



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

Lonan Jerônimo Dantas

**Desempenho de um sistema de purificação e dessalinização de águas salobras
através de membranas de ultrafiltração/osmose inversa**

Campina Grande – PB

2021

LONAN JERÔNIMO DANTAS

**Desempenho de um sistema de purificação e dessalinização de águas salobras
através de membranas de ultrafiltração/osmose inversa**

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. Dr. Kepler Borges França

Campina Grande – PB

2021

D192d

Dantas, Lonan Jerônimo.

Desempenho de um sistema de purificação e dessalinização de águas salobras através de membranas de ultrafiltração/osmose inversa / Lonan Jerônimo Dantas. - Campina Grande, 2021.

99 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

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

Referências.

1. Dessalinização. 2. Microfiltração. 3. Osmose Inversa. 4. Monitoramento de Operação. I. França, Kleper Borges. II. Título.

CDU 66.065.31(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DE DISSERTAÇÃO
DO ALUNO LONAN JERÔNIMO DANTAS**

**TÍTULO: Desempenho de um Sistema de Purificação e Dessalinização de
Águas Salobras Através de Membranas de Ultrafiltração/Osmose Inversa.**

COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. Kepler Borges França (Doutor)

APROVADO

(Orientador)

Prof. Dr. José Nilton Silva (Doutor)

APROVADO

(Examinador Interno)

Prof. Dr. Antônio Carlos S. Vasconcelos (Doutor)

APROVADO

(Examinador Externo)

Campina Grande, 06 de maio de 2021

“Veni, vidi, vici.”

Júlio César

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Yole Jerônimo Ramos da Costa e Luís Antônio Dantas, pelo amor, carinho, suporte e toda paciência diária e ao longo de toda a minha vida.

A minha irmã, Manuela Jerônimo Ramos Caldas Lins, por me dar um sobrinho lindo, meu gordinho.

Aos meus amigos de sempre, Haniel Barros, Rodolfo Maciel e Ruda Aranha, pelas leseiras, broncas, farras e por fazerem distância e tempo não serem importantes.

A minha “assessora”, Nathalia Mendes, por se preocupar e cuidar tanto de mim quanto dos meus pertences, só faltou o copo d’água.

A Prof. Dr. Kepler Borges França, por topar mais uma vez me orientar, pela confiança e amizade dentro e fora do meio acadêmico e cadê a bicicleta?

A Ramon, Welber, Kelly, Antônio, Wellerson, Gleriston, Maiza, Bruna, Karolina, Samrla Vitor, Cel. Márcio e todos os demais que compõem a equipe do LABDES, por todo apoio e paciência durante essa etapa.

A Prof. Dr. José Nilton Silva, por topar qualquer parada (BBB – Btc Brais Binance) estando a disposição na medida do possível e por estar a todo momento procurando formas de motivar e extrair o melhor de todos.

A Arianne Barros e Valdério Segundo, por me incentivarem desde o começo a participar da seleção do mestrado.

A Caio Cefas, Ezequiel Honorato e Fábio George, pelas conversas (de “alto” nível) em volta do ipê e as sextas de descontração no posto.

A Rebeca Albino, por sempre me ajudar com as coisas chatas (para mim) e por me pedir ajuda quando acha que consigo resolver, continue sendo você sempre, não mude por ninguém.

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

A todas as pessoas que aparecerem nos últimos dois anos (vocês agregaram muito) e a todas que desapareceram (vocês fizeram um bem que nem imaginam).

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o desempenho de um sistema híbrido de membranas ultrafiltração/osmose inversa, para fins de tratamento de águas salobras. Várias variáveis de medidas foram monitoradas, tais como; vazões de permeado e concentrado, pressões de entrada e saída do filtro e dos elementos de membranas com o objetivo de estudar a performance do sistema para diferentes níveis de concentrações de sais dissolvidos a partir de misturas de água tratada (A.T) com água do poço (A.P) sob diferentes gradientes de pressões de operação. Visando caracterizar o sistema variando-se as pressões de operação, foram realizados experimentos com 4,0 kgf/cm² e 8,0 kgf/cm² para o sistema com água tratada e 6,0 kgf/cm², 8,0 kgf/cm² e 10,0 kgf/cm² para o sistema com água do poço, dentre essas pressões de operação a de 8,0 kgf/cm² apresentou melhores resultados. O sistema foi ajustado sob essa pressão de 8,0 kgf/cm² variando-se a concentração (75% A.T. + 25% A.P., 50% + 50% e 25% A.T. + 75 A.P.). De acordo com os resultados obtidos observou-se que o potencial de extração de sais dependeu da variação de pressão de operação. Assim como mostrou o percentual de remoção do íon Cl⁻ de -2,24%, 93,76%, 94,79%, 96,25% e 96,65% para as pressões 4,0 kgf/cm², 8,0_{A.T.} kgf/cm², 6,0 kgf/cm², 8,0_{A.P.} kgf/cm² e 10,0 kgf/cm² respectivamente. Os resultados das análises bacteriológicas foram estudados, antes e após a limpeza química dos elementos de membranas, apresentando resultados satisfatórios. Observou-se que o custo da água produzida pelo sistema dependeu do nível da concentração de sais dissolvidos da água de alimentação e da pressão de operação. A pressão de operação de 8,0 kgf/cm² de acordo com os dados obtidos em termos de custo e recuperação apresentaram os melhores resultados.

Palavras-chave: Microfiltração, osmose inversa, dessalinização, monitoramento de operação.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the performance of a hybrid system of ultrafiltration/reverse osmosis membranes, for the purposes of brackish water treatment. Several measurement variables were monitored, such as; permeate and concentrate flows, inlet and outlet pressures of the filter and membrane elements in order to study the performance of the system for different levels of concentrations of dissolved salts from mixtures of treated water (T.W.) with well water (W.W.) under different operating pressure gradients. In order to characterize the system by varying the operating pressures, experiments were carried out with 4,0 kgf/cm² and 8,0 kgf/cm² for the treated water system and 6,0 kgf/cm², 8,0 kgf/cm² and 10,0 kgf/cm² for the system with well water, among these operating pressures, 8,0 kgf/cm² showed better results. The system was adjusted under this pressure of 8,0 kgf /cm² by varying the concentration (75% T.W. + 25% W.W., 50% + 50% and 25% T.W. + 75 W.W.). According to the results obtained, it was observed that the potential for the extraction of salts depended on the variation of operating pressure. As shown by the percentage of Cl⁻ ion removal of -2,24%, 93,76%, 94,79%, 96,25% and 96,65% for pressures 4,0 kgf/cm², 8,0_{T.W.} kgf/cm², 6,0 kgf/cm², 8,0_{W.W.} kgf/cm² and 10,0 kgf/cm² respectively. The results of the bacteriological analyzes were studied, before and after the chemical cleaning of the membrane elements, showing satisfactory results. It was observed that the cost of the water produced by the system depended on the level of dissolved salts in the feed water and the operating pressure. The operating pressure of 8,0 kgf/cm² according to the data obtained in terms of cost and recovery showed the best results.

Keywords: Microfiltration, reverse osmosis, desalination, operation monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos recursos hídricos, superfície e população - em %.	17
Figura 2. Definição do Processo de Dessalinização.	20
Figura 3. Processos que utilizam pressão hidráulica para promover a separação.	21
Figura 4. Esquema do sistema de funcionamentos da tecnologia de membrana.	22
Figura 5. Classificação das membranas de acordo com a morfologia.	22
Figura 6. Esquema do processo de osmose.	24
Figura 7. Diagrama de blocos do sistema de ultrafiltração/osmose inversa.	26
Figura 8. Sistema composto por ultrafiltração e osmose inversa	27
Figura 9. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento de 6,0 kgf/cm ² .	39
Figura 10. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 8,0 kgf/cm ² .	40
Figura 11. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 10,0 kgf/cm ² .	40
Figura 12. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 8,0 kgf/cm ² .	40
Figura 13. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 10,0 kgf/cm ² .	41
Figura 14. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 03.	41
Figura 15. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 04.	42
Figura 16. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 05.	42
Figura 17. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 1.1 e 1.2.	44
Figura 18. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	46
Figura 19. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.	46
Figura 20. Var. das vazões do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.	48
Figura 21. Var. das vazões do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	48
Figura 22. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.	50
Figura 23. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	50
Figura 24. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.	51
Figura 25. Var. das T's da alim., conc. e perm. ensaios 1.1 e 1.2.	52
Figura 26. Var. das T's da alim., conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	53
Figura 27. Var. das T's da alim., conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	53
Figura 28. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.	54
Figura 29. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	55
Figura 30. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.	55
Figura 31. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.	56

Figura 32. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.	57
Figura 33. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.	57
Figura 34. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.	58
Figura 35. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	59
Figura 36. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.....	59
Figura 37. Var. do custo de produção vs vazão do perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	61
Figura 38. Var. do custo de produção vs vazão do perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.....	61
Figura 39. Variações da pressão no filtro no ensaio 1.1.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Processos de Separação por Membranas Comerciais.	21
Tabela 2. Concentrações para cada experimento.	29
Tabela 3. Análise físico-química do experimento 01 para 4,0 kgf/cm ²	31
Tabela 4. Análise físico-química do experimento 01 para 8,0 kgf/cm ²	32
Tabela 5. Análise físico-química do experimento 02 para 6,0 kgf/cm ²	33
Tabela 6. Análise físico-química do experimento 02 para 8,0 kgf/cm ²	34
Tabela 7. Análise físico-química do experimento 02 para 10,0 kgf/cm ²	35

LISTA DE ABREVIATURAS

A.P.	Água do Poço
A.T.	Água Tratada
Alim.	Alimentação
Conc.	Concentrado
Cond.	Condutividade
Cor_c	Cor do concentrado (u.C)
Cor_p	Cor do permeado (u.C)
Elem.	Elementos
Ext.	Extração
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)
Memb.	Membrana
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)
Perm.	Permeado
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	Temperatura/s
T_a	Temperatura da alimentação (°C)
T_c	Temperatura do concentrado (°C)

T_p	Temperatura do permeado (°C)
Turb_c	Turbidez do concentrado (NTU)
Turb_p	Turbidez do permeado (NTU)
U.F.	Ultrafiltração
Var.	Variação/ões

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
u.C	Unidade de cor

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral.....	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	20
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
4.1	Osmose Inversa	23
4.2	Microfiltração	24
4.3	Nanofiltração.....	24
4.4	Ultrafiltração.....	25
5.	MATERIAIS E MÉTODO	26
5.1	Diagrama de Blocos do Sistema.....	26
5.2	Descrição do Sistema de Ultrafiltração e Osmose Inversa	26
5.3	Instrumentação	28
5.4	Procedimento Experimental.....	28
6.	RESULTADOS.....	30
6.1	Análises.....	30
6.1.1	Físico-química.....	30
6.1.2	Bacteriológica.....	39
6.2	Banco de Dados.....	42
6.2.1	Pressão de Operação	43
6.2.2	Vazão	47
6.2.2.1	Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2.....	47
6.2.2.2	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	48
6.2.2.3	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1	49
6.2.3	Condutividade Elétrica	49
6.2.3.1	Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2.....	49
6.2.3.2	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	50
6.2.3.3	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1	51
6.2.4	Temperatura.....	51
6.2.4.1	Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2.....	51
6.2.4.2	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	52
6.2.4.3	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1	53
6.2.5	Potencial Hidrogeniônico	54

6.2.5.1	Todos os experimentos, todos os ensaios	54
6.2.6	Cor	55
6.2.6.1	Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2.....	56
6.2.6.2	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	56
6.2.6.3	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.	57
6.2.7	Turbidez.....	57
6.2.7.1	Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2.....	58
6.2.7.2	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.....	58
6.2.7.3	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1	59
6.2.8	Custo de Produção	60
6.2.8.1	Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2,3.....	60
6.2.8.2	Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1	61
7.	CONCLUSÃO	62
8.	REFERÊNCIAS.....	63
9.	ANEXOS	64
9.1	ANEXO A - PRESSÕES NO FILTRO.	64
9.2	ANEXO B - PRESSÕES NOS ELEMENTOS DE MEMBRANAS.....	68
9.3	ANEXO C - VAZÕES.....	72
9.4	ANEXO D - CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS.....	76
9.5	ANEXO E - TEMPERATURAS.	80
9.6	ANEXO F- POTENCIAL HIDROGENIÔNICO.....	84
9.7	ANEXO G - COR.....	88
9.8	ANEXO H - TURBIDEZ.....	92
9.9	ANEXO I - CUSTO DE PRODUÇÃO vs VAZÃO DO PERMEADO.....	96

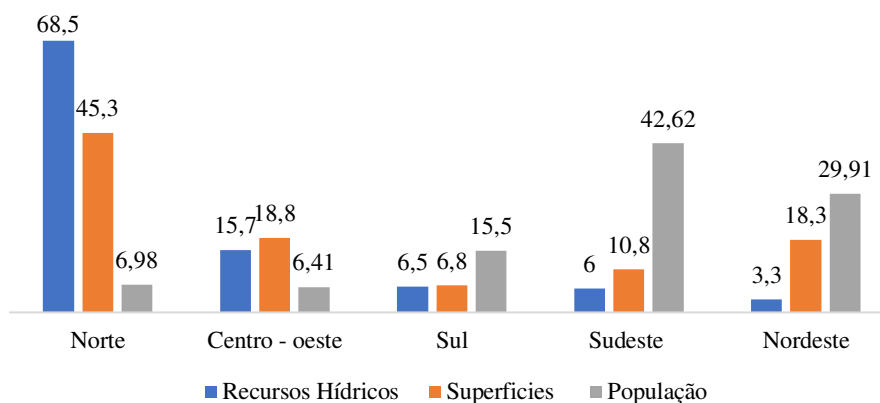
1. INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial para as necessidades básicas do ser humano, como também, para os processos industriais em geral. Porém, devido a mudanças climáticas, a sua disponibilidade, qualidade e quantidade estão sendo afetadas (UNESCO, 2020).

Estudos apontam que cerca de 97,5% da água no mundo são de água salgada, que não é recomendada para consumo humano nem tão pouco para irrigar plantações (Agência Nacional de Água e Saneamento Básico, 2020). O Brasil está em uma boa posição em relação ao volume de recursos hídricos, pois abriga cerca de 13,7% da água doce do mundo (NEWMAN, 2010).

Mesmo o Brasil sendo privilegiado por possuir um alto volume de água doce, esta não é distribuída de forma uniforme no território brasileiro, conforme apresenta o gráfico da Figura 1. Verifica-se que a região nordeste, dentre todas, apresenta a menor taxa de recursos hídricos, cerca de 3,3%, enquanto o índice da região norte é 20,76 vezes maior (NEWMAN, 2010).

Figura 1. Distribuição dos recursos hídricos, superfície e população - em %.



Fonte: NEWMAN, 2010, p. 29 (Adaptado).

Como visto na Figura 1, a região Nordeste possui poucos recursos hídricos, e é comum na região semiárida encontrar água salobra/salina nos poços perfurados como uma alternativa para obter água em locais escassos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010). Em geral, essa água é imprópria para consumo humano por causa das altas taxas de salinidade.

A resolução número 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2005) determina o padrão de qualidade das águas no Brasil, qualificando a água doce,

salina ou salobra segundo as suas taxas de salinidade. Os limites impostos pelo CONAMA são:

- águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 %;
- águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 % e inferior a 30 %;
- águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 %.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar um sistema híbrido de membranas do tipo: Ultrafiltração/Osmose Inversa, para fins de purificação e dessalinização de águas salobras.

2.2 Objetivos Específicos

- Em função das concentrações dos componentes presentes no meio aquoso, fazer um estudo da performance em termos de extração de sais, redução de cor e turbidez;
- Estudar o potencial da remoção microbiológica dos componentes presentes no meio aquoso;
- Apresentar os valores dos custos do consumo de energia em função das pressões de operação *versus* das concentrações de sais dissolvidos no meio aquoso.

3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

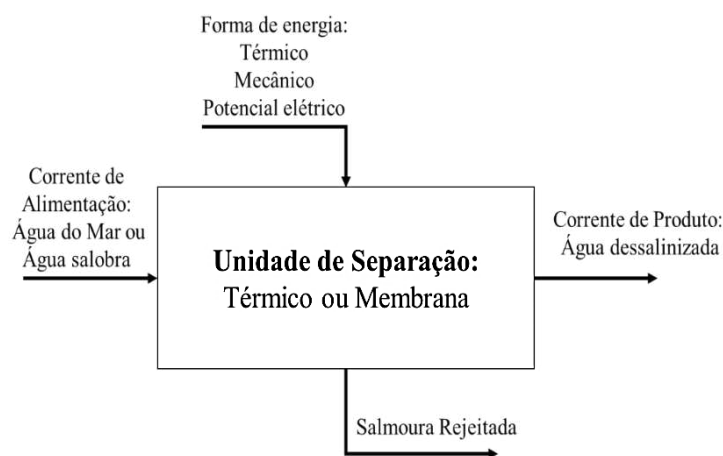
Devido a essa escassez de recursos hídricos e pela recorrente disponibilidade de água salobra ou salina, a tecnologia para dessalinização da água é aplicada para promover a sua potabilização (HASSON et al., 2011), e, com isso, possibilitar a sua utilização para consumo humano e na agricultura como forma de irrigação.

A história da dessalinização inicia-se por volta do século IV a.C., instruída por Aristóteles. Ele descreveu uma metodologia que visava a evaporar água impura e depois condensá-la, obtendo dessa forma água potável. Porém, a primeira aplicação de processos de dessalinização da água do mar por destilação, segundo Alexandre de Afrodisias em 200 d.C., deu-se por marinheiros, a bordo de uma embarcação, que sentiram necessidade de produzir água doce devido a viagens de longa distância (KALOGIROU, 2005).

De forma geral, as tecnologias de dessalinização podem ser agrupadas em dois tipos de processos. O primeiro consiste em um processo térmico em que ocorre mudança de fase, e o segundo tipo trata-se da utilização de membranas e, nesse caso, não há mudança de fase (BARBOSA, 2018).

O processo de dessalinização emprega uma corrente de alimentação de água salobra/salina no início do processo, energia no formato de calor, pressão ou eletricidade que é aplicada nas correntes de saída da unidade de separação, uma corrente de água dessalinizada e a outra concentrada em sais (salmoura rejeitada) que deve ser descartada em local específico, conforme apresenta a Figura 2 (EL-DESSOUKY; ETTOUNEY, 2002).

Figura 2. Definição do Processo de Dessalinização.

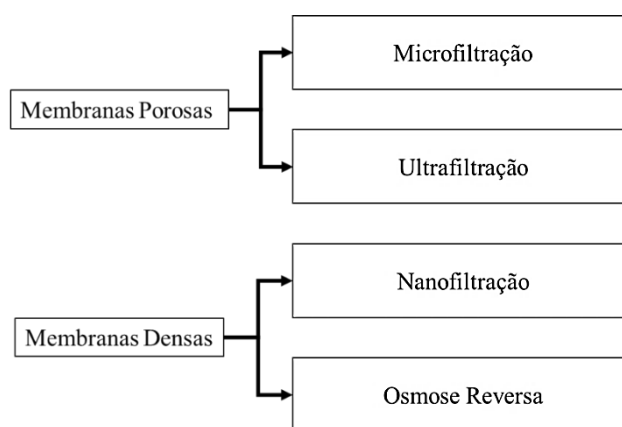


Fonte: EL-DESSOUKY; ETTOUNEY, 2002, p. 11 (Adaptado).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em relação aos processos de separação utilizando membranas, existem alguns tipos de processos de separação desenvolvidos, que são: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa e eletrodialise. O agrupamento dessas tecnologias é feito de acordo com o esquema da Figura 3. Vale enfatizar que esses processos já são bem estabelecidos para a indústria (BAKER, 2011). Grande parte das membranas sintéticas comerciais é feita a partir de materiais poliméricos com amplas características químicas e físicas (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Figura 3. Processos que utilizam pressão hidráulica para promover a separação.



Fonte: Elaboração própria (2020).

A Tabela 1 apresenta brevemente a descrição de algumas das tecnologias de membrana aplicáveis à dessalinização:

Tabela 1. Processos de Separação por Membranas Comerciais.

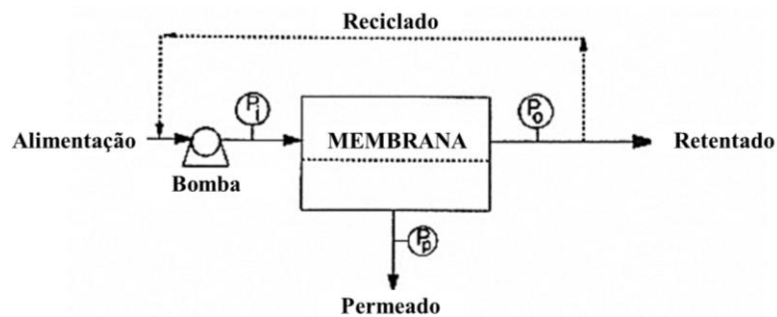
Processo	Força Motriz	Material Retido	Material que Permeia	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão, bactérias. <i>Massa molar > 500 kDa (0,01 μm)</i>	Água e sólidos dissolvidos	Esterilização bacteriana; clarificação vinhos e cervejas; concentração de células; oxigenação de sangue.
Ultrafiltração (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Coloides, Macromoléculas. <i>Massa molar > 5.000 Da.</i>	Água (solvente), sais solúveis de baixa massa molar.	Fracionamento/concentração de proteínas, recuperação de pigmentos/óleos.
Nanofiltração (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de massa molar média: <i>500 < MM < 2.000 Da.</i>	Água, sais e moléculas de baixa massa molar.	Purificação de enzimas; biorreatores a membrana.
Osmose Inversa (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão.	Água (solvente)	Dessalinização de águas; concentração de suco de frutas; desmineralização de águas.
Eletrodialise (ED)	ΔE	Macromoléculas e compostos não iônicos.	Íons	Concentração de soluções salinas; purificação de águas.

Fonte: HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006, p. 17 (Adaptado).

Pode-se definir membrana como uma interface fina e discreta que modera a permeação de espécies químicas em contato com ela. A estrutura dessa interface pode ser constituída molecularmente de forma homogênea ou pode apresentar orifícios ou poros de dimensões finitas, isto é, uma interface heterogênea (BAKER, 2011).

O princípio de funcionamento da tecnologia de membrana é apresentado na Figura 4. Ao contrário de um processo de filtração convencional, o sistema confere uma metodologia em que há necessidade de bombear a solução de alimentação sob pressão sobre a superfície da membrana de naturezas química e física específicas (CHERYAN, 1998).

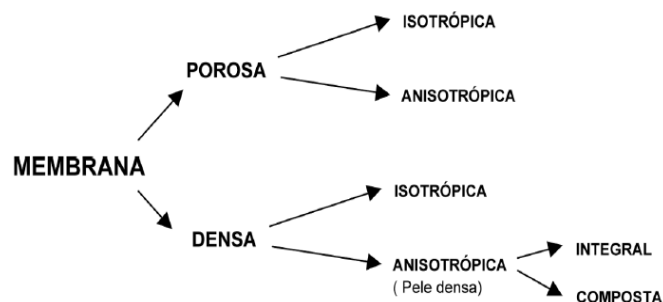
Figura 4. Esquema do sistema de funcionamentos da tecnologia de membrana



Fonte: CHERYAN, 1998, p. 7 (Adaptado).

A morfologia das membranas varia de acordo com a aplicação a que elas serão direcionadas. Em geral, a classificação é feita em duas categorias: porosas e densas, conforme Figura 5. Um requisito para definir a utilização de uma determinada membrana são as características da superfície da membrana que ficará exposta e em contato com a solução que necessita passar por um processo de separação. As membranas de ambos os tipos, densas ou porosas, podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, isto é, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Figura 5. Classificação das membranas de acordo com a morfologia.



Fonte: HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006, p. 26.

Como mostra o esquema da Figura 5, as membranas porosas ou densas recebem uma subclassificação, ainda com relação á morfologia, a saber:

- **Membranas Isotrópicas:** consistem em membranas microporosas com estrutura e função muito semelhantes às de um filtro convencional. Tais membranas possuem uma estrutura firme e muito espaço vazio com poros conectados e distribuídos aleatoriamente. O que diferencia o processo de separação por membranas isotrópicas do processo por filtros convencionais é o tamanho dos poros daquelas que são extremamente pequenos, da ordem de 0,01 a 10 μm de diâmetro. Dessa forma, todas as partículas maiores do que os maiores poros são completamente retidas pela membrana (BAKER, 2011).;
- **Membranas Anisotrópicas,** sobre as quais pode-se afirmar que:

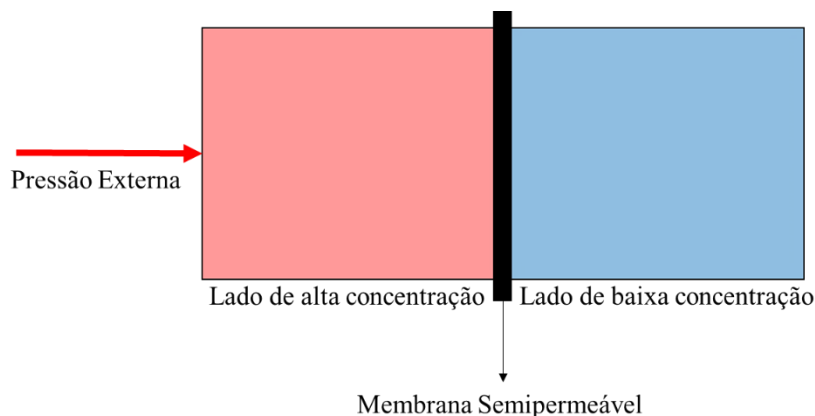
As membranas anisotrópicas consistem em uma camada superficial extremamente fina apoiada em uma subestrutura porosa muito mais espessa. A camada superficial e sua subestrutura podem ser formadas em uma única operação ou separadamente. Em membranas compostas, as camadas são geralmente feitas de polímeros diferentes. As propriedades de separação e taxas de permeação da membrana são determinadas exclusivamente pela camada superficial; a subestrutura funciona como um suporte mecânico. As vantagens dos fluxos mais elevados fornecidos por membranas anisotrópicas são tão grandes que quase todos os processos comerciais usam tais membranas (BAKER, 2011, p.6-7).

A seguir, serão descritas as principais tecnologias de processos de filtração por membrana.

4.1 Osmose Inversa

A técnica de osmose reversa (RO) ou osmose inversa (OI) consiste em um processo físico que utiliza o fenômeno de osmose, isto é, a diferença de pressão osmótica entre a água salgada e a água pura para remover os sais da água. Nesse processo, uma pressão maior que a pressão osmótica é aplicada na água salgada (água de alimentação) para inverter o fluxo, o que resulta em água pura (água doce) passando pelos poros da membrana separados do sal, conforme apresenta a Figura 6. A solução salina concentrada é mantida para descarte (YOUNOS; TULOU, 2005).

Figura 6. Esquema do processo de osmose.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

O processo de separação por osmose inversa requer eletricidade ou potência do eixo para acionar a bomba que aumenta a pressão da solução salina para o necessário. A pressão de execução depende da concentração de sal na solução, e normalmente fica próxima de 70 bar para o caso de dessalinização da água do mar (SEMIAT, 2000). Dessa forma, após acionadas as bombas, a água salgada é bombeada com o objetivo de abastecer o sistema a uma pressão suficiente para atravessar a membrana. Posteriormente, a solução salina concentrada fica retida pela membrana ao lado da alimentação e a água doce fica do lado onde se encontra a menor pressão do sistema.

4.2 Microfiltração

A microfiltração, assim como a ultrafiltração, constitui um dos primeiros processos de separação molecular contínua que não envolvem uma mudança de fase ou transferência de massa interfase. (CHERYAN, 1998). A microfiltração é um dos processos de separação com membranas que mais se aproxima da filtração clássica: utiliza membranas porosas com poros no intervalo entre 0,1 e 10 μm (100 e 10.000 nm), sendo indicada para reter materiais em suspensão e emulsão (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). Trata-se de um dos mais antigos processos de separação por membranas que utilizam a pressão hidráulica.

4.3 Nanofiltração

Consiste em um processo de transição entre a ultrafiltração e osmose inversa. As membranas que utilizam esse processo possuem alta rejeição para os di- e trissacarídeos sacarose e rafinose, pois esses dispõem de diâmetros moleculares entre 10 e 13 Å, porém

o monossacarídeo frutose consegue passar livremente, visto que apresenta um diâmetro molecular de cerca de 5–6 Å (BAKER, 2011). Habert, Borges e Nobrega (2006) afirmam que as membranas para nanofiltração são “mais abertas” e, conseqüentemente, com baixa rejeição a sais, mas com fluxo permeado elevado. Elas podem ser operadas em pressões mais baixas e vêm sendo bastante empregadas em um número crescente de aplicações.

4.4 Ultrafiltração

Esse processo de separação por membranas é utilizado quando se pretende purificar e fracionar soluções que contêm macromoléculas. Essa tecnologia apresenta poros com diâmetros, aproximadamente, entre 1 e 100 nm que, quando comparados aos poros das demais tecnologias que utilizam pressão como meio de funcionamento, são mais fechados. A ultrafiltração trata soluções contendo solutos em uma ampla faixa de massa molar (10³ – 10⁶ Dalton). Como os poros dessa membrana são menores, uma força motriz maior é necessária para obter fluxos permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente. Por este motivo as diferenças de pressão através da membrana variam na faixa de 2 a 10 bar (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Diante do exposto, o presente trabalho pretende verificar a performance do sistema de membrana: Ultrafiltração/Osmose Inversa, para fins de purificação e dessalinização de águas salobras, utilizando para tal fontes de águas diferentes.

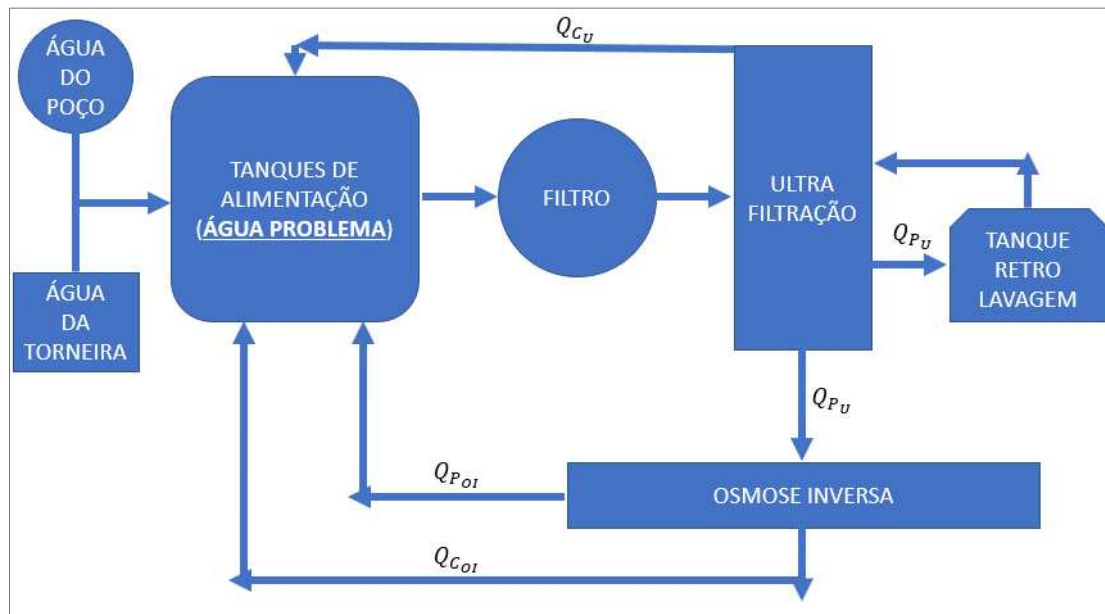
5. MATERIAIS E MÉTODO

A seguir serão apresentados o diagrama de blocos, a descrição do sistema, a instrumentação e o procedimento experimental empregado na realização do presente trabalho.

5.1 Diagrama de Blocos do Sistema

A Figura 7 apresenta um quadro geral do sistema de ultrafiltração e osmose inversa utilizado nos experimentos no processo de dessalinização e purificação das águas salobras provenientes do poço e a água tratada.

Figura 7. Diagrama de blocos do sistema de ultrafiltração/osmose inversa.



Fonte: Elaboração Própria (2020).

5.2 Descrição do Sistema de Ultrafiltração e Osmose Inversa

O sistema utilizado nos experimentos realizados no LABDES é demonstrado na Figura 7 e é composto pelos itens apresentados na Figura 8.

Figura 8. Sistema composto por ultrafiltração e osmose inversa



Fonte: Arquivo Pessoal (2020)

A alimentação do sistema é proveniente de três tanques de 5000L cada, que se encontram do lado de fora a apenas alguns metros do local do experimento, um contendo somente a água do poço, outro contendo somente a água tratada e o terceiro tanque foi utilizado para misturar as águas. Como pode ser visto na Figura 8, existem três válvulas no canto inferior direito, elas servem para selecionar qual tanque será utilizado.

A água da alimentação alimenta uma bomba centrífuga modelo MCS-NX da Eletroplas com potência de 1 CV. A bomba impulsiona a água para o pré-tratamento, realizado por um filtro a disco autolimpante modelo 20540-A da Alfa Matic de 130 μm . A água bruta segue para o elemento de membrana de ultrafiltração na forma de fibra oca com 6" de diâmetro e 60 m^2 de área, desenvolvida pela LENNTECH. O permeado dessa membrana segue dois caminhos, primeiramente é direcionado para um tanque de 200L que serve para a retro lavagem da mesma, nesse sistema é utilizado uma bomba multiestágios modelo ME-HI 5420 da WEG com potência de 2 CV, ao encher o tanque, o permeado segue para uma bomba centrífuga modelo BT4-0510E12 da WEG com potência de 1 CV que alimenta os elementos de membrana de osmose inversa (BW30-4040) na forma de espiral com 4" de diâmetro e 7,2 m^2 de área, desenvolvida pela LENNTECH.

5.3 Instrumentação

Os instrumentos necessários para a realização dos experimentos estão citados a seguir:

- Condutivímetro-600 da ANALYSER;
- pHmetro Digital PG 2000 da GEHAKA;
- 2100 P Turbidímetro da HACH;
- *Smart Colorimeter LaMotte* da *PoliControl*;
- Cronômetro do celular;
- Estufa de Cultura Orion[®] 502 A da FANEM[®] SÃO PAULO - BRASIL
- Béqueres de 200mL;

5.4 Procedimento Experimental

Etapa inicial dos experimentos:

- Encher os dois tanques, um com água do poço e outro com água tratada;
- Realizar, primeiramente, os experimentos contendo só água do poço (A.P.) e, em seguida, apenas com água tratada (A.T.);
- Misturar as duas águas afim de alcançar as concentrações desejadas (75% A.T. e 25% A.P., 50% A.T. e 50% A.P. e por fim 25% A.T. e 75% A.P.);
- Realizar os experimentos para cada nova concentração.

A metodologia empregada nos experimentos foi a seguinte:

- Antes de iniciar o experimento, ligar o sistema para homogeneizar a água do tanque (processo dura 10 minutos);
- Coletar duas amostras da alimentação, uma para análise físico química e outra para bacteriológica (só será avaliada a presença ou ausência de *Escherichia coli*);
- Dar início ao experimento, regular a válvula após as membranas de osmose inversa, até à pressão de operação desejada;
- Iniciar o programa de coleta de dados do CTTD que irá registrar a pressão, temperatura e vazão da alimentação, do concentrado e do permeado;

- Coletar a primeira amostra do permeado e do concentrado no tempo T=0, medir a condutividade elétrica, pH, cor e turbidez. Salvar os dados na planilha do Excel;
- Coletar as demais amostras de 10 em 10 minutos, com duração de 60 minutos. O procedimento anterior é repetido para cada amostra;
- Ao final do experimento, coletar 04 amostras, 02 do permeado e 02 do concentrado, assim como foi feito para alimentação;
- As amostras são encaminhadas para os respectivos laboratórios para realização das análises necessárias.

OBS.: A máquina é programada para efetuar a retro lavagem a cada 40 minutos de operação. Esse processo dura em média 05 minutos e pode ser observado em todas as figuras na parte de Resultados como uma queda ou um pico em um intervalo de 20 minutos.

A Tabela 2 apresenta as diferentes concentrações utilizadas no desenvolvimento do atual trabalho.

Tabela 2. Concentrações para cada experimento.

Experimentos	Sistemas	
	Água do Poço (%)	Água Tratada (%)
01	100	0
02	0	100
03	25	75
04	50	50
05	75	25

6. RESULTADOS

Os dados obtidos são referentes as seguintes análises:

- **Análises**
 - Físico-química
 - Bacteriológicas
- **Banco de dados dos experimentos realizados sob diferentes concentrações e/ou pressões de operação.**

O Anexo do presente trabalho apresenta as figuras pertinentes ao banco de dados obtidos para diferentes concentrações de sais dissolvidos *versus* seus respectivos gradientes de pressões.

6.1 Análises

6.1.1 Físico-química

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Físico-Química do Laboratório de Referência em Dessalinização LABDES/UFCG, seguindo as metodologias do *Standard Methods*. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

6.1.1.1 Alimentação, concentrado e permeado para os diferentes sistemas

As tabelas a seguir apresentam os resultados das análises físico-químicas para os diferentes sistemas em diferentes pressões de operação (4,0 e 8,0 kgf/cm², água tratada, 6,0, 8,0 e 10,0 kgf/cm², água do poço, 8,0 kgf/cm² demais concentrações), assim como a taxa de extração em cada experimento.

Tabela 3. Análise físico-química do experimento 01 para 4,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	100% A.T.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	244,1	274,4	256,6	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,9	8,1	8,3	-
Turbidez, (uT)	1	3,2	1	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	7	5	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	16,8	15	12,6	25,0
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	7,1	8,9	9,8	-38,03
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	71,5	74,5	72,5	-1,40
Sódio (Na ⁺), mg/L	19,6	19,6	19,6	0,0
Potássio (K ⁺), mg/L	0	0,1	0	-
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,04	0,09	0,06	-50,0
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)	10	10	6,4	36,0
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	10	10	6,4	36,0
CO ₂ livre (mg/L)	3,3	4,9	5,3	-60,61
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	15,9	16,4	17,2	-8,18
Fósforo Total, mg/L	0,3	0,4	0,2	33,33
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	62,5	63,2	63,9	-2,24
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,01	0	0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,003	0,002	0,001	66,67
Amônia (NH ₃), mg/L	0	0,04	0	0,00
Sílica, mg/L (SiO ₂)	8,9	9	9,1	-
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,35	-1,22	-1,3	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	143	144,5	140	-

O percentual de extração de cada parâmetro físico químico é dependente do tipo de água que foi analisado. Para os casos, onde a concentração iônica é muito baixa, como foi o caso da água tratada, algumas concentrações iônicas ficaram próximo de zero, a exemplo do íon ferro. As amostras analisadas apresentaram valores muito próximos que se enquadram dentro de um perfil que depende da dissociação da espécie iônica no momento da coleta, a qual tem como uma variável dependente a vazão de operação.

Tabela 4. Análise físico-química do experimento 01 para 8,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	100% A.T.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	244,1	311	6,3	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,9	8,1	8,3	-
Turbidez, (uT)	1	0,3	0,2	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	7	3	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	16,8	19,4	4	76,19
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	7,1	9,4	0,9	87,32
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	71,5	87,5	13,8	80,7
Sódio (Na ⁺), mg/L	19,6	19,8	0,3	98,47
Potássio (K ⁺), mg/L	0	0,2	0	-
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,04	0,08	0,06	-50,0
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)	10	12	4	60,0
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	10	12	4	60,0
CO ₂ livre (mg/L)	3,3	3,9	3,2	3,03
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	15,9	23	4,3	72,96
Fósforo Total, mg/L	0,3	0,5	0,1	66,67
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	62,5	67,5	3,9	93,76
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,01	0,01	0,01	0,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,003	0	0	100,0
Amônia (NH ₃), mg/L	0	0	0	0,0
Sílica, mg/L (SiO ₂)	8,9	11	0,5	94,38
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,35	-1,07	-1,86	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	143	165	18,9	-

Em resumo, a análise para esses casos pode apresentar “falhas” pelo fato da baixa concentração iônica. Para contornar esse “erro” seria interessante tomar pelo menos três amostras sucessivas para serem analisadas em laboratório.

Para o sistema água tratada, todos os valores (alimentação, permeado e o concentrado), estão abaixo do valor máximo permissível.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados das análises físico-químicas para a água do poço em diferentes pressões de operação (6,0, 8,0 e 10,0 kgf/cm²) assim como a taxa de extração em cada experimento.

Tabela 5. Análise físico-química do experimento 02 para 6,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	100% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	5.480,00	5.580,00	330	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,2	7,2	5,9	-
Turbidez, (uT)	4,1	0,3	0,3	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	9	7	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	94	91	3,4	96,38
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	160,8	112,8	4,4	97,26
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	905	727,5	38	95,8
Sódio (Na ⁺), mg/L	938,9	947,6	57,5	93,88
Potássio (K ⁺), mg/L	3,9	3,4	0,2	94,87
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,21	0,02	0,03	85,71
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	44	0	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	78	26	3,6	95,38
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	78	70	3,6	95,38
CO ₂ livre (mg/L)	37,3	45,9	29,4	21,18
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	110,7	122,1	3,8	96,57
Fósforo Total, mg/L	0,1	0,4	0	100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.949,00	1.846,00	101,5	94,79
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,06	0,04	0,03	50,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,006	0,006	0,003	50,0
Amônia (NH ₃), mg/L	1,09	1,1	0,17	84,4
Sílica, mg/L (SiO ₂)	49,1	54	3,9	92,06
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,6	-0,56	-4,47	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	3.248,10	3.402,90	179,5	-

Tabela 6. Análise físico-química do experimento 02 para 8,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	100% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	5.480,00	6.080,00	221,2	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,2	7,3	6	-
Turbidez, (uT)	4,1	0,7	0,4	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	9	10	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	94	103	5,4	94,26
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	160,8	142,8	1,2	99,25
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	905	822,5	27	97,02
Sódio (Na ⁺), mg/L	938,9	987,2	43,1	95,41
Potássio (K ⁺), mg/L	3,9	10,3	0,2	94,87
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,21	0,01	0,02	90,48
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)	78	44	6,4	91,79
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	78	88	6,4	91,79
CO ₂ livre (mg/L)	37,3	11,6	6,7	82,04
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	110,7	151,3	4	96,39
Fósforo Total, mg/L	0,1	0,1	0	100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.949,00	1963,2	73,1	96,25
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,06	0,06	0,04	33,33
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,006	0,003	0,002	66,67
Amônia (NH ₃), mg/L	1,09	0,77	0	100,0
Sílica, mg/L (SiO ₂)	49,1	55	2,9	94,09
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,6	-0,28	-3,93	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	3.248,10	3481,7	137,9	-

Para o sistema água do poço, à medida que a pressão aumenta, a concentração de sais aumenta na saída que gera o concentrado, por outro lado, o permeado se mantém abaixo do valor máximo permitido.

Tabela 7. Análise físico-química do experimento 02 para 10,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	100% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	5.480,00	6.690,00	238,4	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,2	7,4	6,6	-
Turbidez, (uT)	4,1	1,2	0,4	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	9	11	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	94	171	11,4	87,87
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	160,8	164,4	2,3	98,57
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	905	1112,5	18,5	97,96
Sódio (Na ⁺), mg/L	938,9	1441,9	30,1	96,79
Potássio (K ⁺), mg/L	3,9	39,8	0,8	79,49
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,21	0,01	0,11	47,62
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO ₃)	0	0	0	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO ₃)	0	44	0	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO ₃)	78	112	10,4	86,67
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	78	112	10,4	86,67
CO ₂ livre (mg/L)	37,3	38,5	3,7	90,08
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	110,7	134,9	3,4	96,93
Fósforo Total, mg/L	0,1	0,2	0,2	-100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.949,00	2832,9	65,3	96,65
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,06	0,06	0,08	-33,33
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0,006	0,007	0,002	66,67
Amônia (NH ₃), mg/L	1,09	1,34	0	100,0
Sílica, mg/L (SiO ₂)	49,1	55	2,4	95,11
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,6	-0,05	-2,79	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	3.248,10	4978,1	128,6	-

A Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resultados das análises físico-químicas para os experimentos 03, 04 e 05 assim como as taxas de extração em cada experimento.

Tabela 8. Análise físico-química do experimento 03, para 8,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	75% A.T. + 25% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	1.878,00	2.317,00	21	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,38	7,46	5,67	-
Turbidez, (uT)	1	0,58	0,37	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	9	7	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	36,1	45,04	0,34	99,06
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	45,53	56,81	2,56	94,38
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	244,89	305,55	8,7	96,45
Sódio (Na ⁺), mg/L	249,78	311,58	2,56	98,98
Potássio (K ⁺), mg/L	0,98	1,22	0,01	98,98
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,08	0,1	0	100,0
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)	32,67	40,61	0,52	98,41
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	32,61	40,61	0,52	98,41
CO ₂ livre (mg/L)	1,87	1,9	1,78	4,81
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	39,6	49,44	0,23	99,42
Fósforo Total, mg/L	0,25	0,28	0	100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	534,93	667,32	5,34	99,0
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,02	0,03	0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0	0	0	
Amônia (NH ₃), mg/L	0,27	0,34	0,01	96,3
Sílica, mg/L (SiO ₂)	18,95	21,58	0,2	98,94
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,06	-0,82	-6,36	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	959,15	1.196,51	9,6	-

Tabela 9. Análise físico-química do experimento 04, para 8,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	50% A.T. + 50% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	3.389,00	4.085,00	46	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,28	7,35	5,9	-
Turbidez, (uT)	2	1,19	0,59	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5	6	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	55,4	67,56	0,63	98,86
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	83,95	102,4	0,88	98,95
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	418,05	509,88	4,53	98,92
Sódio (Na ⁺), mg/L	479,49	584,73	5,7	98,81
Potássio (K ⁺), mg/L	1,95	2,38	0,02	98,97
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,13	0,15	0	100,0
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)	53,41	64,91	0,86	98,39
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	53,41	64,91	0,86	98,39
CO ₂ livre (mg/L)	3,64	3,67	3,53	3,02
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	63,3	77,27	0,39	99,38
Fósforo Total, mg/L	0,2	0,22	0	100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.007,35	1.228,48	11,85	98,82
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,04	0,04	0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0	0	0	
Amônia (NH ₃), mg/L	0,55	0,66	0,02	96,36
Sílica, mg/L (SiO ₂)	29	35,37	0,33	98,86
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,84	-0,63	-6,04	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	1.774,72	2.164,31	20,69	-

Tabela 10. Análise físico-química do experimento 05, para 8,0 kgf/cm².

PARÂMETROS	25% A.T. + 75% A.P.			
	Alim.	Conc.	Perm.	Ext. (%)
Condutividade Elétrica, mmho/cm a 25°C	4.853,00	5.718,00	77	-
Potencial Hidrogeniônico, pH a 25,0°C	7,23	7,29	5,57	-
Turbidez, (uT)	1	0,65	0,37	-
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	13	10	0	100,0
Dureza em Cálcio (Ca ⁺⁺), mg/L	74,7	88,93	1,01	98,65
Dureza em Magnésio (Mg ⁺⁺), mg/L	122,38	145,71	1,5	98,77
Dureza Total (CaCO ₃), mg/L	591,24	703,92	7,53	98,73
Sódio (Na ⁺), mg/L	709,19	844,22	9,76	98,62
Potássio (K ⁺), mg/L	2,93	3,48	0,04	98,63
Alumínio (Al ³⁺), mg/L	0	0	0	-
Ferro Total, mg/L	0,17	0,2	0	100,0
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)	73,97	87,97	1,25	98,31
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO ₃)	73,97	87,97	1,25	98,31
CO ₂ livre (mg/L)	5,43	5,45	5,3	2,39
Sulfato (SO ₄ ⁻⁻), mg/L	87	103,67	0,58	99,33
Fósforo Total, mg/L	0,15	0,18	0	100,0
Cloreto (Cl ⁻), mg/L	1.479,78	1.761,54	20,27	98,63
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	0,05	0,06	0	100,0
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	0	0	0	
Amônia (NH ₃), mg/L	0,82	0,97	0,04	95,12
Sílica, mg/L (SiO ₂)	39,05	46,49	0,48	98,77
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,67	-0,5	-5,71	-
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	2.590,38	3.083,57	34,95	-

Em cada experimento, a taxa de extração aumenta (com o aumento da pressão), chegando a um ponto onde se torna inviável aumentar a pressão, o gasto energético será elevado em comparação ao percentual extraído.

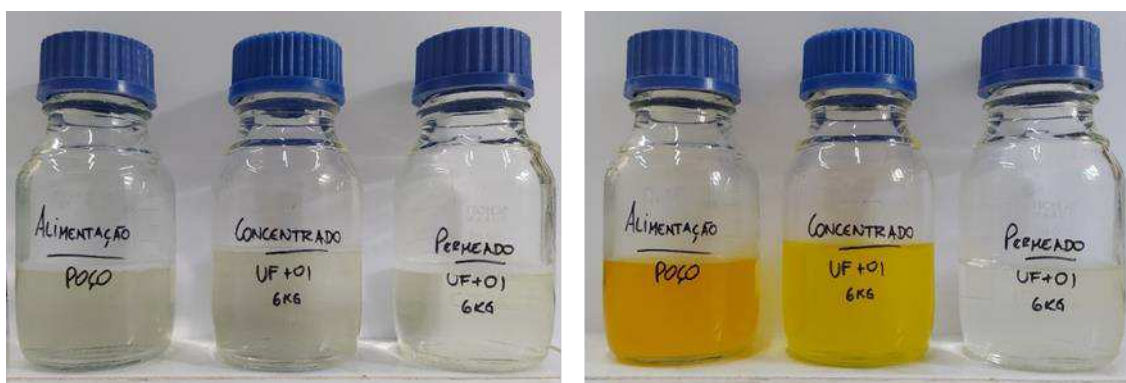
6.1.2 Bacteriológica

Todas as análises foram feitas no Laboratório de Microbiologia do Laboratório de Referência em Dessalinização LABDES/UFCG, seguindo as metodologias do *Standard Methods*. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir.

6.1.2.1 Experimentos 02

A Figura 9 apresenta o resultado das análises das amostras no experimento com pressão de 6,0 kgf/cm², onde o permeado não apresentou a coloração amarela, que é um indicativo para a presença de coliformes totais. Entretanto o resultado não foi o mesmo para a alimentação e o concentrado. Todos as amostras foram expostas a luz negra afim de se testar a presença de *Escherichia coli*, resultado foi negativo, não apresentado o mesmo.

Figura 9. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento de 6,0 kgf/cm².

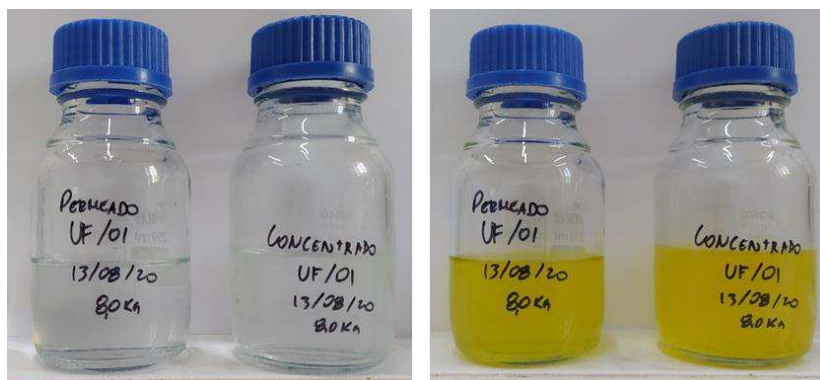


Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

Tendo em vista que a água da alimentação é a mesma para todo esse experimento, realizou-se coleta de apenas uma (1) amostra, e, realizou-se a análise bacteriológica para a mesma.

A Figura 10 apresenta a presença de coliformes totais no permeado, indicando que a membrana precisa de tratamento físico-químico.

Figura 10. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 8,0 kgf/cm².



Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

A Figura 11 apresenta resultado semelhante ao visto na Figura 10, tendo em vista que o experimento foi realizado em seguida e o resultado só pôde ser coletado 24 horas depois.

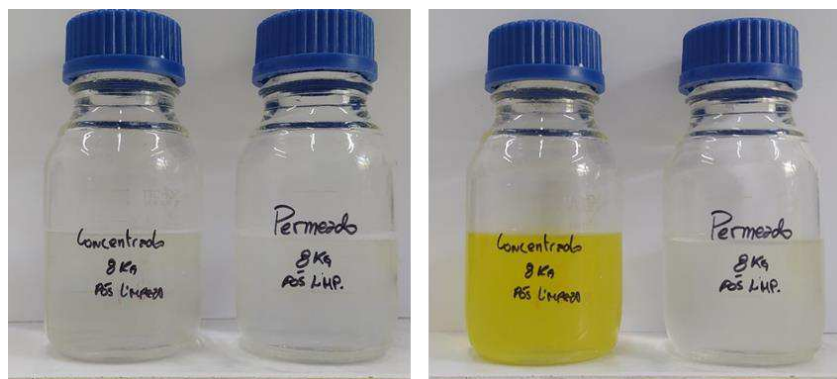
Figura 11. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 10,0 kgf/cm².



Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

As Figuras 12 e 13 mostram o resultado do reteste após a limpeza química nas membranas.

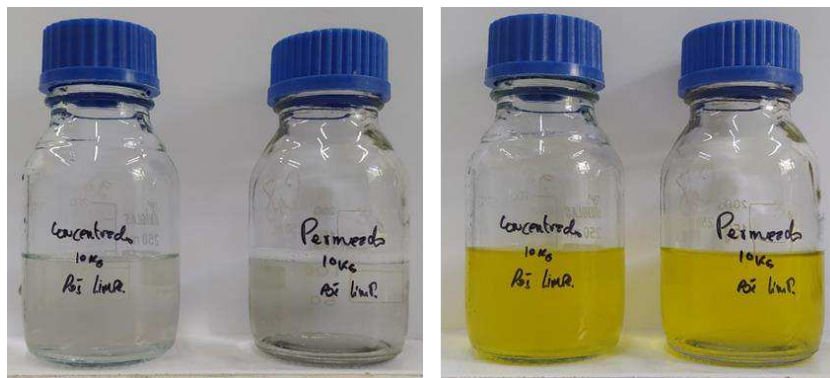
Figura 12. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 8,0 kgf/cm².



Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

Como se pode observar na Figura 12, a limpeza foi eficaz para a pressão de 8 kgf/cm², já para 10 kgf/cm², conforme a Figura 13, foi necessário realizar uma segunda e mais prolongada limpeza.

Figura 13. Amostras do conc. e perm. para o experimento de 10,0 kgf/cm².



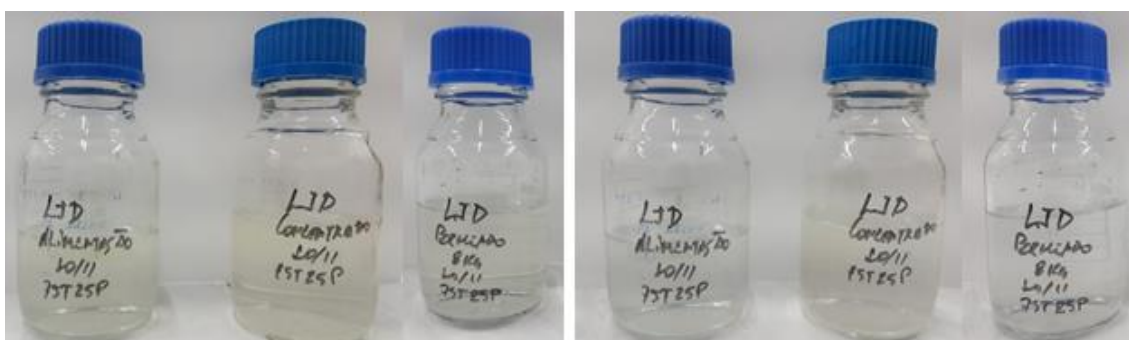
Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

Após o segundo tratamento nas membranas de osmose inversa, verificou-se que as amostras não apresentaram mais coliformes totais nem *E. coli*.

6.1.2.2 Experimento 03

Como supracitado, após o segundo tratamento químico nos elementos de membrana de osmose inversa as amostras não apresentaram coliformes totais nem a *E. coli*. A Figura 14 apresenta os resultados das análises das amostras do experimento 03

Figura 14. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 03.



Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

6.1.2.3 Experimento 04

A Figura 15 apresenta os resultados das análises das amostras do experimento 04, constatando-se a ausência de coliformes total e *E. coli*.

Figura 15. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 04.

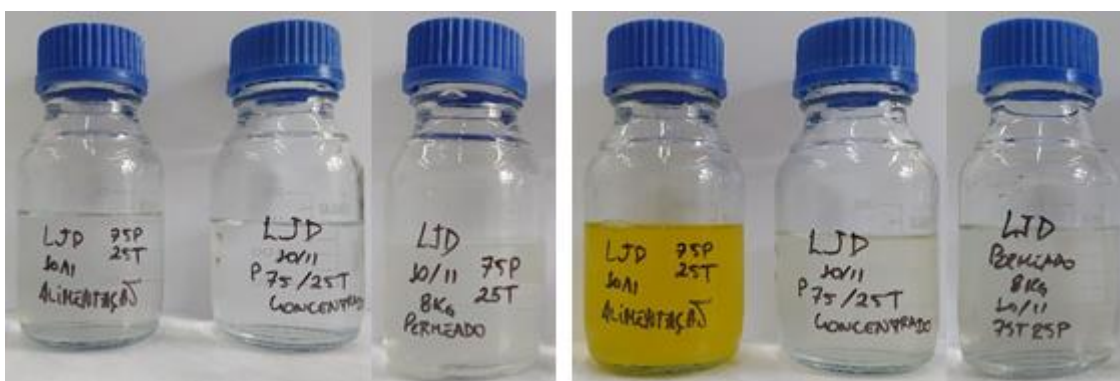


Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

6.1.2.4 Experimento 05

A Figura 16 apresenta o resultado das análises das amostras do experimento 05, verificando a presença de coliformes totais na amostra da alimentação e ausência na de concentrado e permeado. As amostras não apresentaram *E. coli*.

Figura 16. Amostras da alim., conc. e perm. para o experimento 05.



Fonte: Arquivo Pessoal (2020).

6.2 Banco de Dados

- Pressão de operação;
- Vazão;
- Condutividade;
- Temperatura;
- pH;
- Cor;
- Turbidez.

Para cada composição química do meio aquoso (água tratada e/ou água do poço) variou-se as pressões após 60 minutos de operação. Os dados obtidos em cada experimento foram assim apresentados na mesma figura, visando facilitar a interpretação do processo sob diferentes gradientes de pressões.

6.2.1 Pressão de Operação

Como previsto no plano de trabalho, foram realizados experimentos para se descobrir a pressão de operação mais viável. A Tabela 11 mostra as pressões que foram aplicadas aos diferentes sistemas:

Tabela 11. Pressões de operação do sistema.

Experimentos	Ensaio	Sistema (%)	Pressão (kgf/cm²)
01	1.1	100 (A.T.)	4,0
	1.2		8,0
02	2.1	100 (A.P.)	6,0
	2.2		8,0
	2.3		10,0
03	3.1	75 (A.T.) + 25 (A.P.)	
04	4.1	50 (A.T.) + 50 (A.P.)	8,0
05	5.1	25 (A.T.) + 75 (A.P.)	

A.T. – Água Tratada. A.P. – Água do Poço

Observou-se que os perfis de operação foram semelhantes para ambos experimentos. Constatando-se assim que a pressão de 8 kgf/cm² obteve resultados satisfatórios. Poder-se-ia utilizar a pressão de 10 kgf/cm², porém, o equipamento trabalharia sobrecarregado.

Sabendo que o sistema é programado para efetuar a retro lavagem a cada 40 minutos ou quando o rendimento da membrana de ultrafiltração diminui, nas Figuras 17, 18 e 19 é possível notar o efeito dessa operação. Pode-se também visualizar a variação de pressão antes e depois do filtro e nos elementos de membrana.

As figuras apresentadas abaixo, cada uma representa os valores das variáveis de medidas obtidas durante cada experimento sob as condições de operação, em termos de qualidade de água de alimentação e a variação da pressão. Para visualizar cada

experimento sob uma dada condição de operação, achou-se prudente representar cada experimento em uma única figura visando facilitar as variações das variáveis de medidas durante o processo de dessalinização para cada sistema.

As Figura 17, 18 e 19 apresentam os perfis das variações das pressões no filtro de pré-tratamento e nos elementos de membrana de osmose inversa durante os experimentos para diferentes sistemas, conforme será apresentado a seguir.

Vale salientar que:

P1 – Pressão de entrada dos elementos de membranas

P2 – Pressão de saída dos elementos de membranas.

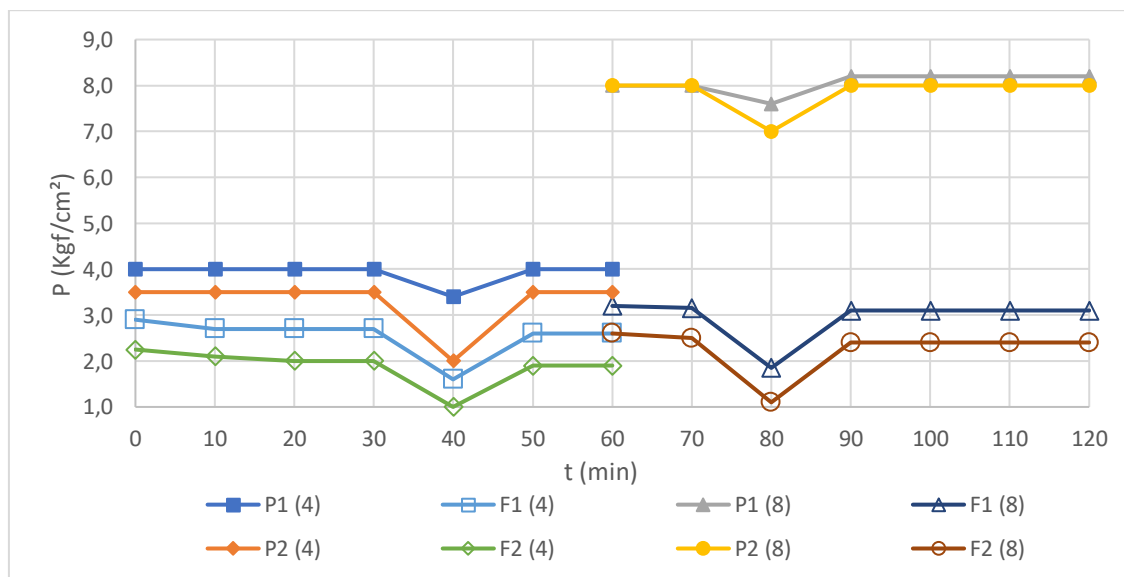
F1 – Pressão de entrada do filtro

F2 – Pressão de saída do filtro.

6.2.1.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

Na Figura 17 verifica-se o efeito do processo de retro lavagem como uma queda de pressão. Como o segundo experimento foi realizado após o primeiro, pode-se notar a mesma queda de pressão, em tempos diferentes, mas com intervalo de 40 minutos entre elas.

Figura 17. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 1.1 e 1.2.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Foi observado que a diferença de pressão durante os experimentos para o mesmo tipo de água variou em função da pressão de operação. Para 4,0 kgf/cm² a diferença de pressão entre a entrada e saída dos elementos de membranas foi superior à de 8,0 kgf/cm².

Esse fato ocorre em função da pressão osmótica oferecida pelo meio aquoso, ou seja, quanto maior a pressão osmótica maior a necessidade do aumento da pressão de operação para que ocorra a osmose inversa.

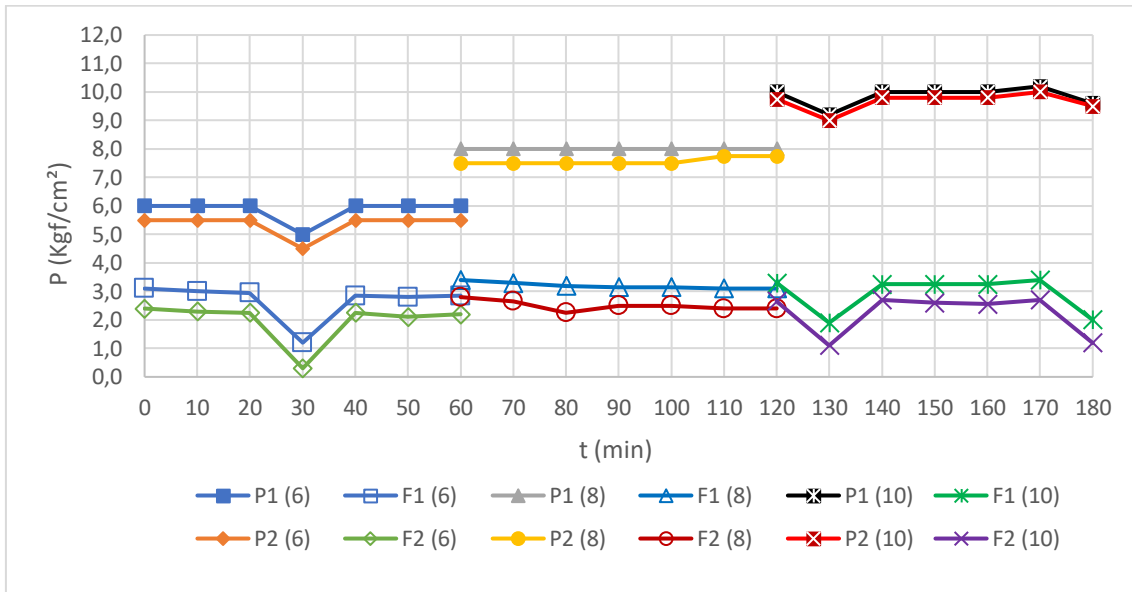
Quando há o aumento de pressão a diferença de pressão diminuiu, isso se deve a pressão osmótica oferecida pelo meio aquoso (constante), apresentar uma resistência inferior para o processo de osmose inversa. Quando essa diferença de pressão aumenta, pode ser por motivos além do aumento da pressão osmótica, tal qual a presença de outros componentes insolúveis que se depositam na superfície dos elementos de membranas, aumentando assim a resistência do processo e conseqüentemente, diminuindo o rendimento do sistema. Esse fato foi observado para todos os experimentos realizados, independentemente do sistema aquoso utilizado.

6.2.1.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

A Figura 18 mostra o comportamento das variações das pressões de entrada e saída do filtro e dos elementos de membranas para três experimentos realizados com as respectivas pressões, 6,0, 8,0 e 10,0 kgf/cm². Observou-se que para o primeiro ensaio as variações de pressão foram semelhantes em função do tempo que ocorreu a retro lavagem da membrana de ultrafiltração, o qual nesse momento a pressão de entrada e de saída diminui simultaneamente para as membranas. Essa diminuição de pressão é devido a retro lavagem da membrana de ultrafiltração e conseqüentemente ocorre uma diminuição na vazão de alimentação também da membrana de osmose inversa.

Para o experimento realizado entre 60 e 120 minutos esse fato não foi observado com mais clareza porque a leitura das pressões foi realizada antes do início da retro lavagem. Por outro lado, o mesmo fato que ocorreu no primeiro ensaio foi possível detectar no terceiro (120 e 180 min).

Figura 18. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

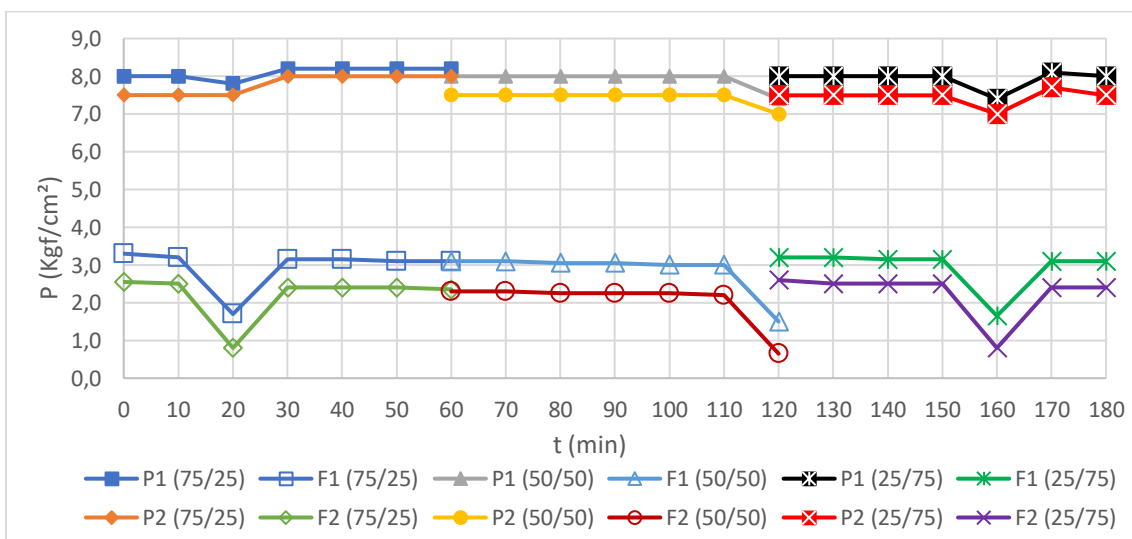


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.1.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaio 3.1, 4.1 e 5.1

A Figura 19 apresenta os resultados dos experimentos (03, 04 e 05), para mesma pressão com diferentes concentrações de sais dissolvidos. Observar-se que o efeito descrito anteriormente, também pode ser observado para os demais experimentos. Convém salientar que os experimentos não foram realizados no mesmo dia, isso implica em função da evaporação da água nos tanques, a pressão osmótica do meio aquoso pode aumentar e conseqüentemente, os gradientes de pressões durante os experimentos podem sofrer alterações.

Figura 19. Var. das P's no filtro e nos elem. de memb. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.2 Vazão

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os perfis das vazões dos concentrados e permeados durante a realização dos experimentos para diferentes sistemas, assim como segue:

Em que:

Q_c – Vazão do concentrado.

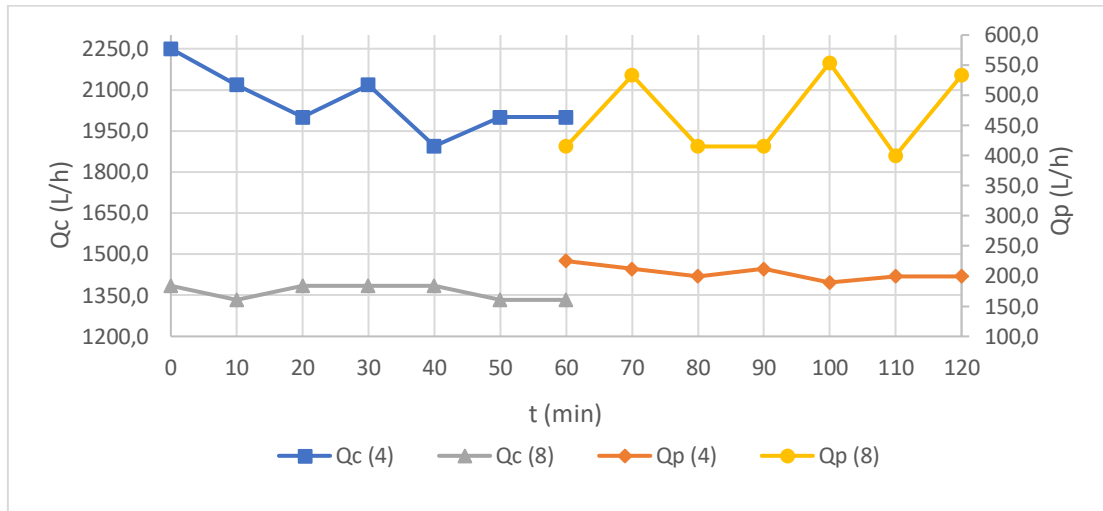
Q_p – Vazão do permeado.

6.2.2.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

A Figura 20 apresenta os perfis das vazões do concentrado (Q_c) e do permeado (Q_p) em função do tempo. O comportamento apresentado para as duas pressões de operação (4,0 e 8,0 kgf/cm²) é retratado com os perfis das variações das vazões do concentrado e permeado para cada ensaio. A vazão do permeado para 8,0 kgf/cm² foi superior à de 4,0 kgf/cm² e conseqüentemente a vazão do concentrado para o de 8 kgf/cm² foi menor do que a de 4,0 kgf/cm². Isso mostra que o aumento da vazão do permeado é em função da pressão de operação e a pressão osmótica do meio. Considerando que os dois ensaios foram realizados para a mesma composição físico química, a pressão osmótica diminuiu quando a pressão de operação passou de 4,0 pra 8,0 kgf/cm².

A diminuição da vazão do permeado pode ocorrer durante o processo de dessalinização quando a membrana começa a entupir em função das características físico química e bacteriológicas da água da alimentação, logo o rendimento diminui e ocorre um aumento da pressão, isso faz com que ocorra um aumento do consumo de energia, conforme será apresentado para os sistemas subsequentes.

Figura 20. Var. das vazões do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.

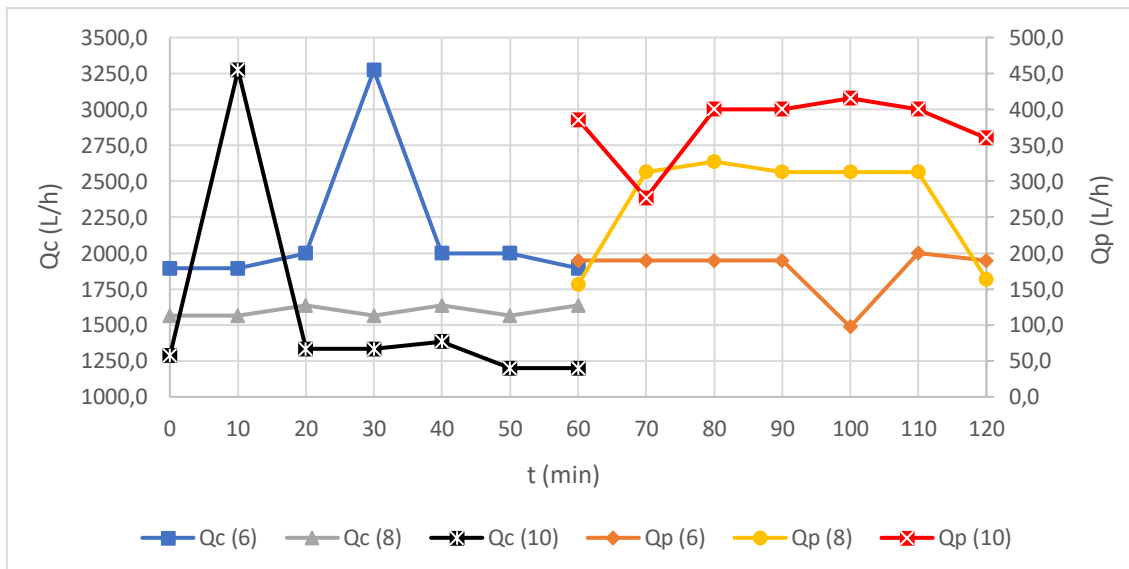


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.2.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

A Figura 21 apresenta comportamento semelhante ao do sistema anterior, ao se elevar a pressão a produção de permeado aumenta e a do concentrado diminui. Os picos apresentados nas vazões do concentrado e as quedas no permeado se deram em função da retro lavagem.

Figura 21. Var. das vazões do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

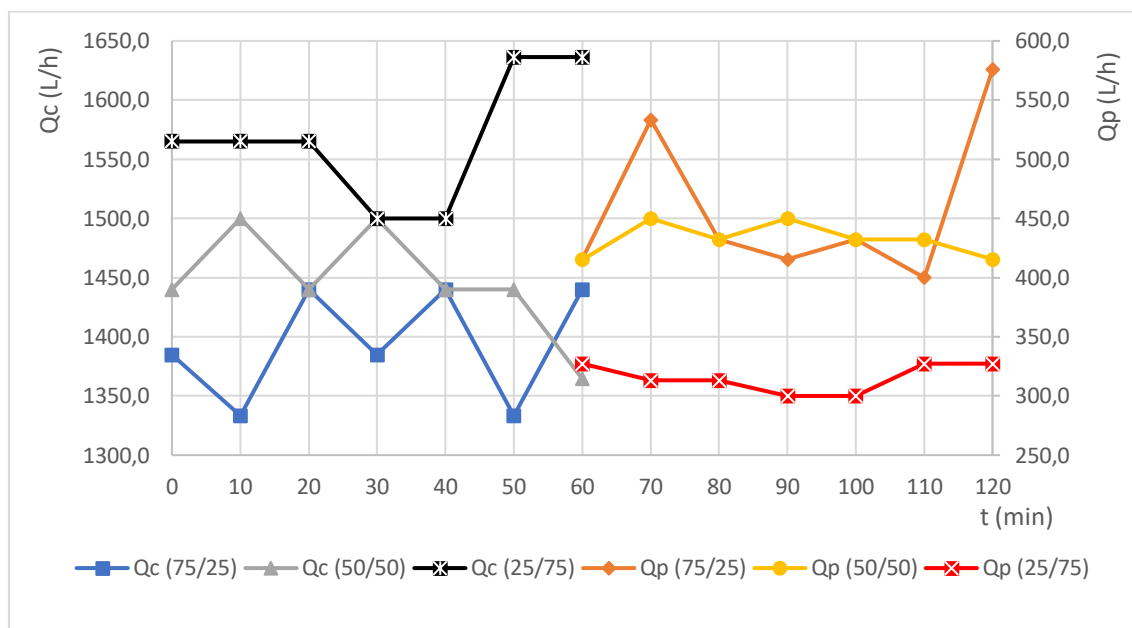


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.2.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1

A Figura 22 apresenta resultado semelhante ao anterior. À medida que a concentração de sais aumenta, a vazão do concentrado também aumenta, diminuindo a produção do permeado.

Figura 22. Var. das vazões do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.3 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica de uma amostra nada mais é do que a medida da sua capacidade em conduzir corrente elétrica, dependendo do número e do tipo de espécies iônicas dispersas no meio aquoso.

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os perfis da condutividade elétrica para os experimentos com água tratada.

Em que:

Kc – Condutividade elétrica do concentrado.

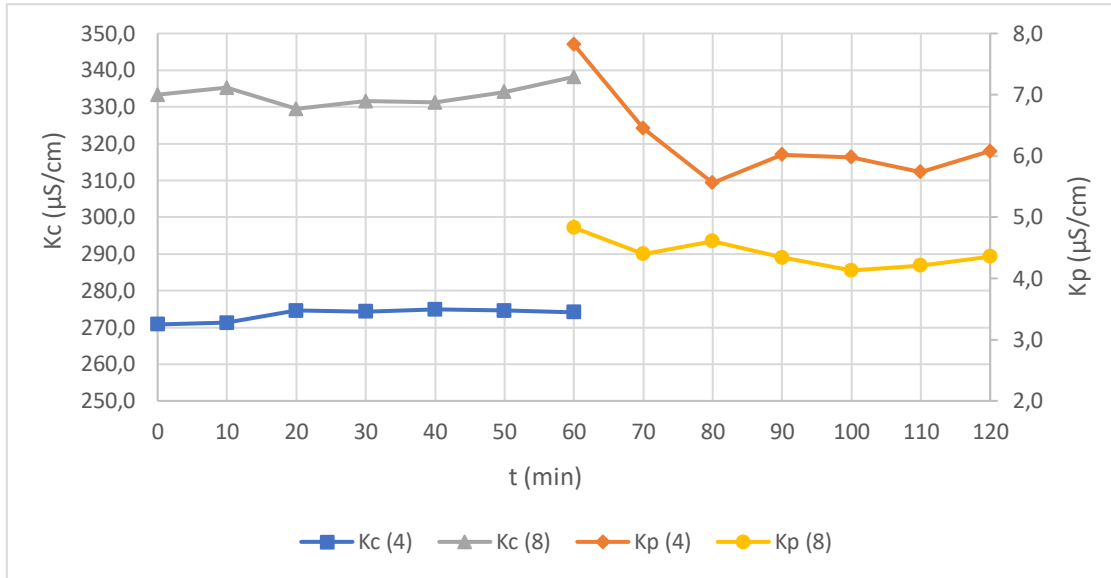
Kp – Condutividade elétrica do permeado.

6.2.3.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

Verifica-se a partir dos perfis de condutividade elétrica, apresentados na Figura 23, que à medida que a pressão aumenta, a vazão do concentrado diminui, aumentando a

concentração de sais. O inverso ocorre para o permeado, a vazão aumenta e a concentração de sais diminui.

Figura 22. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.

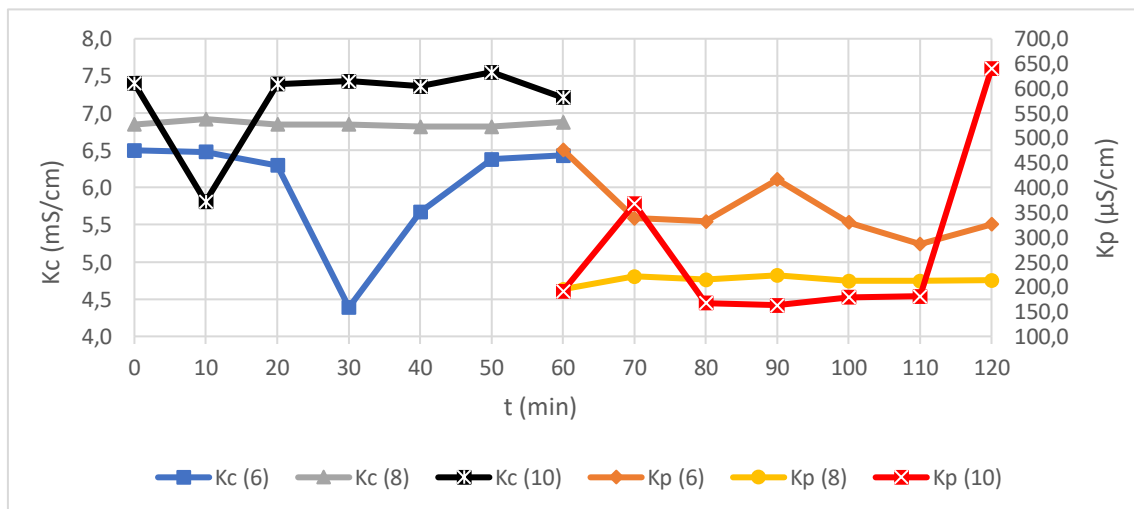


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.3.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

A Figura 24 apresenta performance semelhante ao exposto na Figura 23, observa-se que os picos e as quedas (relacionados ao permeado e concentrado, respectivamente) expressos nos perfis são devidos ao processo de retro lavagem.

Figura 23. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

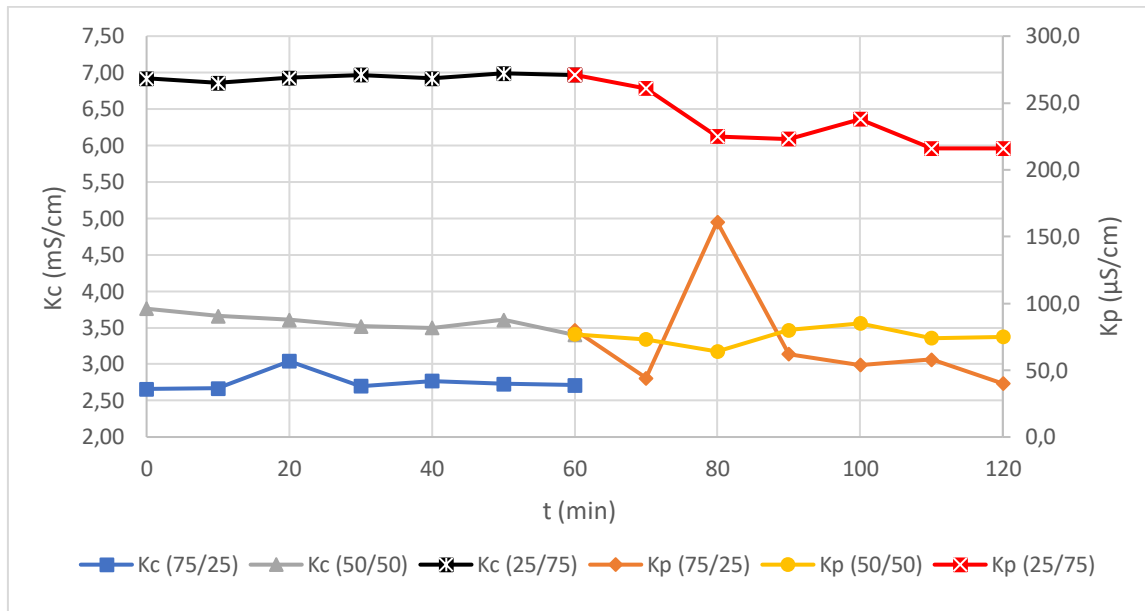


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.3.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1

A Figura 25 apresenta o efeito da variação de concentração na condutividade, quanto maior for a concentração, mais elevada será a condutividade, salientando que isso ocorre devido a diminuição da produção de permeado e aumento da produção do concentrado.

Figura 24. Var. das cond. elétricas do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.4 Temperatura

O comportamento da temperatura do sistema é de essencial importância para o processo de separação com membranas poliméricas. Para cada tipo existe uma faixa de temperatura ideal, por exemplo, nas membranas poliméricas de osmose inversa utilizadas no presente sistema, a temperatura máxima não pode exceder 70°C.

Em que:

T_a – Temperatura da alimentação.

T_c – Temperatura do concentrado.

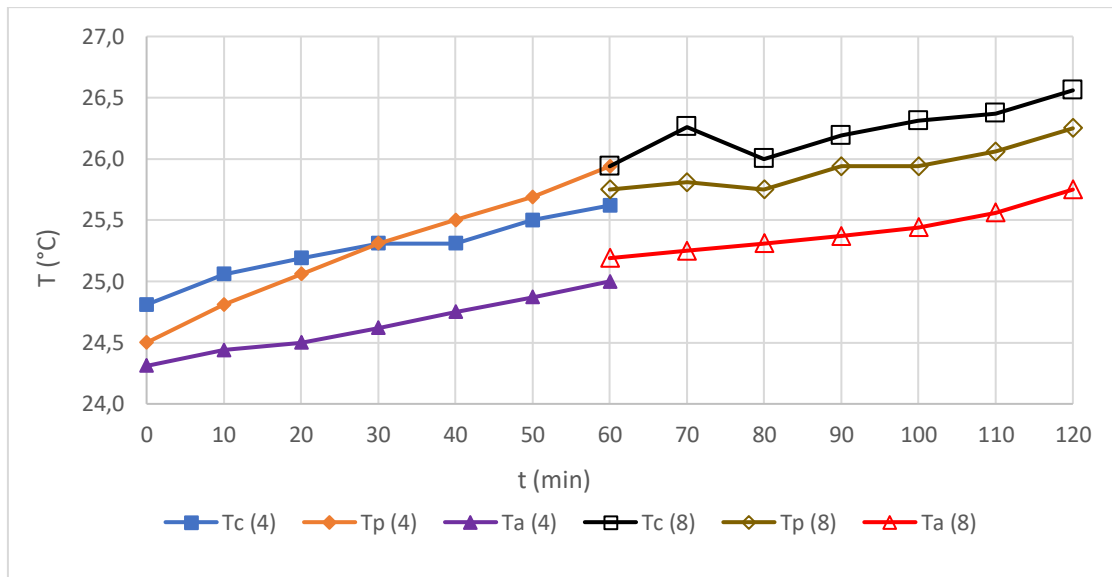
T_p – Temperatura do permeado.

6.2.4.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

A Figura 26 apresenta os perfis de temperatura para os sistemas propostos, e observa-se que a temperatura do sistema tende a subir devido à: perda de carga da

tubulação, a transferência de calor do motor para a carcaça da bomba e o tanque de alimentação, pois esse último encontra-se exposto ao sol.

Figura 25. Var. das T's da alim., conc. e perm. ensaios 1.1 e 1.2.



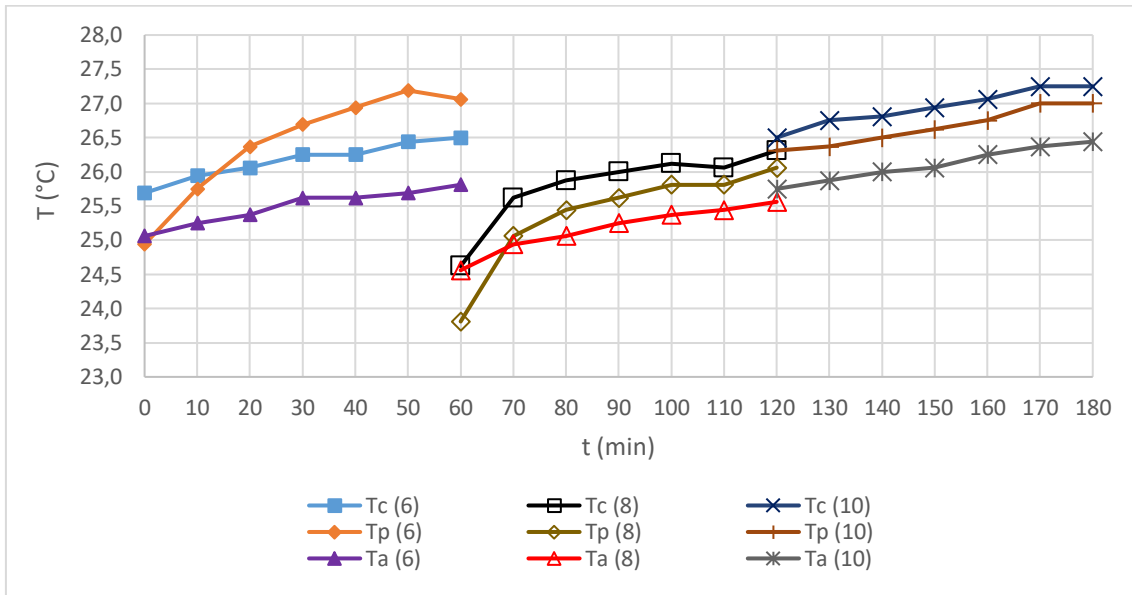
Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.4.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

Os perfis de temperatura para o experimento com água do poço, conforme Figura 27, apresentam performance semelhantes aos discutidos para o experimento com água tratada, apresentado na Figura 26.

É importante ressaltar que os experimentos para 8 e 10 kgf/cm² foram realizados no mesmo dia e o experimento com 6kgf/cm² em outro dia.

Figura 26. Var. das T's da alim., conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

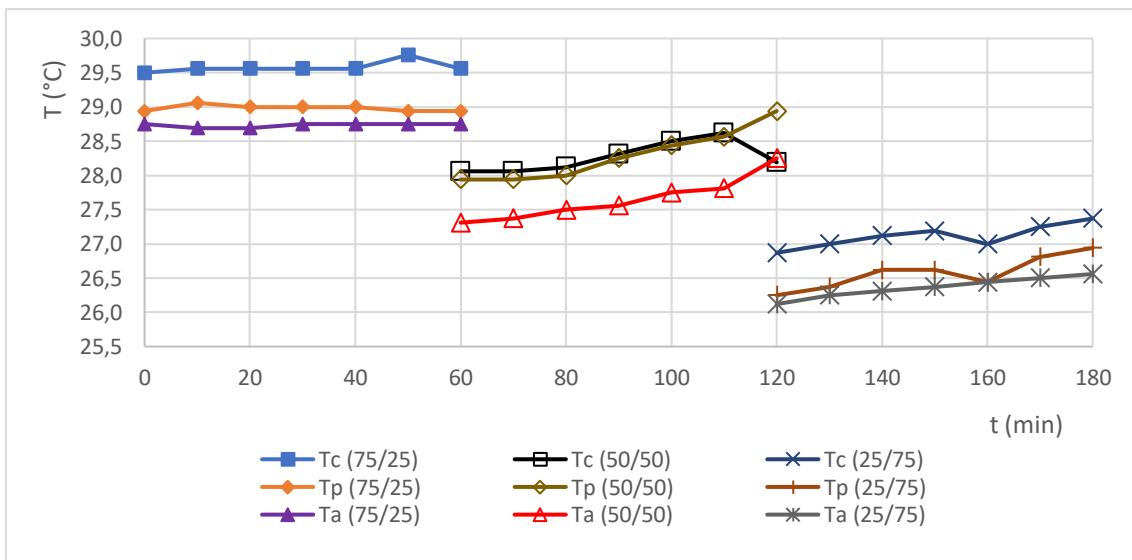


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.4.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1

A Figura 28 apresenta os perfis de temperatura para os experimentos (03, 04 e 05). Conforme mencionado no item 6.2.1.3, os experimentos não foram realizados no mesmo dia, a faixa de operação (0 a 180) minutos, foi tomado para visualizar o efeito da temperatura durante o processo.

Figura 27. Var. das T's da alim., conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.5 Potencial Hidrogeniônico

A variação do pH foi obtida durante o processo para as correntes do permeado e concentrado, conforme mostra as Figuras 29, 30 e 31.

Em que:

pHc – Potencial hidrogeniônico do concentrado;

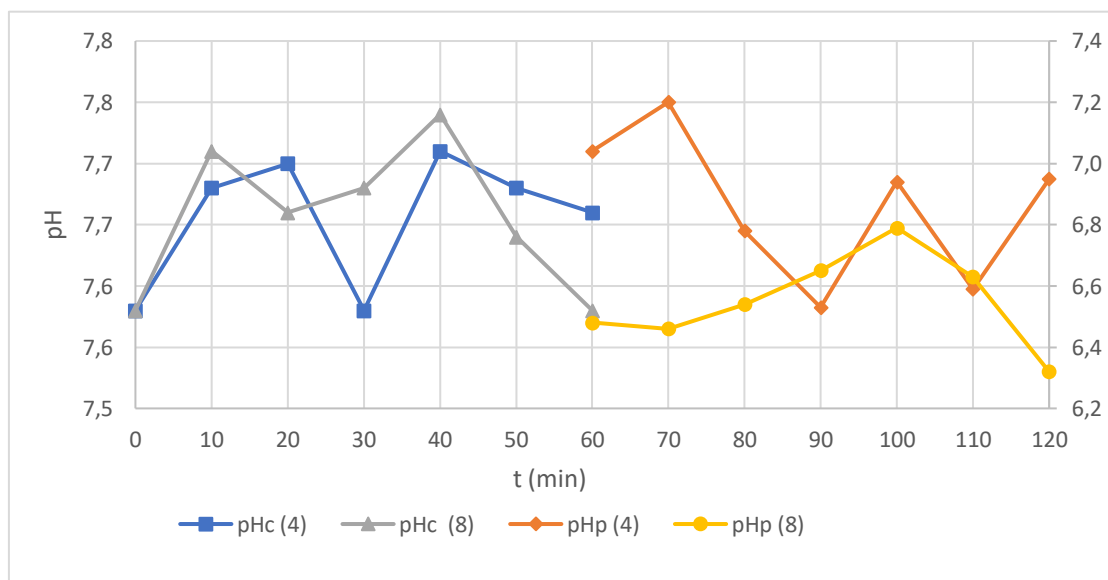
pHp – Potencial hidrogeniônico do permeado.

6.2.5.1 Todos os experimentos, todos os ensaios

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam a variação do potencial hidrogeniônico para as duas correntes, permeado e concentrado, não foram significativas. Observa-se que o pH do concentrado foi superior ao do permeado para as duas pressões estudadas. Esse fato ocorre devido a extração dos sais minerais da água da alimentação transferindo-os para a corrente do concentrado e conseqüentemente o pH do permeado diminui. De acordo com os resultados, esse fato ocorreu independentemente da concentração inicial da água da alimentação.

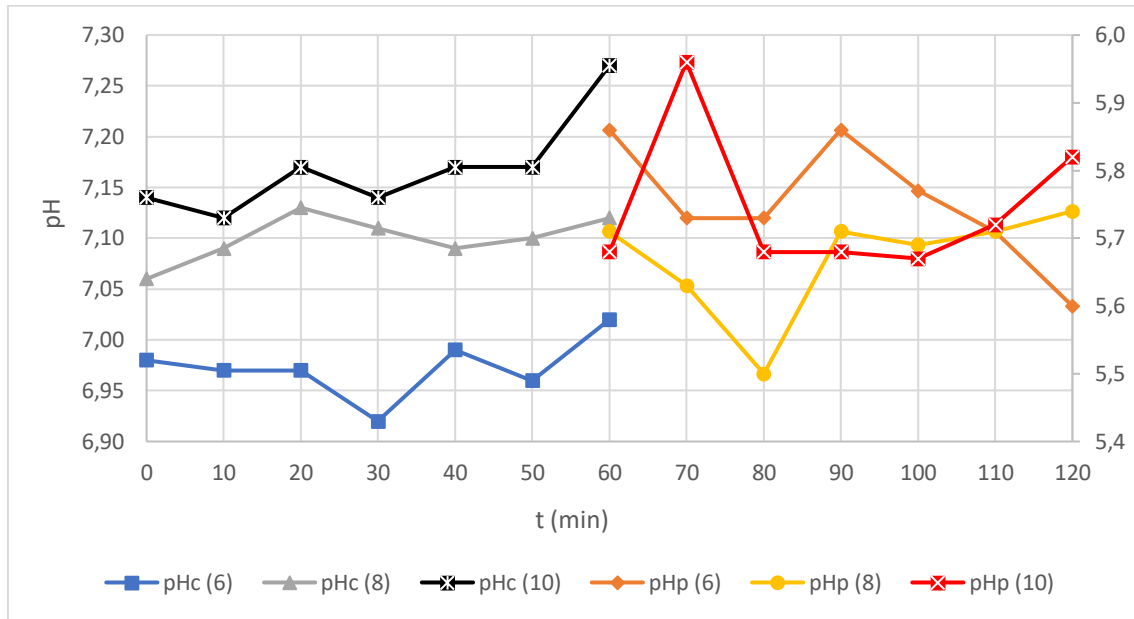
Um outro ponto que faz o pH do permeado diminuir durante o processo é o nível da concentração de gás carbônico presente na água de alimentação. O gás carbônico durante a permeação atravessa a membrana e conseqüentemente ocorre a formação de ácido carbônico na corrente do permeado diminuindo assim o pH.

Figura 28. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.



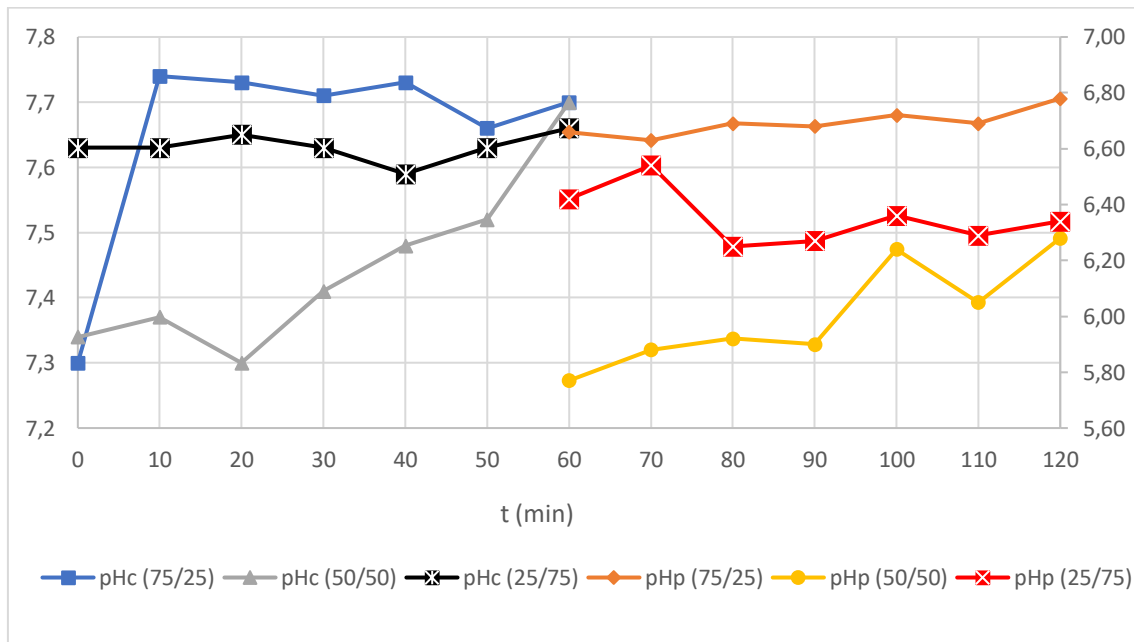
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 29. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 30. Var. de pH do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.6 Cor

A cor de uma amostra serve para indicar a presença de substâncias dissolvidas na água. Para realizar essa medição, foi utilizado um colorímetro com disco de cor, contendo um tubo de ensaio para a prova em branco com água destilada, sendo essa a referência de cor zero, e um tubo de ensaio com a amostra a ser comparada.

O alcance do aparelho é de 0 a 250 unidade *Hazen* (mg Pt-Co/L). De acordo com a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, o valor máximo permissível para cor em amostras de água é de 15 U.C.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os perfis de variações da cor nos concentrados e nos permeados durante a realização dos experimentos para os diferentes sistemas.

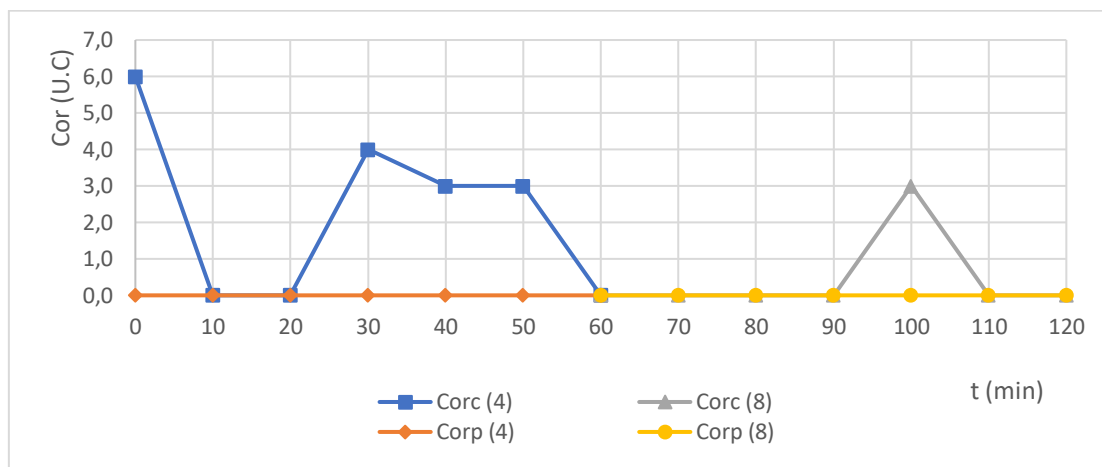
Em que:

Corc – Cor do concentrado;

Corp – Cor do permeado.

6.2.6.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

Figura 31. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.



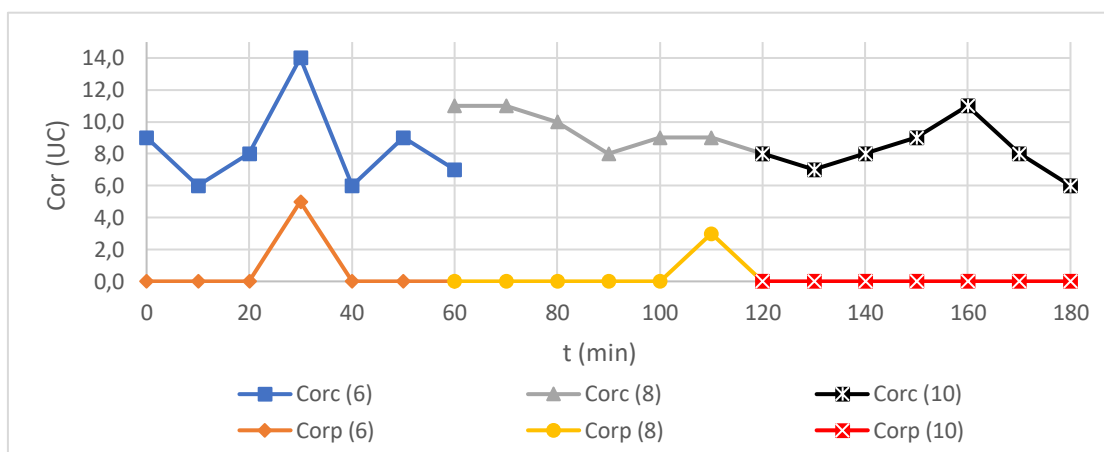
Fonte: Autoria Própria (2020).

A variação da cor da água tratada durante o processo, observou-se que a cor do permeado e do concentrado ao longo do experimento apresentou alguns picos que podem representar um processo difusivo da concentração dos componentes presentes no meio aquoso, na camada limite da superfície da membrana, a qual é superior à do “seio da fase aquosa do concentrado”. Esse fato ocorre devido ao efeito da pressão de operação *versus* a produção do concentrado e permeado. Por outro lado, esse fato foi mais acentuado para os experimentos realizados com a água do poço onde a concentração dos componentes na camada limite da superfície da membrana é superior à da água tratada.

6.2.6.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

Pode-se observar na Figura 33 a ocorrência de picos em 30 minutos que é decorrência do processo de retro lavagem.

Figura 32. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

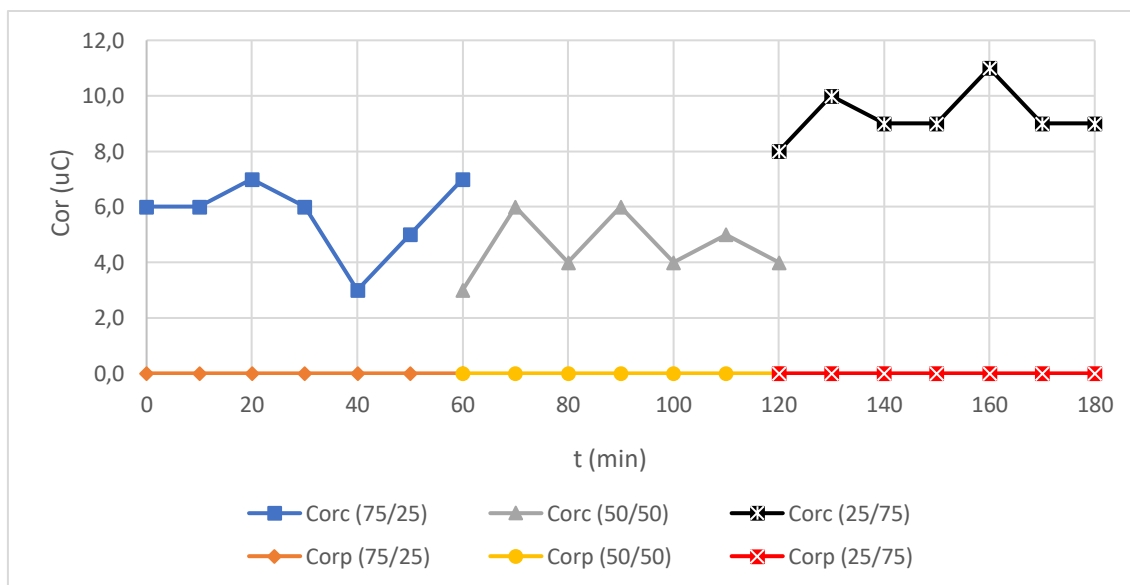


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.6.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1. 4.1 e 5.1.

A Figura 34 apresenta resultados semelhantes aos visualizados anteriormente. Todos os resultados permaneceram dentro do valor máximo permissível, de acordo com a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Figura 33. Var. da cor do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.7 Turbidez

A turbidez da amostra é um parâmetro que serve para medir a resistência da água a passagem de luz, efeito provocado por partículas em suspensão. As análises foram realizadas em um turbidímetro, contendo uma cubeta para a prova em branco com água

destilada, sendo essa a referência de turbidez zero, e uma cubeta com a amostra a ser comparada. O alcance do aparelho é de 0 a 1000 unidade de turbidez (UT).

De acordo com a portaria 518, o valor máximo permissível para potabilidade humana é de 5 UT.

Em que:

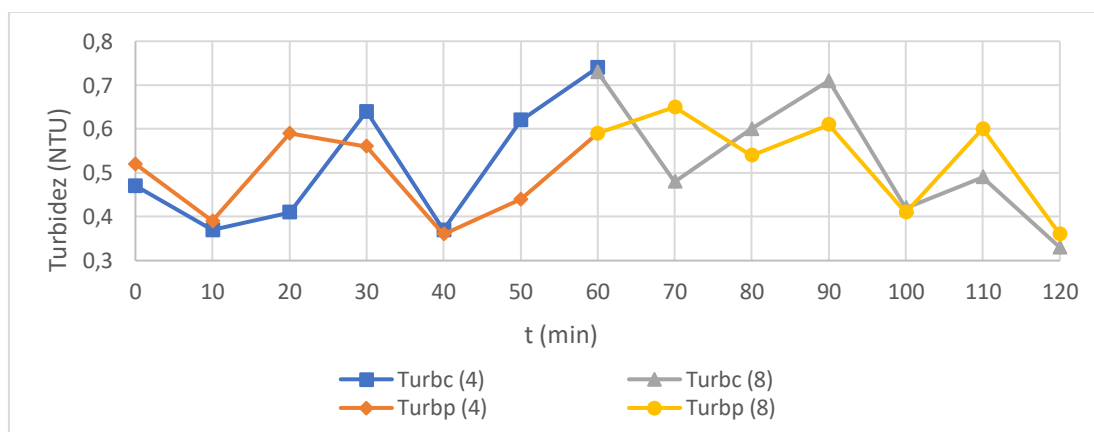
Turbc – Turbidez do concentrado;

Turbp – Turbidez do permeado.

Através dos perfis apresentados na Figura 35, pode-se observar que há um aumento na turbidez, sendo consequência do processo de retro lavagem.

6.2.7.1 Experimento 01, ensaios 1.1 e 1.2

Figura 34. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 1.1 e 1.2.



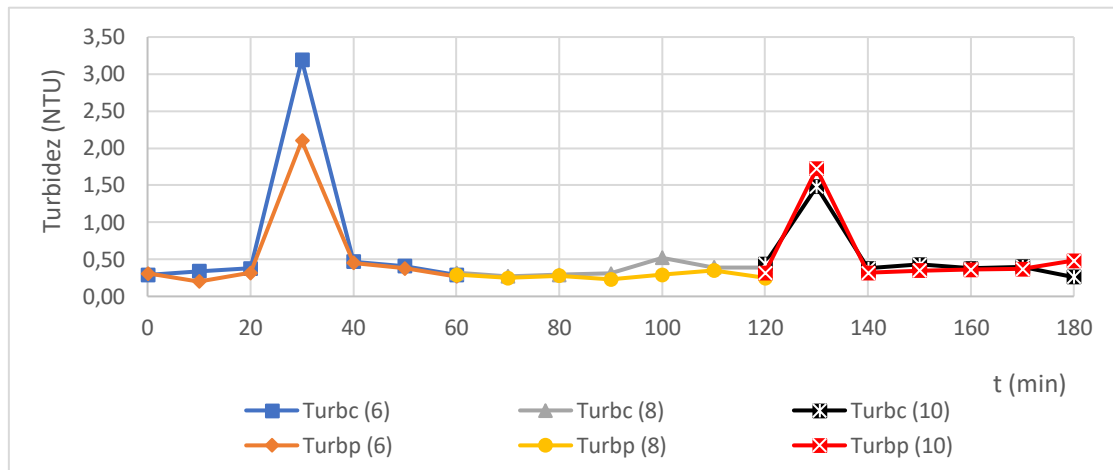
Fonte: Autoria Própria (2020).

O comportamento da turbidez do concentrado e do permeado para os ensaios realizados da Figura 35 mostram que seus valores se encontram abaixo do valor máximo permissível, conforme a portaria 2914/11 da Legislação brasileira, onde o valor máximo é igual a 5,0 (uT). O fato de a força motriz do processo ser a pressão, a turbidez, tanto do concentrado e do permeado tende-se a diminuir pelo mesmo processo mencionado acima da formação de um leito na superfície da membrana (*cake*), funciona como uma “decantação forçada” minimizando assim a turbidez do concentrado e do permeado.

6.2.7.2 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

Através dos perfis apresentados na Figura 36, pode-se observar que há um aumento na turbidez, sendo consequência do processo de retro lavagem.

Figura 35. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.



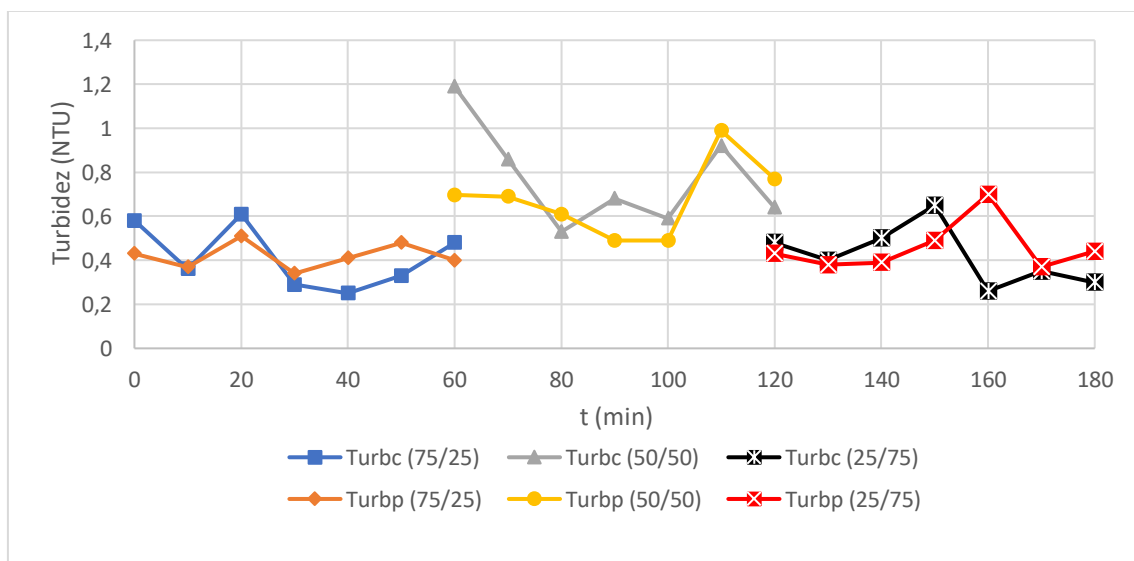
Fonte: Autoria Própria (2020).

O efeito apresentado anteriormente também é observado nos ensaios com água do poço. Pode-se notar ainda o efeito do processo de retro lavagem, onde os valores da turbidez do concentrado e do permeado aumentaram significativamente em relação aos coletados durante o processo.

6.2.7.3 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1

Os valores tanto para concentrado quanto para permeado encontram-se abaixo do valor máximo permitido. O efeito da retro lavagem não foi tão evidente quanto no experimento anterior. A Figura 37 apresenta os resultados obtidos.

Figura 36. Var. da turbidez do conc. e perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.8 Custo de Produção

A Tabela 12 apresenta os custos de produção para diferentes pressões com concentrações de sais dissolvidos.

Os valores obtidos dos custos em função dos percentuais dos sistemas (água tratada e água do poço) e da pressão de operação mostram que o custo diminuiu em função da pressão de operação, devido ao aumento da vazão do permeado, isso ocorreu para todos os experimentos realizados. Observa-se que para os experimentos 03, 04 e 05 o percentual da água tratada diminuiu enquanto o da água do poço aumenta, consequentemente a concentração de sais aumentaram e sob uma pressão de operação 8,0 kgf/cm² (constante) o menor custo se deu para o experimento 03.

Tabela 12. Custos de produção para diferentes pressões de operação *versus* concentrações.

Exp.	Ensaio	Sistema (%)	Pressão (kgf/cm ²)	Custo (R\$/m ³)
01	1.1	100 (A.T.)	4,0	3,77
	1.2		8,0	1,56
02	2.1	100 (A.P.)	6,0	4,28 (*)
	2.2		8,0	2,49 (*)
	2.3		10,0	1,81 (*)
03	3.1	75 (A.T.) + 25 (A.P.)		1,56 (*)
04	4.1	50 (A.T.) + 50 (A.P.)	8,0	1,76 (*)
05	5.1	25 (A.T.) + 75 (A.P.)		2,32 (*)

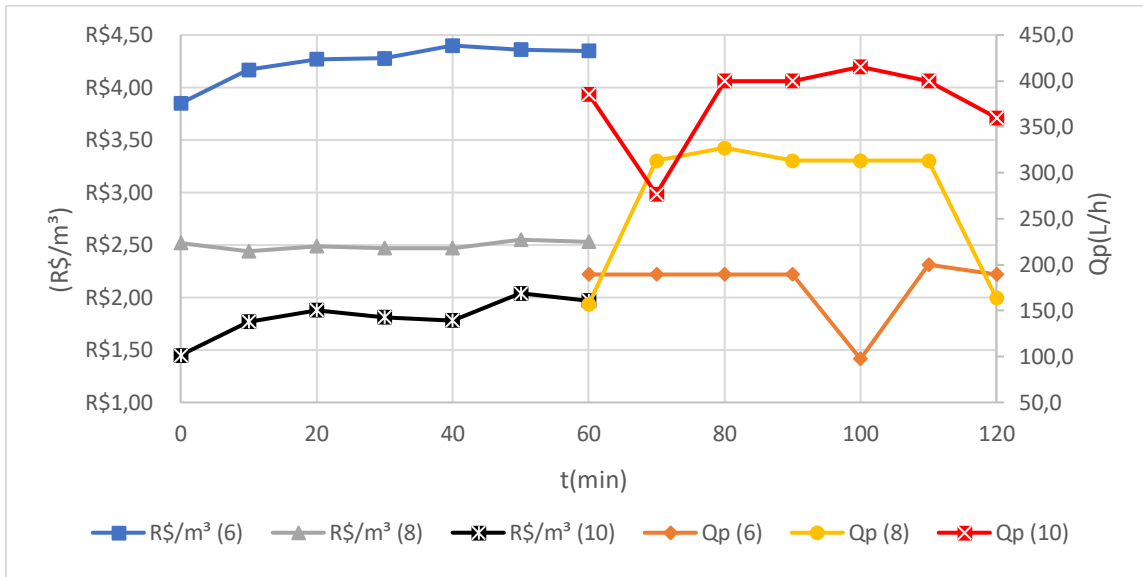
* Valor médio. A.T – Água Tratada. A.P. – Água do Poço.

As Figura 38 e 39 apresentam os perfis dos custos de produção *versus* a produção do permeado em função do tempo. O experimento 01 não possui gráfico, pois, a ideia de registrar o consumo ponto a ponto só foi concebido após o término desse experimento.

6.2.8.1 Experimento 02, ensaios 2.1, 2.2 e 2.3

Na Figura 38 observa-se o efeito da pressão no custo e na produção, à medida que a pressão sobe, a produção de permeado aumenta, diminuindo assim o custo.

Figura 37. Var. do custo de produção vs vazão do perm. nos ensaios 2.1, 2.2 e 2.3.

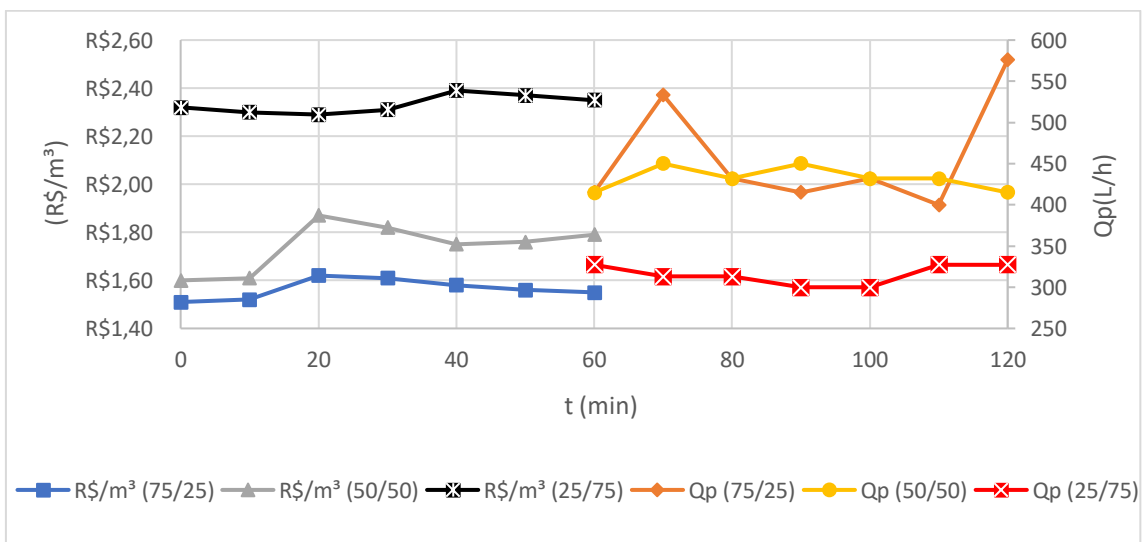


Fonte: Autoria Própria (2020).

6.2.8.2 Experimentos 03, 04 e 05, ensaios 3.1, 4.1 e 5.1

A Figura 39 apresenta o efeito da concentração no custo. Ao se manter a pressão de operação em 8,0 kgf/cm² (constante) e variando a concentração de sais dissolvidos da água problema, notou-se que ocorreu uma diminuição na produção do permeado, elevando-se assim o custo de produção.

Figura 38. Var. do custo de produção vs vazão do perm. nos ensaios 3.1, 4.1 e 5.1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

7. CONCLUSÃO

- Assim como mostrou o percentual de remoção do íon Cl^- de -2,24%, 93,76%, 94,79%, 96,25% e 96,65% para as pressões 4,0 kgf/cm², 8,0_{A.T.} kgf/cm², 6,0 kgf/cm², 8,0_{A.P.} kgf/cm² e 10,0 kgf/cm² respectivamente. Com base na extração de sais, optou-se por trabalhar com 8,0 kgf/cm², poder-se-ia trabalhar com 10,0 kgf/cm², porém o sistema trabalha próximo ao limite;
- De acordo com os resultados obtidos para os sistemas estudados, observou-se que em alguns casos a presença de coliformes totais na água de alimentação, no permeado e no concentrado. Esse fato justifica-se quando os elementos de membranas apresentam a presença de matéria orgânica (*fouling*) acumulada na superfície das membranas. Considerando que a água do poço se encontra próximo de uma lagoa situada no âmbito da universidade próximo ao poço, o LABDES possui um histórico da qualidade da água do poço com a presença de *E. coli* e coliformes fecais, nesse sentido existe uma probabilidade das amostras coletadas antes e/ou durante os experimentos apresentarem a presença dessas bactérias, principalmente quando a necessidade de uma limpeza química das membranas. A ausência das bactérias (no permeado e no concentrado), se deu logo após a limpeza química das membranas;
- Os valores obtidos dos custos em função dos percentuais dos sistemas e da pressão de operação mostram que o custo diminui em função da pressão de operação, devido ao aumento da vazão do permeado. Observa-se que para os experimentos 03, 04 e 05 o percentual da água tratada diminuiu enquanto o da água do poço aumenta, conseqüentemente a concentração de sais aumentaram e sob uma pressão de operação 8,0 kgf/cm² (constante) o menor custo se deu para o experimento 03.

8. 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 set. 2020.

BAKER, R. W. **Membrane technologies and applications**. 2. ed. California: John Wiley & Sons, Inc, 2011.

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

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução n 357, 18 de março de 2005. **Diário Oficial**, n. 053, p. 58–63, 2005.

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

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

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

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

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 set. 2020.

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

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

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

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

9. ANEXOS

9.1 ANEXO A - PRESSÕES NO FILTRO.

Figura 39. Variações da pressão no filtro no ensaio 1.1.

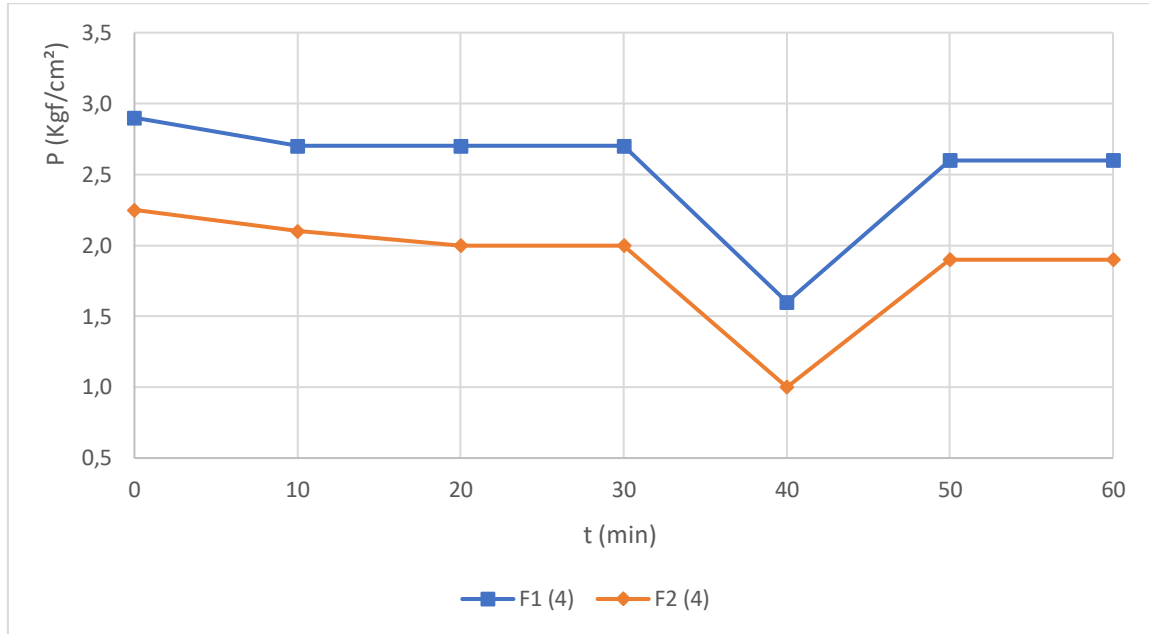


Figura 40. Variações da pressão no filtro no ensaio 1.2.

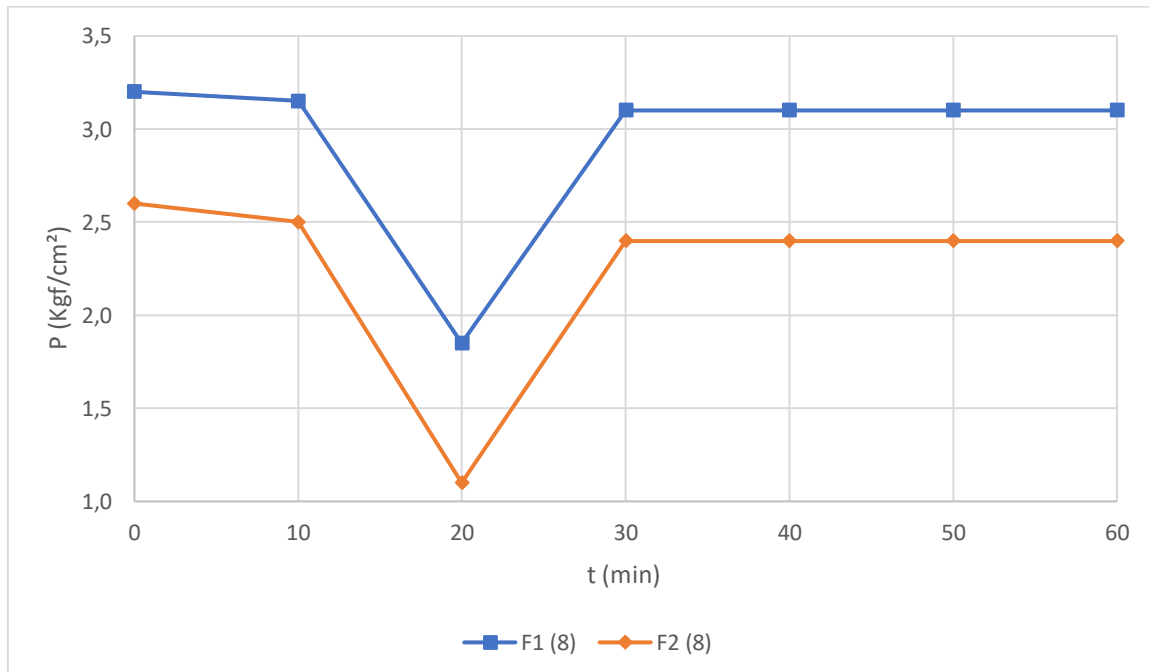


Figura 41. Variações da pressão no filtro no ensaio 2.1.

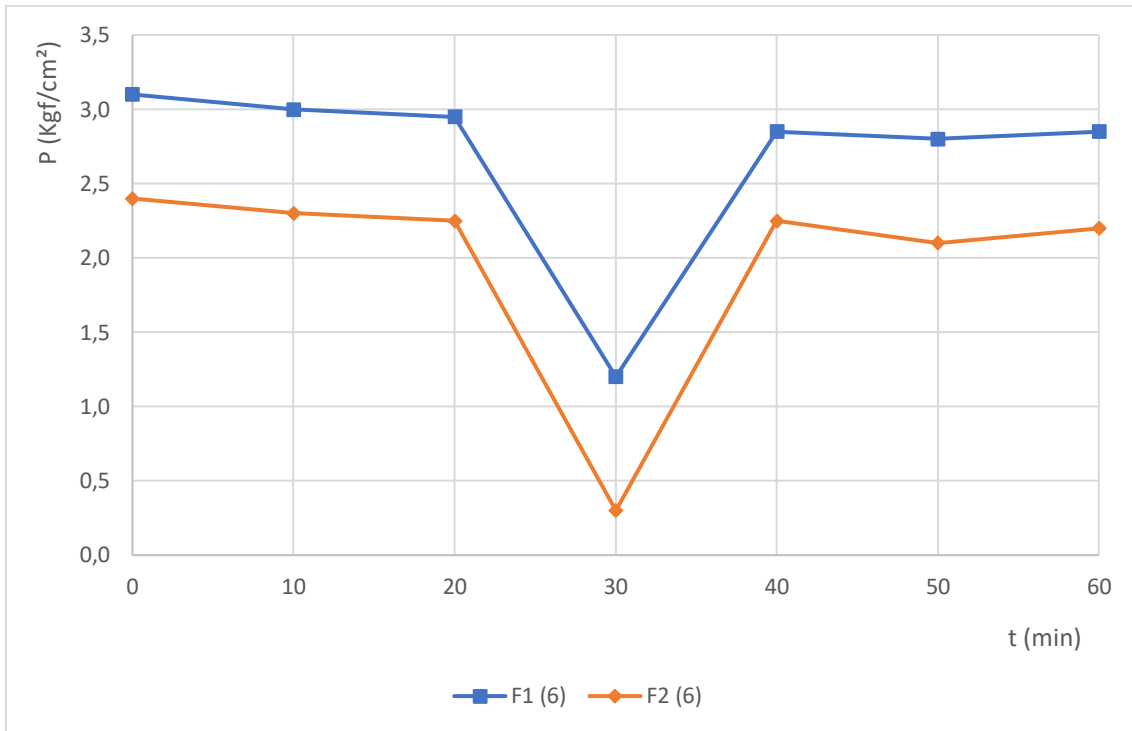


Figura 42. Variações da pressão no filtro no ensaio 2.2.

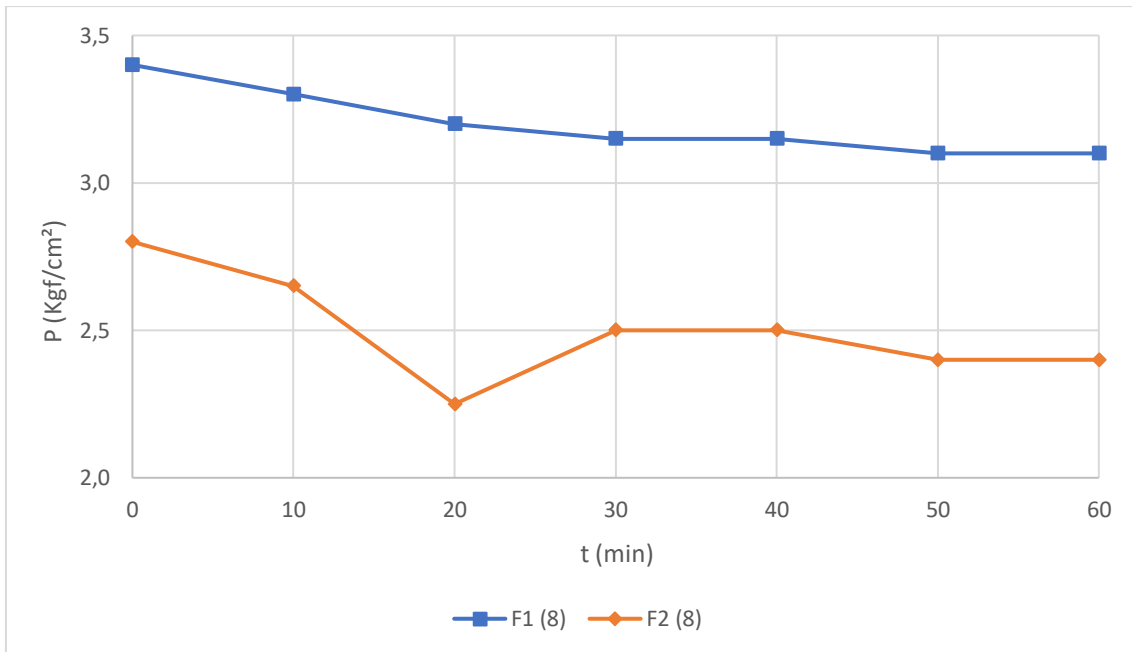


Figura 43. Variações da pressão no filtro no ensaio 2.3.

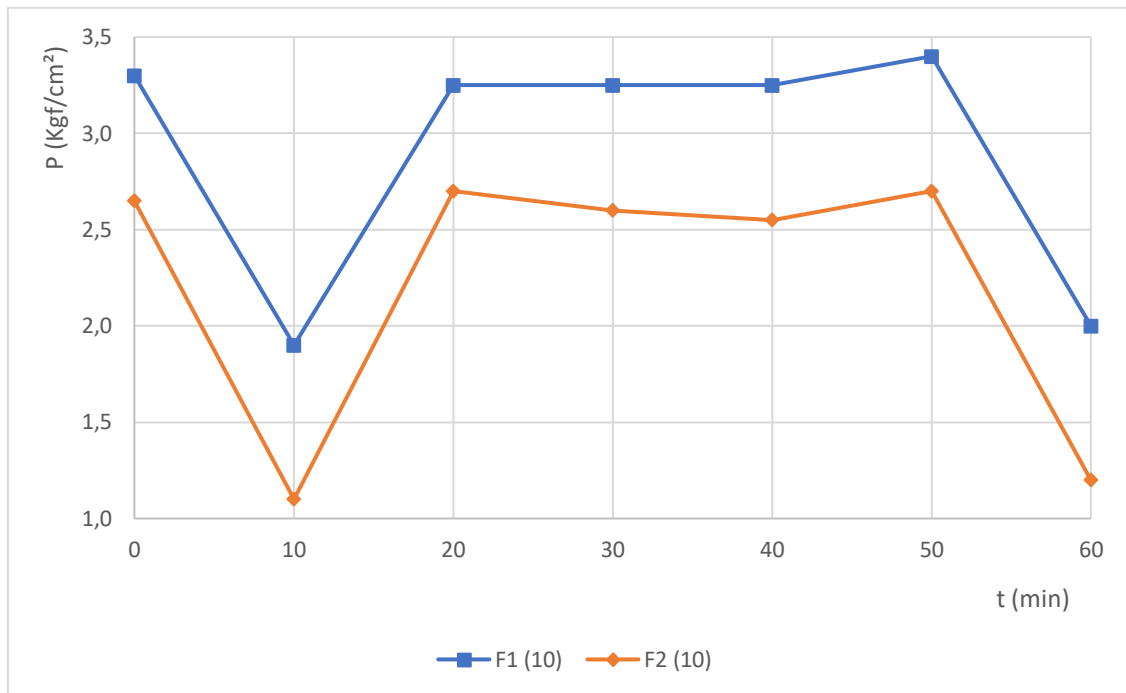


Figura 44. Variações da pressão no filtro no ensaio 3.1.

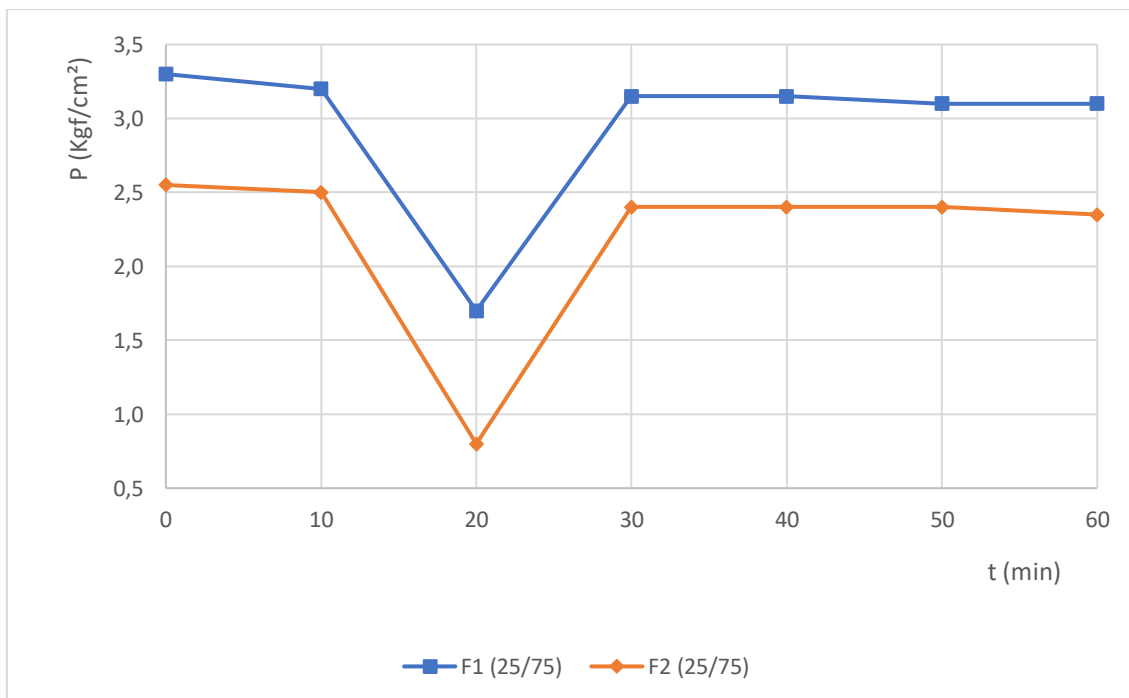


Figura 45. Variações da pressão no filtro no ensaio 4.1.

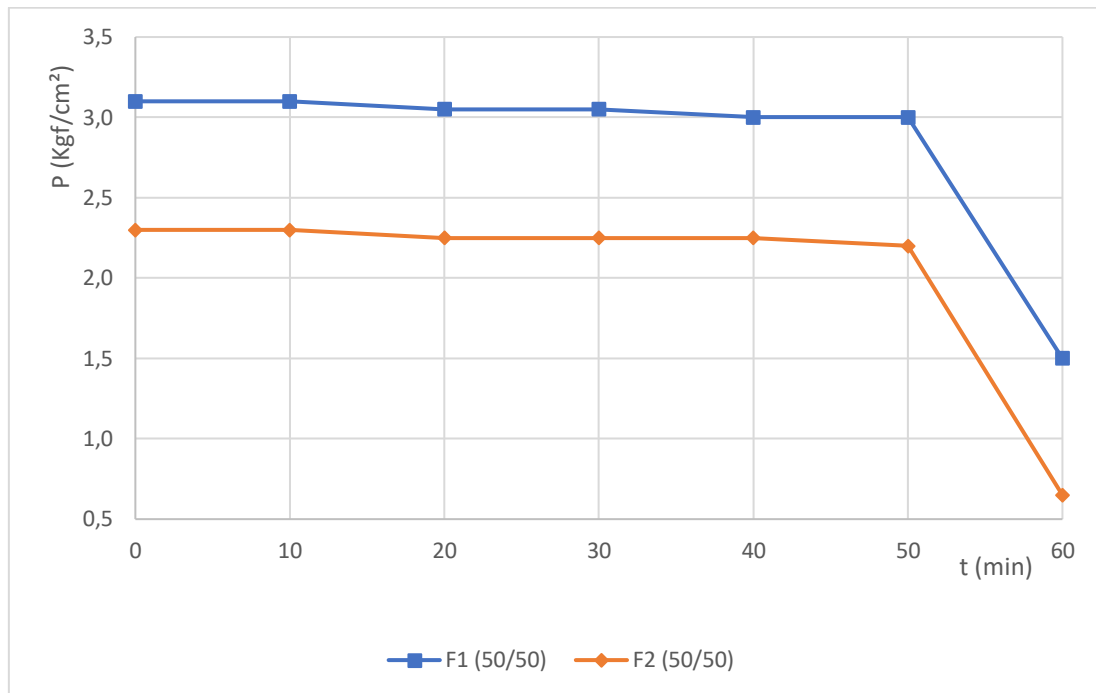
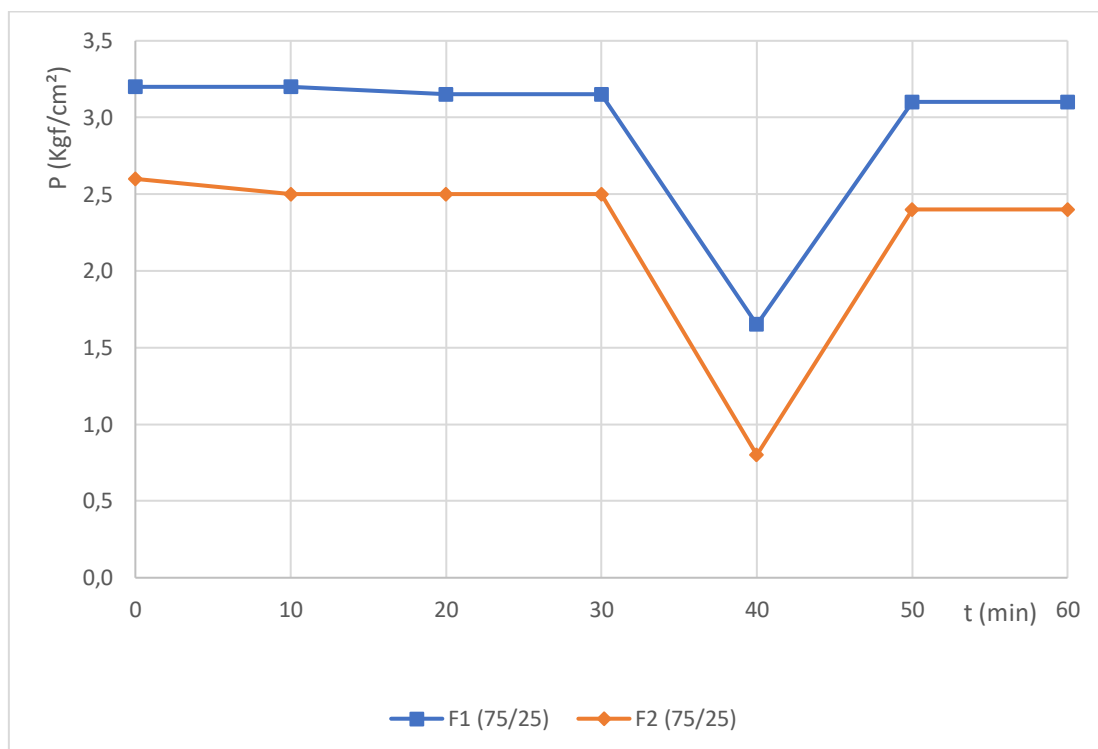


Figura 46. Variações da pressão no filtro no ensaio 5.1.



9.2 ANEXO B - PRESSÕES NOS ELEMENTOS DE MEMBRANAS.

Figura 47. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 1.1.

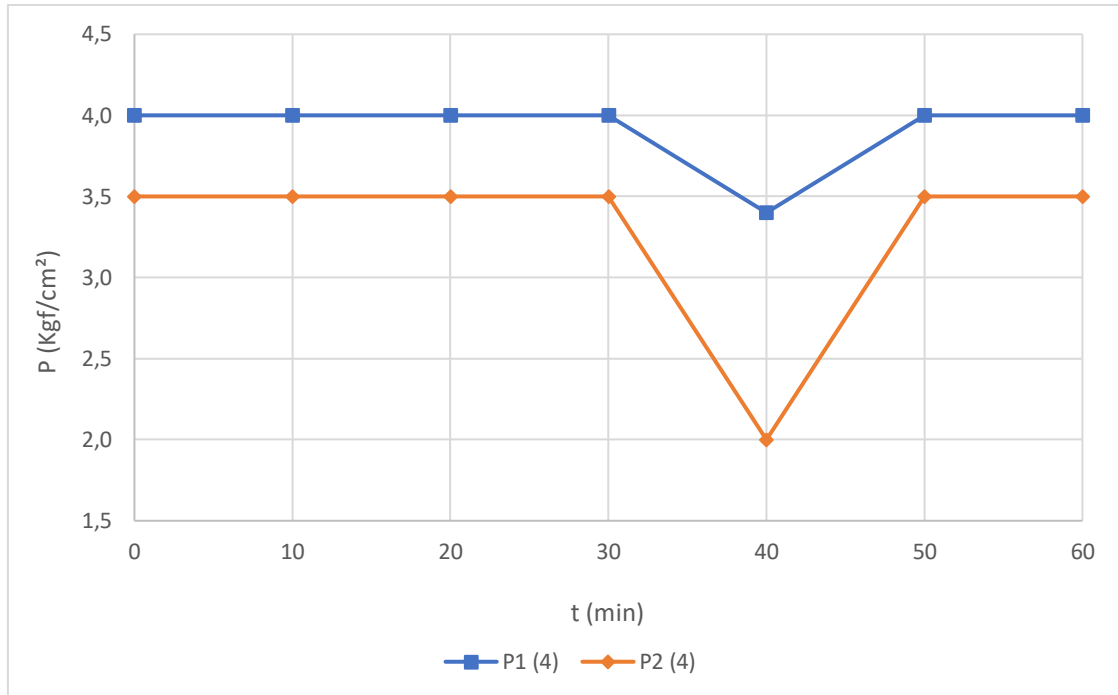


Figura 48. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 1.2.

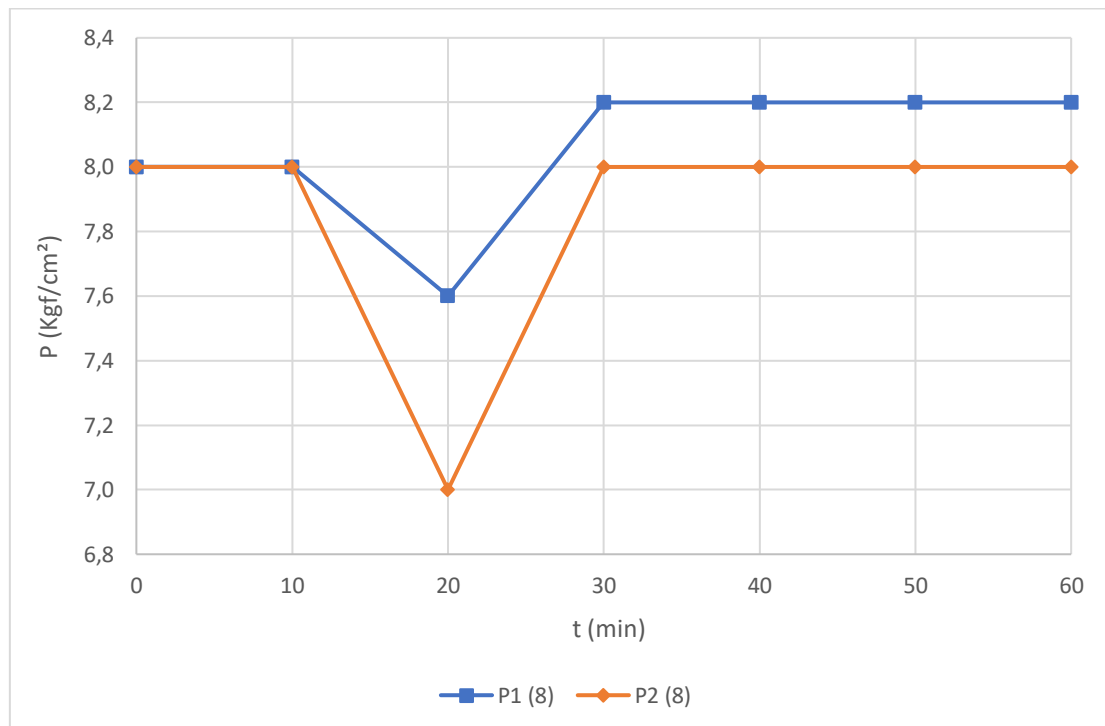


Figura 49. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 2.1.

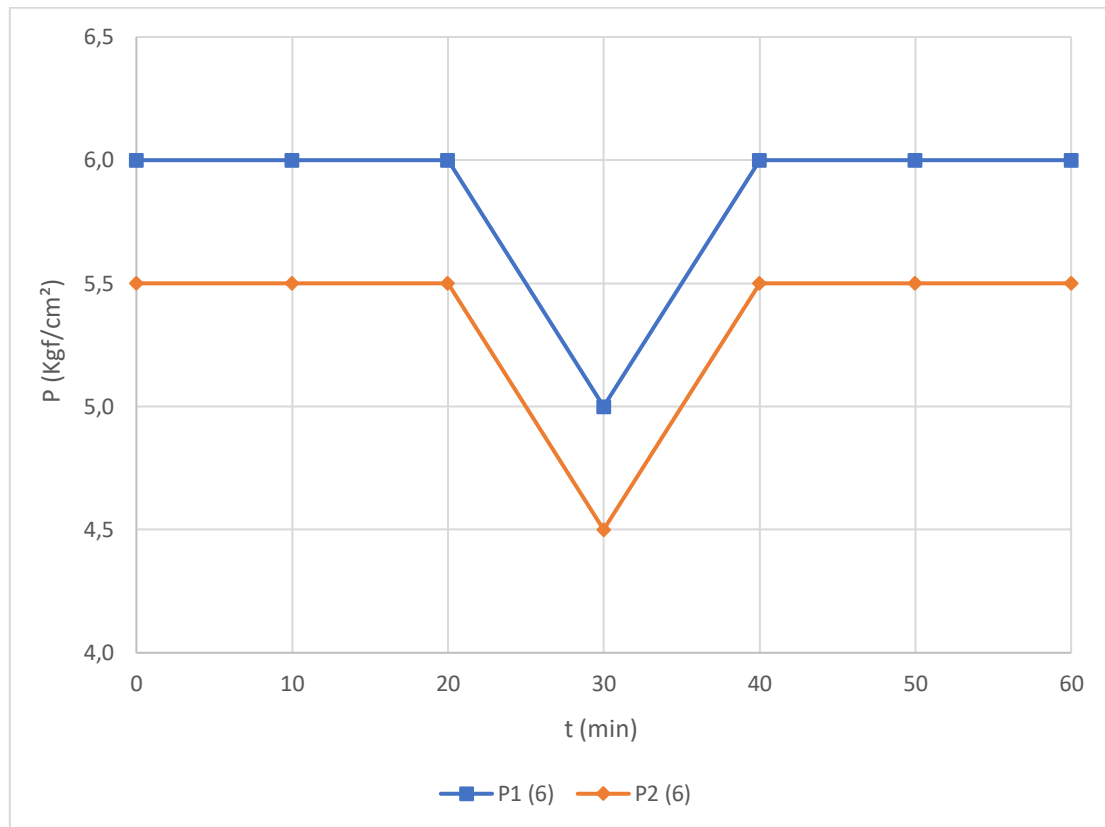


Figura 50. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 2.2.

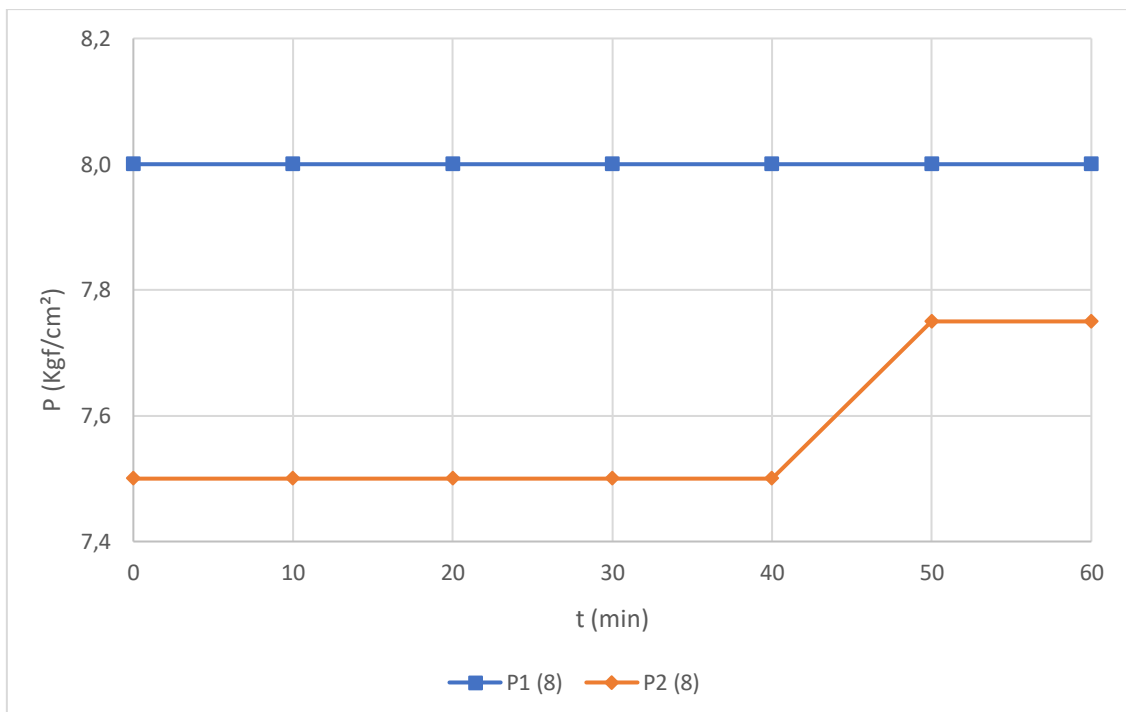


Figura 51. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 2.3.

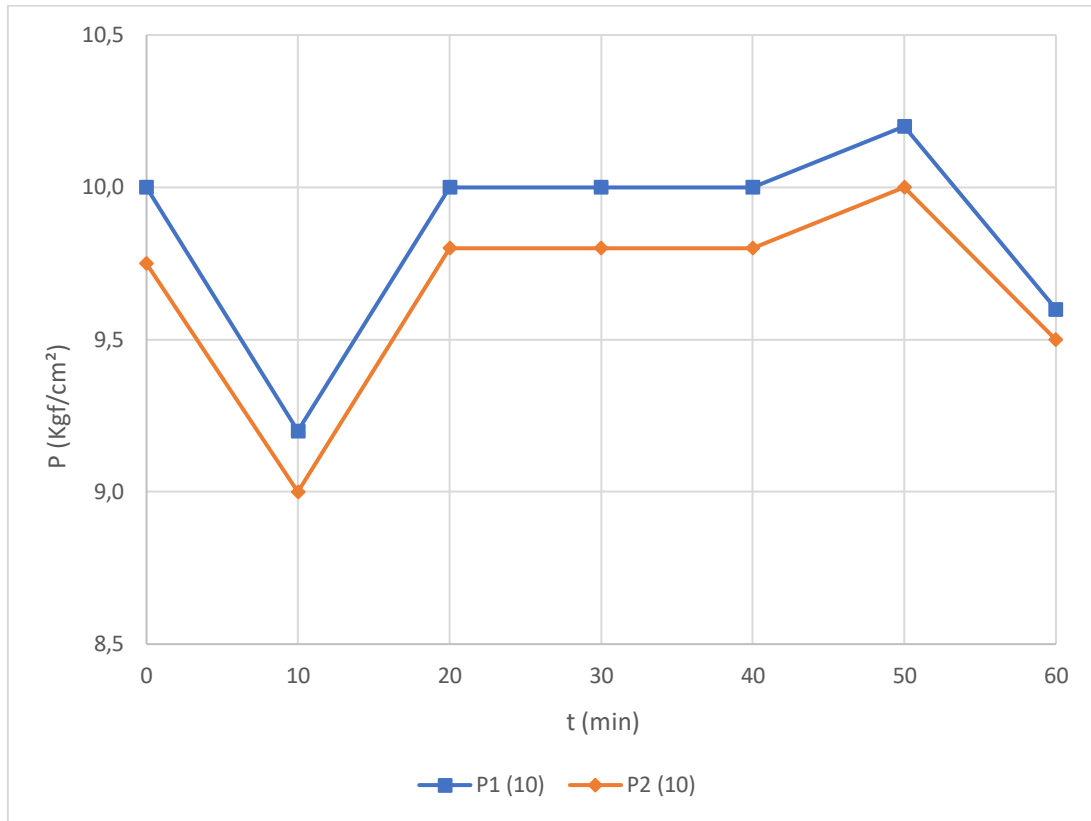


Figura 52. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 3.1.

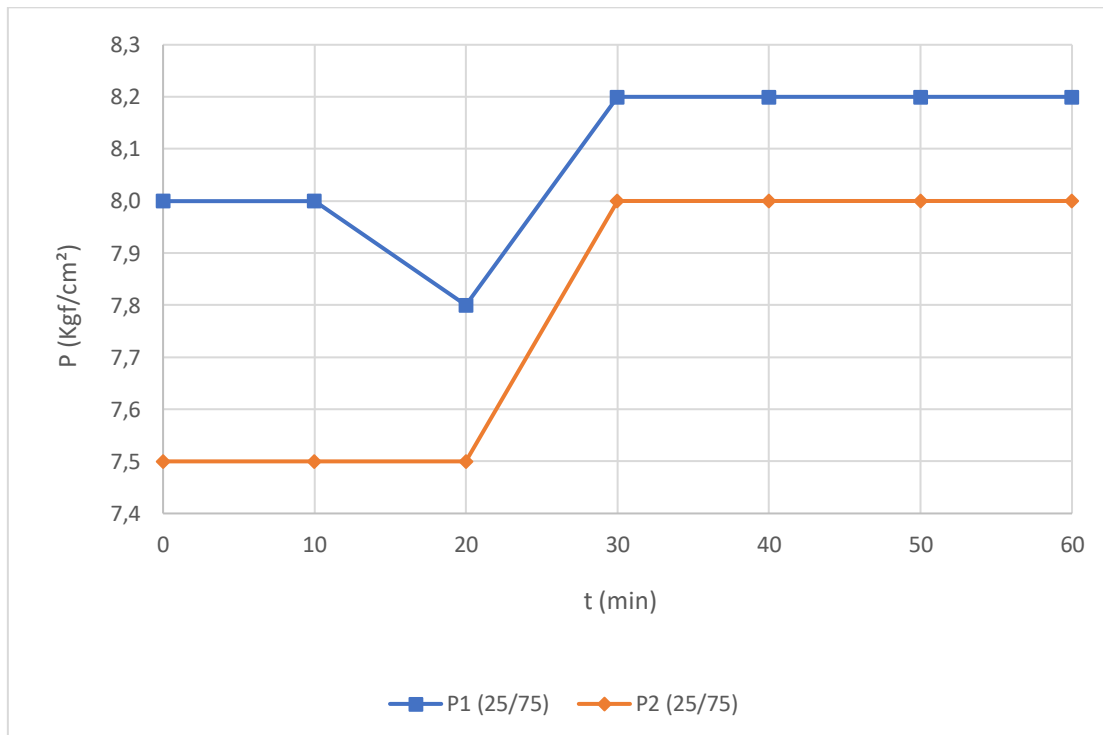


Figura 53. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 4.1.

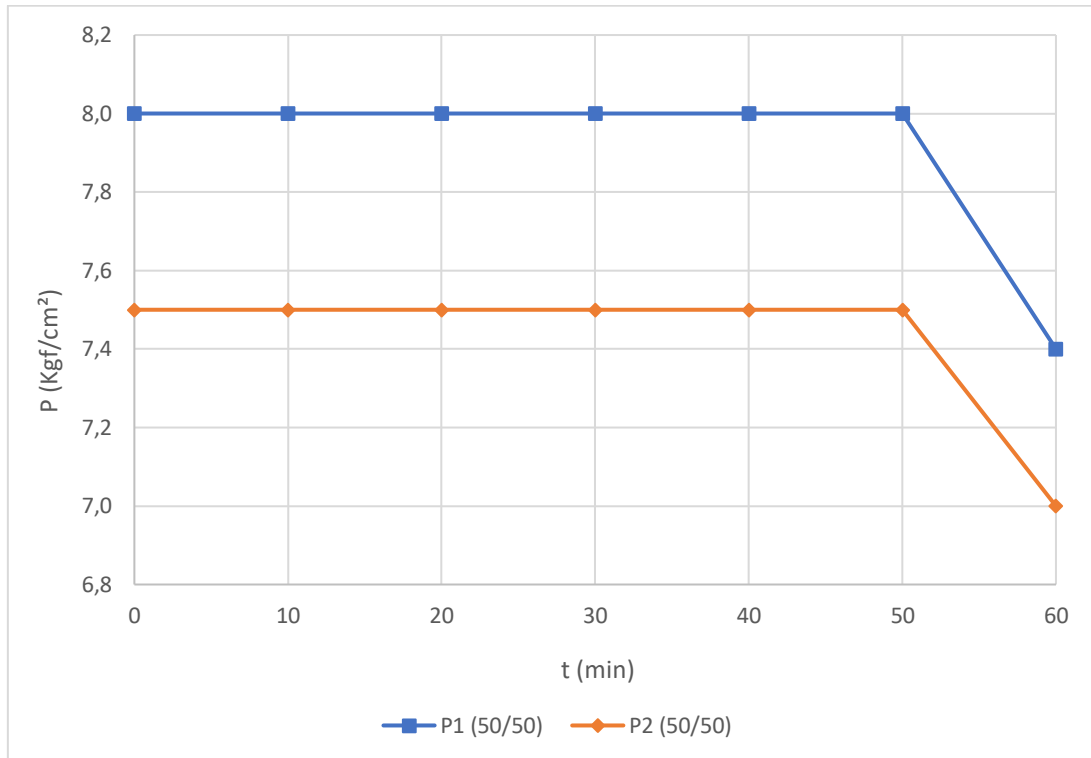
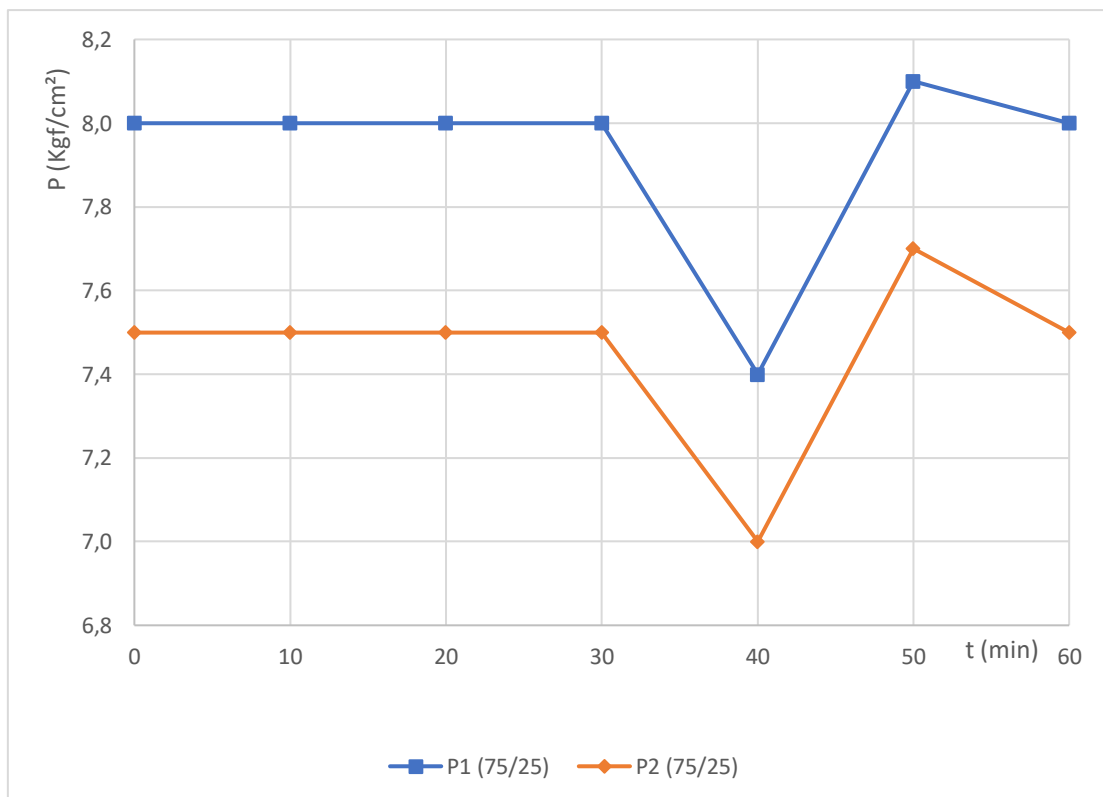


Figura 54. Variações das pressões nos elementos de membranas no ensaio 5.1.



9.3 ANEXO C - VAZÕES.

Figura 55. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 1.1.

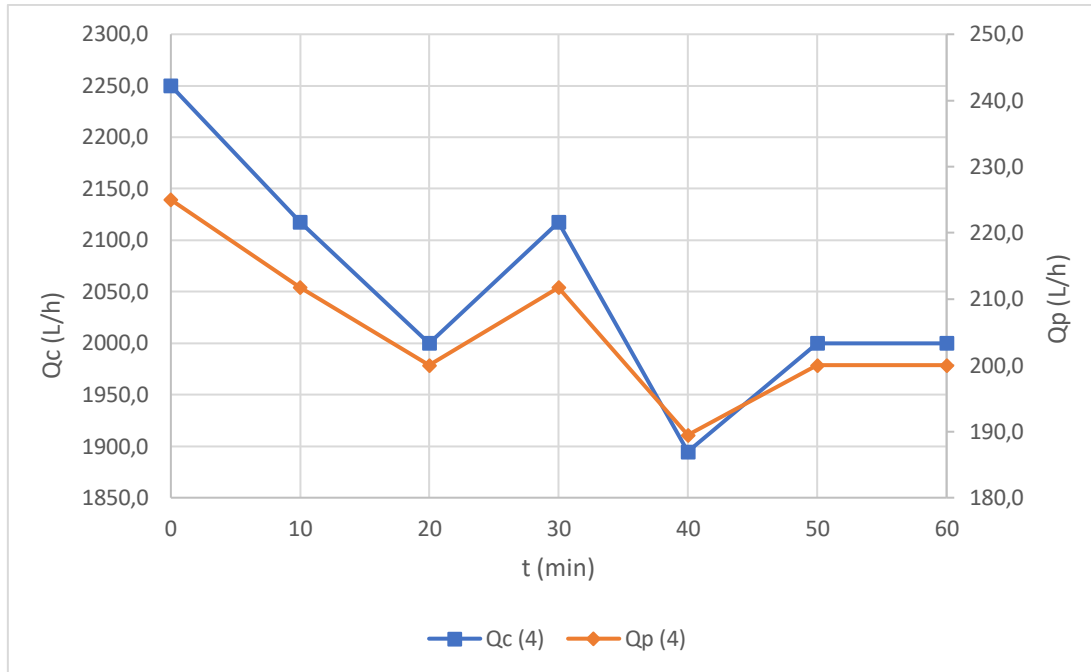


Figura 56. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 1.2.

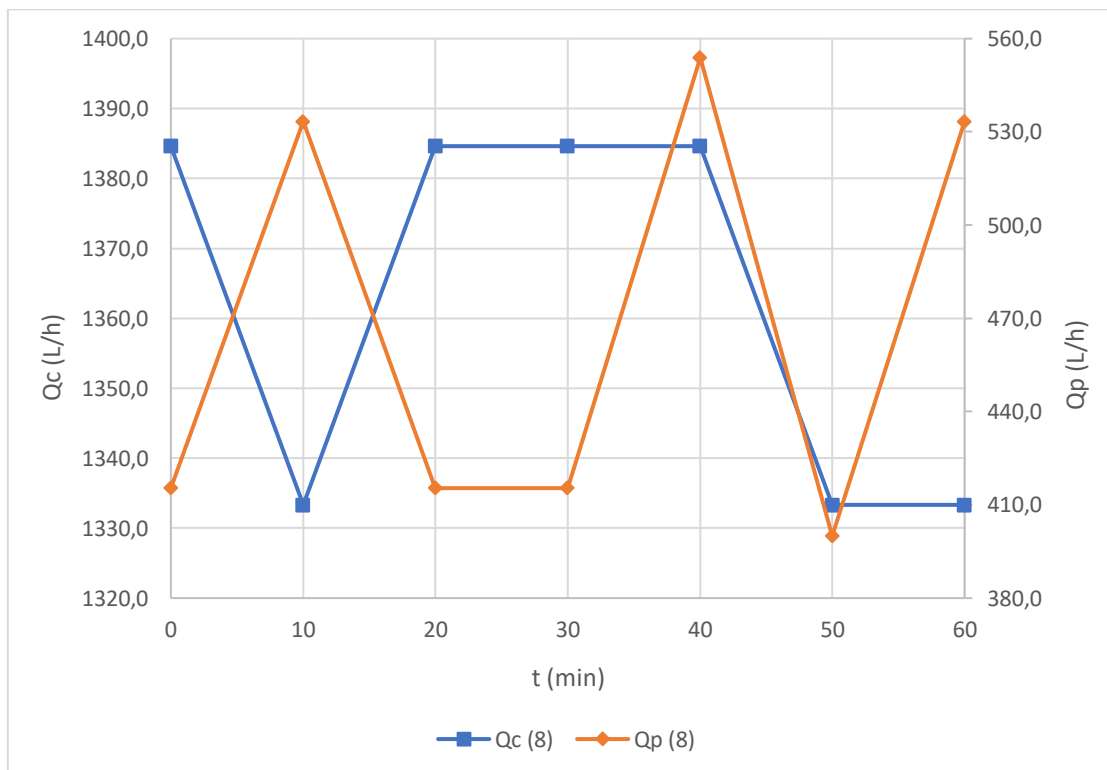


Figura 57. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 2.1.

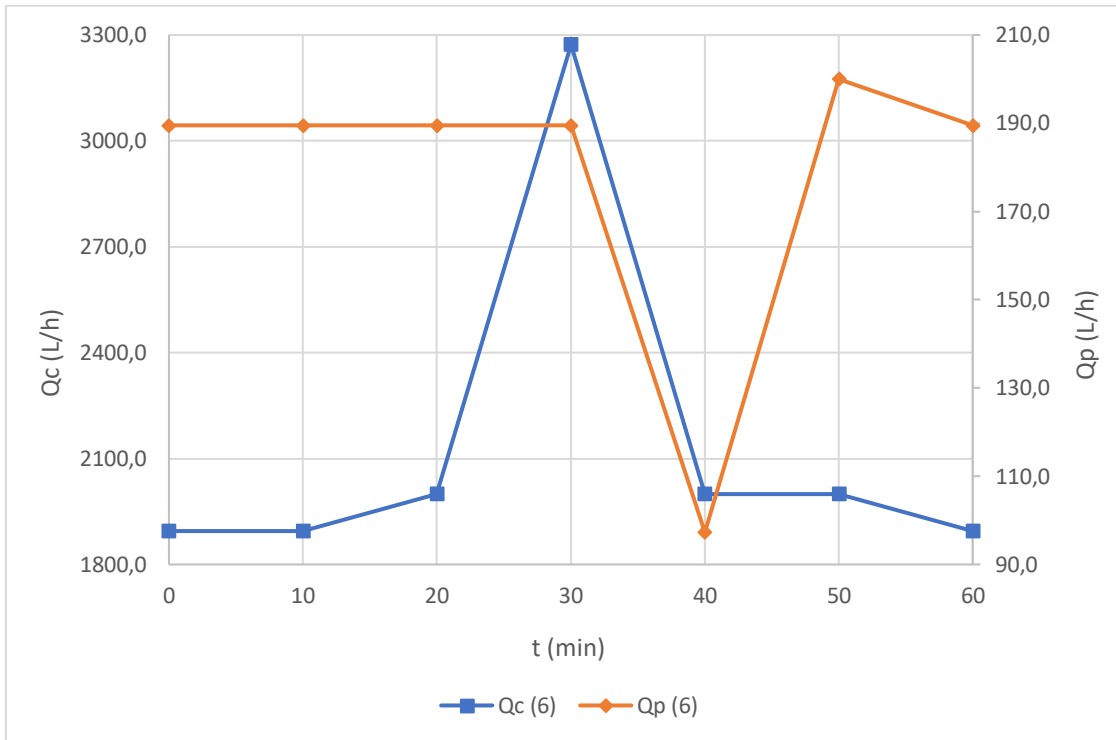


Figura 58. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 2.2.

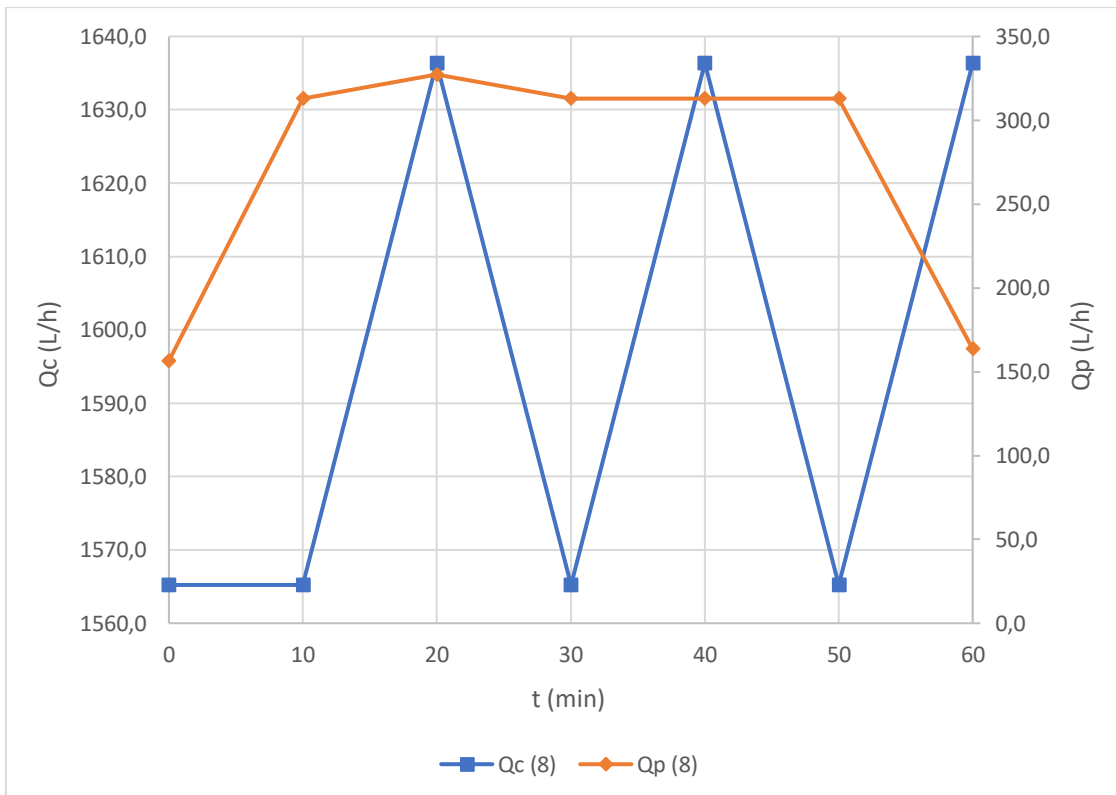


Figura 59. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 2.3.

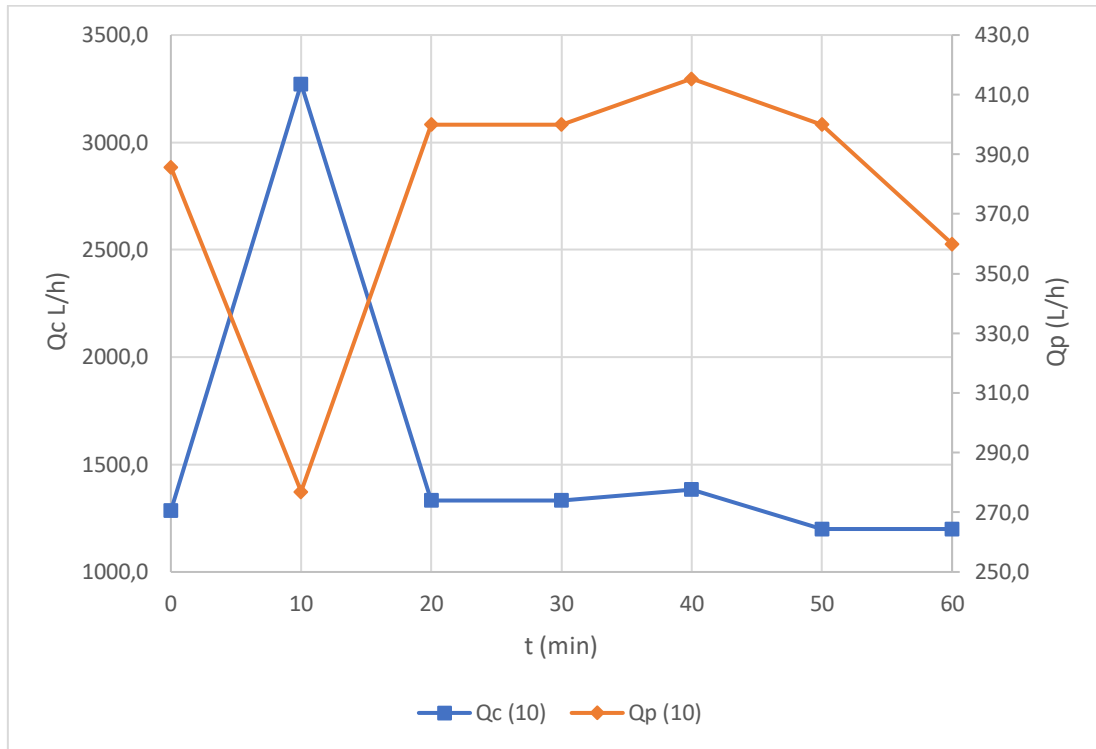


Figura 60. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 3.1.

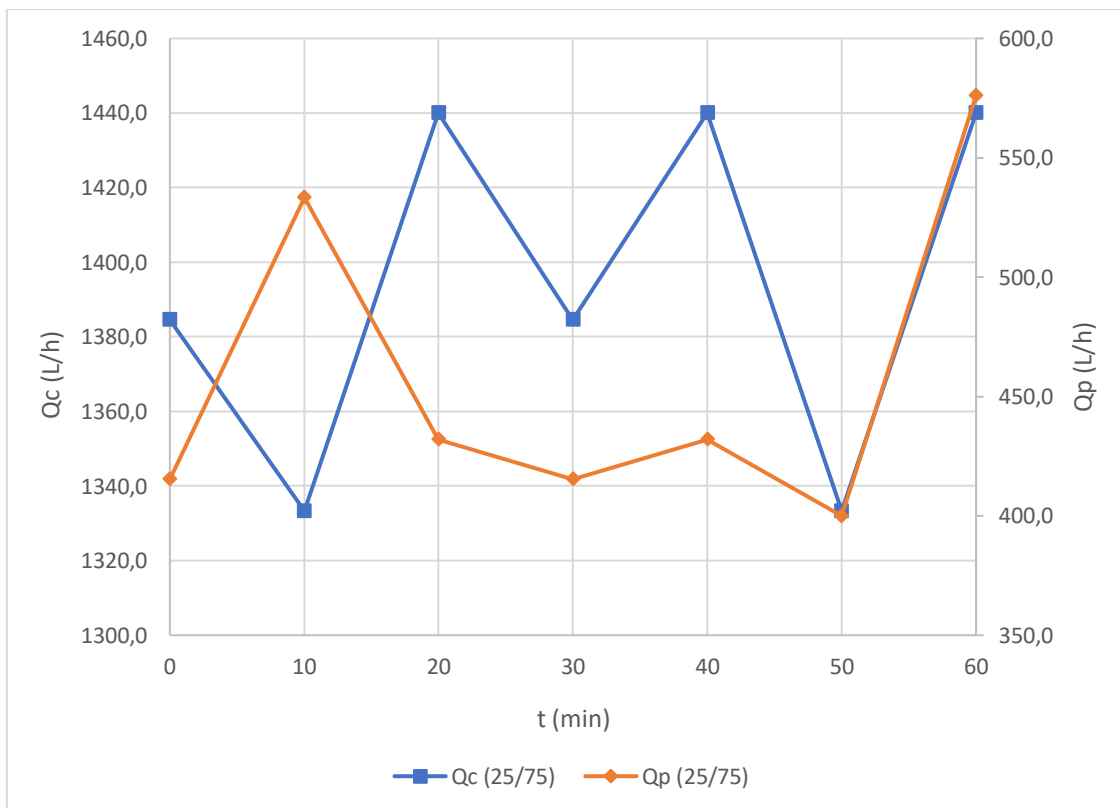


Figura 61. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 4.1.

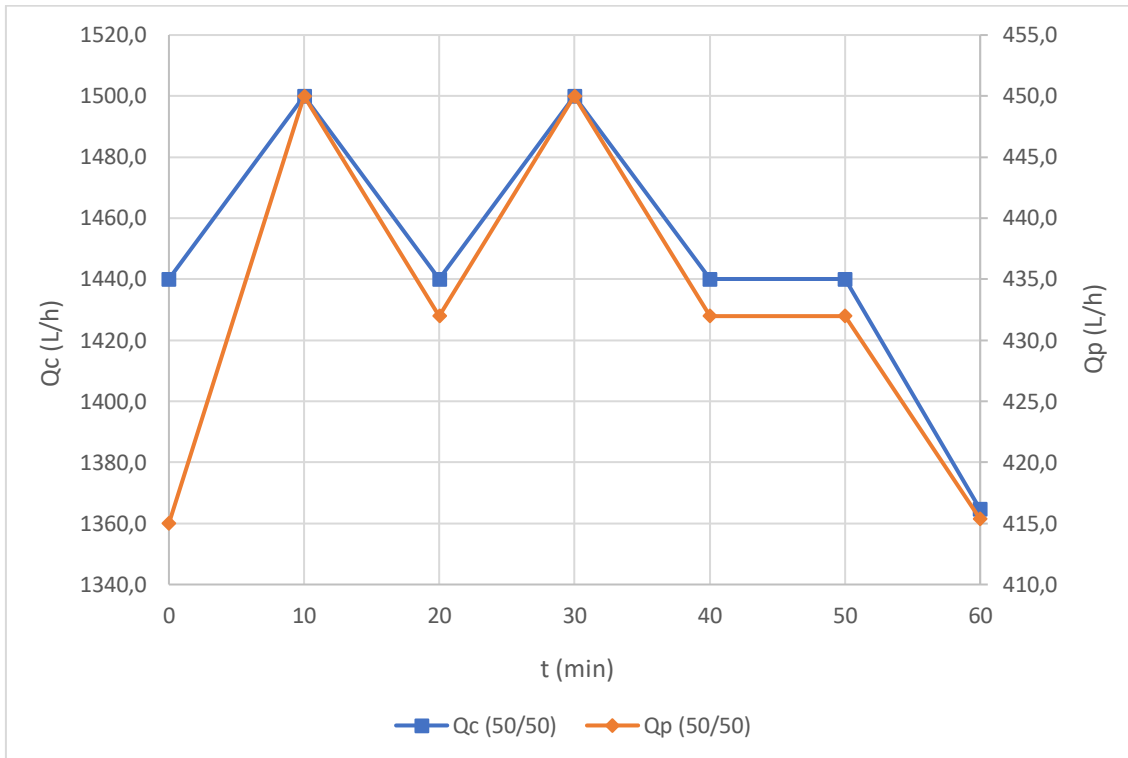
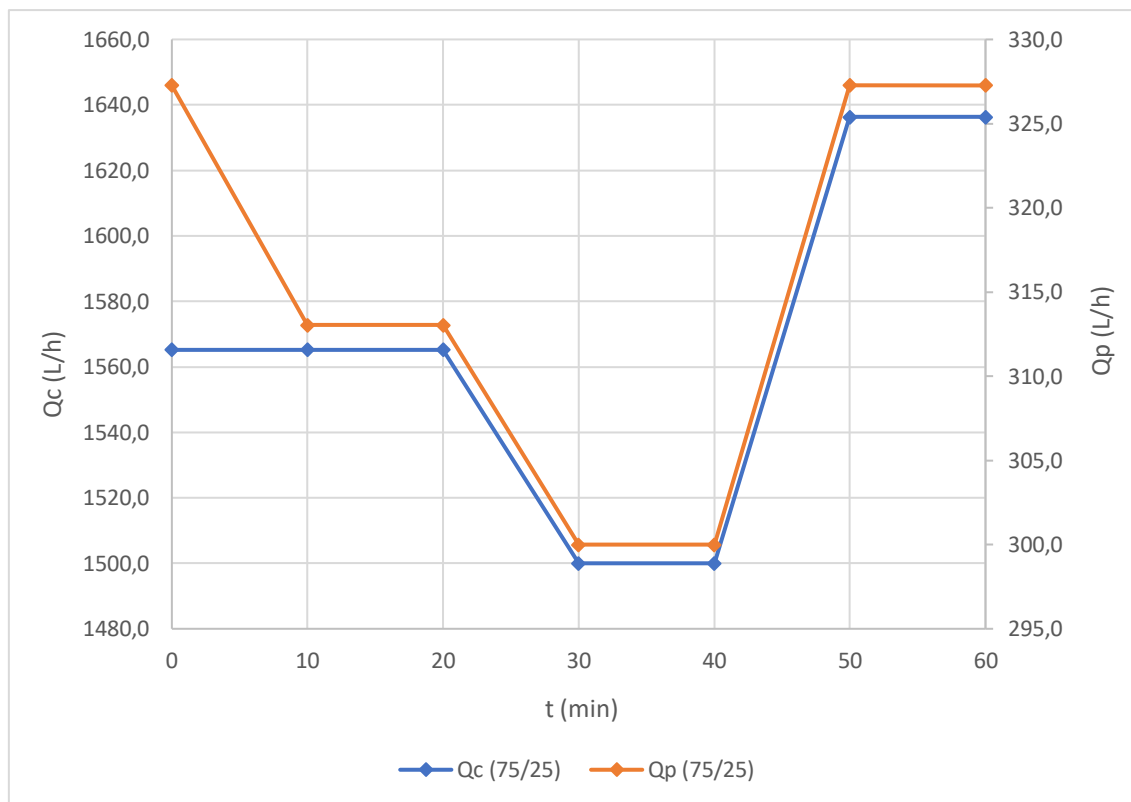


Figura 62. Variações das vazões do concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.4 ANEXO D - CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS.

Figura 63. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 1.1.

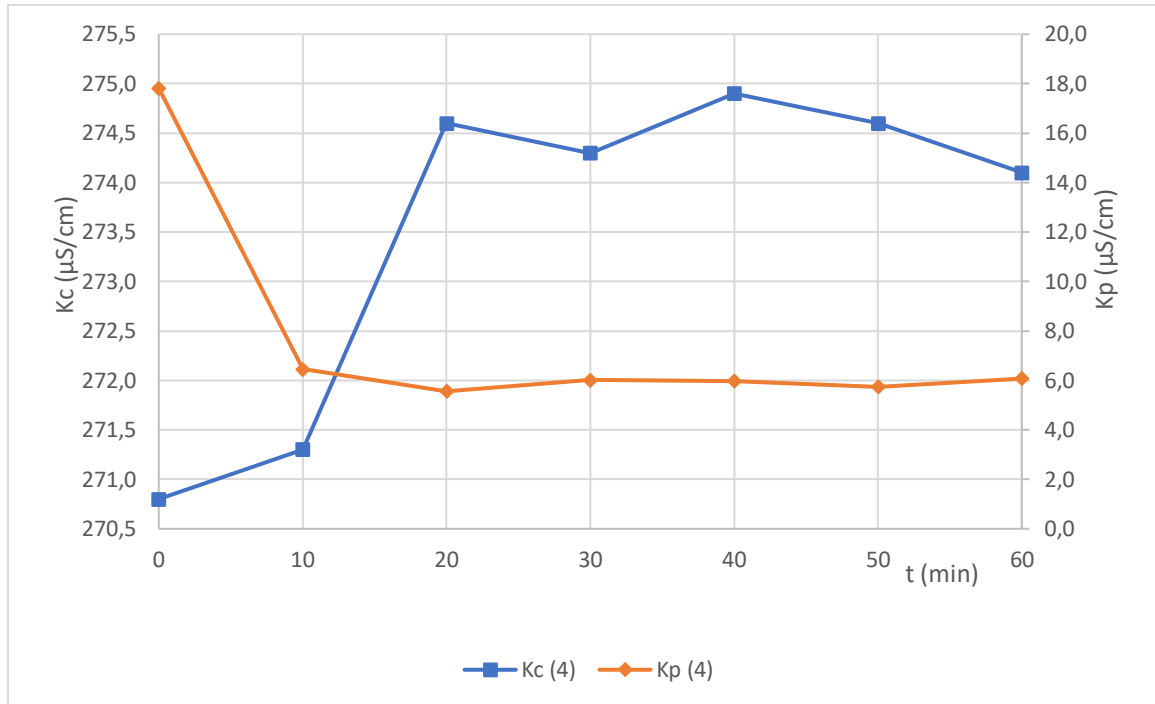


Figura 64. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 1.2.

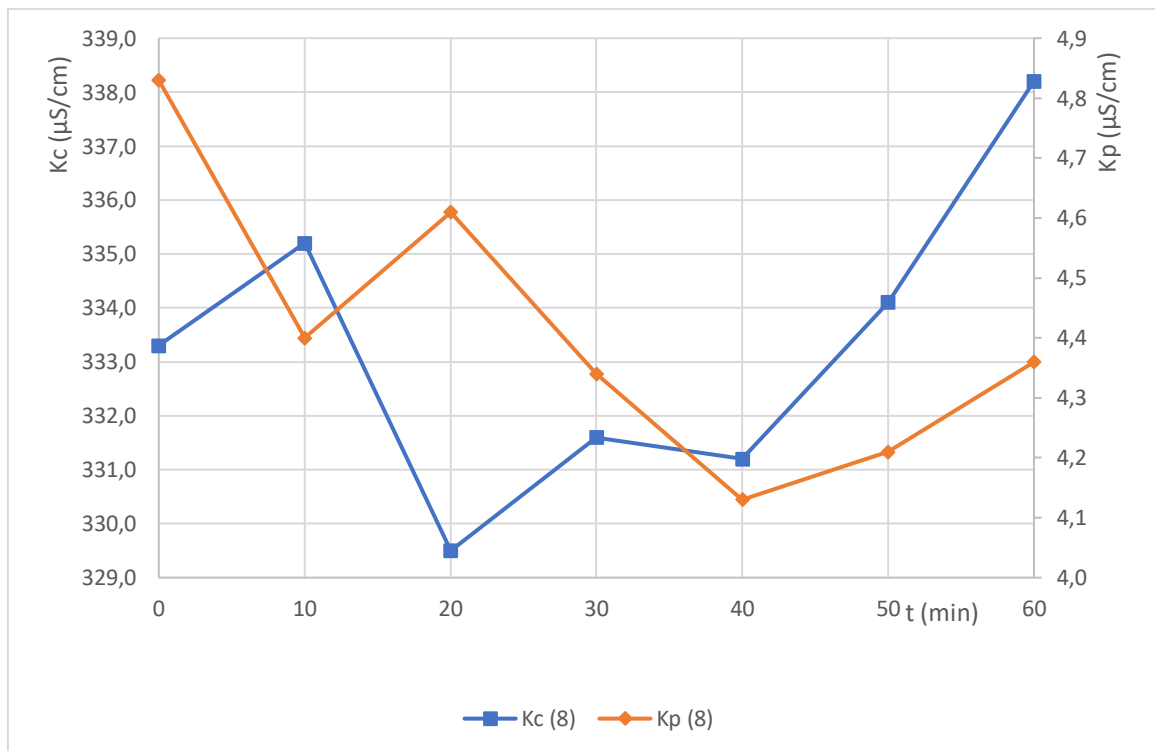


Figura 64. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 2.1.

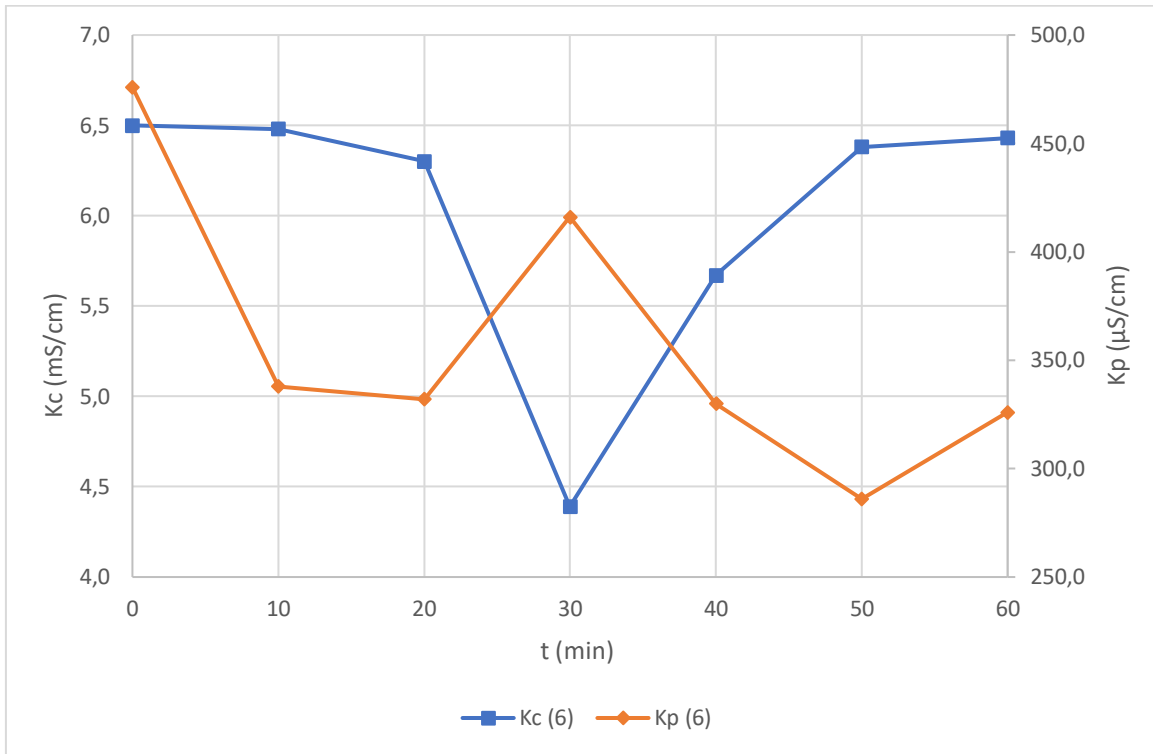


Figura 65. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 2.2.

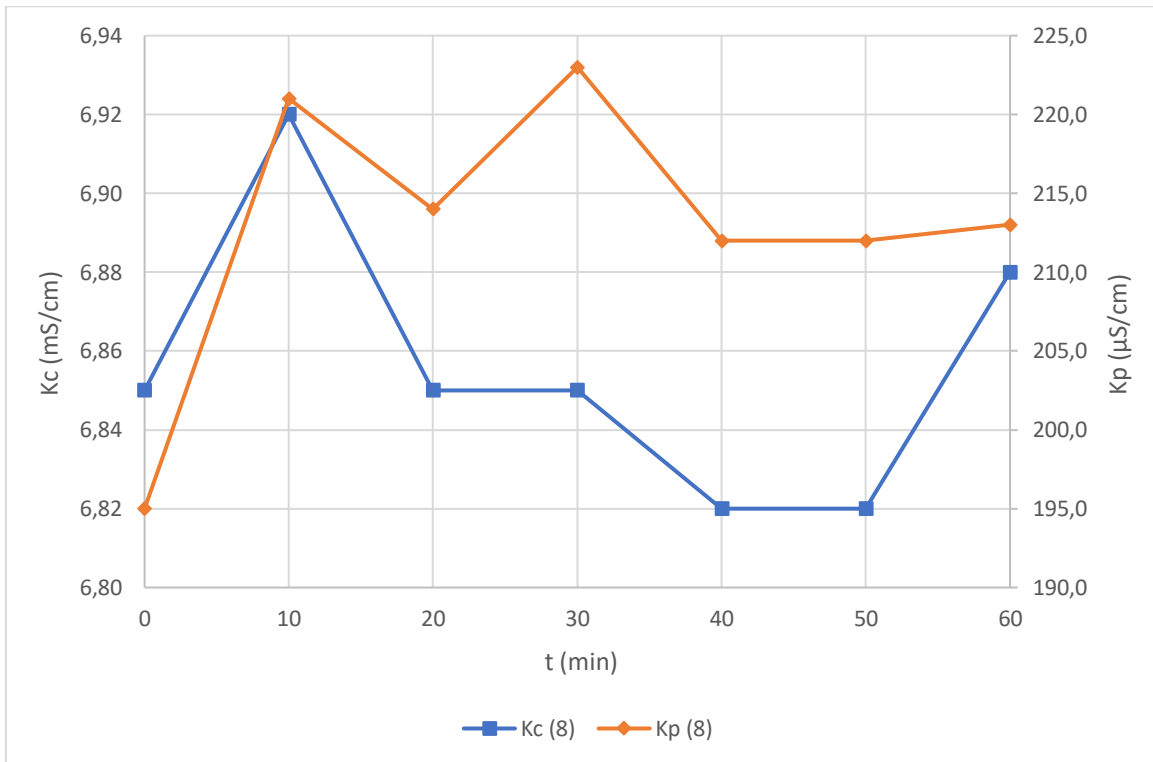


Figura 66. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 2.3.

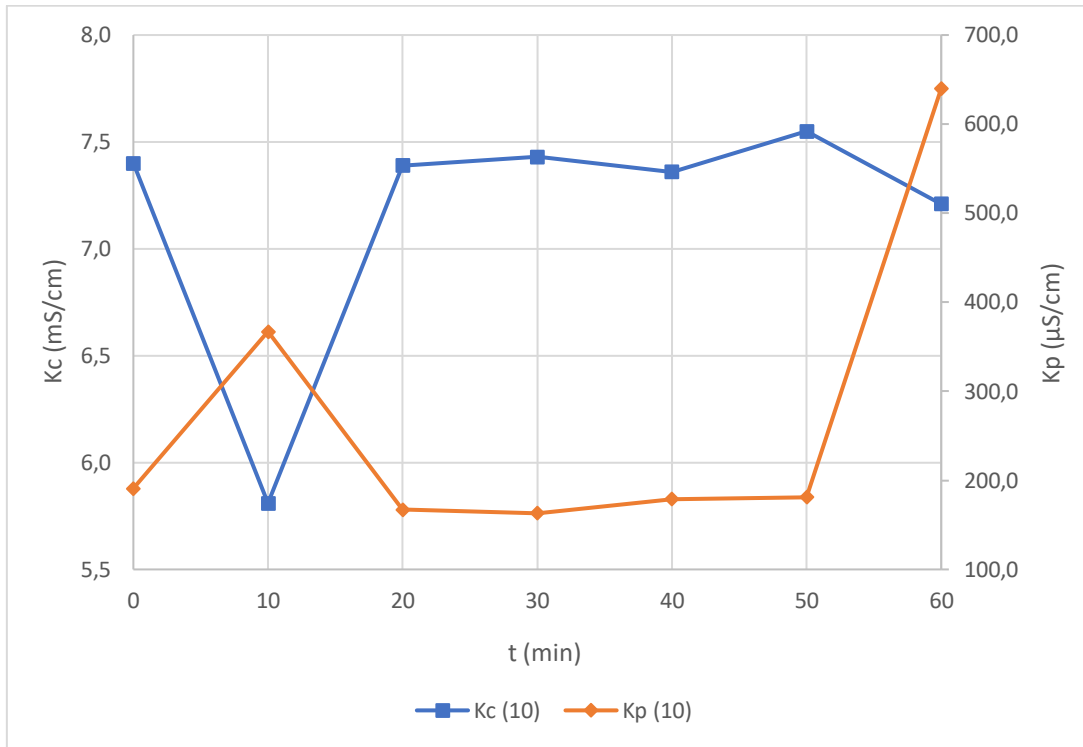


Figura 67. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 3.1.

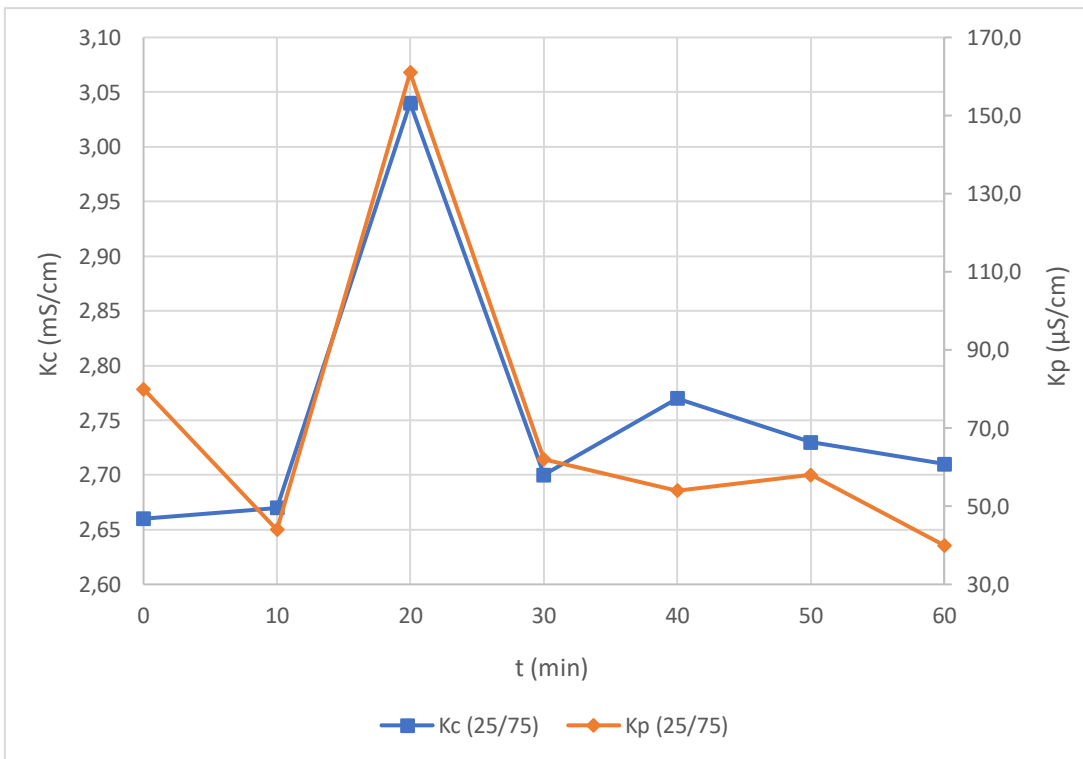


Figura 68. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 4.1.

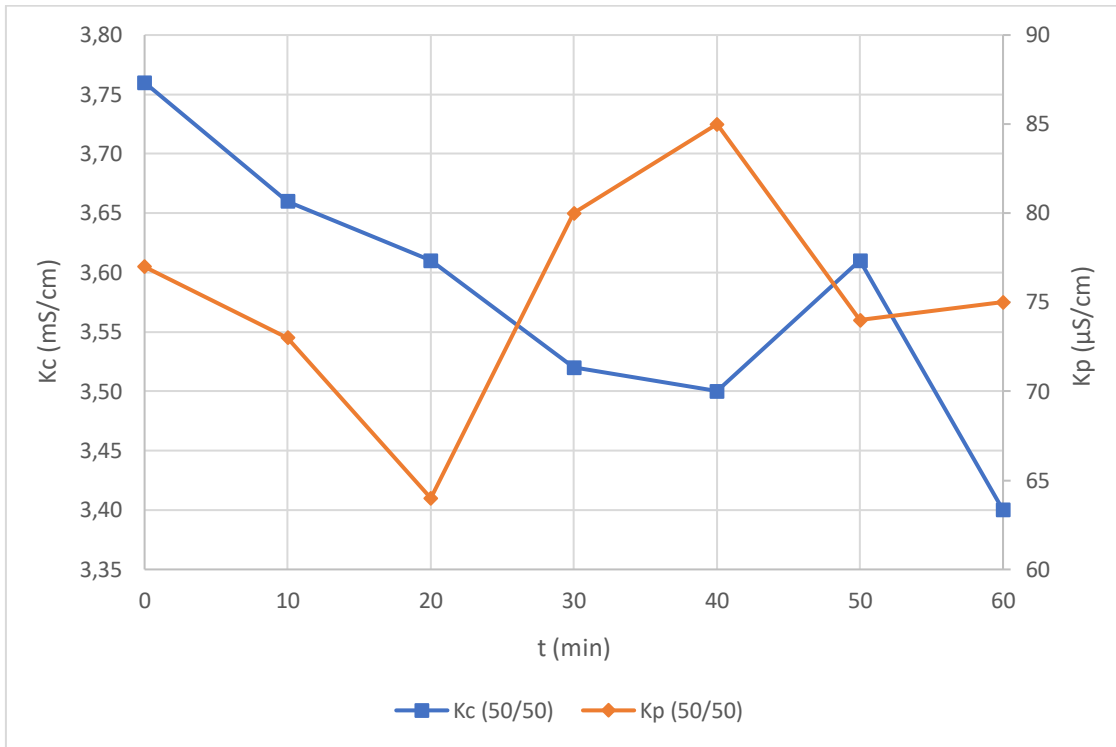
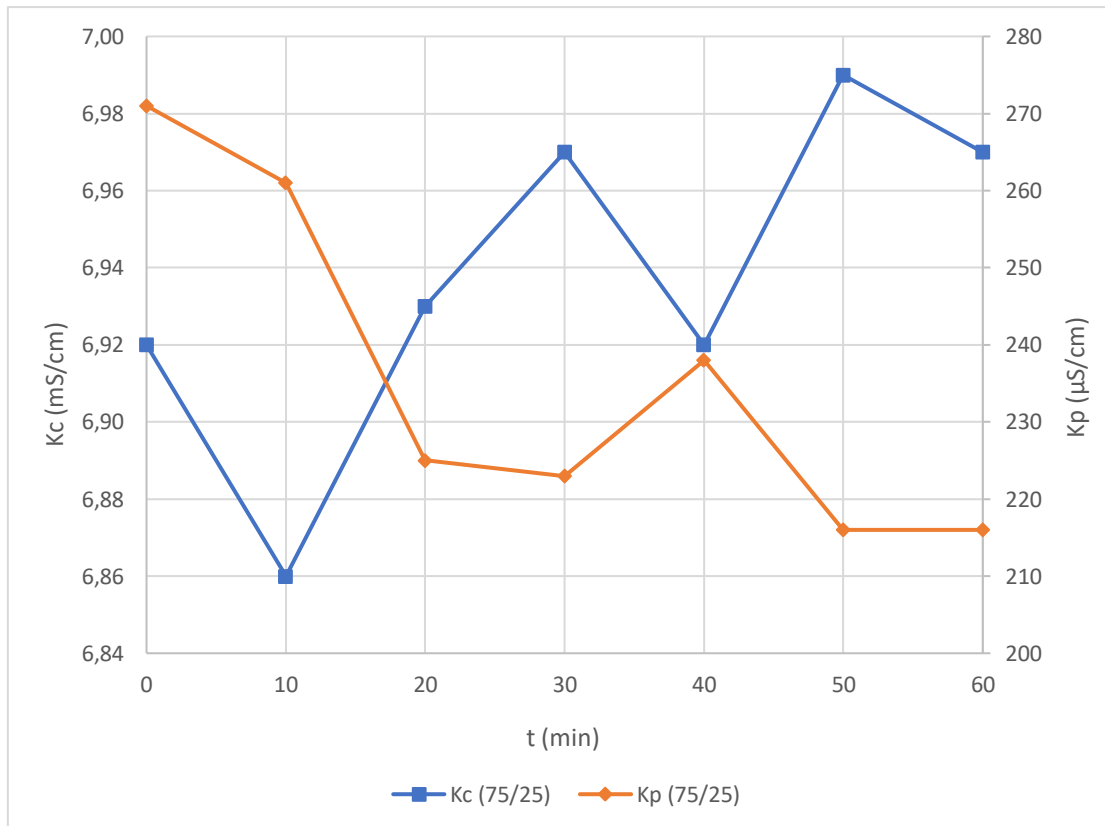


Figura 69. Variações da condutividade elétrica do concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.5 ANEXO E - TEMPERATURAS.

Figura 70. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 1.1.

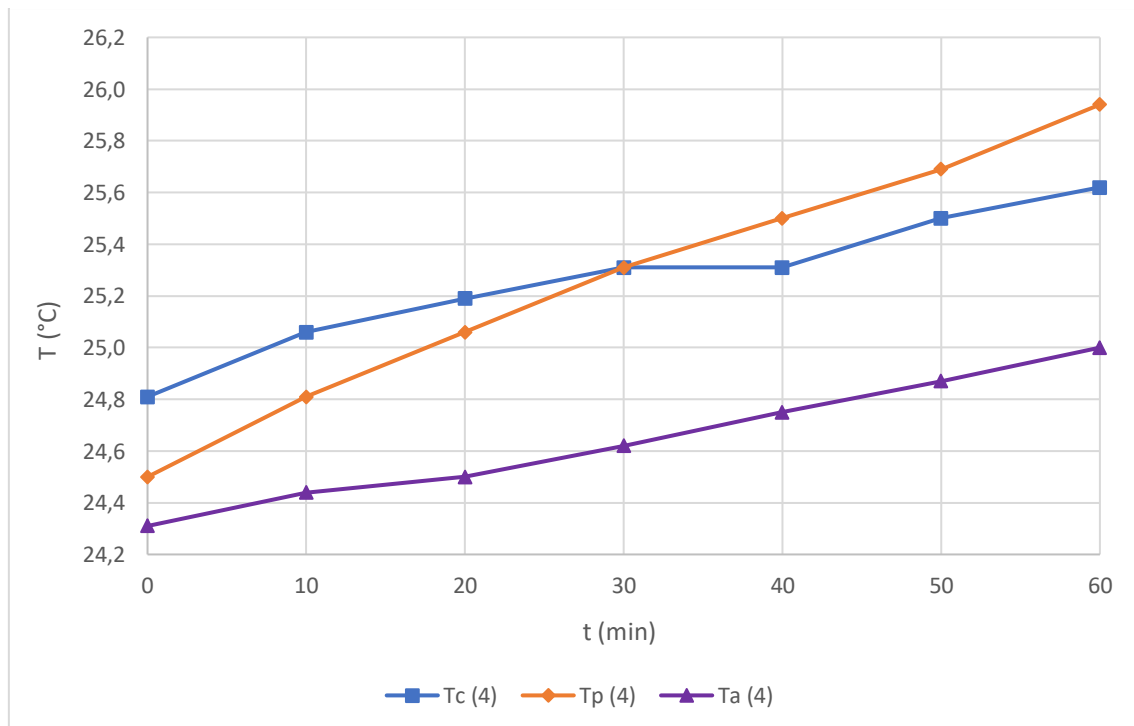


Figura 71. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 1.2.

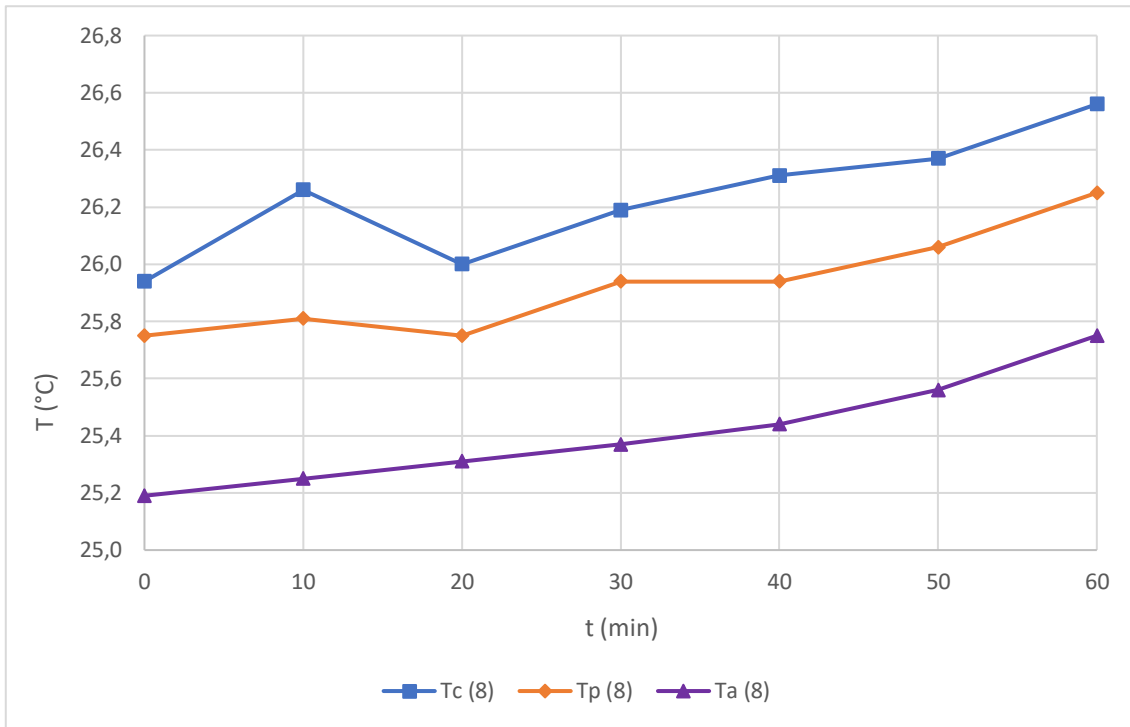


Figura 72. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 2.1.

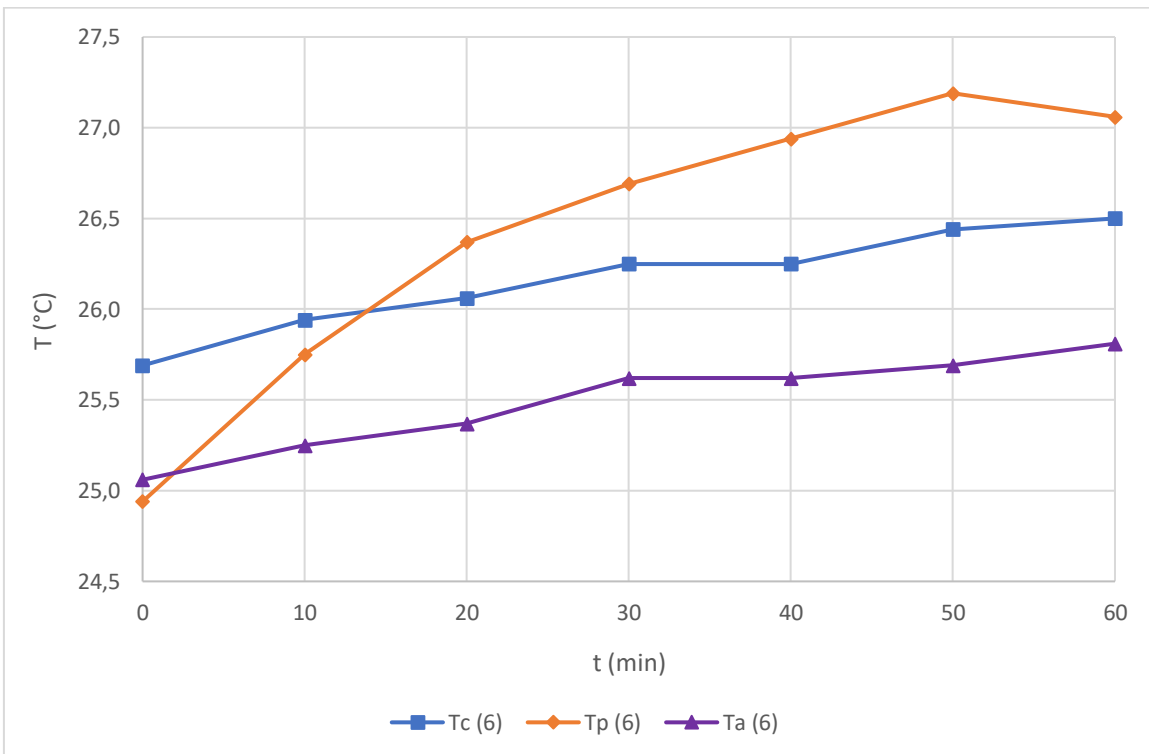


Figura 73. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 2.2.

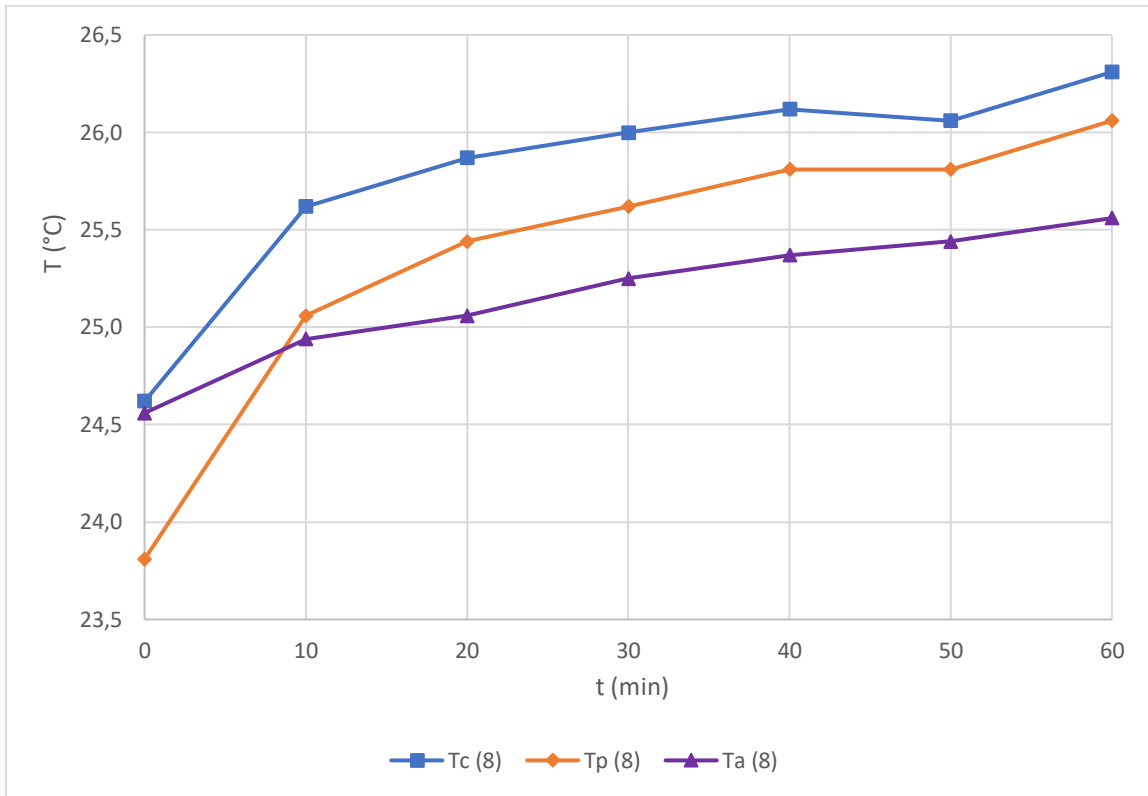


Figura 74. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 2.3.

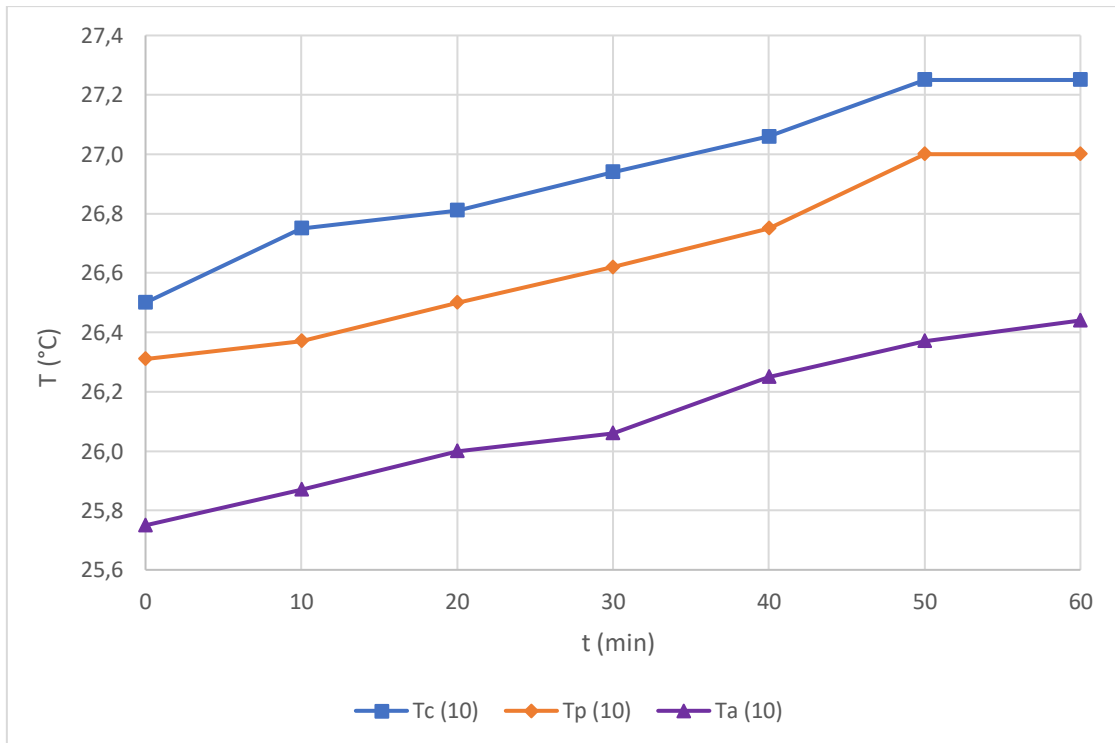


Figura 75. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 3.1.

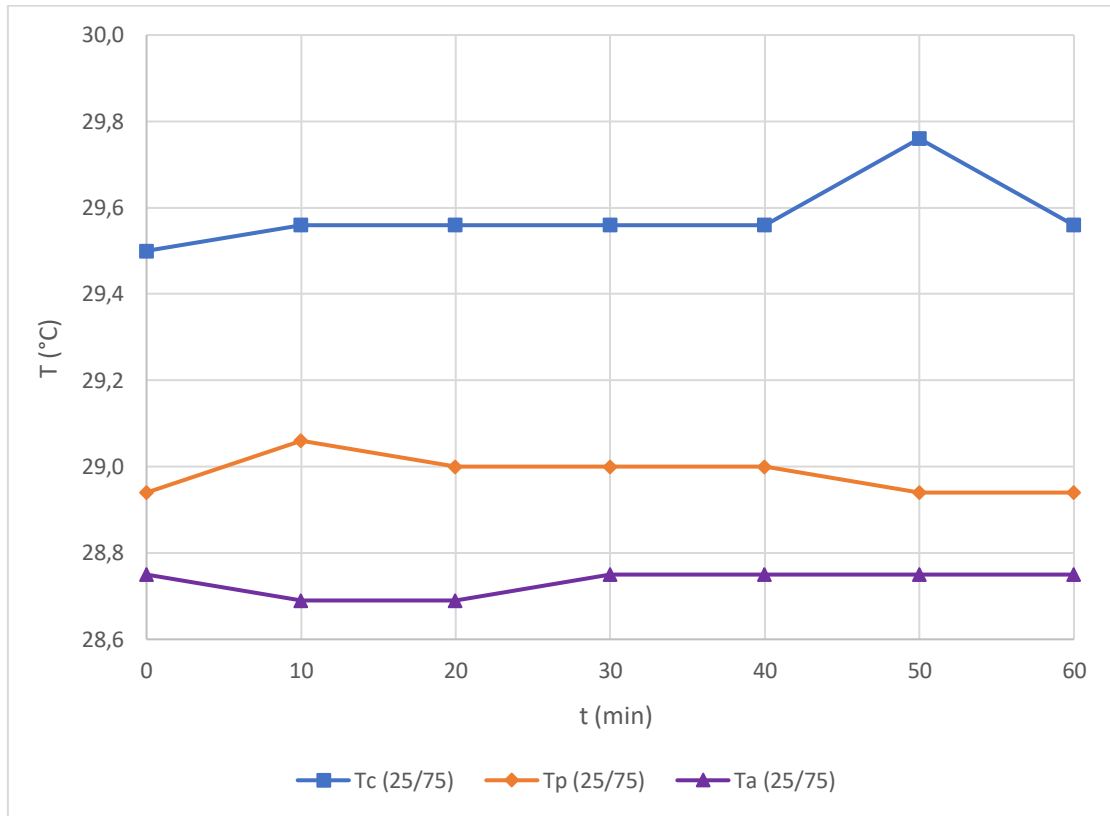


Figura 76. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 4.1.

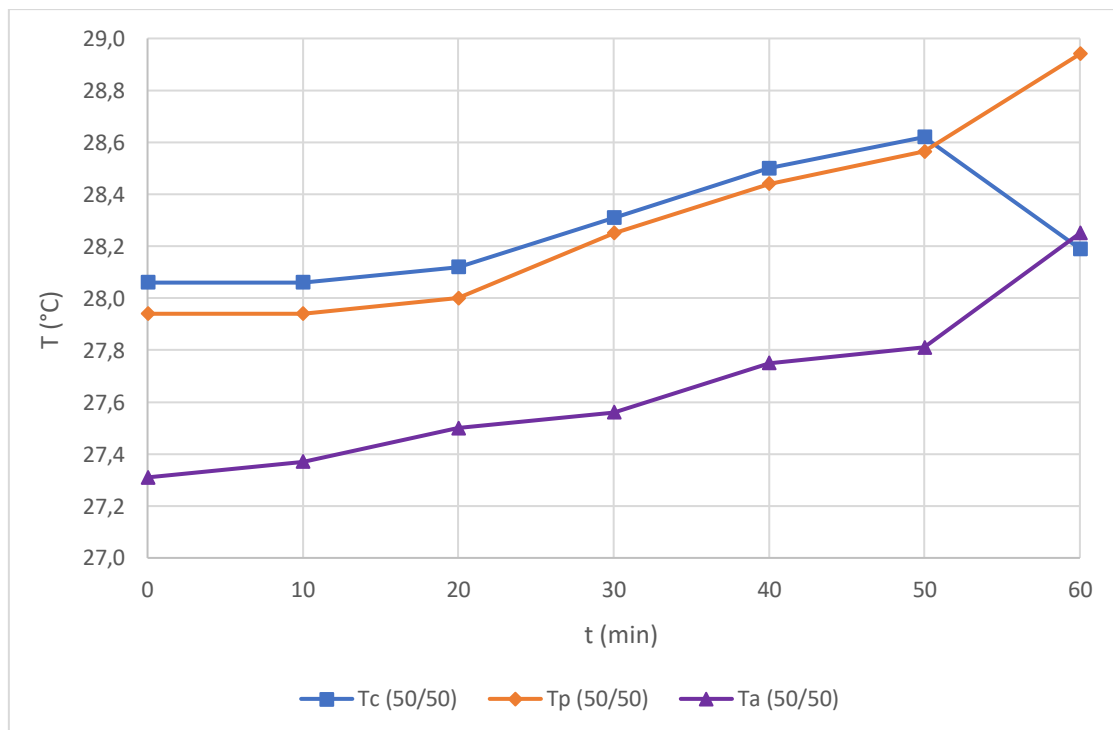
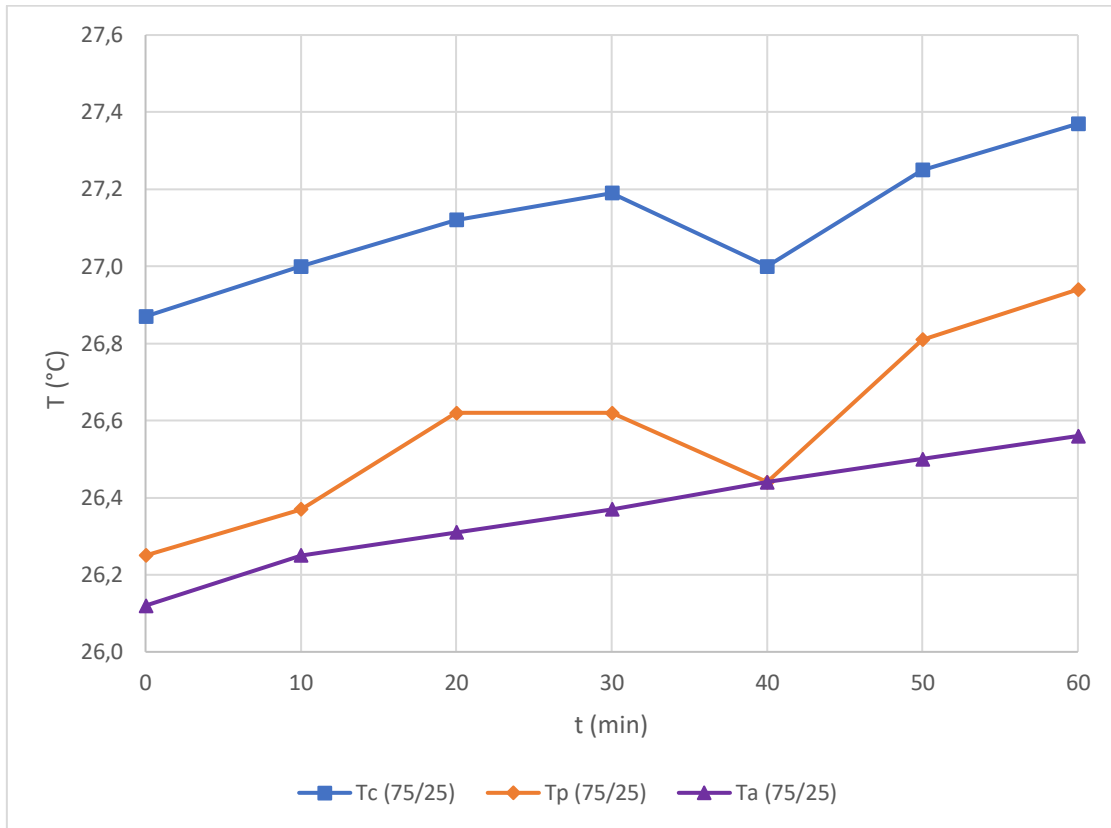


Figura 77. Variações das temperaturas da alimentação, concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.6 ANEXO F- POTENCIAL HIDROGENIÔNICO.

Figura 78. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 1.1.

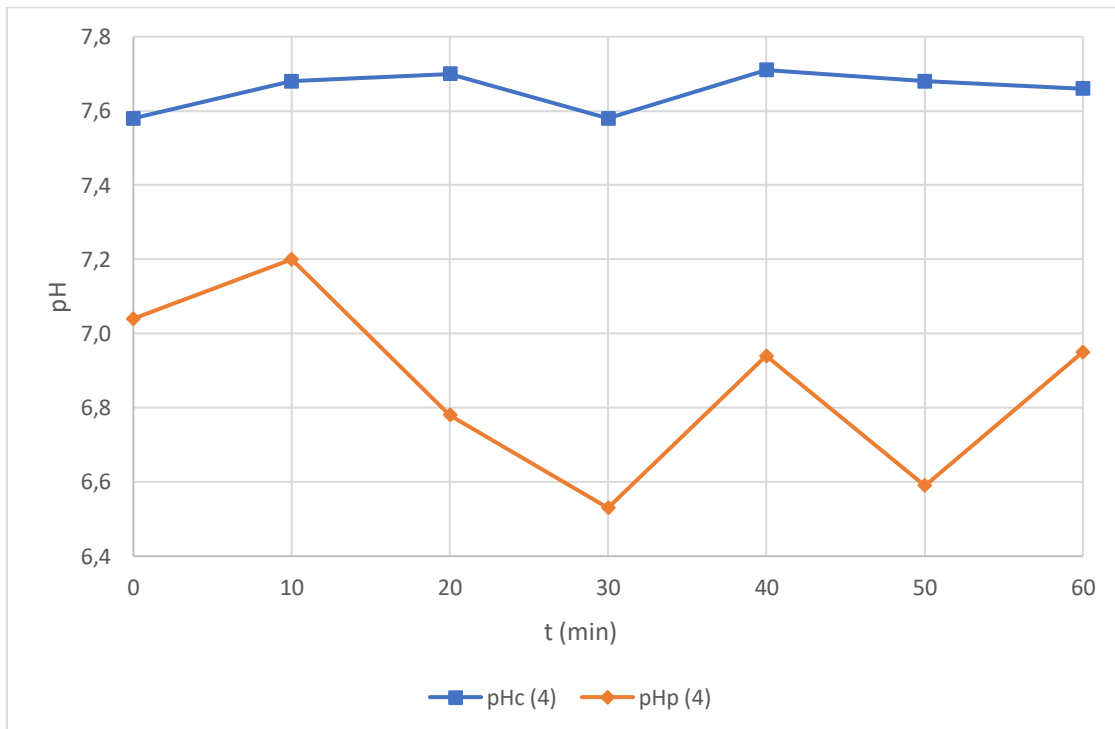


Figura 79. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 1.2.

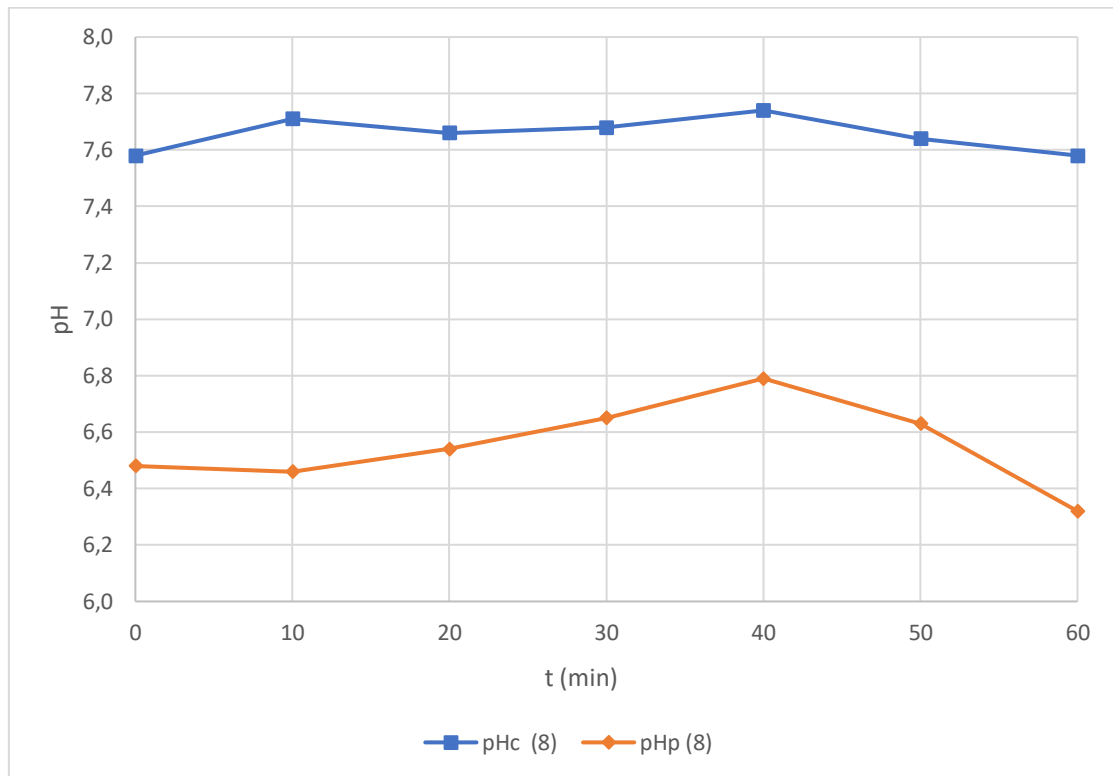


Figura 80. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 2.1.

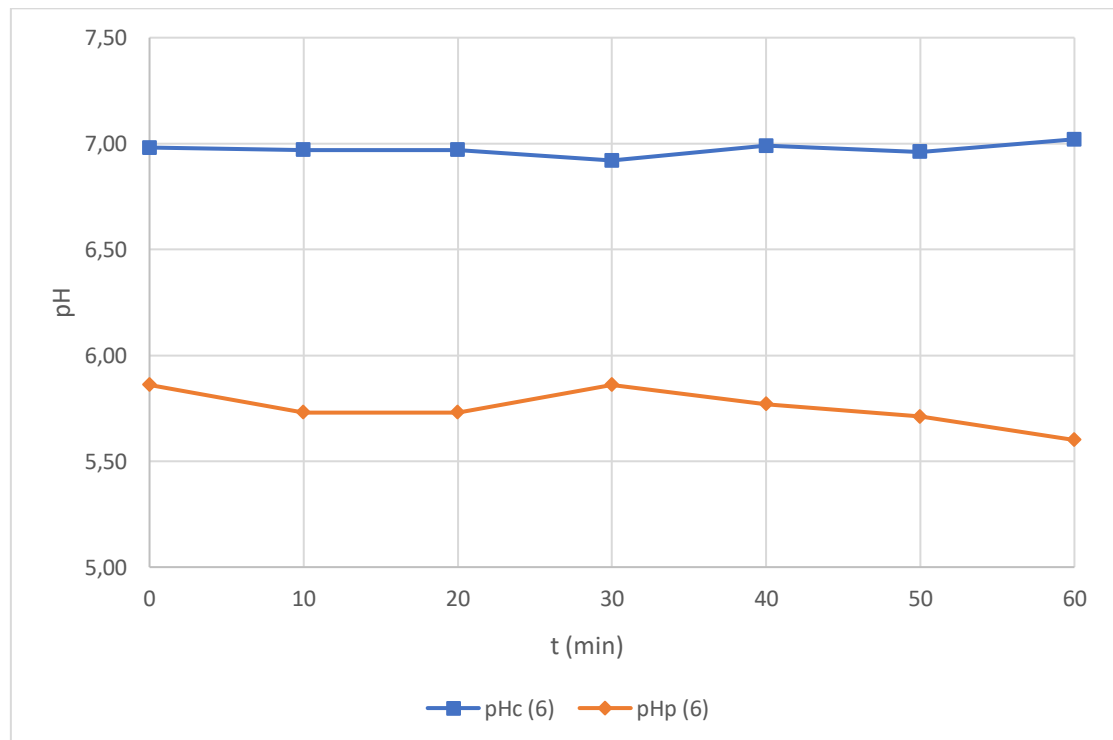


Figura 81. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 2.2.

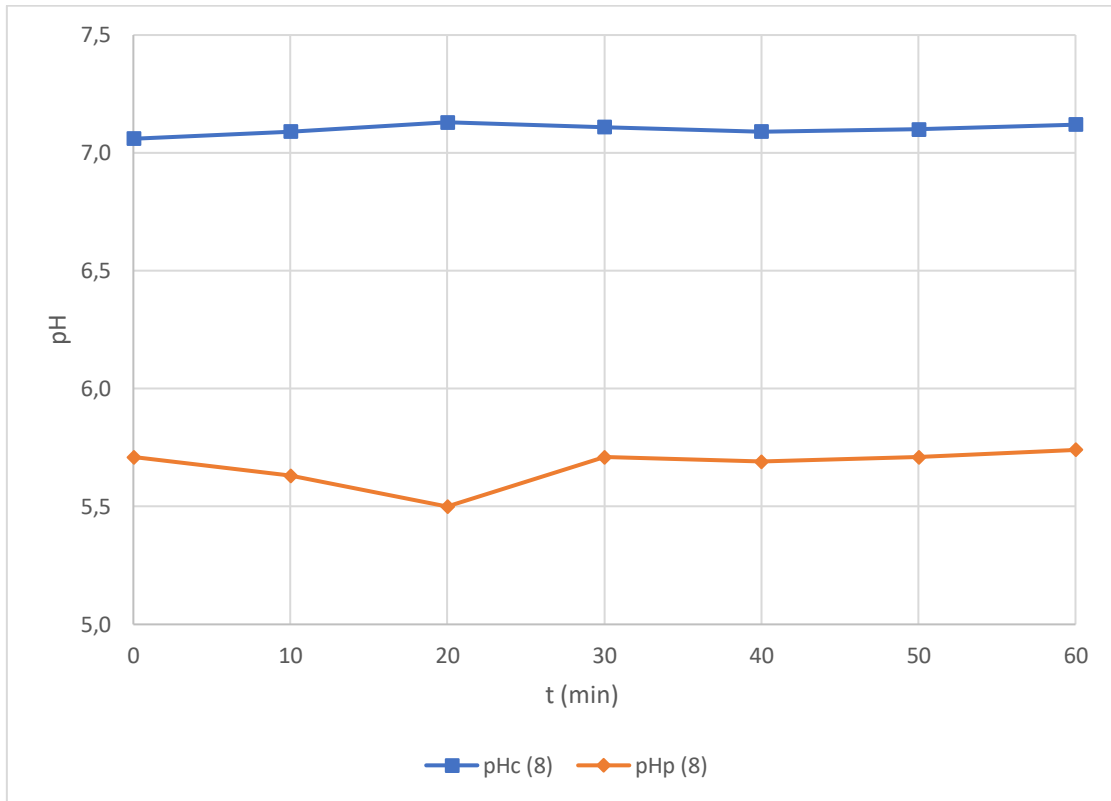


Figura 82. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 2.3.

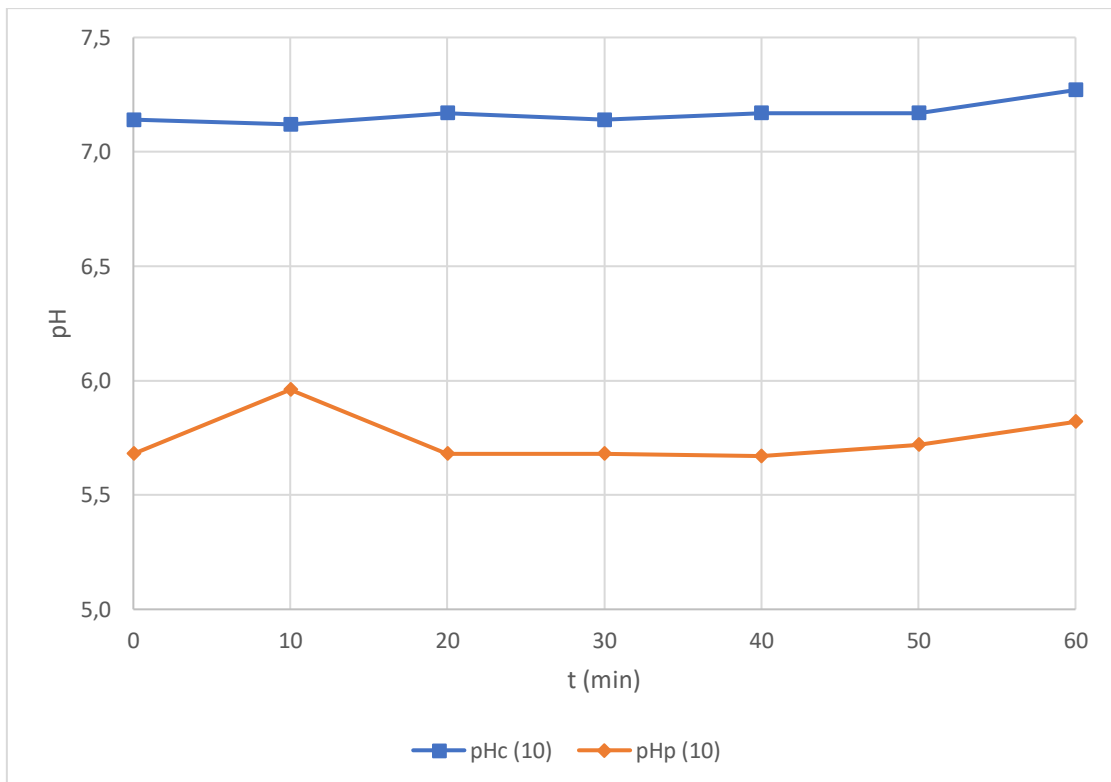


Figura 83. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 3.1.

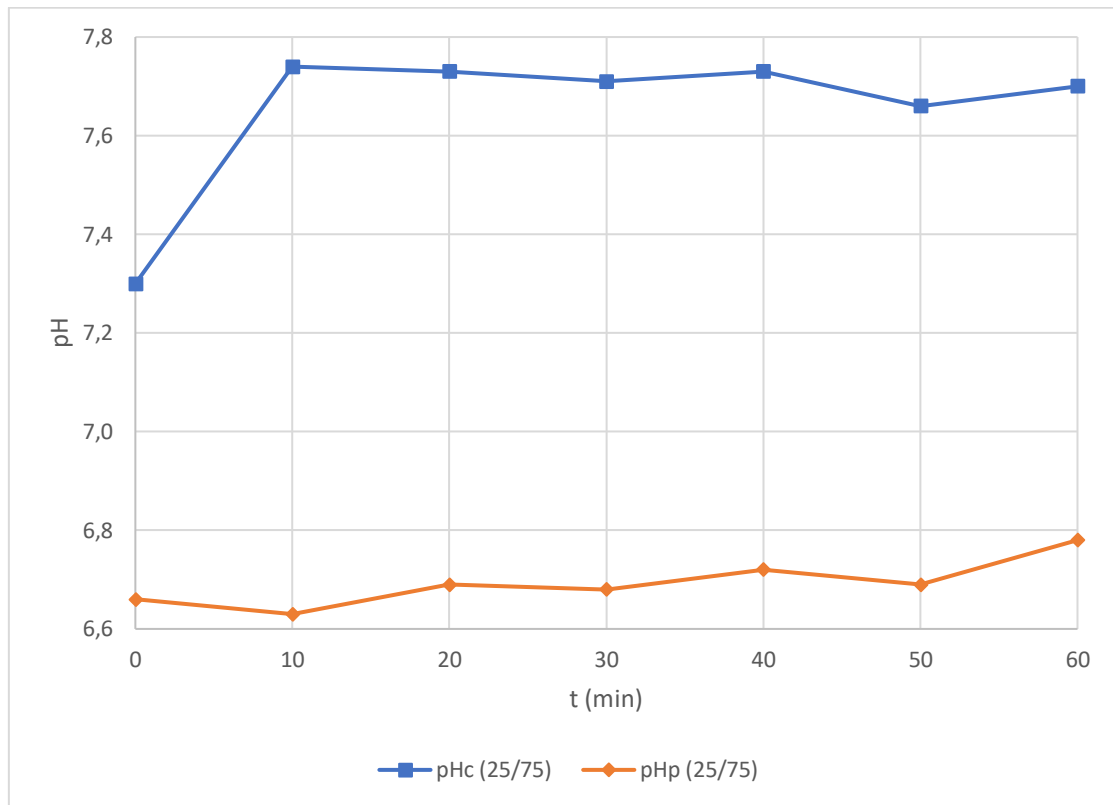


Figura 84. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 4.1.

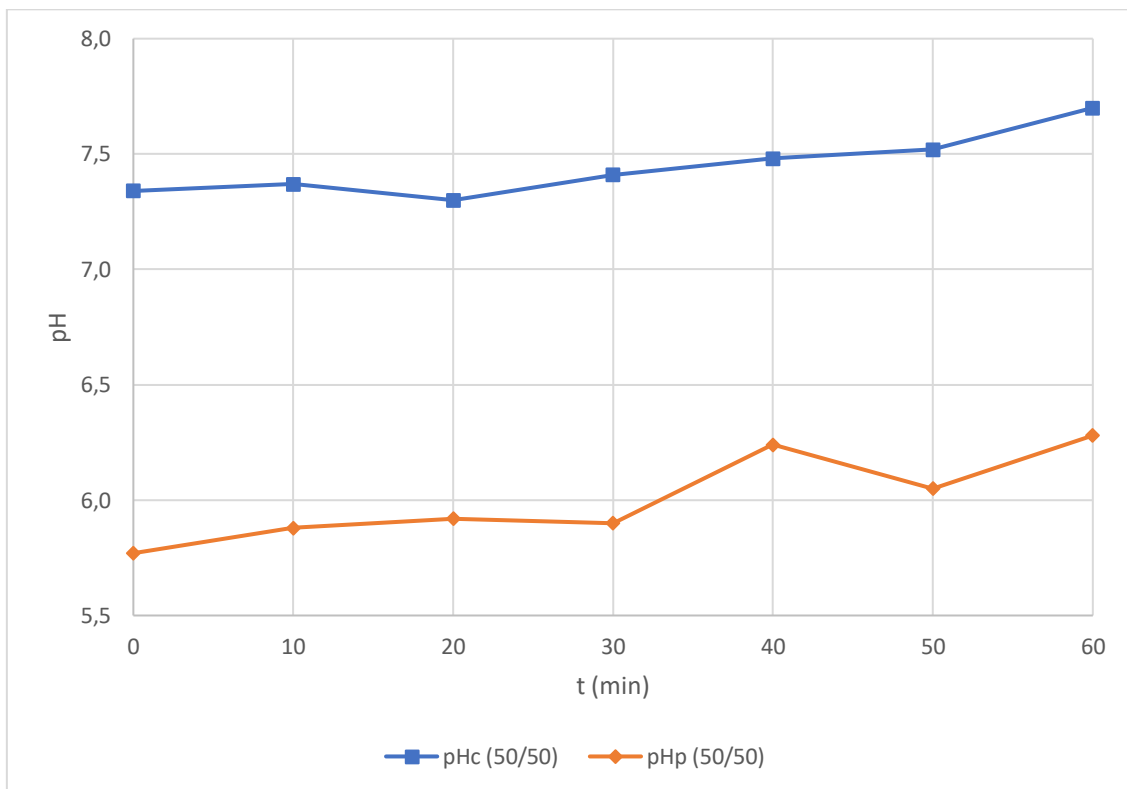
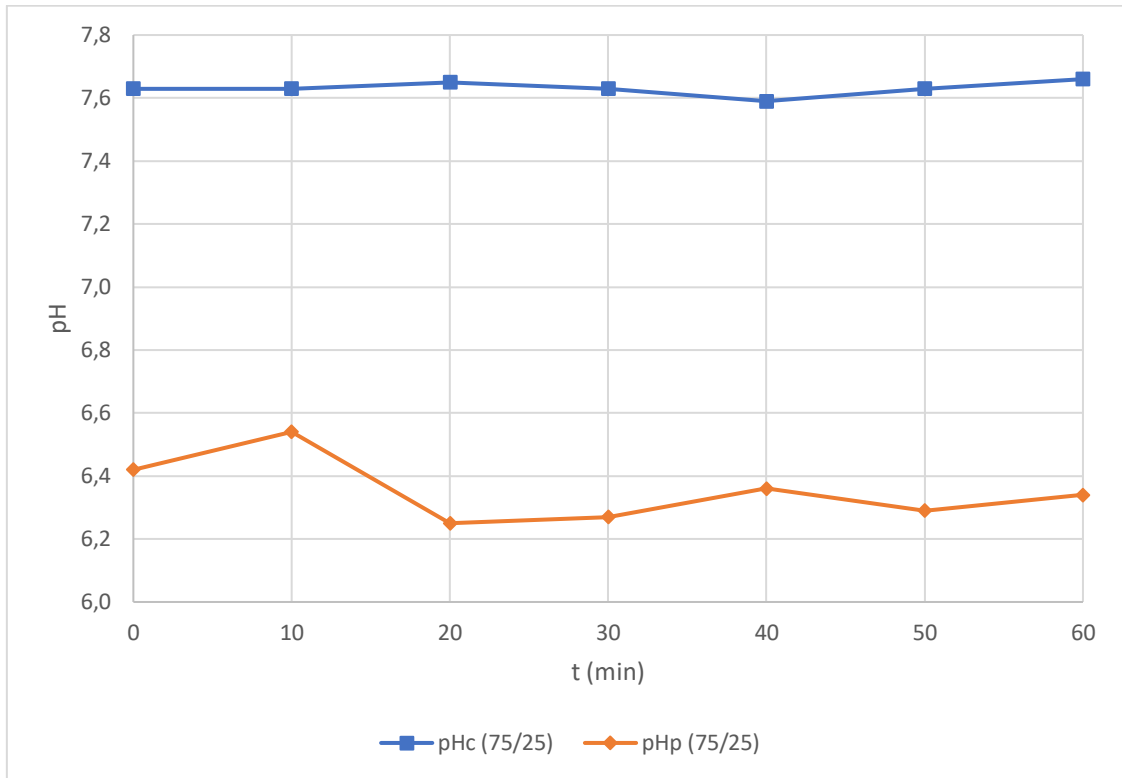


Figura 85. Variações do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.7 ANEXO G - COR.

Figura 86. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 1.1.

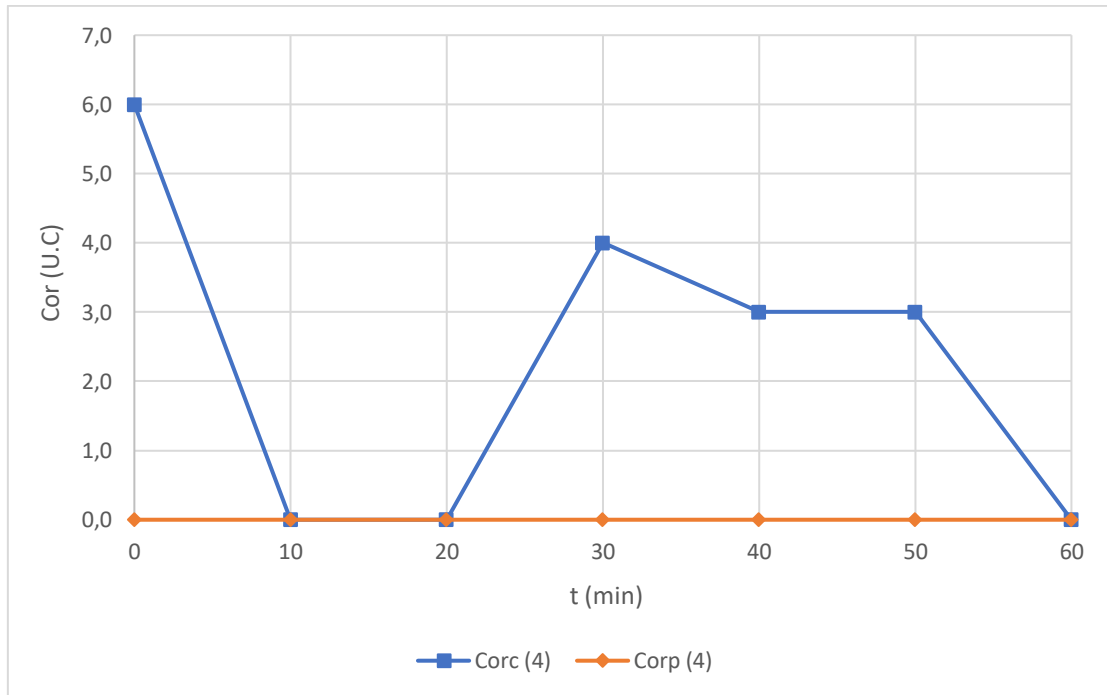


Figura 87. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 1.2

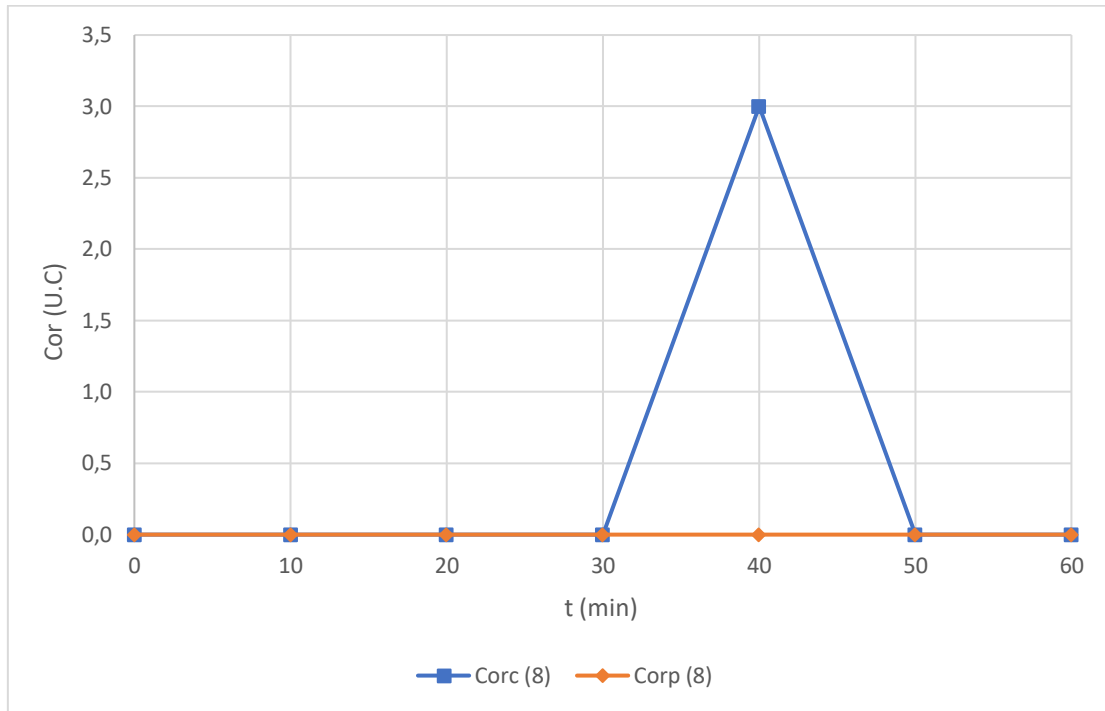


Figura 88. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 2.1.

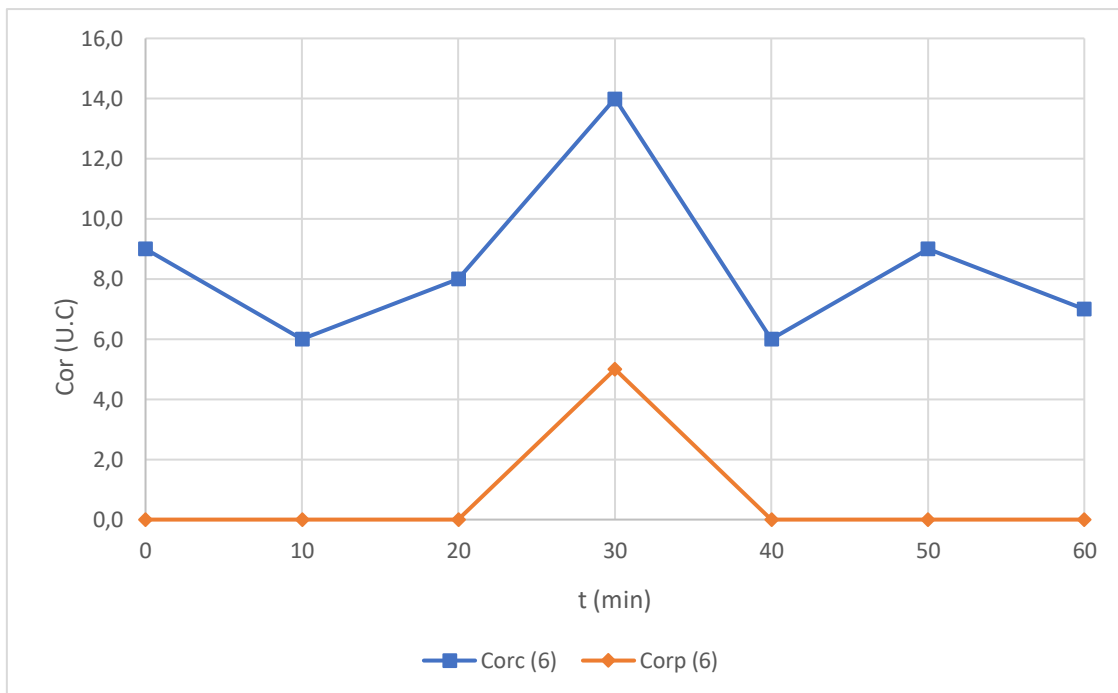


Figura 89. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 2.2.

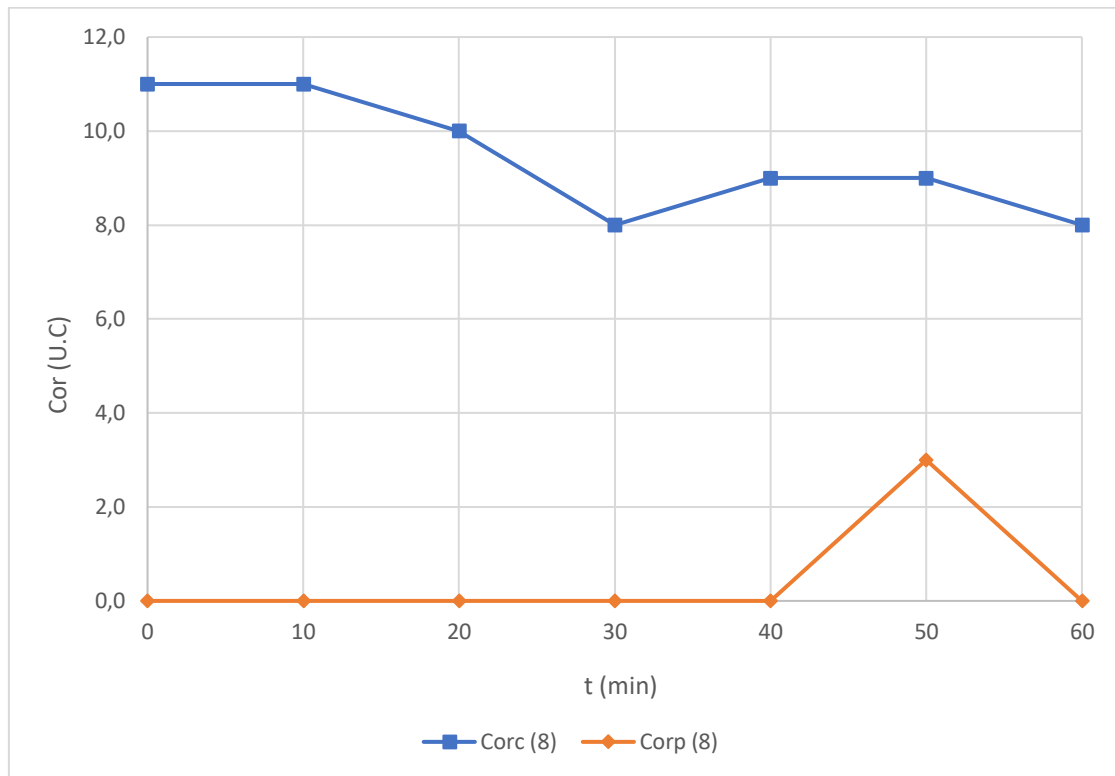


Figura 90. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 2.3.

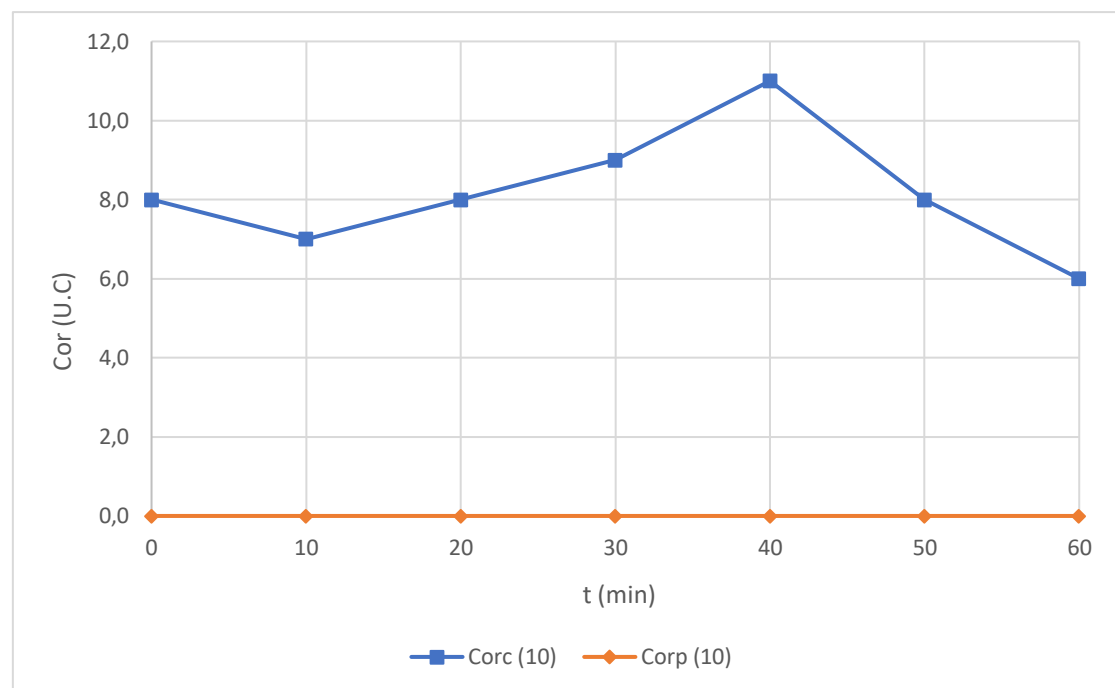


Figura 91. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 3.1.

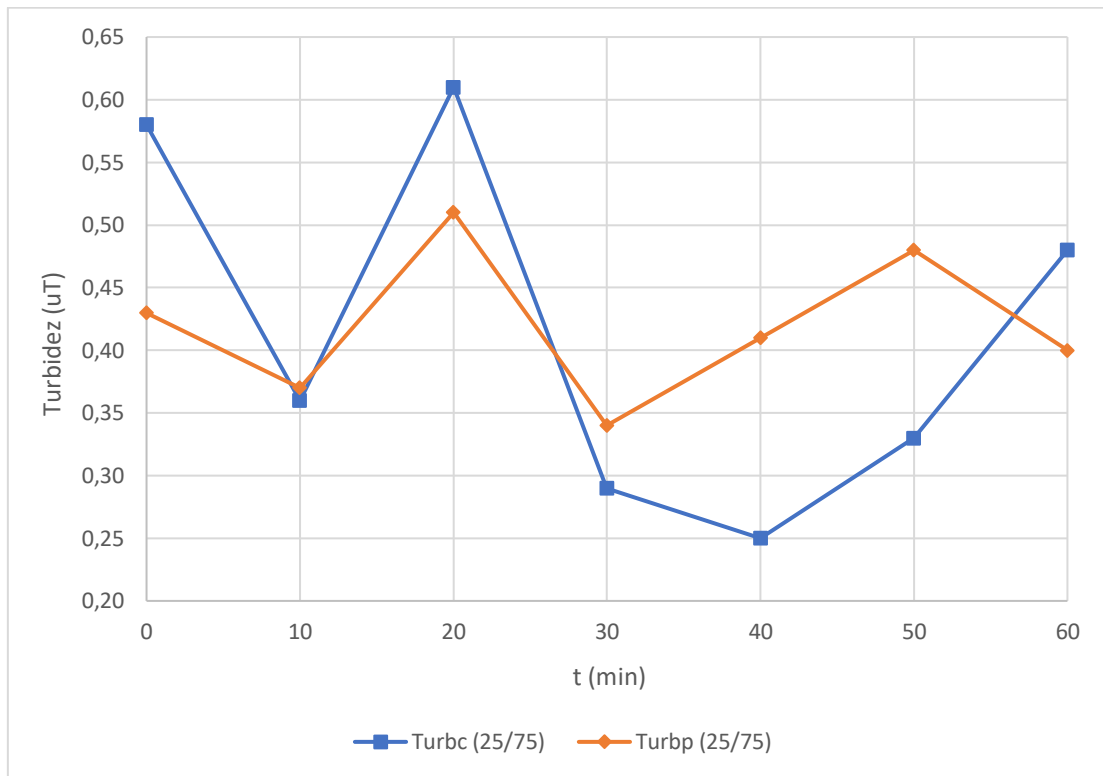


Figura 92. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 4.1.

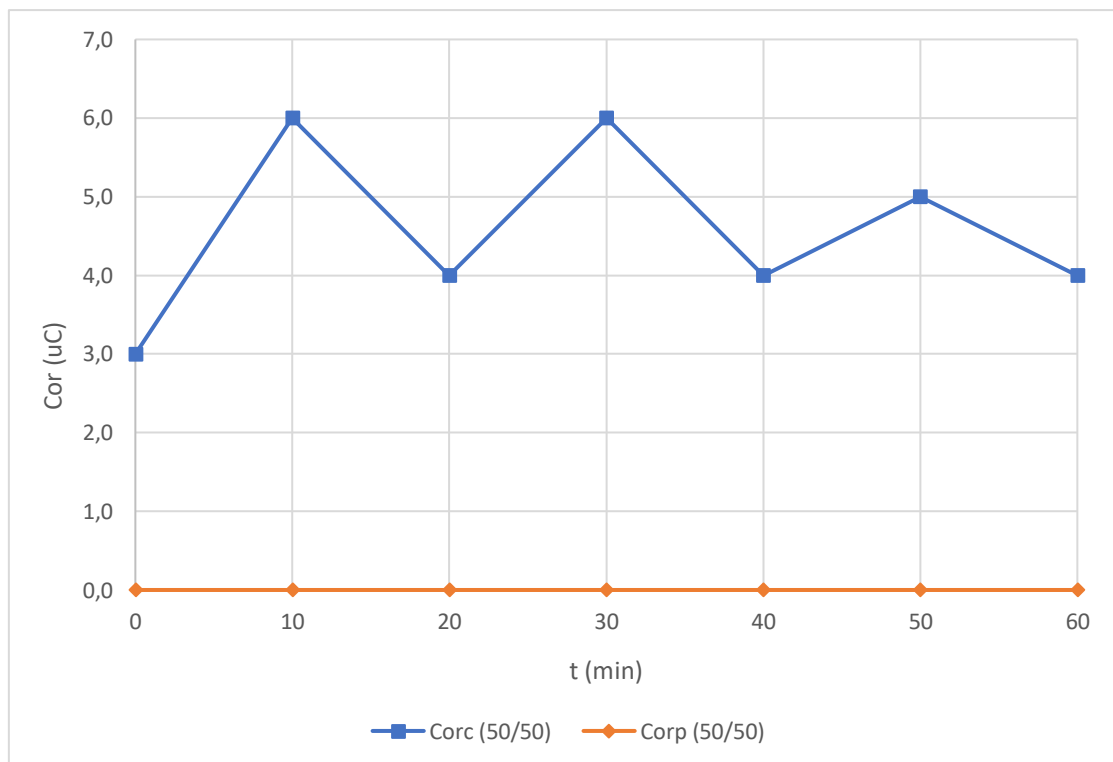
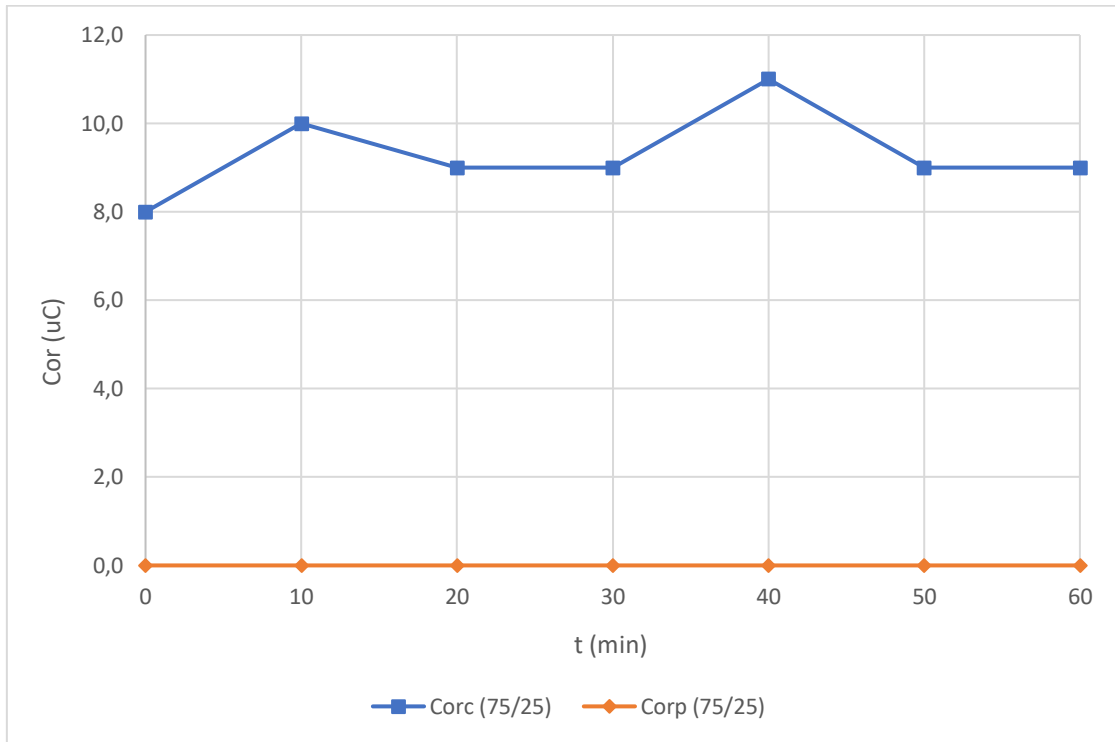


Figura 93. Variações da cor do concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.8 ANEXO H - TURBIDEZ.

Figura 94. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 1.1.

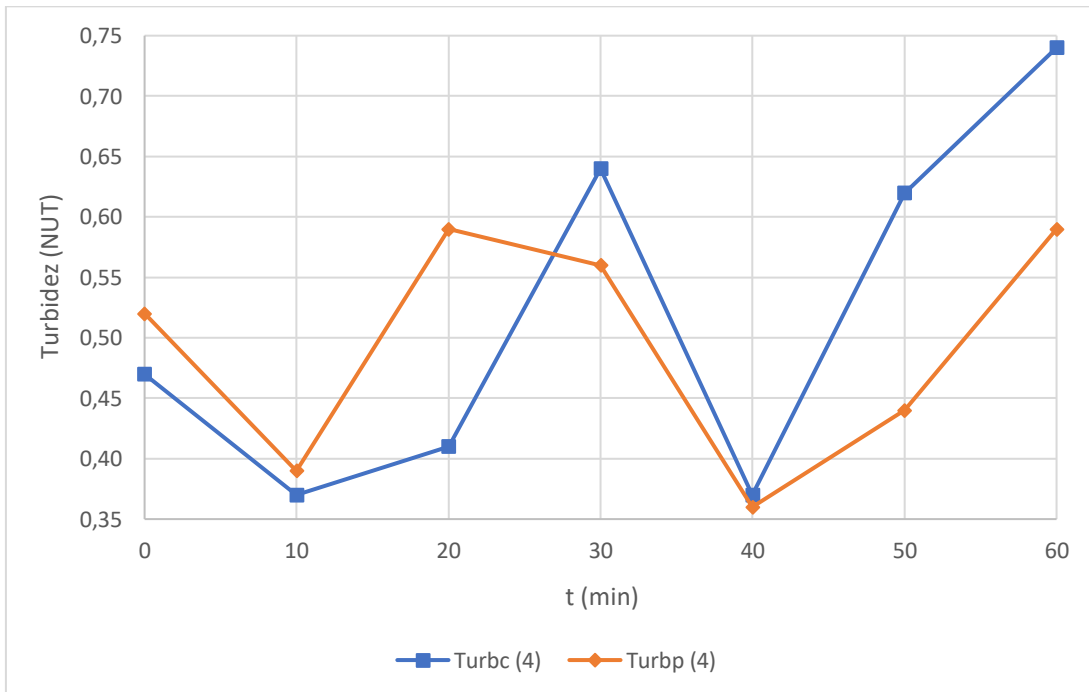


Figura 95. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 1.2.

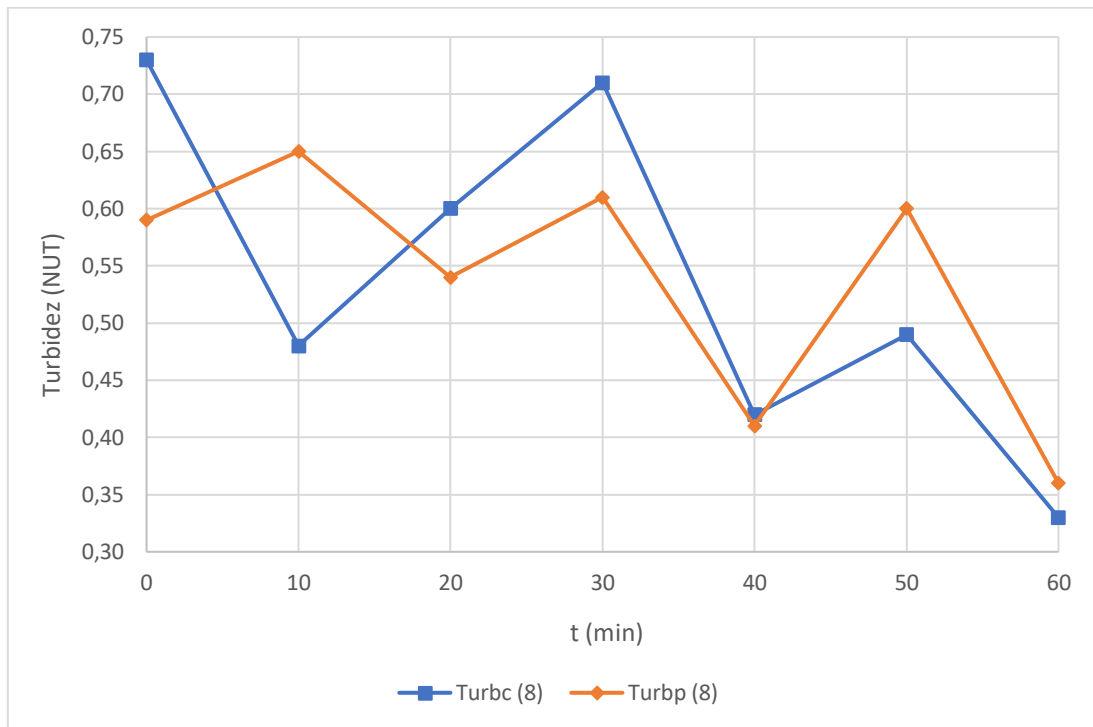


Figura 96. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 2.1.

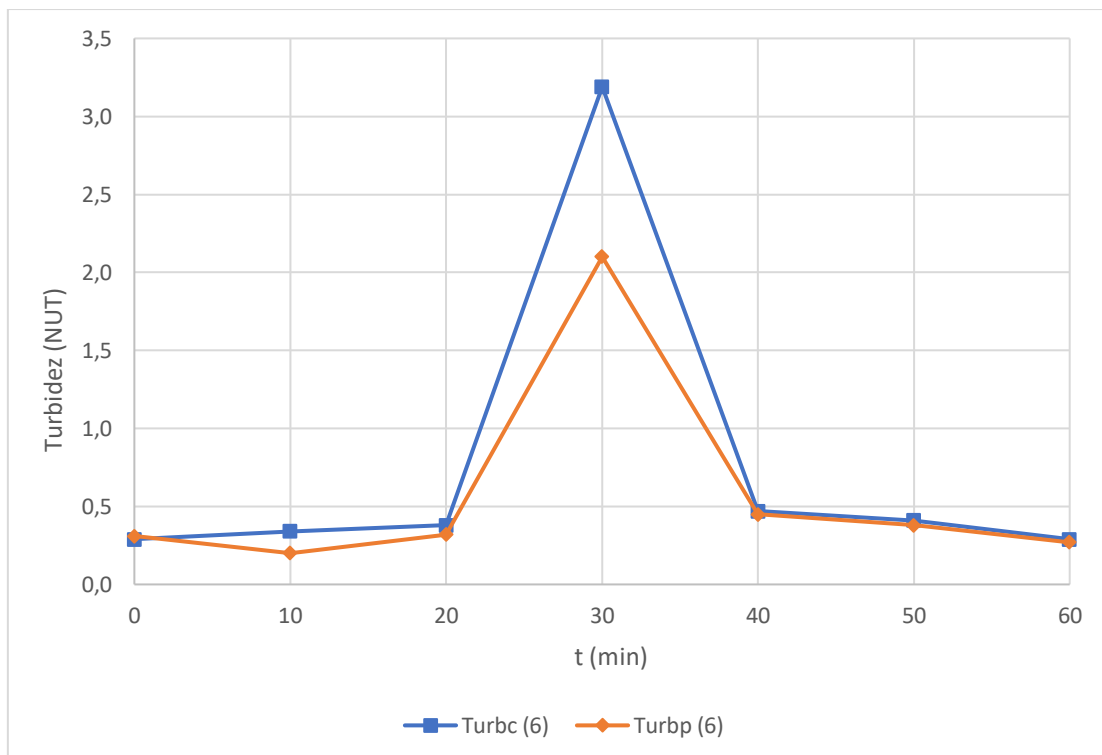


Figura 97. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 2.2.

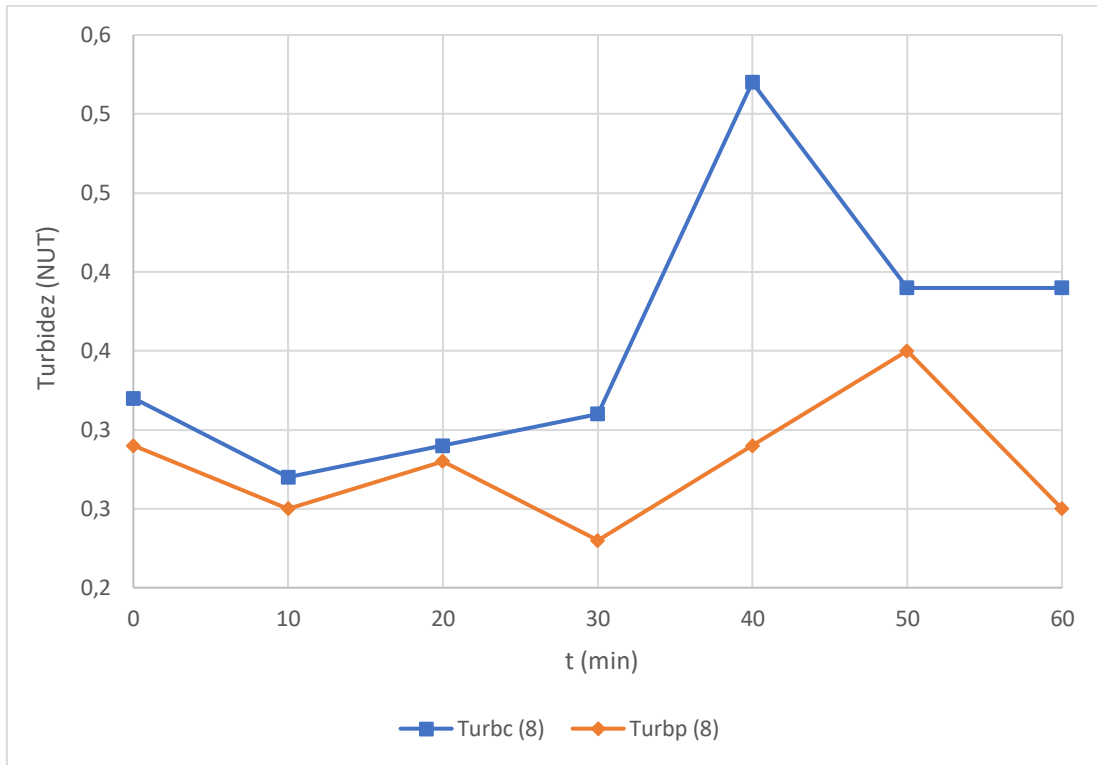


Figura 98. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 2.3.

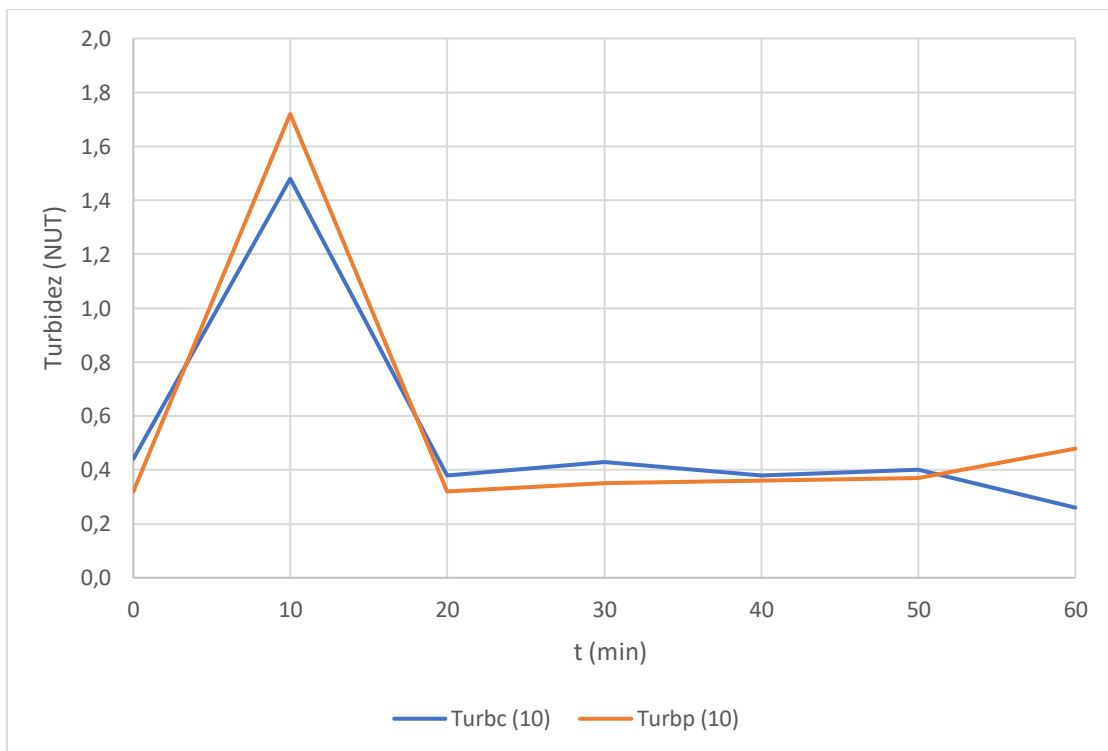


Figura 99. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 3.1.

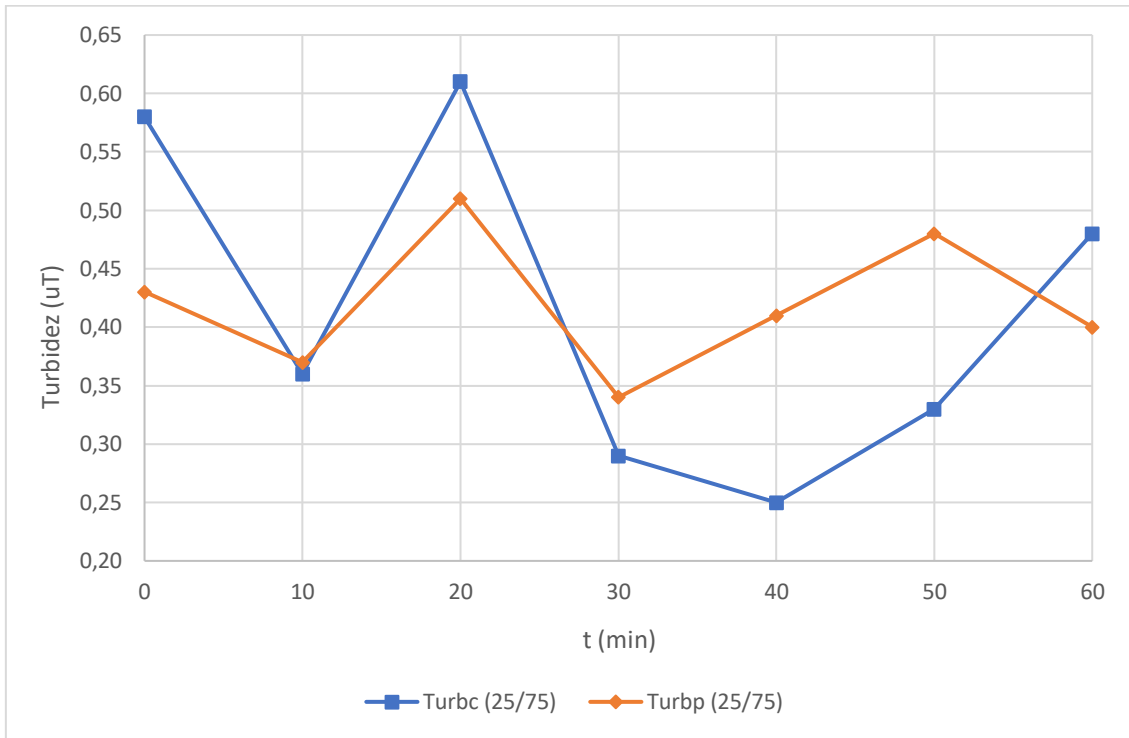


Figura 100. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 4.1.

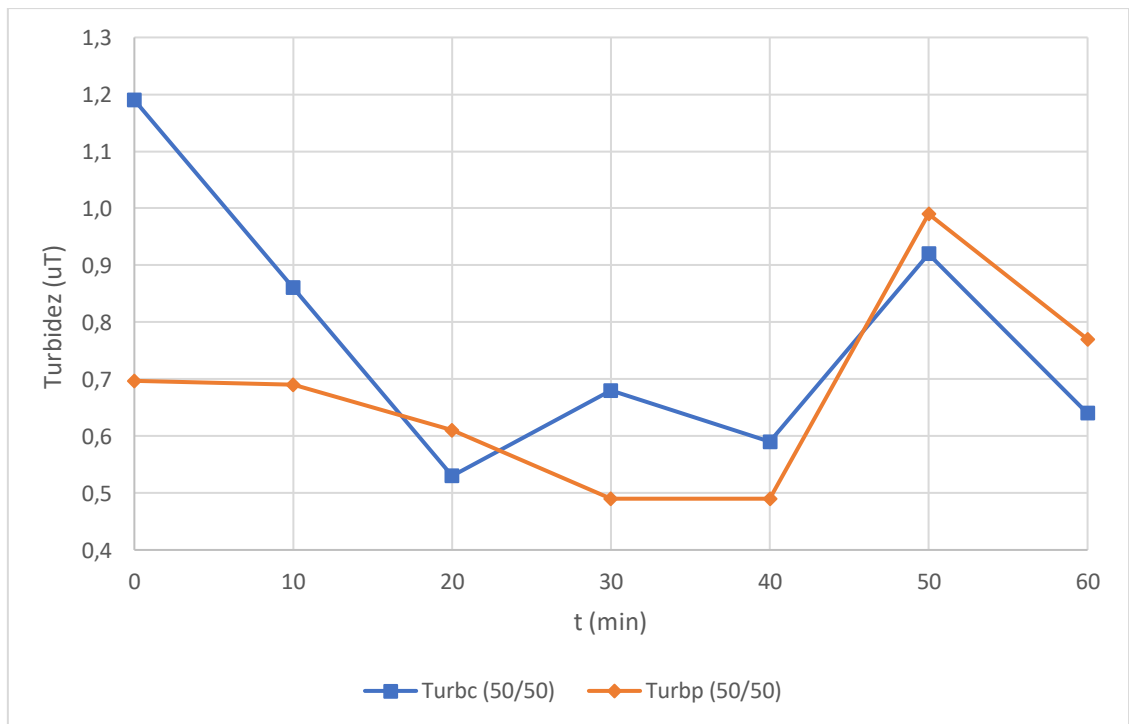
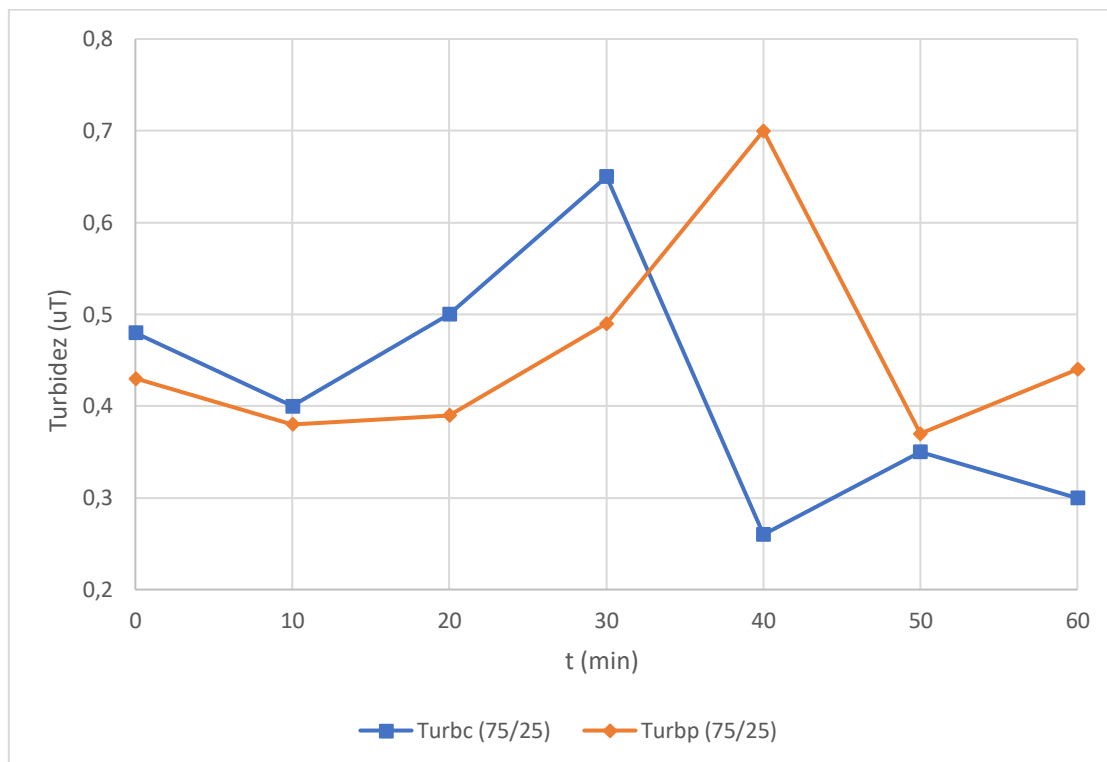


Figura 101. Variações da turbidez do concentrado e permeado no ensaio 5.1.



9.9 ANEXO I - CUSTO DE PRODUÇÃO vs VAZÃO DO PERMEADO.

Figura 102. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 2.1.

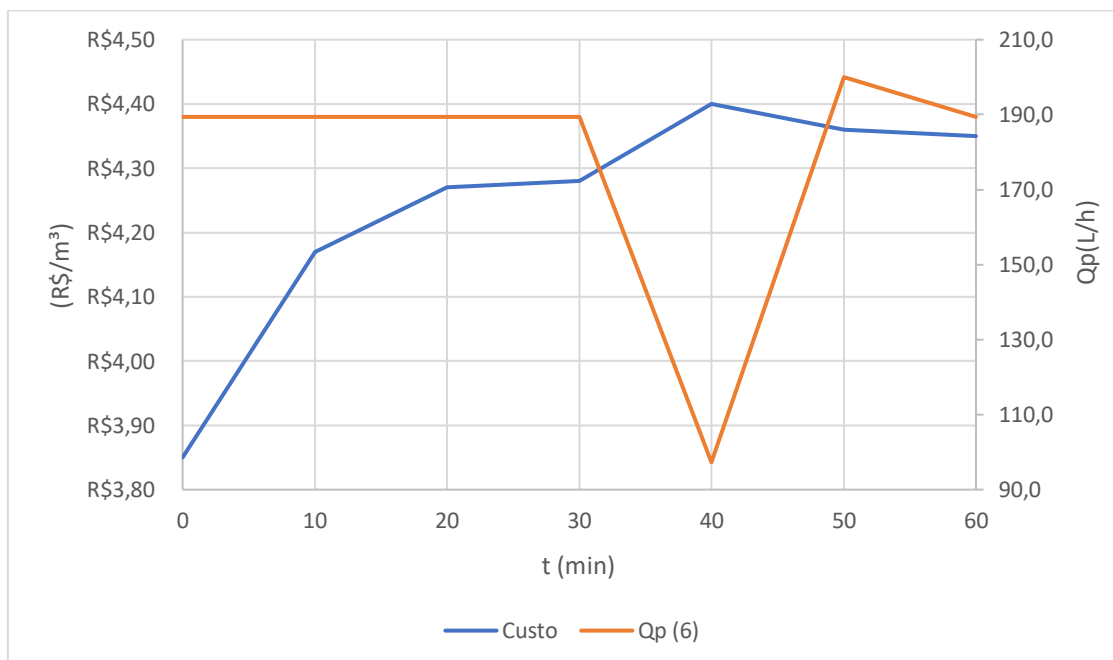


Figura 103. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 2.2.

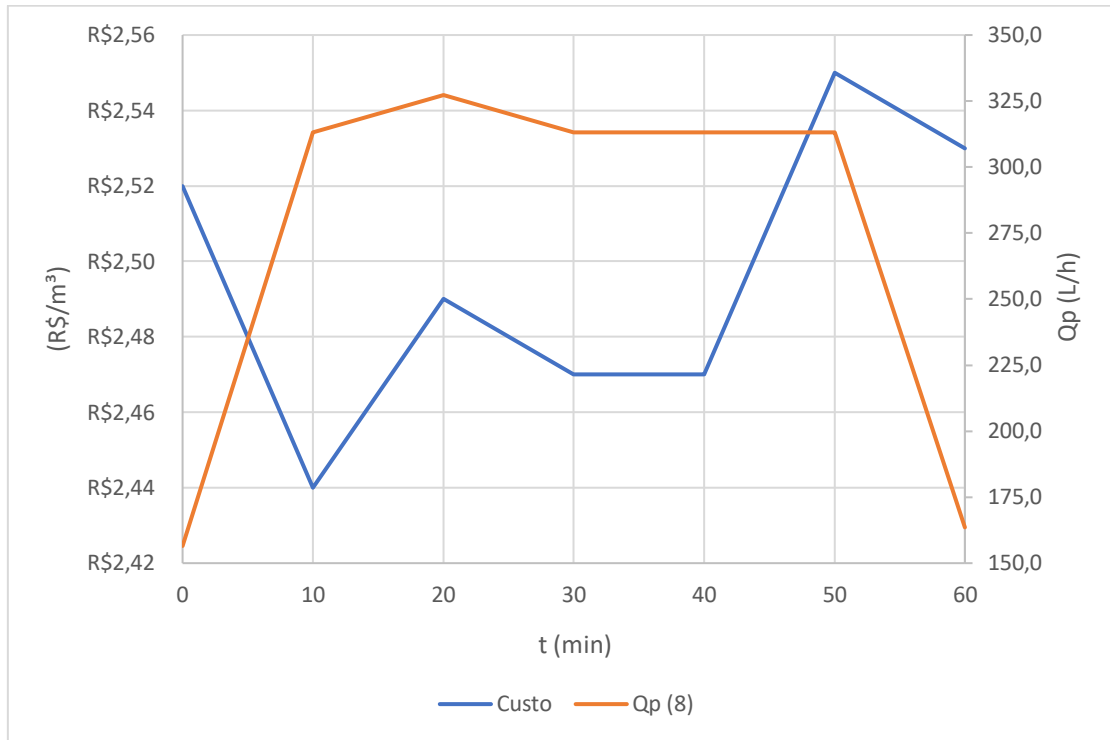


Figura 104. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 2.3.

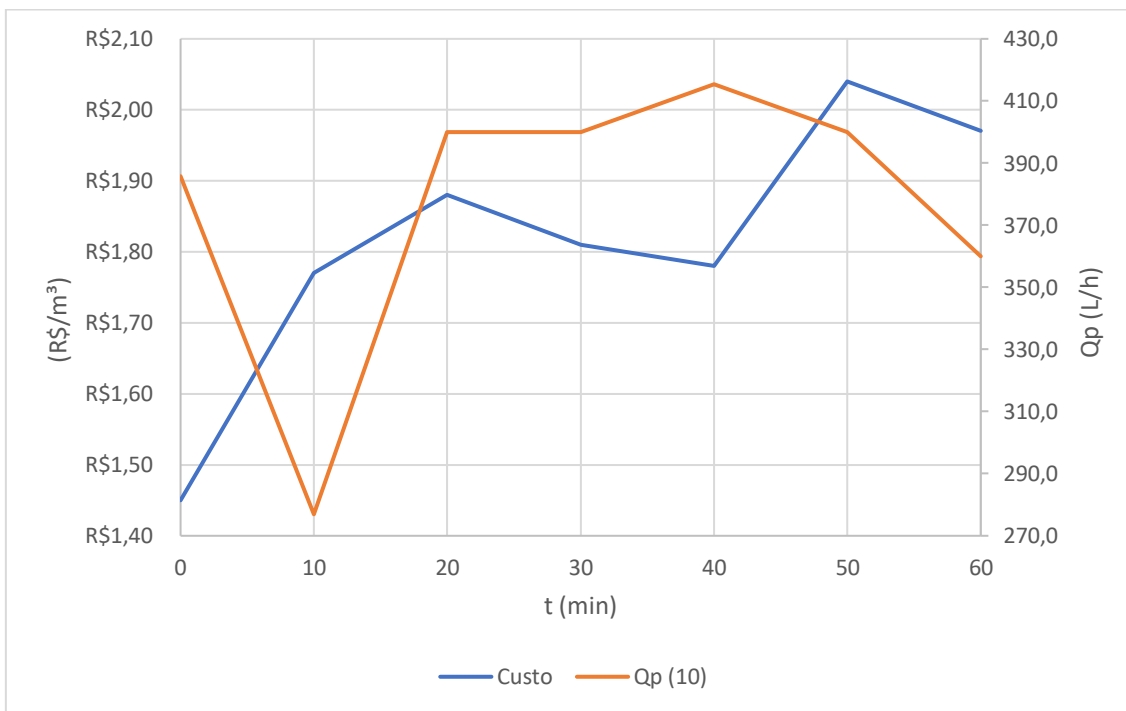


Figura 105. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 3.1.

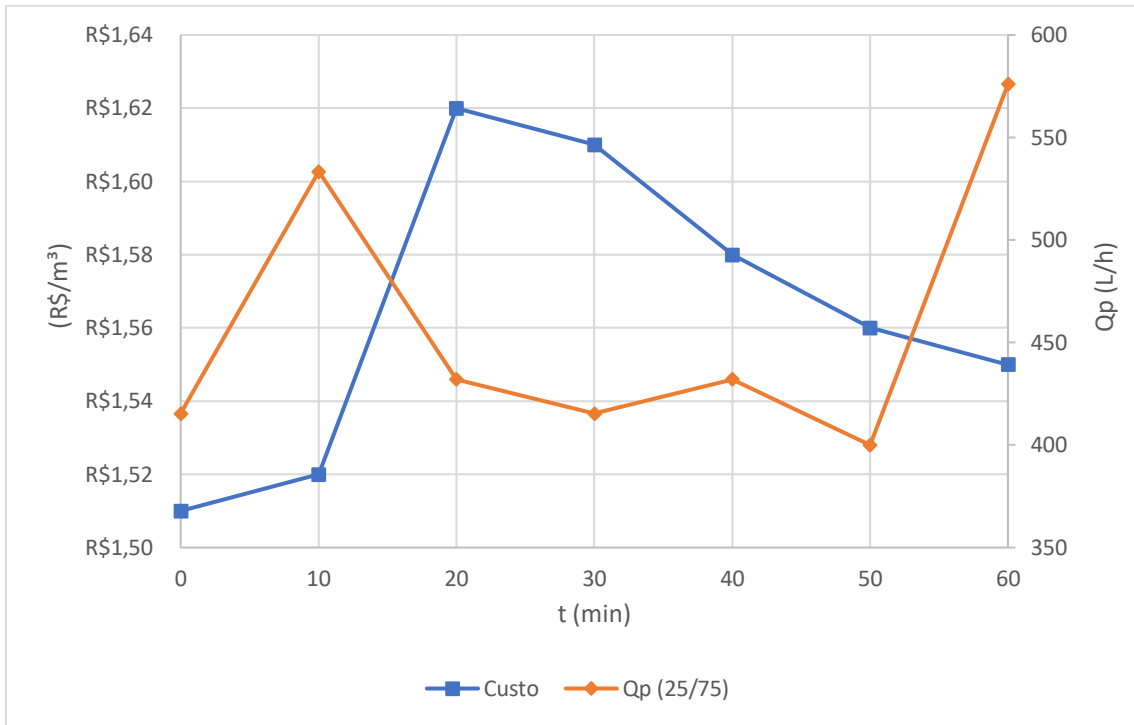


Figura 106. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 4.1.

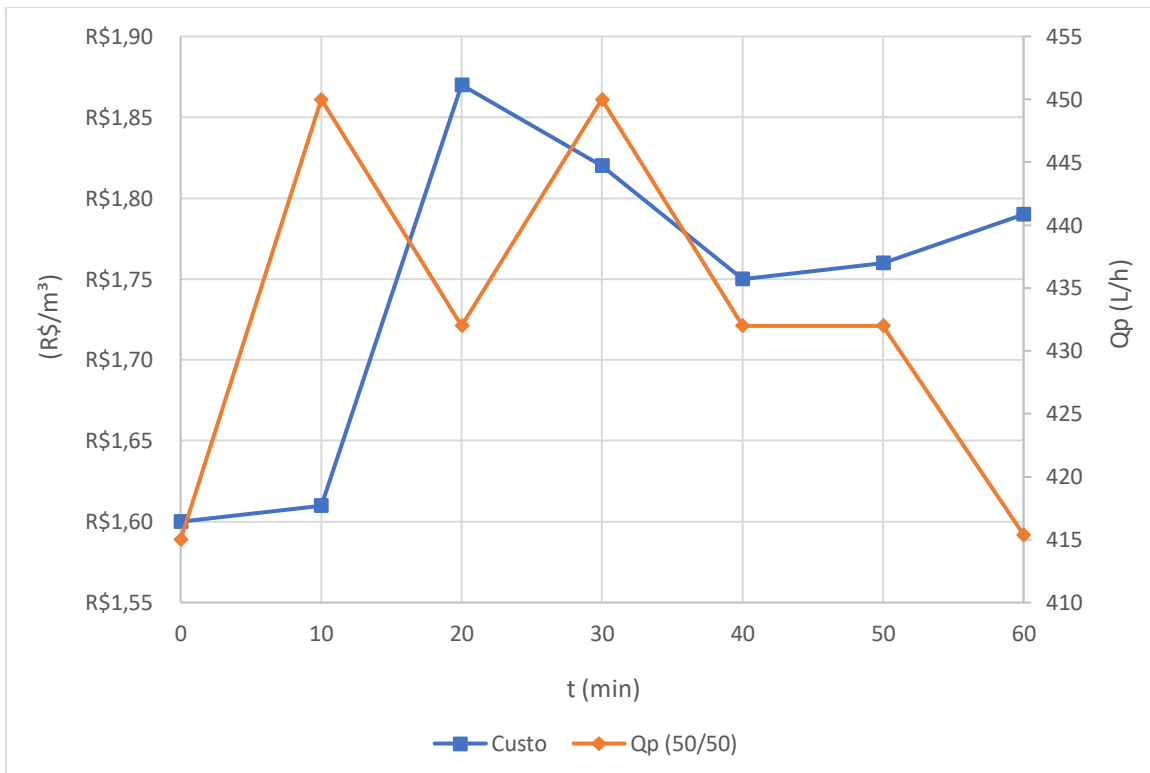


Figura 107. Variações do custo de produção versus vazão do permeado nos ensaios 5.1.

