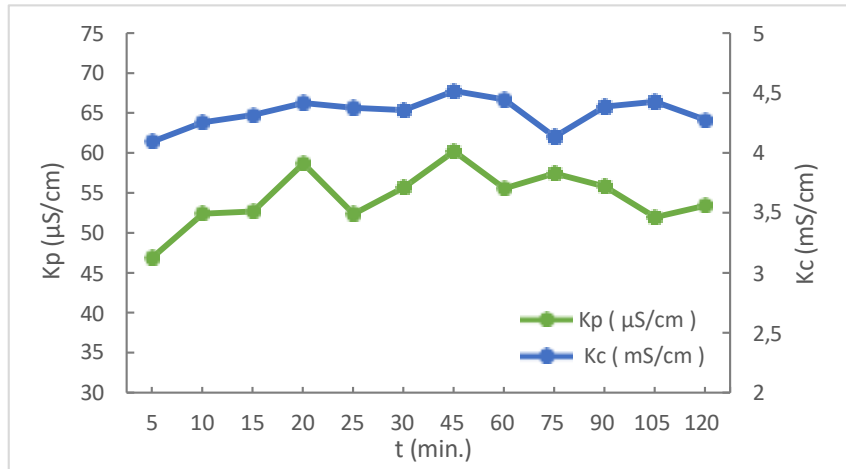
Outro fator que contribui para a diminuição do pH na água que passa pela membrana durante o processo é a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) presente na água de alimentação. O CO_2 , ao atravessar a membrana, leva à formação de ácido carbônico (H_2CO_3) na corrente do permeado, o que resulta na redução do pH.

4.4 Condutividade

As Figuras 20, 21, 22, 23 e 24 retratam evolução da condutividade elétrica na água para as correntes de concentrado e permeado em função do tempo coletadas nos experimentos do presente estudo.

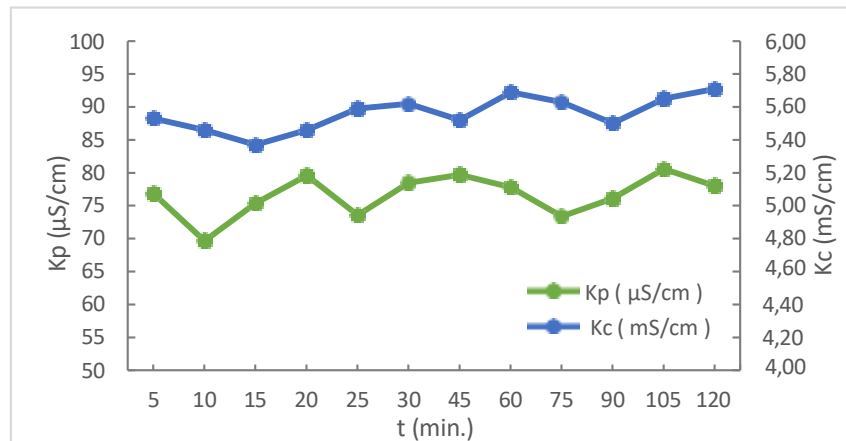
Diante as Figuras, tem-se que a curva da condutividade elétrica no concentrado (K_c) apresenta valores superiores à curva do permeado (K_p), uma vez que a concentração de sais na corrente do permeado é menor, devido ter que permear nas membranas sofrendo redução de sais. Nota-se também que houve oscilações no perfil da curva das condutividades, isso pode acontecer devido a difusão de concentração dos componentes na solução aquosa.

Figura 20. Variação da K_c e K_p do experimento 01, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 3,39 mS/cm, em função do tempo de operação.



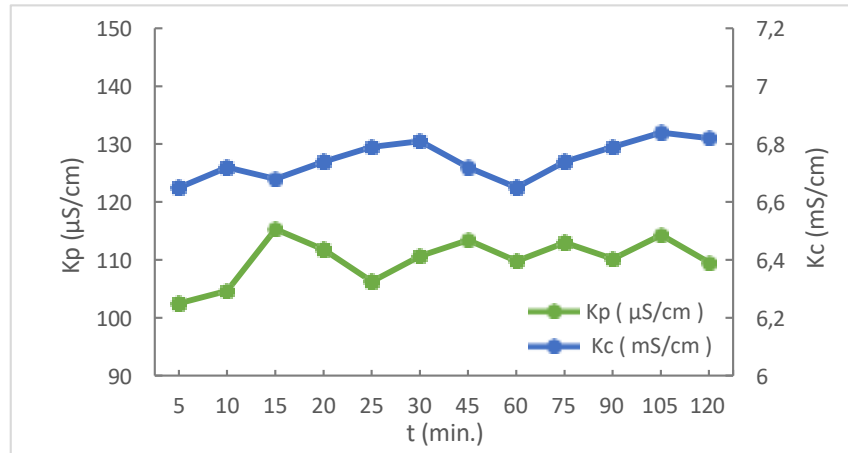
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 21. Variação da K_c e K_p do experimento 02, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 4,85 mS/cm, em função do tempo de operação.



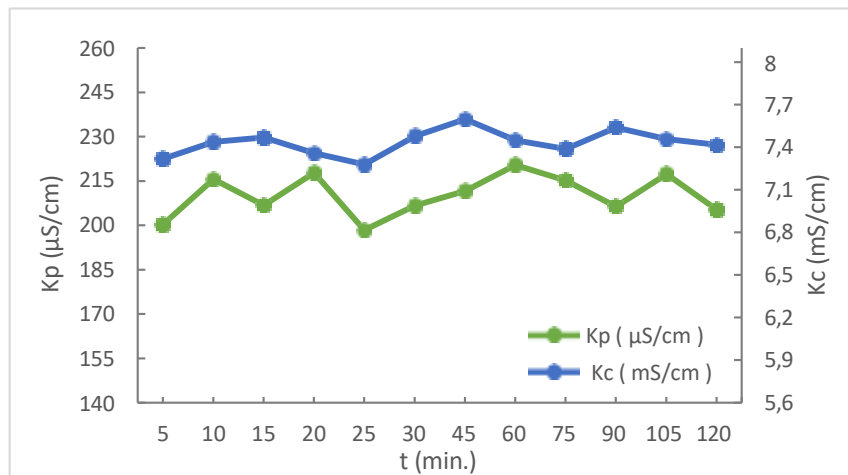
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 22. Variação da Kc e Kp do experimento 03, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 5,71 mS/cm, em função do tempo de operação.



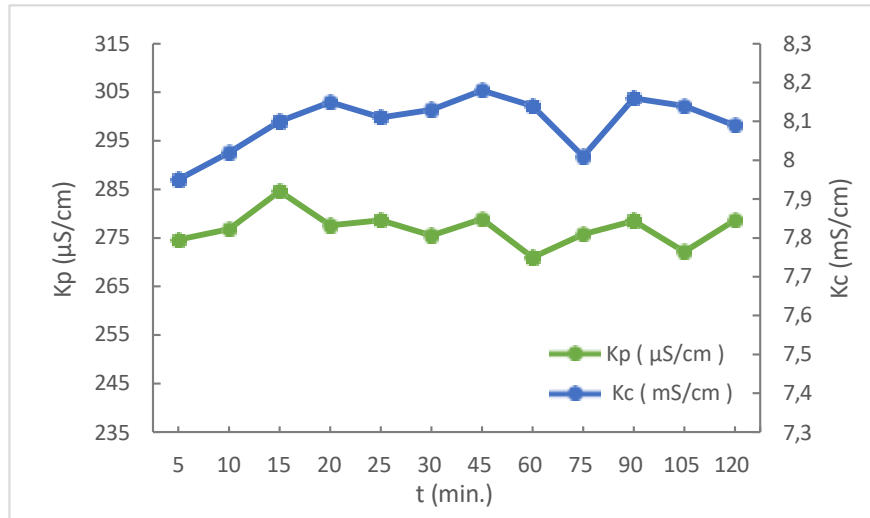
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 23. Variação da Kc e Kp do experimento 04, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 6,35 mS/cm, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 24. Variação da K_c e K_p do experimento 05, apresentando uma alimentação com condutividade igual à 7,05 mS/cm, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observando-se as Figuras 20, 21, 22, 23 e 24, nota-se que, à medida que a concentração de sais aumenta em cada experimento, os resultados das análises também aumentam. Notavelmente, o valor médio da condutividade do concentrado e do permeado no experimento 01 foi de 4,0 mS/cm e 50,31 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. No entanto, no experimento 05, esses valores aumentaram para 8,1 mS/cm e 276,96 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. Essa tendência sugere que uma menor condutividade, conforme observado no experimento 01, está associada a uma melhor qualidade de água, em comparação com concentrações mais elevadas de sais, como verificadas no experimento 05.

4.5 Pressão

As Figuras 25, 26, 27, 28 e 29, ilustram as variações no comportamento das pressões de entrada e saída do filtro e das membranas de O.I para diferentes concentrações de sais dissolvidos no meio aquoso.

Ao analisar os dados em relação às pressões com o aumento de concentração, percebe-se que as curvas tiveram um comportamento praticamente constante, tanto para a pressão do filtro quanto para as membranas de O.I. Porém, de acordo com as figuras, as membranas de O.I necessitam de uma pressão maior comparada ao filtro. Isso está relacionado aos princípios de funcionamento de cada sistema. O filtro de fibra normalmente é usado para retenção de partículas e sedimentos maiores presentes na água. A resistência ao fluxo gerada pelo filtro é relativamente baixa, uma vez que as partículas retidas não são fortemente compactadas, o que permite que a água passe com pouca resistência, necessitando assim de uma menor pressão.

Por outro lado, o sistema de O.I. utiliza membranas semipermeáveis para remover contaminantes e íons da água. Para forçar a água através dessas membranas, é necessária uma pressão significativamente maior. Essa pressão é aplicada na entrada do sistema para superar a osmose e permitir que a água purificada passe através das membranas, deixando para trás os contaminantes.

Vale destacar que:

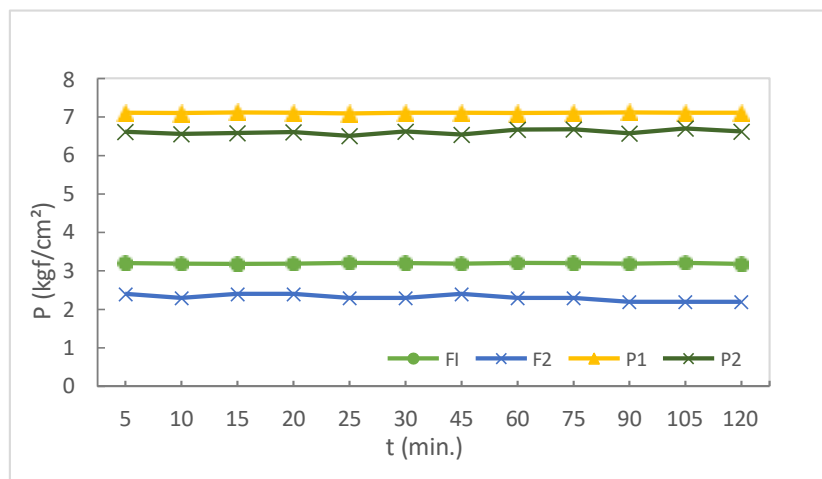
P1 – Pressão de entrada dos elementos de membranas

P2 – Pressão de saída dos elementos de membranas.

F1 – Pressão de entrada do filtro

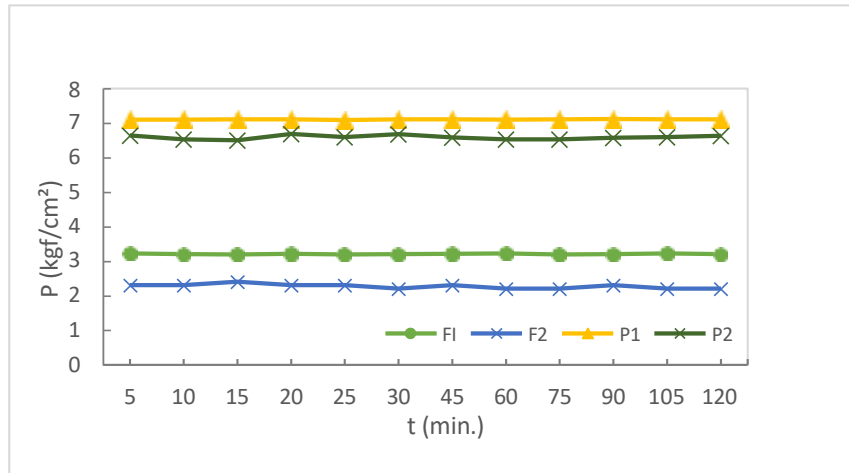
F2 – Pressão de saída do filtro.

Figura 25. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.



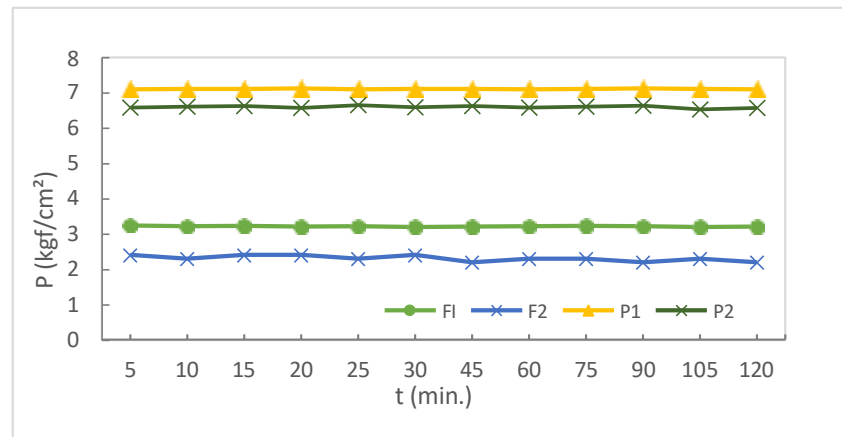
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 26. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.



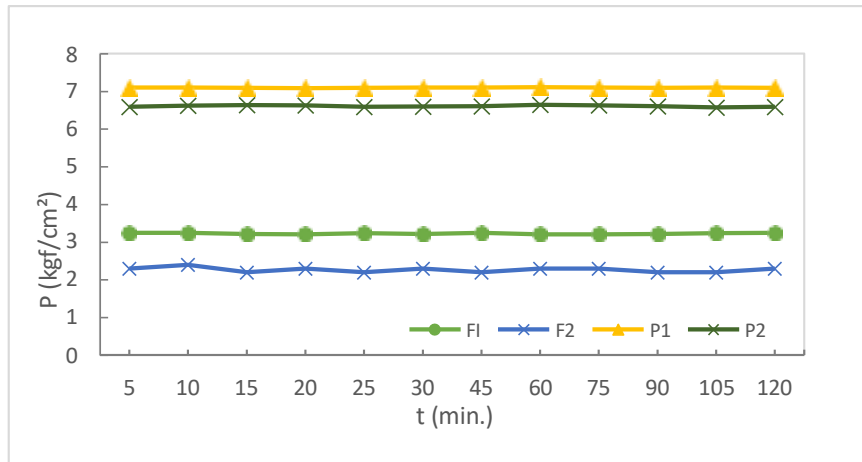
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 27. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.



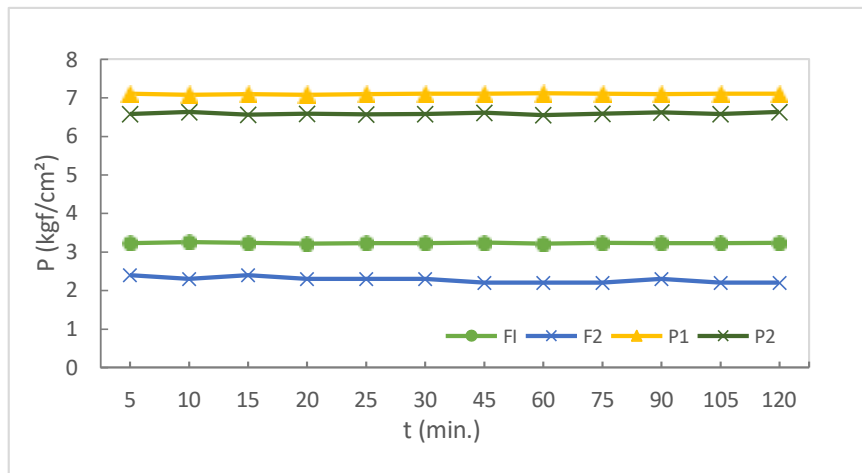
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 28. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 29. Variação da P1, P2, F1 e F2, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.6 Vazão

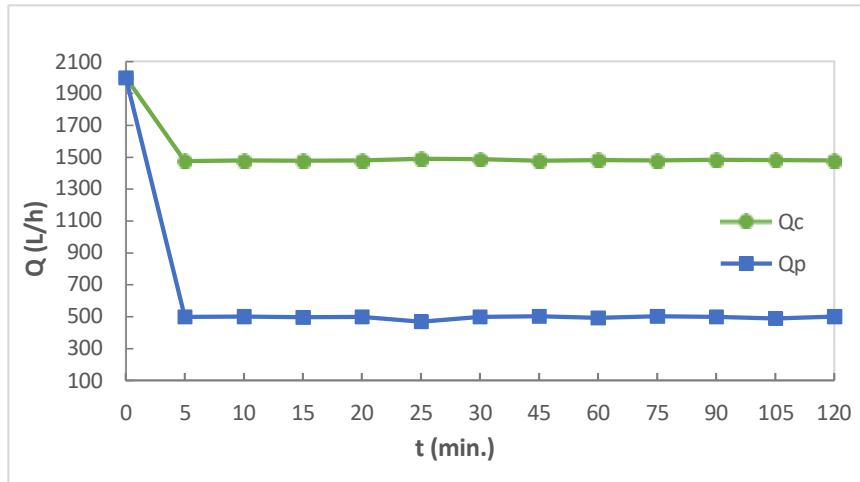
As Figuras 30, 31, 32, 33 e 34, ilustram as variações das curvas das vazões do concentrado e permeado em função do tempo de operação para os experimentos com diferentes concentrações de sais no meio aquoso. Considera-se que no tempo igual a zero ($t=0$) é a vazão de alimentação igual à 2.000 L/h.

Onde:

Q_c – Vazão do concentrado.

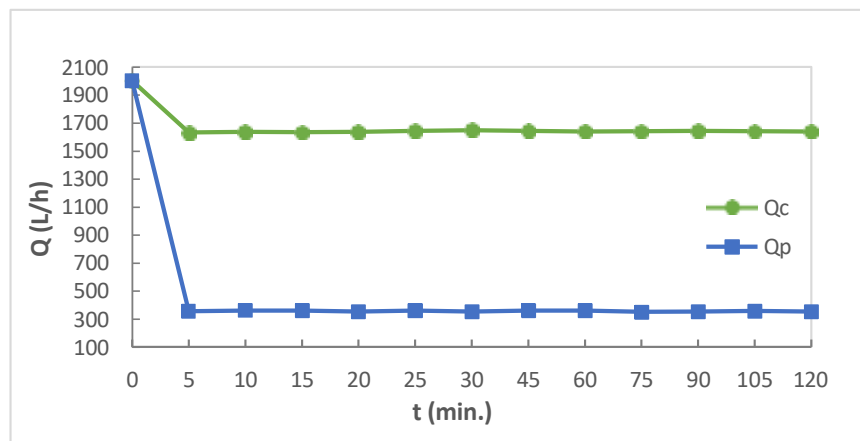
Q_p – Vazão do permeado.

Figura 30. Variação da Q_c e Q_p do Experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



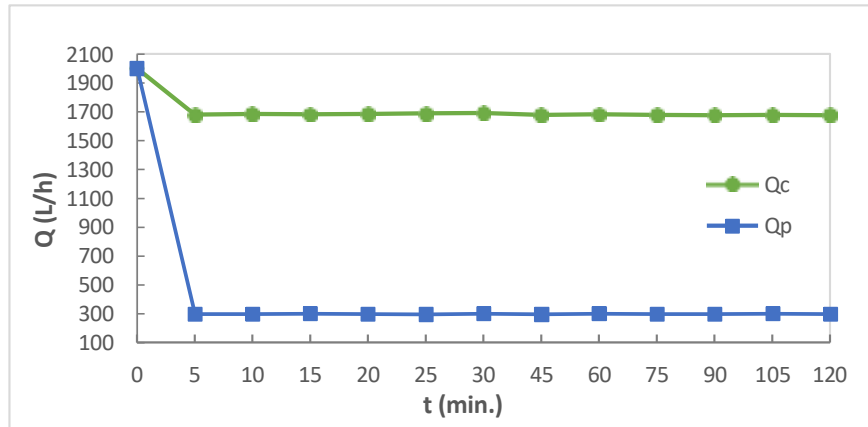
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 31. Variação da Q_c e Q_p do Experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



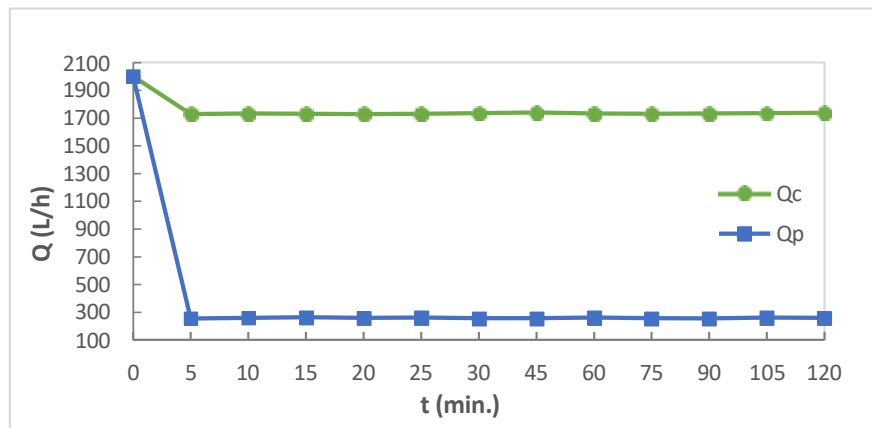
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 32. Variação da Q_c e Q_p do Experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



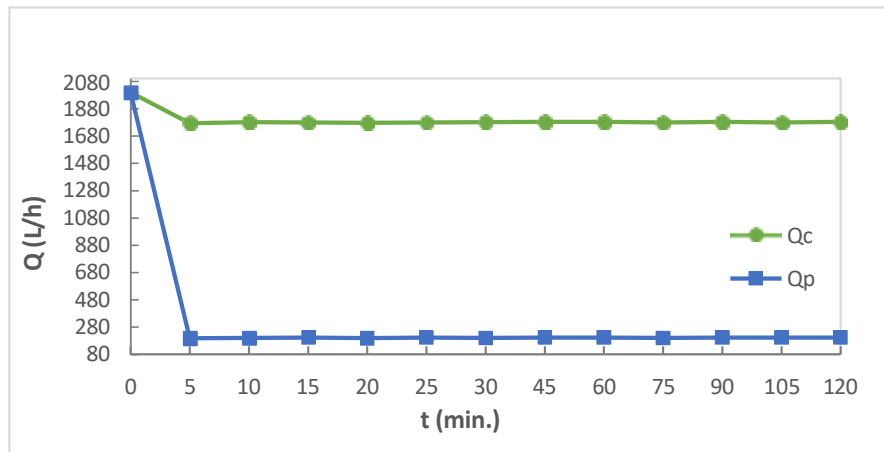
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 33. Variação da Q_c e Q_p do Experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 34. Variação da Q_c e Q_p do Experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, sob a pressão de operação de 7,10 kgf/cm².



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota-se que, à medida que aumenta a concentração de sais na água de alimentação dos experimentos, a vazão do permeado tende a diminuir e a do concentrado tende a aumentar. Isso resulta em uma redução na taxa percentual de recuperação de água do sistema. A Tabela 04 mostra o percentual de extração para cada experimento, conforme o aumento da concentração de sais.

Tabela 04. Taxa de recuperação (TR%) de água tratada dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 de acordo com o aumento da concentração de sais dissolvidos nas águas de alimentação.

Experimentos	STD (mg/L)	TR%
01	1.775,62	24,86
02	2.589,98	17,80
03	3.249,09	14,92
04	4.207,9	12,75
05	5.554,0	10,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A redução na taxa de recuperação em um sistema de O.I ocorre quando sais são adicionados à água de alimentação, devido à influência da pressão osmótica. Nessa caso, para aumentar a produção teria que aumentar a pressão de operação. Como a pressão de operação para todos os experimentos foi de 7,1 kgf/cm², que foi a pressão simulada para as condições de qualidade da água do primeiro experimento, o aumento da pressão osmótica nos experimentos subsequentes fez com que a eficiência do sistema diminuísse. Isso resultou em uma redução na vazão do permeado e, conseqüentemente, em uma diminuição na taxa de recuperação do sistema. Esse fato, do aumento da concentração de sais nas águas de alimentação leva à tendência natural de formação de incrustações na superfície das membranas. Embora isso não tenha sido um ponto de estudo neste trabalho, seria interessante ser estudado. Diante disso, seria interessante realizar limpeza químicas entres os experimentos para se observar os efeitos das precipitações de sais. Nessa mesma linha de estudo, para evitar esses problemas, seria importante analisar o efeito dos antincrustantes adicionados à linha de alimentação do sistema, visando avaliar sua eficiência em termos de concentração e vazão. Nesse caso, observa-se que este trabalho abrange outros parâmetros importantes que estão relacionados com o desempenho geral do sistema.

4.7 Temperatura

A temperatura desempenha um papel fundamental no funcionamento eficaz do processo de separação com membranas poliméricas. O comportamento térmico do sistema é, portanto, um fator de suma importância a ser considerado.

As Figuras 35, 36, 37, 38 e 39, apresentam a evolução do perfil da variação das curvas de temperaturas das águas de alimentação, permeado e concentrado em função do tempo para os experimentos realizados no presente estudo.

Onde:

T.a – Temperatura da alimentação.

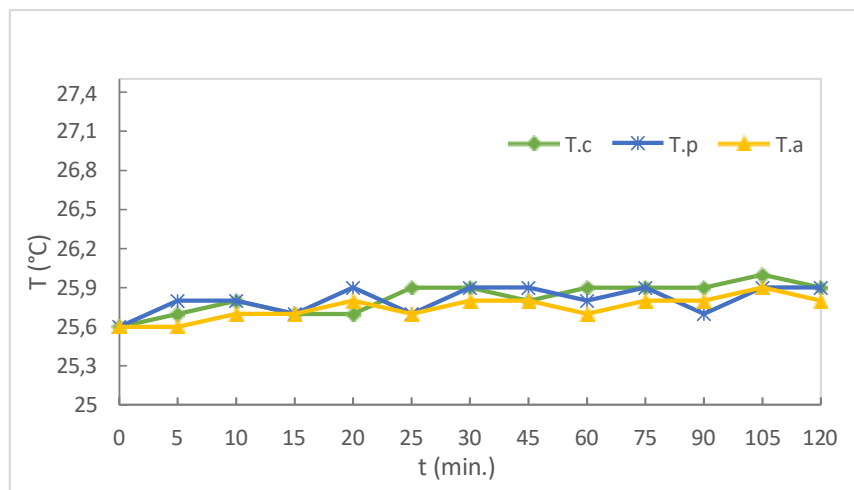
T.c – Temperatura do concentrado.

T.p – Temperatura do permeado.

Diante as Figuras, nota-se que os perfis das curvas de temperatura tiveram uma variação muito baixa ($\pm 0,6^{\circ}\text{C}$) em relação as águas de alimentação, concentrado e permeado durante todos os experimentos. Isso pode ocorrer devido a não ter tido uma troca de calor tão significativa entre as águas e os equipamentos do sistema, o que faz com que não haja uma discrepância nas temperaturas das águas.

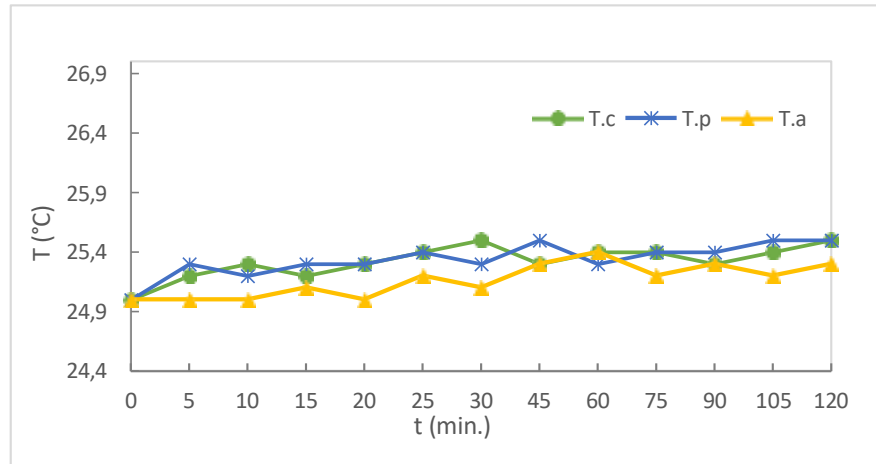
No entanto, essa pequena troca de calor durante os experimentos é válida, pois sistemas de membranas poliméricas que operam em temperaturas elevadas podem ter sua eficiência reduzida devido à degradação química do material polimérico da membrana, perda de seletividade e outros pontos negativos.

Figura 35. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 01, apresentando uma alimentação de STD igual à 1.775,62 mg/L, em função do tempo de operação.



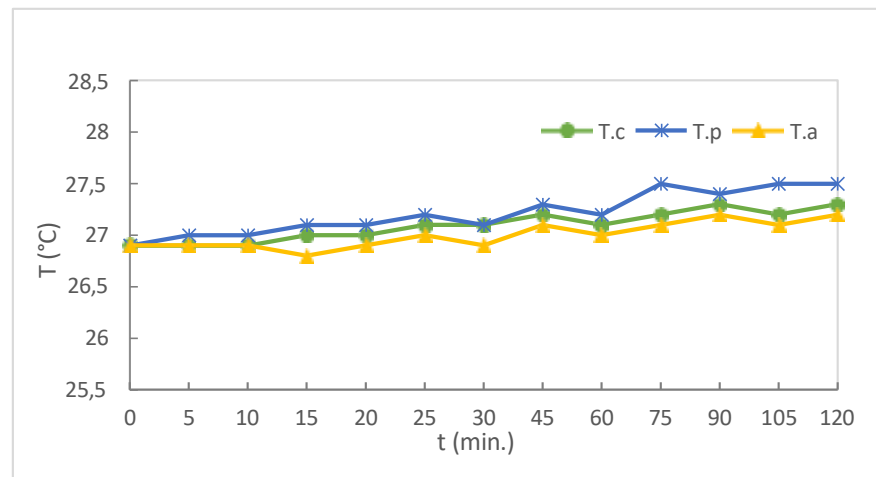
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 36. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 02, apresentando uma alimentação de STD igual à 2.589,98 mg/L, em função do tempo de operação.



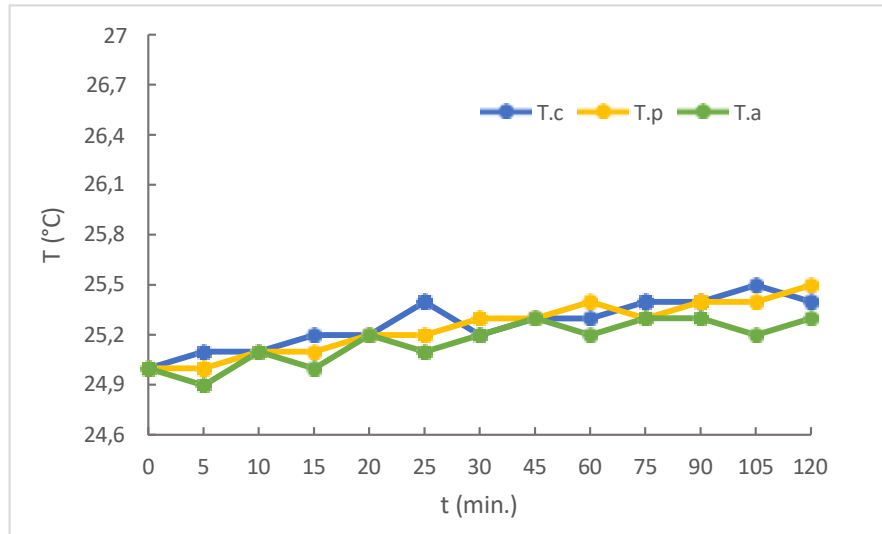
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 37. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 03, apresentando uma alimentação de STD igual à 3.249,09 mg/L, em função do tempo de operação.



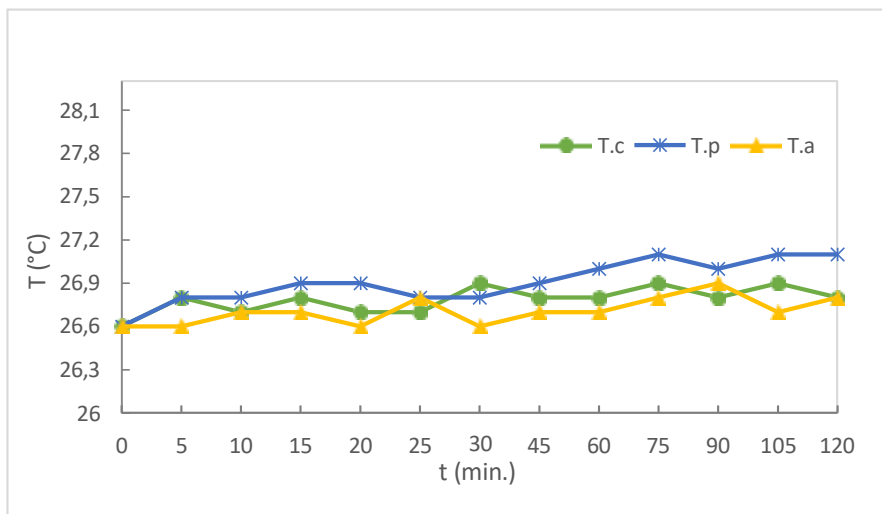
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 38. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 04, apresentando uma alimentação de STD igual à 4.207,9 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 39. Variação da T.a, T.c, T.p do Experimento 05, apresentando uma alimentação de STD igual à 5.554,0 mg/L, em função do tempo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.8 Análises Bacteriológicas

A Figura 40, mostra os resultados das análises microbiológicas de coliformes totais realizadas a partir das águas de Alimentação (A), Concentrado (C) e Permeado (P) referente aos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05, respectivamente, conforme descritos nos respectivos frascos.

Onde:

- (a) Amostras de águas da alimentação (A), concentrado (C) e permeado (P)

do EXP.01.

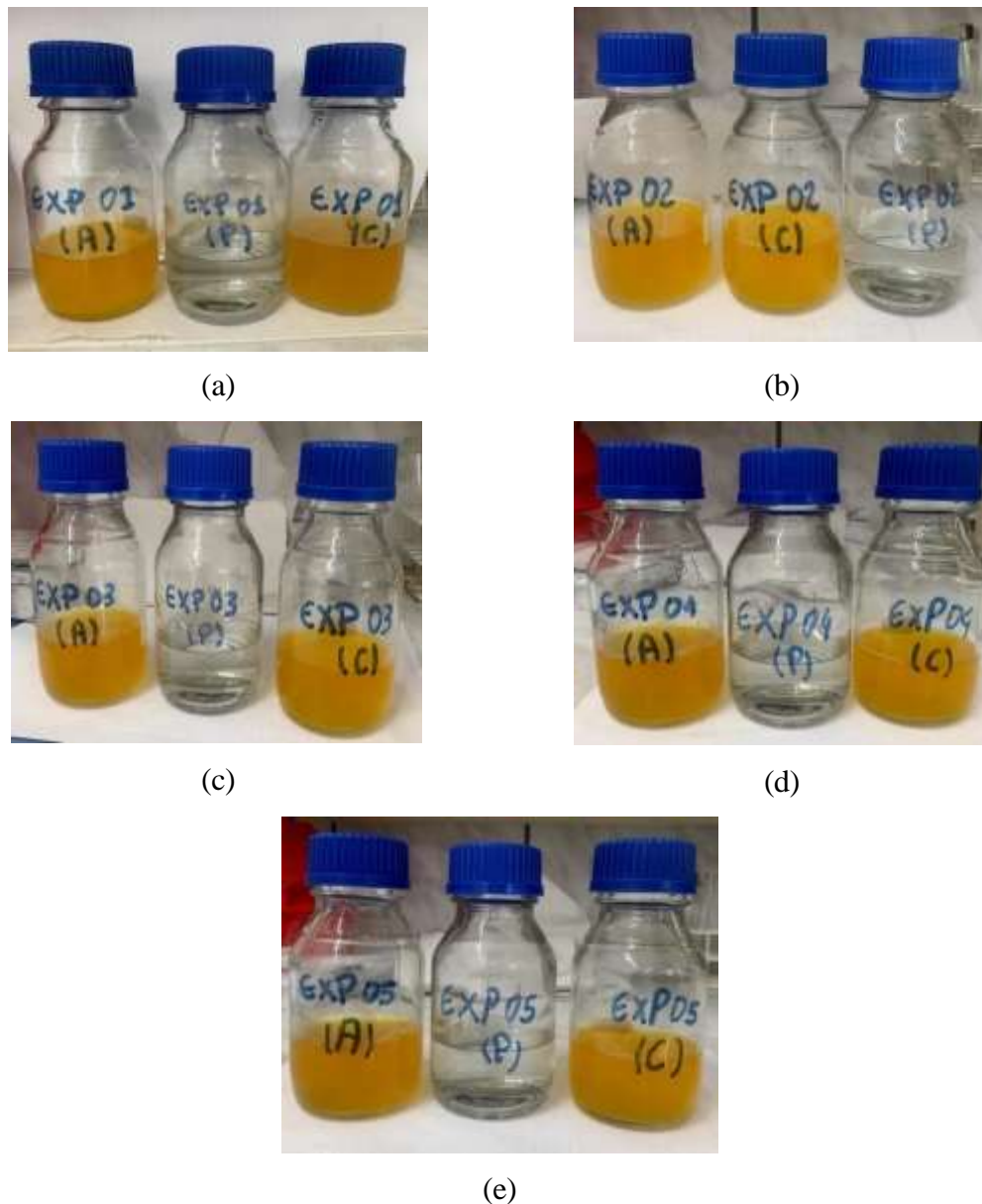
(b) Amostras de águas da alimentação (A), concentrado (C) e permeado (P) do EXP.02.

(c) Amostras de águas da alimentação (A), concentrado (C) e permeado (P) do EXP.03.

(d) Amostras de águas da alimentação (A), concentrado (C) e permeado (P) do EXP.04.

(e) Amostras de águas da alimentação (A), concentrado (C) e permeado (P) do EXP.05.

Figura 40. Análises bacteriológicas da alimentação, concentrado e permeado referente aos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.



Fonte: Reprodução própria (2023)

Conforme a Figura 40, as amostras das águas de alimentação (A) e concentrado (C) dos cinco experimentos apresentaram contaminação por coliformes totais, evidenciada pela coloração amarelada das amostras nos frascos. Essa cor amarelada aparece devido colocar um meio de cultura na amostra de água que ao fermentar com o coliforme ocorre essa mudança de cor da água, evidenciando a presença da bactéria de coliformes totais. No entanto, as análises bacteriológicas dos permeados (P) não revelaram a presença de coliformes totais, ressaltando a segurança do processo para a purificação das águas. Isso acontece devido à água do permeado ter que penetrar os microporos das membranas, fazendo com que as bactérias fiquem retidas na

superfície das mesmas, e a água saia tratada sem contaminação. Enquanto a água do concentrado não penetra e, assim, não foi possível remover a contaminação da água de alimentação.

Com o objetivo de identificar a presença de *Escherichia coli*, as amostras foram submetidas à exposição à luz ultravioleta (UV), conforme mostra na Figura 41. Caso haja bactérias de *Escherichia coli* na amostra de água, esta apresentará um aspecto de neon; caso contrário, não haverá presença dessa bactéria. No entanto, diante a Figura 41, os resultados obtidos foram negativos, indicando a ausência dessa bactéria patogênica nas amostras analisadas. Os laudos 001/2023, 002/2023, 003/2023, 004/2023 e 005/2023 (Apêndice B) mostram os resultados das análises microbiológicas ao longo do processo de dessalinização.

Figura 41. Análises bacteriológicas da alimentação, concentrado e permeado referente aos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.

Experimento 01



Experimento 02



Experimento 03



Experimento 04



Experimento 05



Fonte: Reprodução própria (2023)

4.2.10 Custo de Produção

O custo de produção do sistema híbrido de membranas é em função do consumo de energia durante os experimentos. A Figura 41, ilustra o perfil das curvas do consumo de energia específico para cada experimento em função do tempo de operação do sistema.

A Figura 41, mostra que o consumo de energia aumenta em função da concentração de sais distribuídos na água de alimentação do sistema, mantendo-se uma pressão de alimentação constante ($7,1 \text{ kgf/cm}^2$) para todos os experimentos. Esse fato se dá em função do aumento da pressão osmótica do meio aquoso, o que aumenta a perda de pressão durante os experimentos.

Onde:

CEE. – Consumo de energia específico (kWh/m^3)

C. P – Custo de produção ($\text{R\$/m}^3$)

CEE. Exp.01 – Consumo de energia específico do Exp.01.

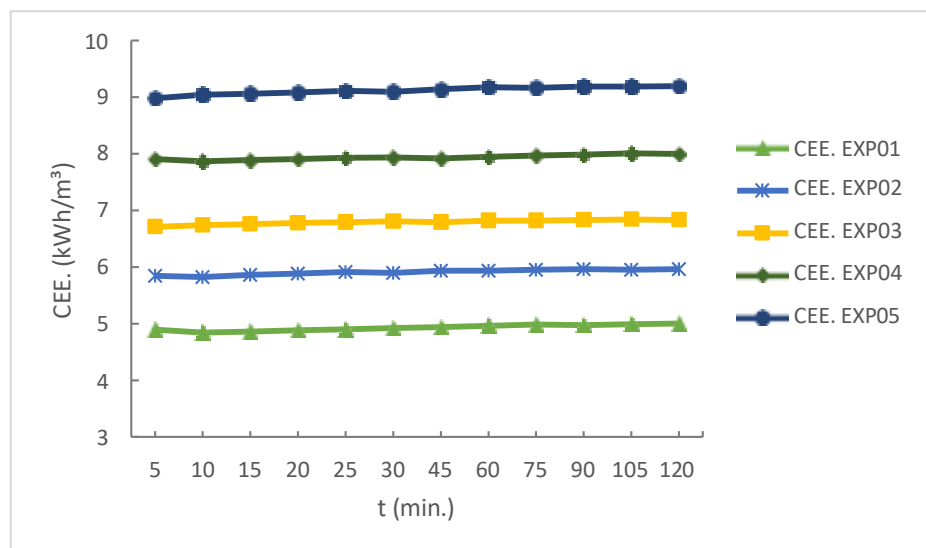
CEE. Exp.02 – Consumo de energia específico do Exp.02.

CEE. Exp.03 – Consumo de energia específico do Exp.03.

CEE. Exp.04 – Consumo de energia específico do Exp.04.

CEE. Exp.05 – Consumo de energia específico do Exp.05.

Figura 41. Variação do consumo específico de energia dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05, sob a pressão de operação de $7,10 \text{ kgf/cm}^2$.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir dos dados de consumo de energia, temos a Tabela 05. Nesta tabela, apresentamos os custos de produção de água para cinco diferentes experimentos, variando a concentração de sais em cada um deles.

Tabela 05. Consumo específico de energia e custo de produção para os Experimentos 01, 02, 03, 04, 05.

Exp. / STD (mg/l)	CEE. (kwh/m³)*	C.P (Tarifa Rural – 0,56 (R\$/kWh)) (R\$/m³)*
01 / 1.775,62	4,94	2,77
02 / 2.589,98	5,93	3,32
03 / 3.249,09	6,81	3,81
04 / 4.207,90	7,94	4,44
05 / 5.554,00	9,14	5,12

* Valor médio do CEE. e C.P para cada experimento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Diante os dados, temos que:

- **Experimento 01:** Este experimento alcançou um custo de 2,77 R\$/m³, apresentando o menor custo de produção para o sistema híbrido de membranas. Comprovando que, quanto menor a concentração de sais, mais econômica é a produção de água por sistemas de membranas sob a mesma pressão de operação. Isso acontece, devido à menor necessidade de intensificação de processos de purificação e dessalinização.
- **Experimento 05:** Este experimento apresenta o custo mais alto, indicando que concentrações mais elevadas de sais aumentam os custos de produção. Isso pode estar relacionado à necessidade de processos mais intensivos de dessalinização, o que torna o processo mais dispendioso.

Em geral, nota-se que os dados da tabela mostram que a concentração de sais influencia diretamente o custo de produção de água tratada quando se trabalha sob pressão de operação constante. Quanto menor a concentração de sais, menor é o consumo específico de energia no sistema, o que resulta em menor custo de produção. No entanto, apesar do aumento do consumo de energia e do custo de produção considerando os cinco experimentos, o experimento 05, que apresentou o maior custo de produção, com 5,12 R\$/m³ para o tratamento de águas salobras, ainda está dentro de um valor acessível quando comparado com outros tipos de água ofertada no mercado.

5. CONCLUSÃO

Diante os resultados obtidos para o referido sistema de membranas, conclui-se que:

- A comparação entre os dados simulados e obtidos experimentalmente da dessalinização da água misturada mostrou que o desempenho, em termos de recuperação da água tratada do sistema de membranas, foi de 24,86%, o que foi muito próximo do valor obtido pelo *software Winflows 4.03*, de 25%.
- É possível verificar que, à medida que o nível de concentração de sais na água de alimentação aumenta e a pressão de operação é mantida constante, os dados da TES% diminuem. Diante o estudo, temos uma taxa de extração de 98,83% para o STD de 1.775,62 mg/L e 93,40% para o STD de 5.554,0 mg/L;
- A TR% do sistema híbrido de membranas, um dos principais parâmetros relacionados ao desempenho, mostrou estar diretamente ligada à concentração de sais dissolvidos na água de alimentação quando a pressão de operação é mantida constante. Nos experimentos com a menor e a maior taxa de concentração de sais dissolvidos na água de alimentação, a TR% do sistema híbrido foi de 24,86% e 10,02%, respectivamente.
- As análises bacteriológicas revelaram que a água de alimentação dos experimentos estava contaminada por coliformes totais, e o sistema híbrido de membranas de dessalinização foi eficaz no tratamento. A água tratada atendeu aos padrões exigidos pela portaria 888/2021.
- Os valores obtidos do consumo de energia e custo de produção em função do tempo de operação do sistema mostraram que quanto menor o nível de concentração de sais dissolvidos na água de alimentação, menor será o consumo de energia, bem como o custo de produção, para as mesmas condições de operação, ou seja, a pressão constante.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Esse estudo além de ser explorado o rendimento do sistema *versus* as concentrações de sais dissolvidos nas águas de alimentação, estudar também os tipos de antincrustantes que são vendidos no mercado *versus* suas concentrações/dosagens para a vazão de alimentação do sistema.
- Outro ponto importante é realizar um estudo de normalização, visando estudar o desempenho do sistema e conseqüentemente desenhar uma programação de limpeza química das membranas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Panorama das Águas: Águas no Mundo**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo#>. Acesso em: 04 de set. de 2020.

ALMEIDA, Juliano Penteadó de. EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA UTILIZANDO ULTRAFILTRAÇÃO E OSMOSE REVERSA. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/30>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

ARAUJO, G. S, ROSA, T. S, OLIVEIRA, T. M. **Dessalinização de água salobra por osmose reversa: uma revisão de literatura**. Journal of Exact Sciences. 2021. Disponível em: https://www.mastereditora.com.br/periodico/20211013_095530.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

APHA/AWWA/WEF (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Denver.

BAKER, R. W. **Membrane technologies and applications**. 2. ed. California: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

BARBOSA, C. N. R. **DESSALINIZAÇÃO POR MEMBRANAS: Tecnologias consagradas e emergentes**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888**, de 04 de maio de 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acessado em: 11 de outubro de 2023.

CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**. Lancaster: Technomic Publishing CO., INC, 1998.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 357**, 18 de março de 2005. Diário Oficial, n. 053, p. 58–63, 2005.

COPPEN, J. **Advanced wastewater treatment systems**, 2004, 92 F. Dissertation (Bachelor of Engineering – Civil) – University of Southern Queensland and Faculty of Engineering and

Surveying – Toowoomba, Australia, 2004.

EL-DESSOUKY, H. T.; ETTOUNEY, H. M. **Fundamentals of Salt Water Desalination.** Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2002.

ELIMELECH, M., PHILLIP, WA (2011). **O Futuro da Dessalinização da Água do Mar: Energia, Tecnologia e Meio Ambiente.** *Ciência*, 333, 712-717. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1200488>. Acessado em: 02 de agosto de 2023.

FRITZMANN, C.; LOWENBERG, J.; WINTGENS, T.; MELIN, T. **State-of-the-art of reverse osmosis desalination.** *Desalination*. N. 216, p. 1-76, 2007.

GEISE, G. M., LEE, H. S., MILLER, D. J., FREEMAN, B. D., **Membrane water purification: the role of polymer science.** *Journal of Polymer Science Parte B: Polymer Physics*, 2021. Volume 48 , Edição 15, Páginas 1685-1718. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/polb.22037>. Acessado em: 29 de setembro de 2023.

GHAFFOUR, N., MISSIMER, TM e AMY, GL., 2013. **Revisão técnica e avaliação da economia da dessalinização da água:** desafios atuais e futuros para uma melhor sustentabilidade do abastecimento de água. *Dessalinização*, 309, 197-207. doi:10.1016/j.desal.2012.10.015

GOVERNO entrega mais oito sistemas de dessalinização do Programa Água Doce. Governo da Paraíba, 2023. Disponível em: < <https://paraiba.pb.gov.br/noticias/governo-entrega-mais-oito-sistemas-de-dessalinizacao-do-programa-agua-doce>>. Acesso em: 08 de agosto de 2023.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas.** Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HABERT, A. C. P.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Uma abordagem integrada no estudo da filtração em membranas: ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa.** *Química Nova*, 2006, 29(6), 1314-1320.

HASSON, D. et al. **High recovery brackish water desalination process devoid of precipitation chemicals.** *Desalination*, v. 283, p. 80–88, 2011.

IGUI ecologia, 2023. Disponível em: <https://www.iguiecologia.com/como-e-feito-o-processo->

de-dessalinizacao/. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

KALOGIROU, S. A. **Seawater desalination using renewable energy sources**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 31, n. 3, p. 242–281, 2005.

KIMURA, S., **Analysis of reverse osmosis membrane behaviors in a long-term verification test**. Desalination. Elsevier. Volume 100, Issues 1–3, January 1995, Pages 77-84. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(96\)00009-4](https://doi.org/10.1016/0011-9164(96)00009-4). Acessado em: 10 de outubro de 2023.

INFOPÉDIA, 2023. **Porto: Porto Editora**. [consult. 2023-11-28 22:56:53]. Disponível em [https://www.infopedia.pt/\\$cloretos](https://www.infopedia.pt/$cloretos).

LENNTECH, 2023. Disponível em: <https://www.lenntech.com.pt/processes/reverse-osmosis-demineralization.htm>. Acesso em: 17 de outubro de 2023.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MIDR, 2023). **Programa Água Doce**. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/programa-agua-doce/programa-agua-doce-1>. Acesso em: 17 de agosto de 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Água Doce**. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/doc_PAD_01.pdf. Acesso em: 4 de Setembro de 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **ÁGUA: um recurso cada vez mais ameaçado**. Brasília, p. 25-40, 2018.

MISHRA, R. K., Development of characteristic equations for PVT-CPC active solar distillation system. **Desalination**. Elsevier. Volume 445, 1 November 2018, Pages 266-279. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.08.009>. Acessado em: 02 de outubro de 2023.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. Springer Netherlands, 1999. DOI: 10.1007/978-94-009-1764-3

NARDY, J. F. et al., **Estudo espectrofotométrico de turbidez em água para as indústrias de bebidas e alimentos de origem animal**. Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal, Fortaleza, v. 14 , n. 3, p. 1 - 13, jul./set. 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/55086>. Acessado em: 12 de setembro de 2023.

NEWMAN, B. **Água**. Dancing Times, v. 101, n. 1202, p. 69, 2010.

OLIVEIRA, A. F. de. **Membranas de ultrafiltração: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2010.

PROCESSOS de separação, 2023. **Portal laboratórios Virtuais**. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=206. Acessado em: 13 de maio de 2023.

SARAIVA, MARYA D. C.; SILVA, THAYLON M. F.; PAIXÃO, LETÍCIA A.; SILVA, MARYNA A.; FERNANDES, MORGANA B.; LEANDRO, LÍVIA M. G.; AQUINO, PEDRO E. A.; SILVA, RAKEL O. M.; **Análise bacteriológica da água utilizada para consumo humano**, Barbalha - CE. Revista Saúde (Sta. Maria). 2020; 46 (1).

SEMIAT, R. **Desalination: Present and future**. Water International, v. 25, n. 1, p. 54–65, 2000.

STRATHMANN, H. Membrane Science and Technology: **Industrial, Biological, and Waste Treatment Processes**. John Wiley & Sons, 2011.

SHATAT, M.; RIFFAT, S. B. **Water desalination Technologies utilizing conventional and renewable energy sources**. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2012.

TWDB – Texas Water Development Board. Lake, Peter M.; Jackson, Kathleen; Paup, Brook T.; Walker, Jeff. **The Future of Desalination in Texas**. 2020. Biennial Report on Seawater and Brackish Groundwater Desalination in Texas. 87th Texas Legislative Session.

UNESCO, W. W. A. P. **Água E Mudança. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**, p. 12, 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). 1999. **Update of ambient water quality criteria for ammonia** Washington, DC: Office of Water/Office of Science and Technology, 1999.

YOUNOS, T.; TULOU, K. E. Overview of Desalination Techniques. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 132, n. 1, p. 3–10, 2005.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Análises físico-químicas das águas de alimentação, permeado e concentrado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 realizados no sistema híbrido de membranas de dessalinização do LABDES.

Tabela 07. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.02.

LAUDO N°.: 02/2023		Resp. pela coleta: CTTD			
Município: Campina Grande - PB		Vazão (*): 2000 L/h			
Procedência: Concentrado do Experimento 01 – Experimento 02					
PARÂMETROS					
	Alim.	Conc.	Perm.	VPM (**)	TES (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	4.845,00	5.721,00	76	--	--
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0 °C	7,35	7,41	6,12	6,0 a 9,0	--
Turbidez, (uT)	2,92	2,71	0,72	5,0	75,34
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	8,0	6,0	3,0	15,0	62,5
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	74,6	88,86	1,03	--	98,61
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	122,48	145,62	1,6	--	98,69
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	592,24	703,02	7,54	300	98,72
Sódio (Na ⁺), mg/L	708,19	843,21	9,89	200	98,60
Potássio (K ⁺), mg/L	2,94	3,46	0,05	--	98,29
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	0,2	--
Ferro Total, mg/L	0,18	0,22	0,006	0,3	96,7
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	73,89	86,98	1,26	--	98,29
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	73,89	86,98	1,26	--	98,29
CO ₂ livre (mg/L)	5,44	5,45	5,3	--	25,7
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	86	103,59	0,59	250,0	99,31
Fósforo Total, mg/L	0,25	0,30	0,02	--	92,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.480,01	1.759,04	20,28	250,0	98,62
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,05	0,06	0,0	10,0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,006	0,006	0,001	1,0	87,5
Amônia (NH ₃), mg/L	0,81	0,96	0,05	1,2	93,82
Sílica, mg/L (SiO ₂)	39,04	46,50	0,49	--	98,74
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,68	-0,6	-5,72	≤ 0	--
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	2.589,98	3.079,87	34,89	500,0	98,65

VMP (**) Valor Máximo Permitido à cada mg/L de acordo com a portaria 888/2021.

Tabela 08. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.03.

LAUDO N°. : 03/2023		Resp. pela coleta: CTTD			
Município: Campina Grande - PB		Vazão (*): 2000 L/h			
Procedência: Concentrado do Experimento 02 – Experimento 03					
PARÂMETROS					
	Alim.	Conc.	Perm.	VPM (**)	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	5.710,00	6.813,00	221,2	--	--
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0 °C	7,49	7,63	6,2	6,0 a 9,0	--
Turbidez, (uT)	2,55	2,11	0,63	5,0	75,29
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	7,0	6,0	2,0	15,0	77,4
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	95	103	5,4	--	94,31
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	161,2	172,8	1,2	--	99,25
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	822	906	27	300	97,02
Sódio (Na ⁺), mg/L	939,1	987,2	43,1	200	95,41
Potássio (K ⁺), mg/L	3,9	7,3	0,2	--	94,87
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	0,2	-
Ferro Total, mg/L	0,22	0,28	0,02	0,3	90,90
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	89	102	6,4	--	91,89
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	89	102	6,4	--	91,89
CO ₂ livre (mg/L)	7,3	11,6	6,7	--	3,02
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	110,5	151,3	3,9	250,0	96,47
Fósforo Total, mg/L	0,29	0,30	0,03	--	89,65
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.948,00	2.263,2	73,1	250,0	96,25
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,08	0,06	0,01	10,0	87,50
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,008	0,006	0,002	1,0	86,2
Amônia (NH ₃), mg/L	1,08	1,34	0,11	1,2	90
Sílica, mg/L (SiO ₂)	49,2	55	2,9	--	94,10
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,7	-0,5	-3,93	≤ 0	--
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	3.249,09	4.181,7	137,9	500,0	95,75

VMP (**) Valor Máximo Permitido à cada mg/L de acordo com a portaria 888/2021.

Tabela 09. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.04.

LAUDO N°.: 04/2023		Resp. pela coleta: CTTD			
Município: Campina Grande - PB		Vazão (*): 2000 L/h			
Procedência: Concentrado do Experimento 03 – Experimento 04					
PARÂMETROS					
	Alim.	Conc.	Perm.	VPM (**)	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	6.350,0	7.020,00	299,7	--	--
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0 °C	7,55	7,69	6,12	6,0 a 9,0	--
Turbidez, (uT)	2,09	1,91	0,58	5,0	72,24
Cor, Unidade Hazen (mg Pt–Co/L).	8,0	7,0	4,0	15,0	70,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	120,0	326,4	11,5	--	90,41
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	168,0	192,6	7,4	--	95,60
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.000,0	1.202,0	72,0	300	92,80
Sódio (Na ⁺), mg/L	1.075,9	1.168,3	43,0	200	96,00
Potássio (K ⁺), mg/L	8,3	12,2	0,5	--	93,97
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	0,2	--
Ferro Total, mg/L	0,05	0,07	0,01	0,3	77,83
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	102,0	152,0	8,8	--	91,37
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	102,0	152,0	8,8	--	91,37
CO ₂ livre (mg/L)	10,8	12,4	7,3	--	3,02
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	76,8	133,6	8,8	250,0	88,52
Fósforo Total, mg/L	0,30	0,4	0,04	--	86,66
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.782,1	2.138,1	88,0	250,0	95,88
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,09	0,08	0,02	10,0	77,78
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,008	0,009	0,001	1,0	83,3
Amônia (NH ₃), mg/L	2,68	3,18	0,32	1,2	88,1
Sílica, mg/L (SiO ₂)	31,3	35,7	2,19	--	93,0
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,15	0,73	-2,60	≤ 0	--
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	4.207,9	5.013,9	226,5	500,0	94,62

VMP (**) Valor Máximo Permitido à cada mg/L de acordo com a portaria 888/2021.

Tabela 10. Análise físico-química da alimentação, concentrado, permeado, TES% e VPM (**) do EXP.05.

LAUDO N°.: 05/2023		Resp. pela coleta: CTTD			
Município: Campina Grande - PB		Vazão (*): 2000 L/h			
Procedência: Concentrado do Experimento 04 – Experimento 05					
PARÂMETROS					
	Alim.	Conc.	Perm.	VPM (**)	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	7.050,0	8.012,0	365,7	--	--
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0 °C	7,65	7,83	6,7	6,0 a 9,0	--
Turbidez, (uT)	1,93	1,81	0,53	5,0	72,53
Cor, Unidade Hazen (mg Pt–Co/L).	9,0	7,0	4,0	15,0	60,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	214,4	301,6	21,5	--	89,97
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	110,9	169,9	5,1	--	95,4
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	1.098,0	1.462,0	25,6	300	97,4
Sódio (Na ⁺), mg/L	1.115,0	1.173,7	90,0	200	91,9
Potássio (K ⁺), mg/L	14,1	16,0	1,2	--	91,48
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	0,2	--
Ferro Total, mg/L	0,07	0,10	0,02	0,3	71,4
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	--	--
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	676,0	1.062,0	46,4	--	93,1
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	676,0	1.062,0	46,4	--	93,1
CO ₂ livre (mg/L)	12,4	12,65	9,32	--	3,02
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	103,8	179,2	7,5	250,0	92,8
Fósforo Total, mg/L	0,34	0,41	0,05	--	85,29
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.991,6	2.211,7	126,4	250,0	93,7
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,10	0,11	0,03	10,0	70,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,029	0,040	0,007	1,0	75
Amônia (NH ₃), mg/L	3,18	5,50	0,60	1,2	81,7
Sílica, mg/L (SiO ₂)	94,3	117,4	8,1	--	91,4
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,29	1,08	-3,68	≤ 0	--
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	5.554,0	6.139,0	301,7	500,0	93,4

VPM (**) Valor Máximo Permitido à cada mg/L de acordo com a portaria 888/2021.

APÊNDICE B – Análises bacteriológicas das amostras de águas da alimentação, permeado e concentrado dos Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05 realizados no sistema híbrido de membranas de dessalinização do LABDES.

Tabela 11. Análises bacteriológicas do EXP.01.

LAUDO N°.: 001/2023	Resp. pela coleta: OSMAR
Município: Campina Grande - PB	Vazão (*): 2000 L/h
Procedência: 50% A.P / 50% A.T – Experimento 01	

Réplicas	Parâmetros	Alimentaça o	Permeado	Concentrado	VMP (**)
1	Coliformes Totais	PRESENTE	AUSENTE	PRESENTE	AUSENTE
2	<i>Escherichia coli</i>	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

(**) VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira Portaria 888/2021 Ministério da Saúde.

Parecer Técnico:

De acordo com os resultados analíticos acima mostrados, os quais mostram ausência de Coliformes Totais no permeado, o sistema mostra eficiência na remoção de bactérias.

Metodologia analisada: Método enzimático de substrato definido - Colilert.

OBSERVAÇÕES:

3. Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.

4. Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Tabela 12. Análises bacteriológicas do EXP.02.

LAUDO N°.: 002/2023	Resp. pela coleta: OSMAR
Município: Campina Grande - PB	Vazão (*): 2000 L/h
Procedência: Concentrado do Exp.01 – Experimento 02	

Réplicas	Parâmetros	Alimentação	Permeado	Concentrado	VMP (**)
1	Coliformes Totais	PRESENTE	AUSENTE	PRESENTE	AUSENTE
2	<i>Escherichia coli</i>	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

(**) VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira Portaria 888/2021 Ministério da Saúde.

Parecer Técnico:

De acordo com os resultados analíticos acima mostrados, os quais mostram ausência de Coliformes Totais no permeado, o sistema mostra eficiência na remoção de bactérias.

Metodologia analisada: Método enzimático de substrato definido - Colilert.

OBSERVAÇÕES:

3. Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.

4. Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Tabela 13. Análises bacteriológicas do EXP.03.

LAUDO N°.: 003/2023	Resp. pela coleta: OSMAR
Município: Campina Grande - PB	Vazão (*): 2000 L/h
Procedência: Concentrado do Exp.02 – Experimento 03	

Réplicas	Parâmetros	Alimentação	Permeado	Concentrado	VMP (**)
1	Coliformes Totais	PRESENTE	AUSENTE	PRESENTE	AUSENTE
2	<i>Escherichia coli</i>	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

(**) VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira Portaria 888/2021 Ministério da Saúde.

Parecer Técnico:

De acordo com os resultados analíticos acima mostrados, os quais mostram ausência de Coliformes Totais no permeado, o sistema mostra eficiência na remoção de bactérias.

Metodologia analisada: Método enzimático de substrato definido - Colilert.

OBSERVAÇÕES:

3. Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.

4. Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Tabela 14. Análises bacteriológicas do EXP.04.

LAUDO N°.: 004/2023	Resp. pela coleta: OSMAR
Município: Campina Grande - PB	Vazão (*): 2000 L/h
Procedência: Concentrado do Exp.03 – Experimento 04	

Réplicas	Parâmetros	Alimentação	Permeado	Concentrado	VMP (**)
1	Coliformes Totais	PRESENTE	AUSENTE	PRESENTE	AUSENTE
2	<i>Escherichia coli</i>	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

(**) VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira Portaria 888/2021 Ministério da Saúde.

<p>Parecer Técnico:</p> <p>De acordo com os resultados analíticos acima mostrados, os quais mostram ausência de Coliformes Totais no permeado, o sistema mostra eficiência na remoção de bactérias.</p> <p>Metodologia analisada: Método enzimático de substrato definido - Colilert.</p> <p>OBSERVAÇÕES:</p> <p>3. Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.</p> <p>4. Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.</p> <p>A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.</p>
<p>Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)</p>

Tabela 15. Análises bacteriológicas do EXP.05.

LAUDO N°.: 005/2023	Resp. pela coleta: OSMAR
Município: Campina Grande - PB	Vazão (*): 2000 L/h
Procedência: Concentrado do Exp.04 – Experimento 05	

Réplicas	Parâmetros	Alimentação	Permeado	Concentrado	VMP (**)
1	Coliformes Totais	PRESENTE	AUSENTE	PRESENTE	AUSENTE
2	<i>Escherichia coli</i>	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE

(**) VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira Portaria 888/2021 Ministério da Saúde.

Parecer Técnico:

De acordo com os resultados analíticos acima mostrados, os quais mostram ausência de Coliformes Totais no permeado, o sistema mostra eficiência na remoção de bactérias.

Metodologia analisada: Método enzimático de substrato definido - Colilert.

OBSERVAÇÕES:

3. Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.

4. Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

APÊNDICE C – Parâmetros físico-químico e das variáveis de medidas coletadas durante os Experimentos 01, 02, 03, 04 e 05.

Tabela 16. Parâmetros físico-químico e variáveis de medidas do EXP.01.

Tempo (min)	Kgf/cm ²				L/h		Cond. elétrica		C°			pHc	pHp
	FI	F2	P1	P2	Qc	Qp	Kc (mS/cm)	Kp (µS/cm)	T.c	T.p	T.a		
0	0,00	0,00	0,00	0,0	2000,00	2000,00	3,39	3.390,00	25,6	25,6	25,6	7,29	7,29
5	3,20	2,40	7,10	6,61	1475	500	4,1	47,00	25,7	25,8	25,6	7,18	6,15
10	3,19	2,30	7,09	6,55	1480,1	501,4	4,26	52,46	25,8	25,8	25,7	7,25	6,01
15	3,18	2,40	7,11	6,58	1476,5	498,8	4,32	58,62	25,7	25,7	25,7	7,41	6,23
20	3,19	2,40	7,10	6,60	1479,2	500	4,42	58,76	25,7	25,9	25,8	7,45	6,32
25	3,21	2,30	7,08	6,50	1490	470	4,38	59,04	25,9	25,7	25,7	7,33	6,46
30	3,20	2,30	7,10	6,70	1487,3	500	4,36	52,75	25,9	25,9	25,8	7,38	6,34
45	3,19	2,40	7,10	6,54	1478,43	503,5	4,52	60,30	25,8	25,9	25,8	7,22	6,18
60	3,21	2,30	7,09	6,67	1481,5	494,8	4,45	59,87	25,9	25,8	25,7	7,29	6,12
75	3,20	2,30	7,10	6,80	1479	503,7	4,14	62,36	25,9	25,9	25,8	7,36	6,25
90	3,19	2,20	7,11	6,30	1484,2	500	4,39	55,65	25,9	25,7	25,8	7,19	6,17
105	3,21	2,20	7,10	6,70	1481,4	490,6	4,43	52,03	26	25,9	25,9	7,28	6,06
120	3,18	2,20	7,10	6,62	1480,0	502,4	4,28	53,46	25,9	25,9	25,8	7,35	5,90
Média	3,19583	2,13077	7,10	6,6	1481,05	497,10	4,00	51,72	25,84	25,83	25,76	7,31	5,71
TR% = 24,86													

Tabela 17. Parâmetros físico-químico e variáveis de medidas do EXP.02.

Tempo (min)	Kgf/cm ²				L/h		Cond. elétrica		C°			pHc	pHp
	FI	F2	P1	P2	Qc	Qp	Kc (mS/cm)	Kp (µS/cm)	T.c	T.p	T.a		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	2000,00	2000,00	4,84	4.845,0	25,0	25,0	25,0	7,35	7,35
5	3,22	2,30	7,09	6,64	1629,40	355,50	5,53	76,85	25,2	25,3	25,0	7,42	6,29
10	3,20	2,30	7,09	6,53	1634,30	359,40	5,46	69,70	25,3	25,2	25	7,47	6,33
15	3,19	2,40	7,10	6,50	1630,40	359,75	5,37	75,43	25,2	25,3	25,1	7,5	6,28
20	3,21	2,30	7,10	6,68	1633,50	352,34	5,46	79,63	25,3	25,3	25	7,46	6,38
25	3,19	2,30	7,08	6,59	1640,00	358,25	5,59	73,61	25,4	25,4	25,2	7,53	6,42
30	3,20	2,20	7,10	6,67	1645,00	353,50	5,62	78,53	25,5	25,3	25,1	7,45	6,37
45	3,21	2,30	7,10	6,58	1640,40	360,00	5,52	79,76	25,3	25,5	25,3	7,58	6,33
60	3,22	2,20	7,09	6,53	1635,60	359,00	5,69	77,85	25,4	25,3	25,4	7,52	6,24
75	3,19	2,20	7,10	6,53	1638,00	350,75	5,63	73,42	25,4	25,4	25,2	7,49	6,18
90	3,20	2,30	7,11	6,57	1640,20	353,11	5,42	73,10	25,3	25,4	25,3	7,46	6,21
105	3,22	2,20	7,10	6,59	1639,00	357,00	5,65	81,46	25,4	25,5	25,2	7,51	6,15
120	3,20	2,20	7,10	6,63	1636,70	353,00	5,71	78,02	25,5	25,5	25,3	7,49	6,12
Média	3,20417	2,09231	7,10	6,59	1636,88	355,97	5,13	70,57	25,35	25,37	25,18	7,49	6,28
TR% = 17,80													

Tabela 18. Parâmetros físico-químico e variáveis de medidas do EXP.03.

Tempo (min)	Kgf/cm ²				L/h		Cond. elétrica		C°			pHc	pHp
	F1	F2	P1	P2	Qc	Qp	Kc (mS/cm)	Kp (µS/cm)	T.c	T.p	T.a		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	2000,00	2000,00	5,71	5.710,00	26,9	26,9	26,9	7,49	7,49
5	3,23	2,40	7,09	6,58	1679,30	297,70	6,65	102,46	26,9	27	26,9	7,57	6,43
10	3,21	2,30	7,10	6,61	1683,40	298,12	6,72	113,43	26,9	27	26,9	7,55	6,48
15	3,22	2,40	7,10	6,63	1680,00	299,91	6,68	104,65	27	27,1	26,8	7,59	6,50
20	3,20	2,40	7,11	6,57	1683,20	298,50	6,74	111,76	27	27,1	26,9	7,61	6,47
25	3,21	2,30	7,09	6,65	1687,70	296,98	6,79	119,20	27,1	27,2	27	7,64	6,50
30	3,19	2,40	7,10	6,59	1690,00	299,70	6,81	110,64	27,1	27,1	26,9	7,6	6,52
45	3,20	2,20	7,10	6,63	1675,70	296,60	6,72	106,21	27,2	27,3	27,1	7,58	6,54
60	3,21	2,3	7,09	6,58	1680,00	299,42	6,65	118,65	27,1	27,2	27	7,63	6,48
75	3,22	2,3	7,10	6,61	1676,20	297,68	6,74	120,53	27,2	27,5	27,1	7,61	6,58
90	3,21	2,2	7,11	6,64	1673,90	298,65	6,79	115,32	27,3	27,4	27,2	7,64	6,56
105	3,19	2,3	7,10	6,53	1675,80	299,91	6,84	109,48	27,2	27,5	27,1	7,59	6,57
120	3,20	2,2	7,09	6,57	1674,60	298,65	6,82	118,93	27,3	27,5	27,2	7,63	6,52
Média	3,2075	2,13077	7,10	6,60	1680,05	298,49	6,75	103,94	25,02	25,15	24,93	7,60	6,51
TR% = 14,92													

Tabela 29. Parâmetros físico-químico e variáveis de medidas para o EXP.04.

Tempo (min)	Kgf/cm ²				L/h		Cond. elétrica		C°			pHc	pHp
	FI	F2	P1	P2	Qc	Qp	Kc (mS/cm)	Kp (µS/cm)	T.c	T.p	T.a		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	2000,00	2000,00	6,35	6.350,0	25,0	25,0	25,0	7,60	7,60
5	3,24	2,30	7,10	6,59	1728,30	251,77	7,32	200,32	25,1	25,0	24,9	7,67	6,58
10	3,24	2,40	7,10	6,62	1732,46	255,71	7,44	215,76	25,1	25,1	25,1	7,69	6,60
15	3,22	2,20	7,09	6,64	1730,00	258,76	7,47	206,86	25,2	25,1	25	7,71	6,62
20	3,21	2,30	7,08	6,63	1726,70	254,81	7,36	217,85	25,2	25,2	25,2	7,68	6,60
25	3,23	2,20	7,09	6,59	1730,40	256,59	7,28	198,43	25,4	25,2	25,1	7,72	6,61
30	3,22	2,30	7,10	6,60	1734,50	253,71	7,48	206,74	25,2	25,3	25,2	7,74	6,58
45	3,24	2,20	7,10	6,61	1737,80	254,01	7,6	211,75	25,3	25,3	25,3	7,7	6,60
60	3,21	2,3	7,11	6,65	1732,10	257,61	7,45	220,52	25,3	25,4	25,2	7,73	6,62
75	3,21	2,3	7,10	6,63	1730,00	253,60	7,39	215,31	25,4	25,3	25,3	7,75	6,63
90	3,22	2,2	7,09	6,61	1732,50	251,48	7,54	206,43	25,4	25,4	25,3	7,71	6,61
105	3,23	2,2	7,10	6,57	1734,80	256,59	7,46	217,42	25,5	25,4	25,2	7,73	6,6
120	3,24	2,3	7,09	6,59	1736,20	254,32	7,42	205,37	25,4	25,5	25,3	7,73	6,62
Média	3,22583	2,09231	7,10	6,61	1732,15	254,91	7,43	210,23	25,29	25,27	25,18	7,12	6,61
TR% = 12,75													

Tabela 20. Parâmetros físico-químico e variáveis de medidas para o EXP.05.

Tempo (min)	Kgf/cm ²				L/h		Cond. elétrica		C°			pHc	pHp
	FI	F2	P1	P2	Qc	Qp	Kc (mS/cm)	Kp (µS/cm)	T.c	T.p	T.a		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	2000,00	2000,00	7,05	7.050,0	26,6	26,6	26,6	7,71	7,71
5	3,22	2,40	7,10	6,58	1773,60	197,65	7,95	282,35	26,8	26,8	26,6	7,81	6,68
10	3,25	2,30	7,08	6,63	1782,20	199,79	8,02	276,85	26,7	26,8	26,7	7,83	6,67
15	3,23	2,40	7,09	6,56	1780,00	200,50	8,1	284,65	26,8	26,9	26,7	7,82	6,70
20	3,21	2,30	7,08	6,59	1776,80	197,53	8,15	277,64	26,7	26,9	26,6	7,85	6,68
25	3,22	2,30	7,09	6,57	1779,00	200,46	8,11	272,97	26,7	26,8	26,8	7,83	6,67
30	3,22	2,30	7,10	6,58	1780,30	199,66	8,13	281,34	26,9	26,8	26,6	7,85	6,70
45	3,24	2,20	7,10	6,61	1784,30	201,45	8,18	271,45	26,8	26,9	26,7	7,8	6,66
60	3,21	2,2	7,11	6,55	1783,50	200,50	8,14	267,53	26,8	27	26,7	7,83	6,71
75	3,23	2,2	7,10	6,59	1780,00	199,79	8,01	275,75	26,9	27,1	26,8	7,84	6,69
90	3,22	2,3	7,09	6,62	1783,90	201,45	8,16	278,52	26,8	27	26,9	7,82	6,72
105	3,22	2,2	7,10	6,58	1780,00	202,26	8,14	269,04	26,9	27,1	26,7	7,8	6,7
120	3,23	2,2	7,10	6,63	1783,60	200,35	8,09	289,21	26,8	27,1	26,8	7,84	6,71
Média	3,225	2,1	7,10	6,59	1780,60	200,41	8,10	277,28	26,80	26,93	26,72	7,83	6,69
TR% = 10,02													