



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA O
APROVEITAMENTO DO SUBPRODUTO DA DESSALINIZAÇÃO
DE SOLUÇÕES SALINAS**

MÁRCIA LIANA FREIRE PEREIRA

Campina Grande - Paraíba
Novembro de 1998

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA O
APROVEITAMENTO DO SUBPRODUTO DA DESSALINIZAÇÃO
DE SOLUÇÕES SALINAS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia
Química da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento
às exigências para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Operações e Processos

Orientador: Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

Campina Grande - Paraíba

Novembro de 1998



P436a Pereira, Marcia Liana Freire
Avaliacao de um reator eletrodialitico para o aproveitamento do subproduto da dessalinizacao de solucoes salinas / Marcia Liana Freire Pereira. - Campina Grande, 1998.
163 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Operacoes e Processos Quimicos 2. Reator Eletrodialitico Bipolar 3. Solucoes Salinas 4. Dissertacao I. Franca, Kepler Borges, Dr. II. Santos, Neilor Cesar dos, Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 66.08(043)

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA O
APROVEITAMENTO DO SUBPRODUTO DA DESSALINIZAÇÃO
DE SOLUÇÕES SALINAS**

MÁRCIA LIANA FREIRE PEREIRA

Dissertação aprovada em: 26, 11, 1998

Banca examinadora:



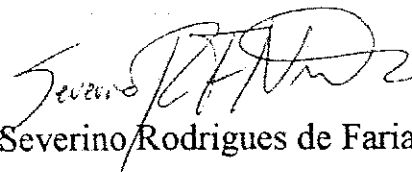
Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

ORIENTADOR



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

COMPONENTE DA BANCA



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

COMPONENTE DA BANCA

*Aos meus filhos Nicolas e Lucas,
a quem o futuro pertence.*

AGRADECIMENTOS

Em especial à Deus por ter me concedido a oportunidade de trabalho e realização.

Aos meus pais e meus sogros pela atenção e carinho que dedicaram aos meus filhos.

Aos meus irmãos e aos meus parentes pelo apoio e amizade.

Ao meu esposo Hébert Rodrigues Pereira pela paciência e compreensão durante a realização e conclusão deste curso.

Ao amigo e orientador Kepler Borges França pelo constante incentivo e empenho ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos pelas palavras de confiança e otimismo nos momentos oportunos.

Ao amigo Elói Duarte Mélo pela valiosa contribuição durante o período de coleta dos dados experimentais.

Ao amigo e professor José Raimundo Sobrinho pela colaboração nas análises laboratoriais.

A todos os professores do mestrado em Engenharia Química.

A Maria José B. Cavalcanti e Maricé P. da Silva pela colaboração prestada e pela organização do curso.

A CAPES pelo suporte financeiro.

Ao apoio da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal em nome do Coordenador Geral de Articulação e Implementação de Planos e Programas e Coordenador do Programa Água Boa, Dr. Herbert Eugênio de Araújo Cardoso.

RESUMO

O presente trabalho visa estudar o desempenho de um reator eletrodialítico bipolar para obtenção de uma solução alcalina a partir de seu respectivo sal. Dois modelos de sistema de fluxos de alimentação foram testados, com e sem o uso do reciclo do concentrado durante o processo. Para avaliar os sistemas foram estudados os seguintes parâmetros; condutividade elétrica do produto e do concentrado, densidade de corrente, resistência ôhmica, eficiência de corrente, consumo de energia prático e potencial elétrico aplicado. De acordo com os resultados obtidos a partir da eficiência de corrente durante o processo, observou-se que o reator apresentou melhor desempenho sem uso do reciclo do concentrado para uma diferença de potencial elétrico aplicada de 50 volts e com o reciclo a 40 volts.

ABSTRACT

The present work has the objective to study the performance of a bipolar electro-dialytic reactor, in order to obtain an alkaline solution from its respective salts. Two models of feed systems were studied. One with concentrated recycle and the other without recycle. To evaluate the systems, the following parameters were analysed; electric conductivity of the product and concentrate, current density, ohmic resistance, current efficiency, practical energy consumption and required electrical power. According with the results from efficiency current during the process the electrical power of 50 volts to the system without recycle and of 40 volts with recycle presented the best performance of the reactor.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - FUDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1 - O PRINCÍPIO DA ELETRODIÁLISE.....	4
2.2 - PRINCÍPIO DA DISSOCIAÇÃO ELETRODIALÍTICA DA ÁGUA COM MEMBRANAS BIPOLARES.....	6
2.3 - MEMBRANAS ELETRODIALÍTICAS.....	9
2.3.1 - Membranas Monopolares.....	9
2.3.2 - Membranas Bípolaras.....	11
2.4 - ELETRODOS.....	16
2.5 - ESPAÇADORES.....	17
2.6 - DENSIDADE DE CORRENTE.....	18
2.7 - EFICIÊNCIA DE CORRENTE.....	20
2.8 - RESISTÊNCIA ÔHMICA.....	22
2.9 - CONSUMO DE ENERGIA.....	25
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 - MATERIAL UTILIZADO.....	27
3.2 - SISTEMA ELETRODIALÍTICO.....	27
3.2.1 - Reator Eletrodialítico.....	27
3.2.2 - Alimentação Elétrica.....	30
3.2.3 - Reator de Degaseificação.....	30
3.2.4 - Sistema Hidráulico.....	30
3.2.5 - Unidades de Registro.....	31
3.3 - METODOLOGIA.....	32
3.3.1 - Modelos de Fluxo de Alimentação.....	33
3.3.2 - Fluxo de Lavagem.....	34
3.3.3 - Dados Experimentais.....	34
3.3.4 - Calibração das Unidades de Registro.....	37
3.3.5 - Conversão da Condutividade para Concentração.....	38

3.3.6 - Densidade de Corrente	39
3.3.7 - Eficiência de Corrente	39
3.3.8 - Resistência Ôhmica	39
3.3.9 - Consumo de Energia	39
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 - COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	40
4.2 - VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE HIDROGÊNIO	56
4.3 - DENSIDADE DE CORRENTE E EFICIÊNCIA DE CORRENTE.....	74
4.4 - EFICIÊNCIA DE CORRENTE E CONSUMO DE ENERGIA	91
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	95
CAPÍTULO 6 - PERSPECTIVAS	97
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema eletrodialítico convencional.....	4
Figura 2.2: Sistema eletrodialítico para produção de ácidos e bases, a partir de seus correspondentes sais.....	6
Figura 2.3: Sistema eletrodialítico alternativo para produção de bases.....	7
Figura 2.4: Estrutura e funcionamento da membrana bipolar.....	12
Figura 2.5: Processos que ocorrem na eletrodialise com membranas bipolares.....	22
Figura 3.1: Sistema eletrodialítico.....	28
Figura 3.2: Esquema de um reator eletrodialítico composto de 2 células, para a geração de ácido e base a partir de uma solução salina.....	32
Figura 3.3: Modelo de fluxo de alimentação FA1.....	33
Figura 3.4: Modelo de fluxo de alimentação FA2.....	34
Figura 4.1: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2$ mS/cm (900 ppm); $K_h = 5,96$ μ S/cm; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $V = 36$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	42
Figura 4.2: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9$ mS/cm (6000 ppm); $K_h = 0,13$ mS/cm; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $V = 36$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	42
Figura 4.3: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 4,87$ μ S/cm; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $V_i = 38$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	43
Figura 4.4: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15$ mS/cm (1000 ppm); $K_h = 44,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	45
Figura 4.5: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3$ mS/cm (1500 ppm); $K_h = 63,4$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	45
Figura 4.6: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 23,9$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	46
Figura 4.7: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	46
Figura 4.8: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 26,6$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C.....	47

Figura 4.9: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 36,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	47
Figura 4.10: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 47,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	48
Figura 4.11: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15$ mS/cm (1000 ppm); $K_h = 19$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	48
Figura 4.12: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3$ mS/cm (1500 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	49
Figura 4.13: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 22,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	49
Figura 4.14: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 24,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	50
Figura 4.15: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 32,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	50
Figura 4.16: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	51
Figura 4.17: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 39$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	51
Figura 4.18: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 54,5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	53
Figura 4.19: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 45,5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	53
Figura 4.20: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 48,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	54
Figura 4.21: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 46,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	54

Figura 4.22: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	55
Figura 4.23: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	55
Figura 4.24: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm); $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	56
Figura 4.25: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	57
Figura 4.26: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	57
Figura 4.27: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	61
Figura 4.28: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	61
Figura 4.29: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	62
Figura 4.30: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	62
Figura 4.31: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	63
Figura 4.32: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	63
Figura 4.33: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	64
Figura 4.34: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.	64

Figura 4.35: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	65
Figura 4.36: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 22,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	65
Figura 4.37: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 24,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	66
Figura 4.38: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 32,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	66
Figura 4.39: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	67
Figura 4.40: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	67
Figura 4.41: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA1.....	68
Figura 4.42: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	70
Figura 4.43: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	70
Figura 4.44: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	71
Figura 4.45: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	71
Figura 4.46: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	72
Figura 4.47: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	72

Figura 4.48: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA2.....	73
Figura 4.49: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm), $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Figura 4.50: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Figura 4.51: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 38 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	76
Figura 4.52: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	80
Figura 4.53: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	80
Figura 4.54: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	81
Figura 4.55: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	81
Figura 4.56: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	82
Figura 4.57: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	82
Figura 4.58: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	83
Figura 4.59: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	83
Figura 4.60: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	84

Figura 4.61: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 22,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	84
Figura 4.62: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 24,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	85
Figura 4.63: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 32,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	85
Figura 4.64: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	86
Figura 4.65: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 39$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	86
Figura 4.66: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	88
Figura 4.67: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 45,5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	88
Figura 4.68: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 36,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	89
Figura 4.69: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	89
Figura 4.70: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 48,3$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	90
Figura 4.71: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 36,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ $^{\circ}$ C.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Características físico-químicas das membranas eletrodialíticas utilizadas (Asahi Chemical Ind. Co.)	29
Tabela 3.2: Unidades de registro do sistema.....	31
Tabela 3.3: Distribuição das bateladas para o reator MR1.....	36
Tabela 3.4: Parâmetros de ajustes para as curvas de calibração dos rotômetros.....	38
Tabela 4.1: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,96 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$ (#); $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	104
Tabela 4.2: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$, (*) $V = 40 \text{ V}$, (#) $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	104
Tabela 4.3: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 19 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	105
Tabela 4.4: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 25,2 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	106
Tabela 4.5: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 22,2 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	106
Tabela 4.6: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 24,7 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	107
Tabela 4.7: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 32,1 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	108
Tabela 4.8: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 5 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	109
Tabela 4.9: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 39 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	110
Tabela 4.10: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 46,7 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	111
Tabela 4.11: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 48,3 \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	113

Tabela 4.12: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*), $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	114
Tabela 4.13: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$ (#); $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	115
Tabela 4.14: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$, (*) $V = 40 \text{ V}$, (#) $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	116
Tabela 4.15: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR1.	58
Tabela 4.16: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	117
Tabela 4.17: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).	119
Tabela 4.18: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 22,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2$.	120
Tabela 4.19: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 24,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	121
Tabela 4.20: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 32,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	122
Tabela 4.21: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	123
Tabela 4.22: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2$.	125
Tabela 4.23: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA1.	126
Tabela 4.24: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 46,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	127
Tabela 4.25: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	129

Tabela 4.26: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	131
Tabela 4.27: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA2.	132
Tabela 4.28: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm); $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	133
Tabela 4.29: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$; $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	134
Tabela 4.30: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V_i = 38 \text{ V}$, (*) $V = 40 \text{ V}$, (#) $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	135
Tabela 4.31: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	136
Tabela 4.32: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	137
Tabela 4.33: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	138
Tabela 4.34: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	139
Tabela 4.35: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	140
Tabela 4.36: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 1,2 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	141
Tabela 4.37: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	142
Tabela 4.38: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	144
Tabela 4.39: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	145

Tabela 4.40: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 22,2$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	146
Tabela 4.41: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 24,7$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	147
Tabela 4.42: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 32,1$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	148
Tabela 4.43: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 5$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	149
Tabela 4.44: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 39$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	151
Tabela 4.45: Concentrações de sódio e cloro no produto e no concentrado para o MR2 e FA1, sob uma diferença de potencial de 40 volts.....	79
Tabela 4.46: Concentrações de sódio e cloro no produto e no concentrado para o MR2 e FA1, sob uma diferença de potencial de 50 volts.....	79
Tabela 4.47: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 54,5$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	152
Tabela 4.48: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 45,5$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	154
Tabela 4.49: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 48,1$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	156
Tabela 4.50: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 46,7$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	158
Tabela 4.51: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 48,3$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	160
Tabela 4.52: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 68$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C.....	162
Tabela 4.53: Eficiência de corrente em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR1.....	91
Tabela 4.54: Eficiência de corrente em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2.....	92

Tabela 4.55: Consumo de energia em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR1.....	93
Tabela 4.56: Consumo de energia em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2.....	93

SIMBOLOGIA

- a - coeficiente linear (Equação 3.1)
- A_e - área efetiva da membrana (cm^2)
- a^{\pm} - atividade dos íons H^+ e OH^- na interface da membrana
- b - coeficiente angular (Equação 3.1)
- C - concentração da solução (ppm)
- C_a - concentração da solução de alimentação (ppm)
- c_i - concentração do íon i (mol/cm^3)
- C_p - concentração do produto (eq-g/l)
- D_i - coeficiente de difusão do íon i (cm^2/s)
- E - consumo de energia (Wh)
- E_p - consumo de energia prático (kWh/m^3)
- F - constante de Faraday (Coulomb/eq-g)
- I - corrente lida (A)
- J - densidade de corrente (mA/cm^2)
- k - condutividade elétrica (mho/cm)
- K - condutividade elétrica (mS/cm)
- K_a - condutividade elétrica da solução de alimentação (mS/cm)
- K_h - condutividade elétrica da água destilada ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- K_w - constante de dissociação da água
- N - numeração na escala do rotâmetro
- n - número de células eletrodialíticas
- N_i - fluxo iônico da espécie i ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
- Q - vazão de alimentação (l/h)
- Q_a - vazão de alimentação da solução salina (l/h)
- Q_h - vazão de alimentação da água destilada (l/h)
- Q_p - vazão do produto (l/h)
- R - constante dos gases ideais ($\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$)
- R_S - resistência oferecida pela camada limite na superfície da membrana (ohm)
- R_A - resistência da solução ácida (ohm)
- R_B - resistência da solução básica (ohm)

R_c - resistência da célula bipolar (ohm)
 R_c - resistência da solução concentrada (ohm)
 R_d - resistência da solução diluída (ohm)
 R_{MA} - resistência da membrana aniônica (ohm)
 R_{MB} - resistência da membrana bipolar (ohm)
 R_{MC} - resistência da membrana catiônica (ohm)
 R_p - resistência de um par de célula (ohm)
 R_s - resistência da solução salina (ohm)
 R_t - resistência total do sistema (ohm)
 T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
 t - tempo (s)
 T_a - temperatura absoluta (K)
 u_i - mobilidade iônica ($\text{mol}\cdot\text{cm}^2/\text{J}\cdot\text{s}$)
 V - potencial elétrico aplicado aos eletrodos (volts)
 v - velocidade de escoamento em cm/s
 V_i - potencial elétrico inicial aplicado aos eletrodos (volts)
 z_i - valência da espécie iônica

Letras gregas

ε - eficiência de corrente (%)
 ΔC - diferença entre a concentração da alimentação e da saída do reator (mol/cm^3)
 ∇E - campo elétrico (volts/cm)
 ΔG - energia livre reversível (kWh)
 λ_i - condutância iônica da espécie i ($\text{cm}^2/\text{ohm}\cdot\text{eq}\cdot\text{g}$)
 ΔU - diferença de potencial elétrico (volts)

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A caminho do próximo milênio, a humanidade influenciada pela crescente consciência ecológica dos últimos anos, cada vez mais se depara com um problema enfrentado durante décadas pelas indústrias químicas. O que fazer com o subproduto gerado num dado processo químico? A resposta seria a obtenção de um novo produto a baixo custo que pudesse ser aproveitado para outros fins, evitando que esse subproduto venha a ser desprezado no meio ambiente. Uma das tecnologias que vem destacando-se no universo de membranas, sendo usada a nível mundial nesse sentido é a eletrodialise.

A eletrodialise é um processo de separação eletroquímica no qual membranas semipermeáveis e uma diferença de potencial são usadas para separar espécies iônicas de uma solução aquosa. Atualmente esse processo é amplamente utilizado para dessalinizar águas salobras e em alguns países é o principal processo na produção de água potável. Embora a dessalinização de águas e a produção de sal sejam as mais importantes aplicações, existem outros empregos significantes para a eletrodialise [Leitz, 1976; Leitz & Eisenmann, 1981]. Estimuladas pelo desenvolvimento de novas membranas com melhor seletividade, baixa resistência elétrica, e melhores propriedades térmicas, químicas e mecânicas, outras aplicações da eletrodialise, especialmente nas indústrias de alimentos, farmacêuticas e de processos químicos bem como em biotecnologia e tratamento de efluentes, tem obtido um amplo campo de interesse mundial [Korngold, 1984; Escudier, Cottreau, & Moutounet, 1989]. A eletrodialise também tem se destacado recentemente, na produção de ácidos e bases a partir de seus respectivos sais, nesse caso com a utilização de membranas bipolares [Mani, 1991], como é o caso da obtenção de uma solução de hidróxido de sódio e ácido clorídrico, oriundas de uma solução saturada de cloreto de sódio. Esse tipo de membrana promove eletricamente uma acelerada dissociação da molécula da água fazendo com que os íons livres (H^+ e OH^-) se combinem com os ânions ou cátions presentes na solução.

Em muitas aplicações, a eletrodialise compete diretamente com outros processos de separação [Strathmann, 1992], como por exemplo, a osmose inversa na dessalinização de águas salobras. Entretanto, é um processo conhecido por mais de um século e a produção em

escala industrial iniciou-se na década de 60. A eletrodialise clássica foi desenvolvida nos anos 50, apesar disso, o principal aspecto desenvolvido foi o processo de inversão de polaridade, conhecido como eletrodialise inversa [Katz, 1979]. As unidades mais modernas operam com polaridade inversa, que consiste em trocar periodicamente as funções dos eletrodos, com o objetivo de prevenir incrustações nas membranas. O último desenvolvimento importante na eletrodialise foi a aplicação das membranas bipolares na recuperação de efluentes industriais e controle de poluição [Mani, 1991; Scott, 1990].

O processo da eletrodialise vem sendo estudado pelo laboratório de dessalinização da Universidade Federal da Paraíba, tendo em vista a grande carência de água potável na região Nordeste. As fontes naturais existentes geralmente são provenientes de poços tubulares, onde na maioria das vezes tratam-se de águas impróprias para o consumo humano, animal e irrigação. O primeiro reator eletrodialítico desenvolvido apresentava um fluxo linear no seu interior [Vilar, 1989]. O segundo protótipo construído apresentava modificações nos compartimentos de lavagem dos eletrodos, no tipo de espaçador e no percurso do fluxo de água no interior do reator, apresentando um caminho de fluxo do tipo serpentina ao longo do reator [Farias Neto, 1992]. Em seguida, foi desenvolvido um terceiro protótipo no qual foi utilizado dois tipos de fluxo no interior do reator: primeiro o fluxo tortuoso e depois o fluxo linear [Reges, 1995]. Outros reatores já foram construídos para dessalinização de colágeno hidrolizado [Cavalcanti, 1991] e do soro do leite [Arruda, 1996]. Atualmente, o laboratório além de estudar essa tecnologia conta com projetos e desenvolvimentos de plantas piloto para dessalinização de água salobra via osmose inversa.

Todo processo de dessalinização produz água potável (diluído) e um concentrado (rejeito) contendo uma grande concentração de sólidos dissolvidos. A liberação insensata deste concentrado salino no meio ambiente, apresenta-se atualmente como uma fonte inibidora e esterilizadora de solos. A quantidade de concentrado produzido depende da qualidade da água a ser dessalinizada e das características do processo empregado. Apesar de existirem várias técnicas para evitar que o mesmo não venha atacar o meio ambiente, não se tem encontrado uma técnica viável para gerar um produto que possa ser aproveitado pela comunidade.

Os métodos conhecidos para distribuição do concentrado são praticamente os mesmos, para a eletrodialise e a osmose inversa, entretanto, o total de sólidos dissolvidos no concentrado da eletrodialise podem ser bastante superiores ao da osmose inversa. Entre as técnicas de distribuição podemos citar: disposição no mar, evaporação, distribuição em tanques de água salgada, injeção em poços profundos, etc. [Schutte, 1983; Andrews & Witt, 1993]

Um reator eletrodialítico constituído de membranas monopolares e bipolares, foi desenvolvido para estudar seu desempenho na obtenção de uma solução alcalina a partir de seu respectivo sal, visando utilizar esta técnica no aproveitamento do concentrado gerado na dessalinização de águas salobras. A avaliação do reator foi realizada através da variação do pH e da condutividade dos efluentes produzidos, em função da concentração da solução de alimentação e do potencial elétrico aplicado. Em função da concentração do afluente, também pode ser analisado a densidade de corrente, a resistência ôhmica, a eficiência de corrente e o consumo de energia durante o processo.

CAPÍTULO 2 - FUDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - O PRINCÍPIO DA ELETRODIÁLISE

O princípio da eletrodialise baseia-se numa série de membranas catiônicas e aniônicas arranjadas alternadamente entre dois eletrodos, como é mostrado na Figura 2.1. Cada membrana é separada, uma da outra, por espaçadores formando compartimentos individuais. Quando uma solução iônica é bombeada através desses compartimentos sob efeito de uma diferença de potencial entre os eletrodos, os cátions migrarão para o cátodo, atravessando a membrana catiônica e em seguida serão retidos pela membrana aniônica. Por outro lado, os ânions tomam o caminho oposto em direção ao ânodo, após atravessar a membrana aniônica ficarão retidos pela membrana catiônica. O resultado final será um aumento da concentração de íons em compartimentos alternados e uma redução na concentração dos íons nos compartimentos restantes, resultando na formação de duas correntes: uma diluída e outra concentrada [Strathmann, 1992]. A eletrodialise é portanto uma operação unitária na qual a separação parcial dos componentes de uma solução iônica é induzida por uma corrente elétrica em função da quantidade de íons dissolvidos no meio [Shaffer & Mintz, 1966].

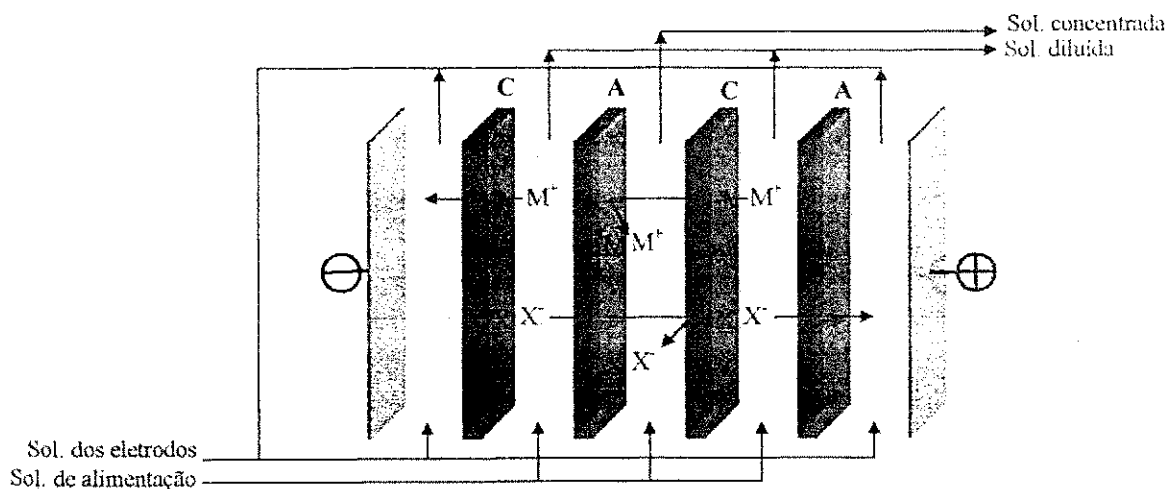


Figura 2.1: Sistema eletrodialítico convencional (C = membrana catiônica e A = membrana aniônica).

Em virtude das diferenças de mobilidade dos íons, moléculas ou partículas quando submetidos a um campo elétrico, a eletrodialise pode ser utilizada em diversos tipos de separação, tais como: remoção de eletrólitos de uma solução aquosa (dessalinização de águas), separação e concentração de sais, ácidos e bases em soluções aquosas, separação de íons monovalentes dos íons polivalentes e separação de eletrólitos de compostos moleculares sem carga. Com pequenas modificações, a eletrodialise também pode ser usada para separar misturas de aminoácidos [Strathmann, 1992], bem como produzir ácidos e bases a partir de soluções salinas, através da dissociação da água com membranas bipolares [Mani, 1991].

Numa solução eletrolítica, a migração da espécie iônica devido a ação de um campo elétrico, trata-se de um mecanismo adicional no transporte de massa [Perry & Green, 1984]. O fluxo de uma espécie iônica N_i em $\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ é dado por:

$$N_i = -z_i \cdot u_i \cdot F \cdot c_i \cdot \nabla E - D_i \cdot \nabla c_i + c_i \cdot v \quad (2.1)$$

Onde: z_i = valência da espécie iônica.

u_i = mobilidade iônica, ou seja, é a velocidade média das partículas sob a ação de um campo elétrico unitário em $\text{mol} \cdot \text{cm}^2/\text{J} \cdot \text{s}$.

F = constante de Faraday em coulomb/eq-g.

c_i = concentração em mol/cm^3 .

∇E = campo elétrico em volts/cm.

D_i = coeficiente de difusão do íon i em cm^2/s .

v = velocidade de escoamento em cm/s .

$z_i \cdot u_i \cdot F \cdot c_i \cdot \nabla E$ = fluxo da espécie iônica sob ação do campo elétrico.

$D_i \cdot \nabla c_i$ = fluxo difusivo.

$c_i \cdot v$ = fluxo convectivo.

Os termos da difusão e convecção na Equação 2.1 são os mesmos para a transferência de massa dos não-eletrólitos. A mobilidade iônica u_i ($\text{mol} \cdot \text{cm}^2/\text{J} \cdot \text{s}$) pode ser relacionada ao coeficiente de difusão do íon D_i (cm^2/s) e a condutância iônica da espécie i , λ_i ($\text{cm}^2/\text{ohm} \cdot \text{eq-g}$) pela Equação 2.2 [Perry & Green, 1984].

$$u_i = \frac{D_i}{R \cdot T_a} = \frac{\lambda_i}{|z_i| \cdot F^2} \quad (2.2)$$

Onde: R = constante dos gases ideais em J/mol.K.

T_a = temperatura absoluta em K.

2.2 - PRINCÍPIO DA DISSOCIAÇÃO ELETRODIALÍTICA DA ÁGUA COM MEMBRANAS BIPOLARES

Esta tecnologia utiliza membranas eletrodialíticas para separar e concentrar constituintes ácidos e básicos de uma solução salina. O elemento chave neste processo é a membrana bipolar que é composta de duas camadas distintas seletivas à íons de carga oposta [Mani, Chlanda & Byszewski, 1988]. A Figura 2.2 mostra uma célula de três compartimentos usada para dissociação eletrodialítica da água.

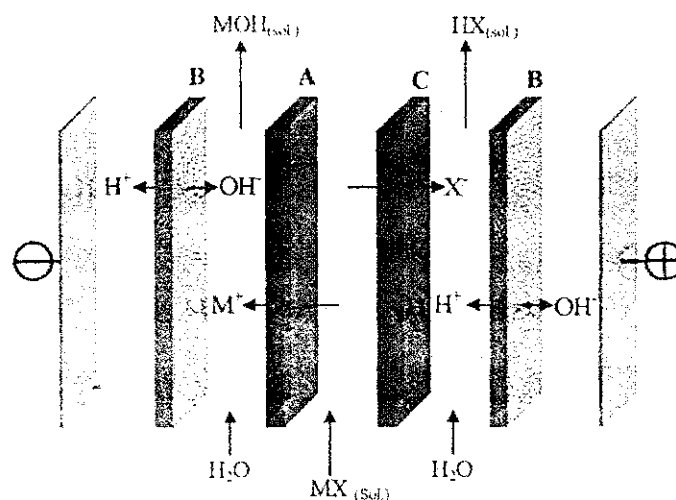


Figura 2.2: Sistema eletrodialítico para produção de ácidos e bases, a partir de seus correspondentes sais (B = membrana bipolar, A = membrana aniônica e C = membrana catiônica).

Para a produção de ácidos e bases, membranas monopolares (catiônicas e aniônicas) são usadas em conjunto com as membranas bipolares. Sob o efeito de um campo elétrico, a água difunde na membrana bipolar e se dissocia em íons H^+ e OH^- , que são transportados através das camadas seletivas a cátions e ânions, para os compartimentos vizinhos à membrana bipolar. A solução salina é alimentada no compartimento entre as membranas monopolares, onde os cátions e ânions migrarão através das membranas catiônicas e aniônicas, conforme a definição da eletrodialise, para se combinarem com os íons hidrogênio e hidroxila. A acidificação e basificação desses compartimentos é o resultado final.

A alimentação para os compartimentos ácido, básico e salino é realizada através de canais internos que distribuem os fluxos. Para uma operação comercial, são necessárias cerca de 200 células as quais são montadas entre um simples par de eletrodos.

A geração de novos produtos distingue a dissociação eletrodialítica da água da eletrodialise convencional [Mani, 1991]. Se apenas um dos produtos precisa ser obtido, o ácido ou a base, a célula poderá ser simplificada para uma unidade de dois compartimentos, conforme mostra a Figura 2.3. Nesse caso, o compartimento ácido forneceria uma mistura de ácido e sal não convertido.

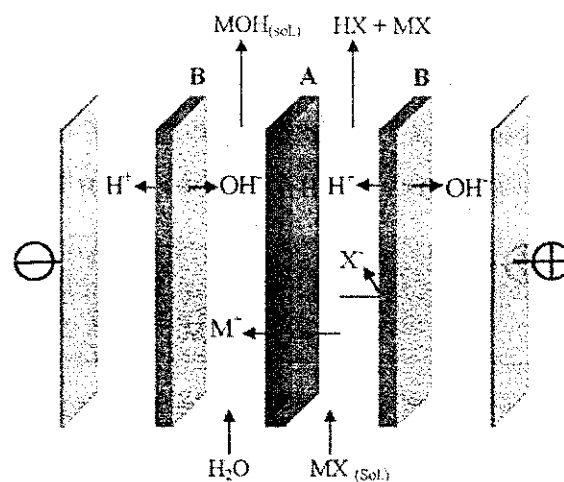


Figura 2.3: Sistema eletrodialítico alternativo para produção de bases (B = membrana bipolar e A = membrana aniônica).

Sais como NaCl, KCl, Na₂SO₄, NaNO₃, etc., ocorrem freqüentemente em efluentes industriais e podem ser convertidos em seus respectivos ácidos e bases com a eletrodialise bipolar. Várias aplicações tem sido descritas, entre as quais podemos citar:

1. A regeneração da solução de decapagem (HF e HNO₃) consumida na manufatura do aço inoxidável. Uma vez gasta, essa solução é neutralizada com hidróxido de potássio e perigosamente descartada, por possuir uma grande quantidade de sais de metais pesados. Através da eletrodialise bipolar os ácidos fluorídrico e nítrico são recuperados juntamente com o hidróxido de potássio. Terra diatomácea é adicionada ao processo para auxiliar na sedimentação dos hidróxidos dos metais (Fe(OH)₃, Cr(OH)₃ e Ni(OH)₂) que são reciclados para o processamento do aço [Byszewski & Bogeatzes, 1988; McArdle, Piccari & Thornburg, 1991].
2. Nas indústrias de papel e celulose a eletrodialise com membranas bipolares vem sendo utilizada na recuperação do hidróxido de sódio fortemente usado na fabricação e branqueamento do papel [Paleologou, Berry & Fleming, 1994].
3. A produção de ácido sulfúrico e soda caustica a partir do sulfato de sódio [Raucq, Pourcelly & Gavach, 1993]. Tendo como aplicações: a recuperação de ácido de bateria e conversão do sulfato de sódio usado na manufatura do rayon [Mani, 1991].
4. Na biotecnologia a mais promissora aplicação das membranas bipolares é na recuperação e produção de ácidos orgânicos tais como, ácido acético [Jeffries et al., 1979], ácido cítrico [Novalic, Okwor & Kulbe, 1996], ácido propanóico [Boyaval, Seta & Gavach, 1993], ácido itacônico [Strathmann, 1993], ácido fórmico e aminoácidos [Mani, 1991].
5. Uma nova classe de aplicações vem sendo desenvolvida na purificação e concentrações de ácidos e bases, baseado no reconhecimento de que a membrana bipolar pode atuar com alta seletividade à cátions e ânions, permitindo a obtenção de produtos com graus de purificação e concentração maiores do que os obtidos pela eletrodialise convencional [Chiao, Chlanda & Mani, 1991].

As membranas são resinas de troca iônica na forma de filme contendo cerca de 30 a 50 % de água, com poros tão pequenos que não permitem passagens significativas de água, somente permite a passagem de íons [Applegate, 1984].

Para manter a neutralidade elétrica, cada um dos grupos fixados na membrana deve ser associado a um íon de carga oposta, ou seja, o contra-íon. Isto permite que o contra-íon possa mover-se livremente passando de um lado para o outro através da membrana, enquanto que íons de mesma carga que os grupos fixados nas membranas, ou seja, os co-íons, sejam impedidos de passarem pela membrana [Applegate, 1984]. Este impedimento, resultante da repulsão eletrostática, é denominado de princípio da exclusão de Donnan [Donnan & Guggenheim, 1932].

A seletividade das membranas resulta da exclusão dos co-íons. Quando uma membrana catiônica é exposta a uma solução de um eletrólito forte, a concentração dos cátions é geralmente maior na membrana do que na solução, isto porque os cátions são atraídos pelos íons de carga negativa fixados na membrana. Por outro lado, a concentração de ânions é maior na solução do que na membrana [Strathmann, 1992].

As membranas seletivas aos cátions têm a sua matriz geralmente feita de poliestireno de cadeia cruzada que é sulfonada com grupos sulfônicos ($-\text{SO}_3^-$) presos ao polímero. As membranas aniônicas são de poliestireno de cadeia cruzada contendo grupos de amônia quaternária ($-\text{NR}_3^+$) presos ao polímero.

As propriedades mais importantes das membranas são a seletividade aos íons e a resistência elétrica, mas existem outras propriedades relevantes, que devem satisfazer as condições de operação na eletrodialise. Abaixo estão relacionadas as principais propriedades e características das membranas de troca iônica:

1. Alta permeseletividade: A membrana deve ser altamente permeável para o contra-íon, mas ser impermeável ao co-íon.

2. Baixa resistência elétrica: A passagem do contra-íon sob as condições do gradiente do potencial elétrico deve ser tão alto quanto possível.
3. Alta estabilidade química: Deve ser estável na faixa de PH de 0 a 14, bem como na presença de agentes oxidantes [Strathmann, 1992].
4. Alta estabilidade física, térmica e mecânica: A membrana deve ter uma estrutura forte e maleável facilitando o manuseamento durante a montagem da unidade eletrodialítica, suportar a expansão osmótica devido aos gradientes de concentração entre 220 e 30000 ppm, bem como oferecer condições de trabalho em temperaturas acima de 46 °C [Meller, 1984].
5. Resistência a oxidação: Deve ser bastante resistente, principalmente para as membranas próximas ao eletrodo [Shaffer & Mintz, 1966].

2.3.2 - MEMBRANAS BIPOLARES

As membranas bipolares tem se destacado recentemente como uma eficiente ferramenta para produção de ácidos e bases a partir de seus correspondentes sais, devido a capacidade de promover eletricamente uma acelerada dissociação da molécula da água [Strathmann, 1992]. O processo que já é bastante difundido, é economicamente viável e tem um grande número de interessantes aplicações técnicas [Liu, Chlanda & Nagasubramanian, 1977]. Até o momento, entretanto, o uso de membranas bipolares em larga escala técnica tem sido até certo ponto limitado pela disponibilidade de membranas eficientes.

A principal estrutura de uma membrana bipolar e sua função é ilustrada na Figura 2.4. Esta figura mostra uma membrana catiônica e uma membrana aniônica dispostas em paralelo entre dois eletrodos, semelhante a eletrodialise convencional. Se uma solução de cloreto de sódio é colocada entre estas membranas e uma diferença de potencial é aplicada, todas as espécies iônicas serão removidas da solução. Quando não houver íons sódio e cloro na solução o transporte de cargas elétricas através das membranas é realizado exclusivamente

pelos prótons e íons hidroxila, os quais estão dispostos na água pura numa concentração de 10^{-7} mol/l, devido ao equilíbrio de dissociação da água. Se a dissociação da água for contínua, uma solução alcalina é formada do lado da membrana aniônica e uma solução ácida é formada do lado da membrana catiônica, na membrana bipolar.

As membranas bipolares podem ser preparadas pela simples justaposição das convencionais membranas catiônica e aniônica, dispostas uma atrás da outra [Leitz, 1972]. A diferença de potencial total depende da densidade de corrente aplicada, da resistência das duas membranas e da resistência da solução entre elas. Devido a resistividade da água destilada ser muito alta, a distância entre as membranas de polaridades opostas deve aproximar-se de zero. As membranas bipolares, frequentemente, não apresentam uma estabilidade química satisfatória para altos valores de pH e algumas vezes a capacidade de dissociação da molécula da água decresce [Strathmann, 1992].

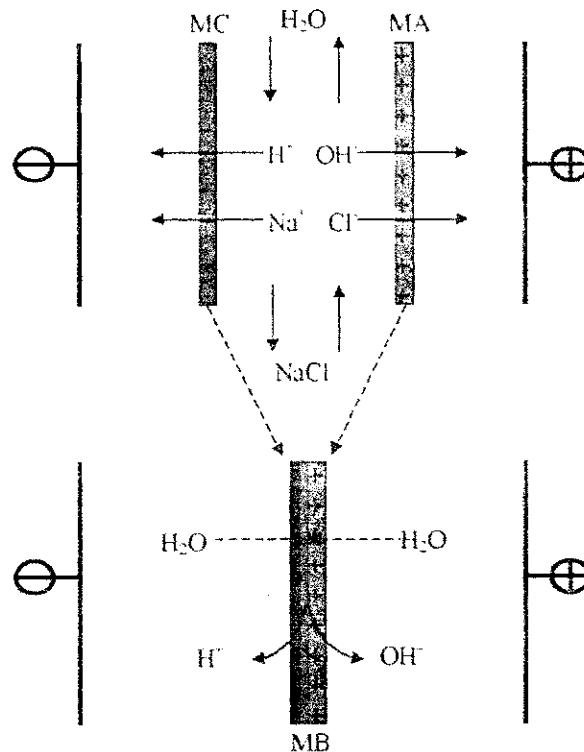


Figura 2.4: Estrutura e funcionamento da membrana bipolar (MB = membrana bipolar, MA = membrana aniônica e MC = membrana catiônica).

Existem dois tipos de membranas bipolares produzidas atualmente: a membrana bipolar simples e a de múltiplas camadas.

As membranas bipolares simples são preparadas mediante a aplicação de uma cobertura seletiva a cátions numa membrana aniônica previamente preparada [Bauer, Gerner & Strathmann, 1988].

As membranas bipolares com múltiplas camadas são fabricadas através da junção das membranas catiônicas e aniônicas. Uma camada especial na interface, conduz a uma perfeita membrana bipolar [Leitz, 1972].

Para uma operação eficiente, a membrana deve possuir uma boa permeabilidade à água, da solução até a interface das duas camadas de carga opostas e a espessura da interface deve ser a menor possível, dessa forma haverá uma pequena resistência ao transporte dos íons H^+ e OH^- . Portanto, a taxa de produção é limitada pela taxa de difusão da água na membrana [Davis, 1988].

Além disso, em aplicações práticas a membrana bipolar deveria, não somente, ter uma boa estabilidade química, como também, adequadas capacidades de dissociação das moléculas da água. Na literatura, estudos mostram que a dissociação da água em contato com a membrana bipolar é bem maior do que na água pura, em densidades de corrente em excesso de 1 mA/cm^2 . As razões para esta acelerada dissociação não foram completamente verificadas. Entretanto, evidências experimentais sustentam fortemente a hipótese de que é causada pela reação reversível de transferência do próton entre os grupos iônicos (positivos e negativos) da membrana e as moléculas de água na superfície da mesma [Strathmann, Bauer & Rapp, 1993].

Vários mecanismos foram sugeridos para explicar a acelerada dissociação da água na membrana bipolar. Dentre estes mecanismos, Strathmann et al (1993), considerou dois:

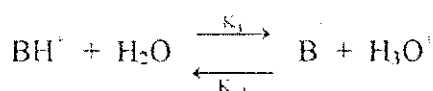
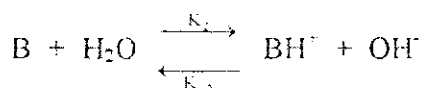
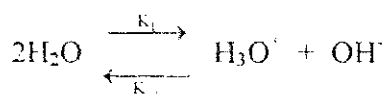
1. Os efeitos do campo elétrico.

2. A influência da superfície iônica nos limites da interface.

O primeiro mecanismo sugere que a taxa de dissociação da água aumenta significativamente com o aumento do campo elétrico. Enquanto que, o outro mecanismo sugere que a acelerada dissociação da água ocorre devido as reações reversíveis do próton com os grupos iônicos da membrana bipolar e as moléculas da água, que encontram-se nos limites da interface das duas camadas de cargas opostas.

Na membrana bipolar, os grupos positivos e negativos da matriz polimérica, podem reagir com as moléculas da água. Entretanto a dissociação inicia-se primeiro na superfície aniônica da interface.

As reações que ocorrem na zona da interface são as seguintes:



Onde: B = grupo básico neutro como R_3N .

BH^+ = grupo iônico como R_3NH^+ .

Para verificar este mecanismo Strathmann et al (1993), estudou dois parâmetros: a concentração da base neutra (NH_3) e a difusividade da água na membrana. Através de observações, concluiu-se que o aumento da concentração da base neutra na interface e o aumento do coeficiente de difusão da membrana aumentam consideravelmente a taxa de dissociação da água na membrana.

A densidade de corrente é limitada pela difusão da água na membrana. Diante dessas condições, a difusão da água na membrana seria o passo determinante para a reação de

dissociação. Entretanto, a taxa de difusão da água nos polímeros de interesse é na faixa de 2×10^{-10} m²/s. Dessa forma, a presença e a concentração do grupo da base neutra na interface da membrana determina a taxa de dissociação da água na membrana [Strathmann, Bauer & Rapp, 1993].

A energia livre reversível requerida para a geração de um mol do produto à 1 N, através de uma membrana bipolar ideal (permeabilidade perfeita), à temperatura e pressão constante é dada pela Equação 2.3 [Mani, 1991]

$$\Delta G = -R \cdot T_a \cdot \ln(a_{H^+}^i \cdot a_{OH^-}^i) = -R \cdot T_a \cdot \ln K_w \quad (2.3)$$

Onde: ΔG = energia livre reversível em J/mol.

R = constante dos gases ideais em J/mol.K.

T_a = temperatura absoluta em K.

a^i = atividade dos íons H^+ e OH^- na interface.

K_w = constante de dissociação da água.

Para soluções normais de ácidos e bases à 25 °C, a energia livre reversível é de 0,0222 kWh e o potencial teórico necessário é de 0,83 volts. O potencial teórico pode ser calculado pela Equação 2.4 (equação de Nernst).

$$\Delta G = -F \cdot \Delta U = -R \cdot T_a \cdot \ln K_w \quad (2.4)$$

Onde: F = constante de Faraday em coulomb/mol.

ΔU = diferença de potencial elétrico em volts.

A diferença de potencial real através das membranas bipolares é geralmente maior do que a calculada teoricamente, devido aos efeitos irreversíveis da resistência elétrica oferecida pela membrana. Em compensação, a produção de ácidos e bases via eletrólise convencional, requer uma quantidade maior de energia, devido a produção dos gases H_2 e O_2 durante o processo [Strathmann, Bauer & Rapp, 1993]. Além disso, as membranas bipolares são mais econômicas comparadas aos eletrodos utilizados nas células eletrolíticas convencionais, já que

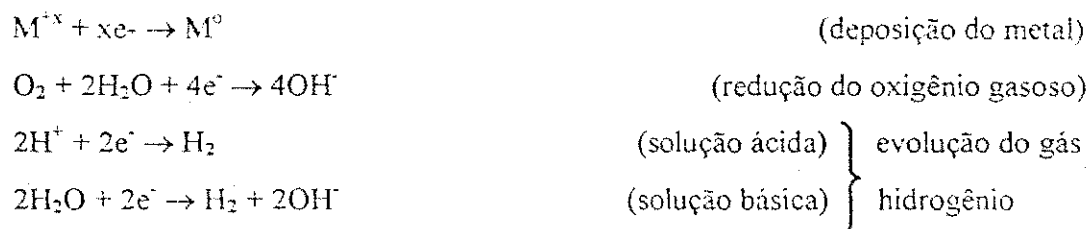
cerca de 200 células eletrodialíticas podem ser acomodadas num simples par de eletrodos [Davis, 1988].

2.4 - ELETRODOS

Na eletrodialise, a força motriz para o transporte dos íons é um gradiente de potencial elétrico. O gradiente de potencial, originado de uma fonte de energia externa, é aplicado aos eletrodos localizados nas extremidades do reator, promovendo a passagem de uma corrente elétrica contínua.

A corrente elétrica que flui externamente é devido ao fluxo de elétrons nos fios condutores, enquanto que, no interior do reator a corrente é eletrolítica, ou seja, devido a migração dos íons na solução. Essa transferência de elétrons do circuito externo para os íons na solução é realizada através das reações que ocorrem nos eletrodos [Davis, 1988].

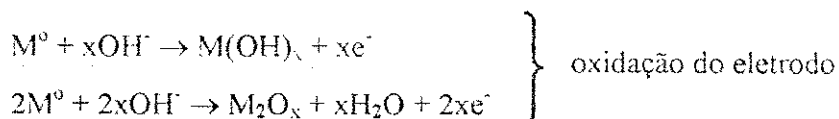
No catodo, as reações observadas são:



A primeira reação é comum na eletro galvanização, mas é indesejável na eletrodialise. A evolução do gás hidrogênio ou a produção de íons hidroxila são freqüentes nos catodos dos reatores eletrodialíticos. Portanto, os eletrodos devem ser estáveis na presença de H_2 e OH^- . O aço inoxidável é o material mais empregado como catodo.

As reações que ocorrem no anodo são:





A reações anódicas causam a dissolução ou oxidação do eletrodo, reduzindo a sua eficiência e destruindo sua estrutura rapidamente. O uso de metais resistentes à condições oxidativas, como a platina evitam o desgaste do eletrodo. Como a platina possui um alto custo, outros tipos de materiais podem ser usados, como o titânio ou o tântalo com uma camada de platina sobre a superfície do metal [Lacey, 1979].

Entre cada eletrodo e a primeira membrana bipolar ocorre a formação de um compartimento, que denomina-se de compartimento eletródico ou de lavagem. Onde, durante o processo da eletrodialise, uma solução ácida passa através de um processo contínuo, com o objetivo de carrear os íons que possam atravessar as membranas e os gases formados nas reações eletrodicas [Howe, 1974]. A referida solução de lavagem com PH acidificado em torno de 3,0 é também usada para evitar a formação de bases como o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ no compartimento catódico, bem como a precipitação de carbonatos insolúveis como CaCO_3 [Applegate, 1984].

2.5 - ESPAÇADORES

As membranas são separadas umas das outras por espaçadores. A distância entre as membranas e a espessura do compartimento precisam ser tão pequenas quanto possível, para minimizar os efeitos da resistência elétrica [Strathmann, 1992]. A maioria dos reatores industriais apresentam uma distância entre as membranas na faixa de 0,5 a 2,0 mm [Mintz, 1963].

Os espaçadores mantêm a forma da membrana, controlam a distribuição do fluxo da solução no interior do reator e minimizam a espessura da camada limite. Em sistemas eletrodialíticos industriais dois tipos de espaçadores vem sendo usados: o de escoamento tortuoso e o linear [Howe, 1974].

Nos espaçadores de fluxo tortuoso a solução percola pela membrana na forma de labirinto. A solução toma várias curvas de 180° entre a entrada e a saída localizadas em pontos opostos ou no centro. Estes espaçadores possuem tiras cruzadas nos canais de fluxo que promovem a turbulência. Enquanto que, nos espaçadores de fluxo linear, uma rede plástica ou tela promove a turbulência. A solução flui em uma linha reta relativa a partir da entrada até a saída, que estão localizadas em lados opostos [Applegate, 1984]. No presente trabalho, usou-se os espaçadores de fluxo linear entre as membranas eletrodialíticas.

A velocidade de escoamento dos espaçadores de fluxo tortuoso encontra-se entre 15 a 50 cm/s, enquanto que, os espaçadores lineares operam com uma velocidade de escoamento de 5 a 10 cm/s [Leitz & Eisenmann, 1981]. Por apresentarem uma velocidade superior e um caminho mais longo, os espaçadores tortuosos apresentam uma queda de pressão na ordem de 2 a 3 bar e os espaçadores lineares, por sua vez, apresentam uma queda de pressão de 1 a 2 bar. Um sistema com alta velocidade de escoamento no interior do reator reduz a deposição de suspensões de sólidos e materiais biológicos [Strathmann, 1992].

2.6 - DENSIDADE DE CORRENTE

A densidade de corrente J (A/cm^2) provocada pelo movimento das espécies químicas no interior do reator durante a eletrodialise é igual à soma das parcelas correspondentes a todas as espécies iônicas presentes e pode ser representada pela Equação 2.5:

$$J = F \cdot \sum_i z_i \cdot N_i \quad (2.5)$$

Substituindo a Equação 2.1, têm-se:

$$J = F \cdot \sum_i z_i \cdot N_i = -k \cdot \nabla E - F \cdot \sum_i z_i \cdot D_i \cdot \nabla c_i + F \cdot v \cdot \sum_i z_i \cdot c_i \quad (2.6)$$

A condutividade elétrica k (mho/cm) é dada pela seguinte equação:

$$k = F^2 \cdot \sum_i z_i^2 \cdot u_i \cdot c_i \quad (2.7)$$

Para propósitos experimentais, o seio de uma solução eletrolítica é considerada eletricamente neutra, logo:

$$\sum_i z_i \cdot c_i = 0 \quad (2.8)$$

Nas soluções de composição homogênea, os dois últimos termos que representam as contribuições pelo efeito da difusão e da convecção desaparecem, reduzindo a Equação 2.5 à lei de Ohm [Perry & Green, 1984].

Portanto, os dados sobre a densidade de corrente J (mA/cm²) podem ser fornecidos através da Equação (2.9):

$$J = \frac{I}{A_e} \quad (2.9)$$

Onde: I = corrente lida durante a dessalinização em ampéres.

A_e = área efetiva da membrana em cm².

A dissociação acelerada da molécula da água ocorre geralmente, em densidades de corrente acima de 1 mA/cm². A eletrodialise com membranas bipolares à altas densidades de corrente (100 mA/cm²) é atrativa devido, a melhoria das propriedades elétricas da membrana. Em geral, a eficiência de corrente aumenta para altos valores da densidade de corrente aplicada. Mas, segundo Aritomi et al (1996), para densidades de corrente elevadas, o consumo

água na interface devido a dissociação, pode ultrapassar a taxa de difusão da água na membrana ocasionando uma menor geração de íons H^+ e OH^- [Aritomi et al, 1996].

A densidade de corrente limite nos compartimentos salinos trata-se de um fator de grande importância devido ao efeito da concentração de polarização nestes compartimentos [Aritomi et al, 1996]. Portanto, para altas densidades de corrente, a acentuada transferência iônica diminuirá a concentração dos íons na superfície das membranas monopolares, aumentando a resistência elétrica no meio. Desta forma, os íons H^+ e OH^- provenientes da dissociação natural da água, passam a ser significativos, fazendo com que a membrana catiônica conduza o íon hidrogênio, neutralizando assim o compartimento básico e a membrana aniônica conduza o íon hidroxila, neutralizando o compartimento ácido.

2.7 - EFICIÊNCIA DE CORRENTE

A eficiência de corrente é um importante parâmetro nos processos eletrodialíticos, sendo definida como o número de equivalentes do produto por faraday da corrente elétrica aplicada [Mani, 1991]. A eficiência de corrente é dada pela seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{C_p \cdot Q_p \cdot F}{I \cdot n} \quad (2.10)$$

Onde: ϵ = eficiência de corrente.

C_p = concentração do produto em eq-g/l.

Q_p = vazão do produto em l/s.

F = constante de Faraday em coulomb/eq-g.

I = corrente lida em ampéres.

n = número de células eletrodialíticas.

Segundo Applegate, 1984, a eficiência de corrente é sempre menor que 100 %, devido aos seguintes fatores:

1. As membranas não são perfeitamente semipermeáveis, uma vez que os co-íons, que possuem a mesma carga dos grupos fixados na membrana, não são rejeitados completamente, principalmente quando a alimentação do sistema possui altas taxas de concentração.
2. Parte da água é transferida através da membrana por íons solvatados via fluxo osmótico.
3. Perda de corrente elétrica que flui através do conjunto de membranas e dos elementos que formam o reator eletrodialítico.

Quando a eficiência de corrente se aproxima dos 100 % o transporte iônico através das membranas pode ser ocasionado não somente pelo potencial elétrico ou efeitos difusivos, mas também pelo transporte convectivo do eletrólito através dos poros da membrana; nesse caso, os contra-íons e os co-íons são transferidos de um compartimento para outro sem a contribuição da corrente elétrica [Shah & Scamehorn, 1987].

Em geral, a eficiência de corrente na dissociação eletrodialítica da água é controlada pela permeseletividade dos componentes individuais na membrana e pelo transporte difusivo. A Figura 2.5 ilustra os variados processos que interferem na eficiência de corrente do sistema.

A linha 1, Figura 2.5, representa as propriedades desejadas: uma alta permeseletividade para o contra-íon nas membranas monopolares e a dissociação da água nas membranas bipolares, produzindo ácido e base a partir do sal.

O transporte paralelo do co-íon através das membranas monopolares (linha 3), também ocorre na membrana bipolar (linha 2), limitando a pureza do ácido e da base produzidos, bem como a eficiência de corrente do processo. Esta imperfeição na seletividade das membranas é uma função do tipo de membrana utilizada, das condições de operação e da natureza dos produtos gerados.

A linha 4 representa as perdas por difusão devido aos gradientes de concentração, que geralmente ocorre para altas concentrações do produto [Mani, 1991].

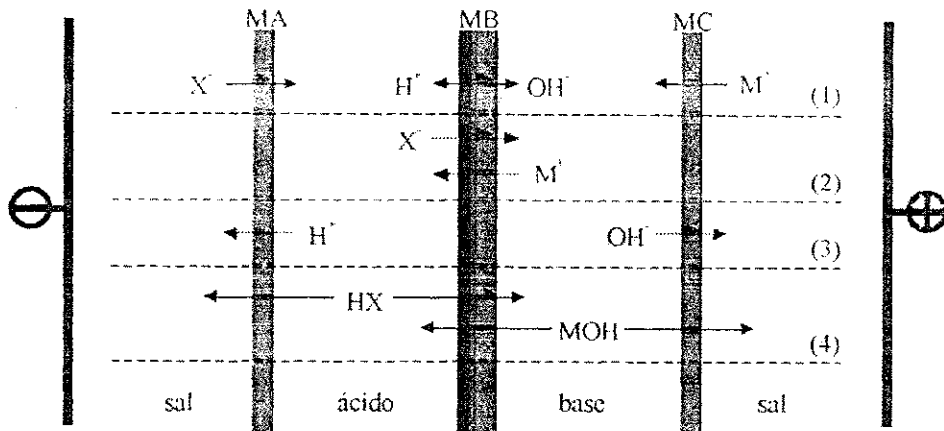


Figura 2.5: Processos que ocorrem na eletrodialise com membranas bipolares (MB = membrana bipolar, MA = membrana aniônica e MC = membrana catiônica).

2.8 - RESISTÊNCIA ÔHMICA

A resistência elétrica de uma célula eletrodialítica é determinada pela soma das resistências dos seus componentes individuais. Na eletrodialise convencional, a unidade básica ou par de célula, é composta por uma membrana catiônica, uma membrana aniônica e pelos compartimentos da solução diluída e concentrada [Mason & Kirkham, 1959].

Dessa forma, a resistência do par de célula pode ser representada pela seguinte expressão:

$$R_p = R_{MC} + R_{MA} + R_C + R_D + R_S \quad (2.11)$$

Onde: R_p = resistência de um par de célula em ohm.

R_{MC} = resistência da membrana catiônica em ohm.

R_{MA} = resistência da membrana aniônica em ohm.

R_C = resistência da solução concentrada em ohm.

R_D = resistência da solução diluída em ohm.

R_s = resistência oferecida pela camada limite na superfície da membrana em ohm [Shaffer & Mintz, 1966].

Dentre os fatores que afetam a resistência do sistema estão: a natureza das espécies iônicas envolvidas, a concentração das soluções próximas às membranas e a temperatura do sistema. Eventualmente, para aumentos de temperatura de 0,55 °C (1 F), ocorrem decréscimos de cerca de 1,1 % na resistência do sistema. Em relação as espécies iônicas, a resistência diminui quando as concentração dos íons Na^+ e Cl^- aumentam na solução [Meller, 1984].

As resistências das membranas variam de acordo com sua espessura, resistência específica do material, dimensão da malha (que geralmente se encontra entre 10 a 14 Å²), temperatura e concentração da solução próxima a sua superfície. Para concentrações de soluções abaixo de 0,1 N (NaCl), a resistência da membrana permanece praticamente inalterada, acima desse valor, a resistência decai em virtude do aumento do eletrólito na resina, aumentando assim, a condutividade da membrana [Mason & Kirkham, 1959].

Na eletrodialise bipolar, a unidade básica é representada por uma célula de três compartimentos, onde a membrana bipolar é usada em conjunto com as convencionais membranas aniônica e catiônica, como foi descrito na seção 2.2. Portanto, a Equação 2.11 seria modificada com o acréscimo das resistências da membrana bipolar e dos compartimentos que a cercam.

Portanto, a resistência da célula seria representada pela seguinte expressão:

$$R_c = R_{MA} + R_{MC} + R_{MB} + R_A + R_s + R_B + R_s \quad (2.12)$$

Onde: R_c = resistência da célula bipolar em ohm.

R_{MA} = resistência da membrana aniônica em ohm.

R_{MC} = resistência da membrana catiônica em ohm.

R_{MB} = resistência da membrana bipolar em ohm.

R_A = resistência da solução ácida em ohm.

R_S = resistência da solução salina em ohm.

R_B = resistência da solução básica em ohm.

R_δ = resistência oferecida pela camada limite nas superfícies das membranas em ohm.

A resistência elétrica da membrana bipolar por sua vez, seria a soma das resistências das camadas de cargas opostas (aniônica e catiônica) e a resistência da interface entre as membranas [Mani, 1991].

Na interface da membrana bipolar, a resistência está diretamente relacionada com a difusão e dissociação da molécula da água. Baseado no fato de que a taxa de íons H^+ e OH^- removidos da interface pela corrente, através da membrana, deveria ser igual a taxa de dissociação da água, ou seja, o fluxo de íons da interface para outras fases não pode exceder a taxa de sua geração, caso contrário, ocorreria uma diminuição da densidade de corrente e levaria a um drástico aumento da resistência elétrica. Esse fato, seria então limitado pela difusividade da água na membrana e sua conseqüente dissociação [Strathmann, 1993].

Este fenômeno é uma importante característica da membrana bipolar que sustenta a hipótese de que a difusividade da água na membrana é o passo determinante na dissociação da água. Portanto, um aumento da resistência pode ser assumido como um decréscimo da concentração da água na interface da membrana bipolar [Aritomi, Boomgaard & Strathmann, 1996].

De uma forma geral, a resistência total de um sistema eletrodialítico pode ser determinada pela lei de Ohm, onde o potencial de um sistema elétrico é igual ao produto da corrente e da resistência do sistema [Meller, 1984].

$$R_t = \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

Onde: R_t = resistência total do sistema em ohm.

V = potencial elétrico aplicado aos eletrodos em volts.

I = corrente lida em ampéres.

2.9 - CONSUMO DE ENERGIA

A maior parte do consumo de energia num sistema eletrodialítico é devido à energia necessária para transferir as espécies iônicas da solução através das membranas e a energia despendida para bombear as soluções através da unidade eletrodialítica [Strathmann, 1992].

No entanto, existem diversos fatores que também contribuem para o consumo total de energia, tais como: o trabalho de dissociação do eletrólito na solução, as reações químicas de oxidação e redução nos compartimentos eletrodicos, a compensação de eventuais vazamentos de corrente ou baixa seletividade das membranas, a dissipação térmica do efeito Joule por diversos componentes, a tensão aplicada em função do número de membranas e finalmente, a conversão da corrente alternada para contínua pela fonte retificadora [Mason & Kirkham, 1959].

A energia consumida pelas reações químicas que ocorrem nos eletrodos dependem do material empregado aos eletrodos, das reações envolvidas, da concentração e composição iônica da solução de alimentação, da densidade de corrente utilizada, bem como da velocidade do fluxo de lavagem [Mason & Kirkham, 1959].

O consumo de energia está diretamente relacionado com a corrente elétrica que flui através do sistema e com o potencial elétrico o qual está relacionado com a quantidade de íons removidos a partir de um certo volume de alimentação até atingir a concentração desejada. O cálculo da energia pode ser avaliado durante o processo eletrodialítico através da Equação (2.14) [Strathmann, 1992].

$$E = \left(\frac{I \cdot n \cdot R_c \cdot z_i \cdot F \cdot Q_p \cdot \Delta C}{\varepsilon} \right) \cdot t \quad (2.14)$$

Onde: E = consumo de energia em Wh.

I = corrente lida em ampères.

n = número de células eletrodialíticas.

R_c = resistência da célula em ohm.

z_i = valência da espécie iônica.

F = constante de Faraday em A.s/mol.

Q_p = vazão do produto em l/h.

t = tempo em segundos.

ε = eficiência de corrente.

ΔC = diferença entre a concentração da alimentação e da saída do reator em mol/l.

O consumo de energia é uma função do número de compartimentos e da resistência ôhmica do sistema que é a soma das resistências das membranas e das soluções no interior do reator. Desde que a resistência da solução é inversamente proporcional a concentração de seus ions, a resistência total é determinada pela resistência dos compartimentos diluídos [Strathmann, 1992].

O consumo de energia prático E_p referente ao processo da eletrodialise em kWh/l é obtido através da seguinte equação [Perry & Green, 1984]:

$$E_p = \frac{I^2 \cdot R_t}{Q_p} \quad (2.14)$$

Onde: I = corrente lida em ampères.

R_t = resistência total do sistema em ohm.

Q_p = vazão do produto em l/h.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAL UTILIZADO

- Cloreto de sódio (NaCl) P.A. da MERCK
- Ácido nítrico (HNO₃) P.A. da REAGEN
- Policloreto de vinila (PVC) de 1 cm de espessura
- Placas de titânio platinado de 1 mm de espessura
- Telas de polietileno de 1 mm de espessura
- Parafusos de bronze de 3/8 in
- Membranas eletrodialíticas da Asahi Chemical Ind. Co., Japão

3.2 - SISTEMA ELETRODIALÍTICO

O sistema eletrodialítico é constituído das seguintes unidades: reator eletrodialítico, fonte de alimentação elétrica, reator de degaseificação, sistema hidráulico e equipamentos de medidas e registros de dados, conforme mostra a Figura 3.1.

3.2.1 - REATOR ELETRODIALÍTICO

O reator eletrodialítico foi construído inicialmente com 2 células. Cada célula é constituída de 3 compartimentos denominados de básico, salino e ácido. Foram utilizados 5 membranas aniônicas (A-201) e 5 membranas catiônicas (K-101) da Asahi Chemical Ind., Japão. Em seguida foi construído outro reator com 8 células, utilizando-se um total de 34 membranas eletrodialíticas.

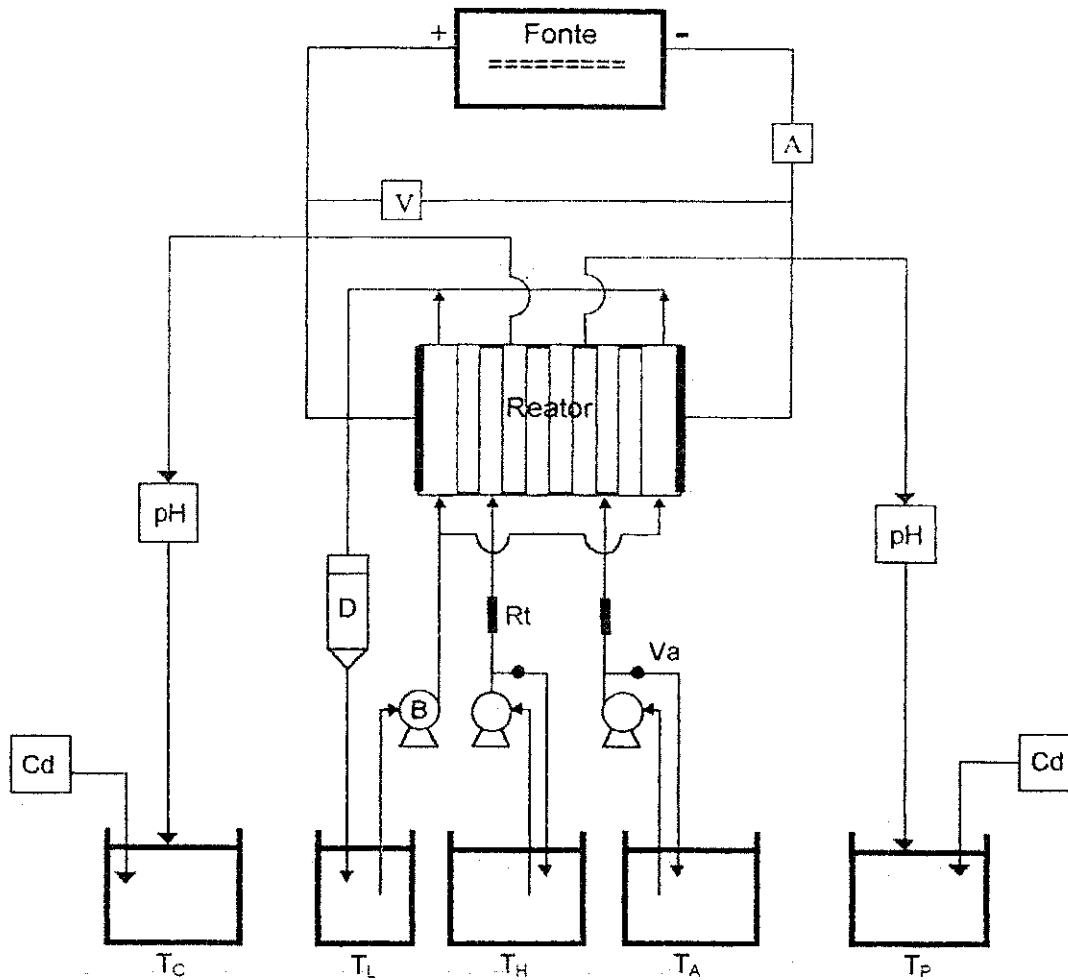


Figura 3.1: Sistema eletrodialítico composto das seguintes unidades: fonte elétrica, reator eletrodialítico, T_H - tanque de água destilada, T_A - tanque de alimentação (NaCl), T_L - tanque de lavagem, T_P - tanque do produto, T_C - tanque do concentrado, D - degaseificador, Rt - rotômetros, A - amperímetro, V - voltímetro, Cd - condutivímetros, pH - pHmetros, B - bombas centrífugas, Va - válvula de esfera.

As membranas são dispostas alternadamente ao longo do reator na seguinte ordem: bipolar, catiônica e aniônica. Entre cada membrana bipolar e uma monopolar ocorre a entrada de água destilada e entre as membranas monopolares ocorre a entrada da solução de cloreto de sódio. As características físico-químicas das membranas são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características físico-químicas das membranas eletrodialíticas utilizadas (Asahi Chemical Ind. Co.).

Características	Catiônica (K-101)	Aniônica (A-201)
Grupo Iônico	Ácido Sulfônico	Amônia Quaternária
Capacidade de Transferência Iônica (meq-g de memb. seca)	1,8 – 2,0	1,4 – 1,6
Resistência Elétrica (ohm.cm ²)	1,8 – 2,3	3,6 – 4,2
Número de Transporte	> 0,99	> 0,99
Tensão de Ruptura (Kgf/mm ²)	2,5 – 3,4	2,6 – 3,8
Espessura (mm)	0,21 – 0,23	0,22 – 0,24

As membranas são separadas uma das outras por espaçadores, exceto o par de membranas que funcionam como bipolar. Estes espaçadores foram confeccionados no laboratório de dessalinização da UFPB, utilizando telas de polietileno e folhas de PVC de 1 mm de espessura. Cada espaçador oferece uma área de troca iônica de 330 cm² e promove um caminho de fluxo linear adjacente a superfície da membrana.

Os eletrodos utilizados para o cátodo e o ânodo, são constituídos por 1mm de espessura de titânio, revestidos por uma camada de 5 µm de platina. O conjunto formado por eletrodos, membranas e espaçadores é pressionado entre placas de PVC de 10 mm de espessura, com auxílio de parafusos de bronze, de 150 mm de comprimento, apresentando um modelo similar a um filtro prensa.

Entre cada eletrodo e a membrana vizinha, existe um compartimento denominado de compartimento eletródico. Este tem a finalidade de receber um fluxo contínuo de uma solução de ácido nítrico (pH ≅ 3,0), com o objetivo de lavar as paredes dos eletrodos durante o processo, evitando a formação de possíveis incrustações nas superfícies e também para aumentar a densidade de corrente nos mesmos, bem como carrear os gases hidrogênio e cloro formados no cátodo e no ânodo, respectivamente.

3.2.2 - ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

Foi empregada uma fonte retificadora chaveada modelo DC POLY- 01 da Itavolt, com ajuste de tensão de 0 a 60 volts, composta de um amperímetro com uma faixa de leitura de 0 a 10 ampéres. Conectado a esta, foi utilizado um multímetro tipo Sanwa, modelo 320-NB, com precisão de $\pm 2,5 \%$, para ajustar a diferença de potencial aplicada.

3.2.3 - REATOR DE DEGASEIFICAÇÃO

O reator de degaseificação é constituído de um tubo de PVC, com dimensões de 32,5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, possuindo no seu interior um recheio do tipo sela, cuja finalidade é eliminar os gases cloro e hidrogênio provenientes dos compartimentos anódico e catódico, respectivamente.

3.2.4 - SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema hidráulico é formado por duas bombas centrífugas de 1/20 hp, modelo 1.5 da Sulplastic, conectadas a dois tanques de alimentação com capacidade para 10 litros cada; e outra bomba centrífuga de 1/200 hp, modelo 1A-Md da New Pumps, conectada ao tanque de lavagem dos eletrodos, com capacidade para 5 litros de solução. No circuito hidráulico utilizou-se válvulas de passagem Deca de $\frac{1}{2}$ in, tubos e conexões de PVC de $\frac{1}{2}$ in, mangueiras plásticas e mangueiras em látex.

3.2.5 - UNIDADES DE REGISTRO

Foram utilizadas cinco unidades de registro, conforme pode ser observado na Tabela 3.2, onde foi possível obter a leitura do potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, diferença de potencial e corrente durante os experimentos.

Tabela 3.2: Unidades de registro do sistema.

Unidade	Tipo	Modelo	Fabricante
1	pHmetro	DMPH-2	Digimed
2	pHmetro	-	Prazis
3	Condutivímetro	CD-21	Digimed
4	Multímetro	320-XB	Sanwa
5	Multímetro	DM-9090	Homis

Através de duas células de leituras localizadas na saída do reator, onde foram imersos os eletrodos dos medidores de pH, registrou-se a variação do potencial hidrogeniônico dos efluentes básico e ácido do reator. Também foram coletadas amostras desses efluentes com a finalidade de verificar a variação da condutividade elétrica através de um condutivímetro modelo CD-21 da Digimed.

O sistema conta também com um par de rotômetros que são utilizados para controlar a vazão da solução de alimentação (cloro de sódio), bem como a vazão da água destilada na entrada do reator.

Para um melhor ajuste da diferença de potencial aplicada ao eletrodos e leitura da corrente obtida, foram conectados ao reator dois multímetros modelos 320-XB da Sanwa e DM-9090 da Homis.

3.3 - METODOLOGIA

Na primeira etapa do trabalho foi montado um reator (MR1) com 2 células eletrodialíticas, usando-se um total de 10 membranas eletrodialíticas, conforme mostra a Figura 3.2. Este reator foi utilizado em caráter experimental, com o objetivo de averiguar seu desempenho em termos de trabalho hidrodinâmico e potencial de hidrogênio.

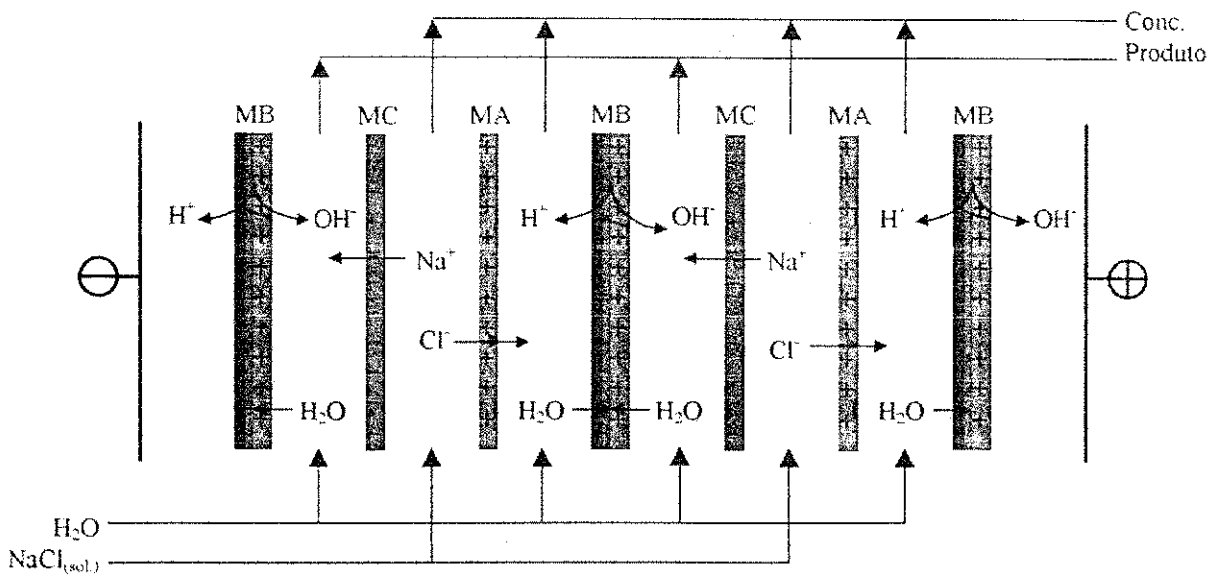


Figura 3.2: Esquema de um reator eletrodialítico composto de 2 células, para a geração de ácido e base a partir de uma solução salina (MB = membrana bipolar, MC = membrana catiônica e MA = membrana aniônica).

Durante o processo da eletrodialise, formam-se os seguintes compartimentos: alcalino, ácido e salino. O compartimento alcalino é formado entre uma membrana bipolar e uma catiônica. A geração da solução ácida dar-se-á entre uma membrana aniônica e bipolar e o último, basicamente, é o compartimento de alimentação do reator que recebe sob um fluxo contínuo uma solução de cloreto de sódio.

Neste trabalho foi dada ênfase a produção de uma solução de hidróxido de sódio (produto) e foi considerado o efluente ácido (concentrado) como uma mistura dos seguintes componentes: cloreto de sódio não convertido e ácido clorídrico em solução.

Na segunda etapa, montou-se um modelo de reator com 8 células eletrodialíticas (MR2), utilizando um total de 34 membranas eletrodialíticas. O MR2 apresenta as mesmas características do MRI, sua diferença é que o mesmo apresenta um maior número de membranas, conforme mencionado acima.

3.3.1 - MODELOS DE FLUXO DE ALIMENTAÇÃO

Foram investigados dois modelos de fluxo de alimentação, nos quais foram utilizadas duas bombas centrífugas, para alimentar o reator com água destilada e soluções de cloreto de sódio à uma vazão constante de $1,4 \times 10^{-3}$ l/s, conforme descrito abaixo:

O modelo de fluxo de alimentação (FA1) estudado inicialmente é representado pela Figura 3.3, onde pode ser observado que os efluentes do produto e do concentrado são receptados em tanques individuais de capacidade de 10 litros cada.

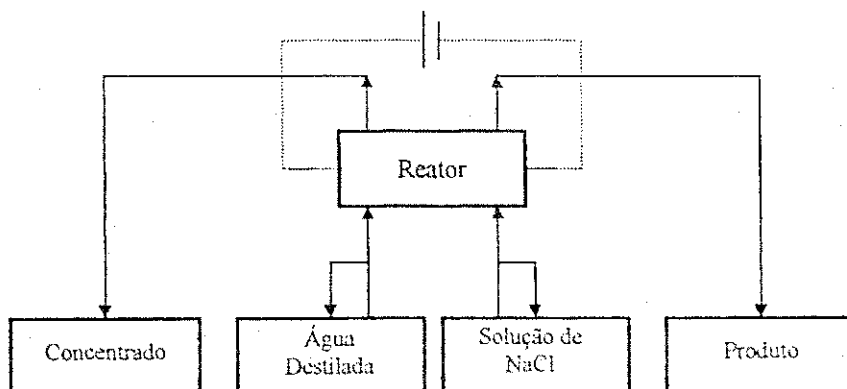


Figura 3.3: Modelo de fluxo de alimentação FA1.

A Figura 3.4 mostra o modelo de fluxo de alimentação (FA2), no qual o efluente do concentrado é desviado para o tanque de alimentação, onde se encontra a solução de cloreto de sódio. Para se manter a homogeneidade da solução de alimentação, utilizou-se de "by pass" durante o processo.

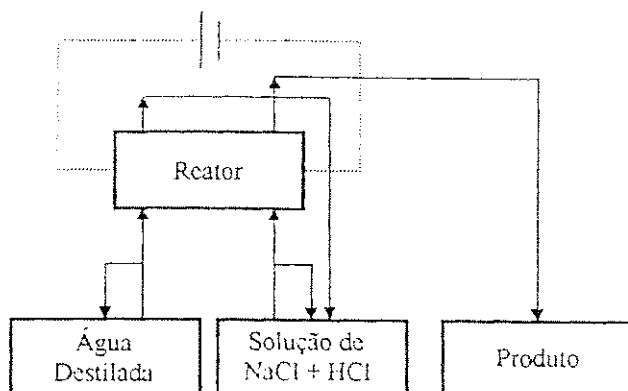


Figura 3.4. Modelo de fluxo de alimentação FA2.

3.3.2 - FLUXO DE LAVAGEM

Durante cada experimento, uma solução de ácido nítrico (10^{-3} M), era recirculada através dos compartimentos eletródicos com o propósito de manter o pH na faixa de 2,0 a 3,0 [Shah & Scamehorn, 1987]. Esta faixa de pH evita a precipitação de carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio no compartimento catódico, que poderia gerar incrustações na membrana, diminuindo a sua área de transferência iônica [Applegate, 1984].

A solução de ácido nítrico foi bombeada por um fluxo constante de 1,2 l/min, sob recirculação contínua e fluxo ascendente através dos compartimentos anódico e catódico.

3.3.3 - DADOS EXPERIMENTAIS

Vários experimentos foram realizados com ambos os reatores, sob vazões e concentrações de alimentação constantes. Antes de dar início a cada batelada, adotamos um procedimento de medição de dados iniciais, como por exemplo: temperatura das soluções; potencial hidrogeniônico da solução de lavagem dos eletrodos; condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico da solução de alimentação (NaCl) e da água destilada.

Em seguida, a água destilada, as soluções de alimentação e de lavagem dos eletrodos são bombeadas para o reator, enquanto é feito o controle das vazões no sistema. Após esse ajuste inicial, a diferença de potencial é aplicada, com auxílio de uma fonte retificadora proporcionando a migração das espécies iônicas presentes no meio, bem como a dissociação eletrodialítica da água nos compartimentos das membranas bipolares, formando assim os compartimentos básico, ácido e salino no interior do reator, conforme encontra-se ilustrado na Figura 3.2.

Os dados obtidos da corrente elétrica e do potencial hidrogeniônico dos efluentes do produto (básico) e do concentrado (ácido), foram tomados no primeiro minuto em intervalos de 15 segundos, com o propósito de estudar o comportamento nos instantes iniciais do processo. Em seguida, as tomadas ocorreram em intervalos de 30 segundos, 1 e 5 minutos, até atingir uma faixa de pH constante, ou em outros casos, até quando houvesse condições de se prolongar a batelada.

Para realizar o levantamento de dados da condutividade elétrica do produto e do concentrado, foram coletadas amostras desses efluentes em tempos regulares, de acordo com as condições oferecidas pelo sistema durante o experimento. Na maioria das bateladas estes dados foram tomados em intervalos de tempo de 5 minutos.

Após cada término de experiência, os tanques de alimentação foram esvaziados e lavados com água destilada. Em seguida, enchidos novamente com água destilada, esta era circulada pelo sistema eletrodialítico para a remoção de íons remanescentes antes do início de uma nova batelada. Esta limpeza era encerrada quando a água destilada utilizada apresentava, na saída do reator, um pH na faixa de 6,0 a 7,0.

Na primeira etapa de experimentos com o reator MR1, foi utilizado o modelo de fluxo de alimentação FA1 e uma diferença de potencial (ddp) de 36 volts para concentrações de solução de cloreto de sódio de 900 e 6000 ppm, e numa mesma batelada, variou-se a ddp em 38,40 e 50 volts para uma concentração de cloreto de sódio de 5000 ppm, utilizando o modelo de fluxo FA2. Em todas as bateladas foram utilizadas vazões de entrada de 7 l/h para a solução de cloreto de sódio e 11 l/h para a água destilada, obtendo uma vazão de 9 l/h para o

produto e 5 l/h para o concentrado. As bateladas para o reator MR1 encontram-se relacionadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Distribuição das bateladas para o reator MR1.

Bateladas	C_a (ppm)	Modelo de fluxo de alimentação	V (volts)
1	900	FA1	36
2	5000	FA2	38,40 e 50
3	6000	FA1	36

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

V = diferença de potencial em volts.

Na segunda etapa de experimentos com o reator MR2, o sistema foi testado para o modelo de fluxo FA1 num total de 14 bateladas. Utilizando soluções de cloreto de sódio com concentrações variando de 1000 a 10000 ppm, para diferenças de potencial de 40 e 50 volts.

O reator MR2 também foi testado com o modelo de fluxo FA2 num total de 06 bateladas. Sendo utilizadas soluções de cloreto de sódio de 3000, 5000 e 7000 ppm, variando a ddp em 40 e 50 volts.

Para todas as bateladas realizadas com o modelo de reator MR2 foram utilizadas vazões de entrada de 5 l/h para a solução de cloreto de sódio e 9 l/h para água destilada, obtendo uma vazão de 7 l/h para o produto e 5 l/h para o concentrado.

3.3.4 - CALIBRAÇÃO DAS UNIDADES DE REGISTRO

3.3.4.1 - PHMETRO E CONDUTIVÍMETRO

Estes equipamentos de registro de dados eram calibrados regularmente, com o propósito de obter coerência nos resultados. Para a calibração dos pHmetros foram utilizadas soluções tampão de pH 4,0 e 6,86 a 25 °C da Digimed, Instrumentação Analítica. Já para o condutivímetro foi utilizada uma solução padrão de 1,412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C também da Digimed, Instrumentação Analítica.

3.3.4.2 - ROTÂMETROS

Os rotâmetros usados para controlar as vazões de alimentação do reator apresentam uma escala numérica de 1 a 12, assim sendo, foi necessário determinar a vazão adequada a cada número dessa escala. Para a calibração, foi utilizada uma proveta graduada de 1,0 litro, onde era recolhida a solução após passar através do rotâmetro zerado numa determinada numeração. O tempo necessário para se atingir 1,0 litro de solução era medido com o auxílio de um cronômetro. Para cada numeração o procedimento foi repetido por 4 vezes, sendo então calculada uma média dessas medidas, representando a vazão adequada.

Esse procedimento foi feito para os dois rotâmetros do sistema, que controlam a vazão da solução de cloreto de sódio (R_{t_a}) e da água destilada (R_{t_h}).

Com auxílio do programa Grapher versão 1.28 da Golden Software, Inc., os dados da calibração dos rotâmetros foram ajustados numa reta, obtendo-se a Equação 3.1 do tipo linear.

$$Q = b \cdot N + a \quad (3.1)$$

Onde: Q = vazão de alimentação em l/h.

N = numeração na escala do rotâmetro.

a e b = parâmetros específicos para cada rotâmetro, conforme mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros de ajustes para as curvas de calibração dos rotâmetros.

Rotômetros	a	b	c.c. (%)
Rt _s	2,9088	4,1572	99,81
Rt _h	7,2787	3,7408	99,76

Onde: c.c. = coeficiente de correlação do ajuste das curvas em percentagem.

3.3.5 - CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE PARA CONCENTRAÇÃO

Com a finalidade de se conhecer a concentração de sais de uma solução aquosa de cloreto de sódio a partir da condutividade lida em mS/cm, foram preparadas diversas amostras de soluções com concentrações conhecidas de 100 a 10000 ppm. Através do condutivímetro CD21 da Digimed foram lidas as condutividades para cada amostra.

Em seguida, utilizando o programa Grapher versão 1.28 da Golden Software, Inc., os dados da calibração do condutivímetro foram ajustados numa curva, representada pela Equação 3.2.

$$C = 453,4489 \cdot K^{1,09504} \quad (3.2)$$

Onde: C = concentração da solução de cloreto de sódio em ppm (partes por milhão).

K = condutividade em mS/cm.

O coeficiente percentual de correlação para esse ajuste de curva foi de 99,99 %.

3.3.6 - DENSIDADE DE CORRENTE

A densidade de corrente durante os experimentos foram determinadas com o auxílio da Equação 2.9 descrita na seção 2.6 do capítulo 2.

3.3.7 – EFICIÊNCIA DE CORRENTE

Os dados de eficiência de corrente do reator eletrodialítico foram obtidos com o auxílio da Equação 2.10 que se encontra na seção 2.7 do capítulo 2. A eficiência foi calculada através dos dados coletados de pH do produto (solução alcalina) e corrente aplicada aos eletrodos.

3.8 - RESISTÊNCIA ÔHMICA

A variação da resistência ôhmica do reator durante o processo foi calculada através da Equação 2.13, conforme foi mencionado na seção 2.8 do capítulo 2.

3.9 - CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia prático do reator eletrodialítico foi obtido com o auxílio da Equação 2.14 que se encontra na seção 2.9 do capítulo 2. Este consumo de energia foi calculado utilizando a média da corrente lida durante a batelada.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos para os dois reatores estudados. O trabalho de coleta de dados foi dividido em duas etapas, conforme descrito abaixo:

A primeira etapa foi referente aos primeiros testes para o modelo de reator MR1 com 2 células eletrodialíticas. Conforme mencionado na seção 3.3 do capítulo 3, o objetivo principal dessa primeira fase era testar o desempenho do sistema em termos de trabalho hidrodinâmico e potencial de produção de hidrogênio.

Na segunda etapa, foram realizadas duas séries de experimentos com o modelo de reator MR2 com 8 células eletrodialíticas, utilizando os modelos de fluxo de alimentação FA1 e FA2, descritos no capítulo anterior. Os dois reatores foram estudados sob diferentes potenciais elétricos, mantendo a vazão de alimentação constante.

4.1 - COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Etapa 1

As Figuras 4.1 a 4.3 representam a variação da condutividade elétrica dos efluentes do produto e do concentrado em função do tempo para o MR1. Observa-se para os três casos estudados, que os valores da condutividade elétrica no concentrado foram superiores aos do produto. Este fato pode ser explicado através do comportamento hidrodinâmico do reator e na forma como o processo eletrodialítico ocorre no seu interior. Além disso, o efluente do concentrado é composto de uma mistura de HCl e NaCl, apresentando assim, uma maior condutividade elétrica.

A taxa de produção do concentrado em relação ao produto é duas vezes maior, uma vez que o MR1 oferece somente dois compartimentos para produção de uma solução de hidróxido de sódio (produto) e quatro compartimentos são destinados para o concentrado.

portanto, quando a diferença de potencial é aplicada ao meio, os compartimentos do concentrado são mais beneficiados com o transporte do fluxo iônico. Além disso, o tempo de residência da solução no reator foi curto, sendo insuficiente para diminuir a condutividade elétrica do concentrado.

A variação da condutividade elétrica durante o processo pode explicar o quanto o sistema pode aumentar a concentração de íons sódio no efluente do produto. Esse fato será melhor detalhado em função da variação da densidade de corrente e do potencial de hidrogênio.

Comparando as Figuras 4.1 e 4.2 referentes a experimentos realizados com o modelo de fluxo de alimentação FA1 e sob potencial elétrico de 36 volts, observou-se que o efeito da concentração da alimentação (NaCl) influenciou na produção de uma solução de hidróxido de sódio. Visto que, a solução de alimentação de maior concentração (6000 ppm) apresentou maiores valores de condutividade elétrica para o produto, conforme mostra a Tabela 4.1, no apêndice. Deve-se levar em consideração a contribuição da condutividade elétrica da água destilada, devido à íons remanescentes, que de certa forma, contribui de forma negativa durante o processo.

Também foi observado que a condutividade elétrica dos efluentes tende a aumentar durante os 10 primeiros minutos de batelada, provavelmente devido a presença dos íons sódio e cloro que são adicionados as correntes do produto e do concentrado, respectivamente, pelo transporte iônico sob a diferença de potencial [Chiao, Chlanda & Mani, 1991].

A Figura 4.3 e a Tabela 4.2 do apêndice, mostra o comportamento da condutividade elétrica de uma batelada realizada com o modelo de fluxo de alimentação FA2, onde o concentrado é reciclado para o tanque de alimentação da solução de cloreto de sódio. Este experimento foi mais longo que os demais com o objetivo de estudar o efeito da variação do potencial elétrico. Iniciando-se com uma ddp de 38 volts, após uma hora de batelada a ddp foi modificada para 40 volts e após duas horas de batelada para 50 volts.

Durante o processo, foram coletados dados de condutividade elétrica do efluente do produto e do tanque de alimentação, observou-se que o efeito do reciclo do concentrado alterou a condutividade elétrica da solução de alimentação no decorrer do tempo.

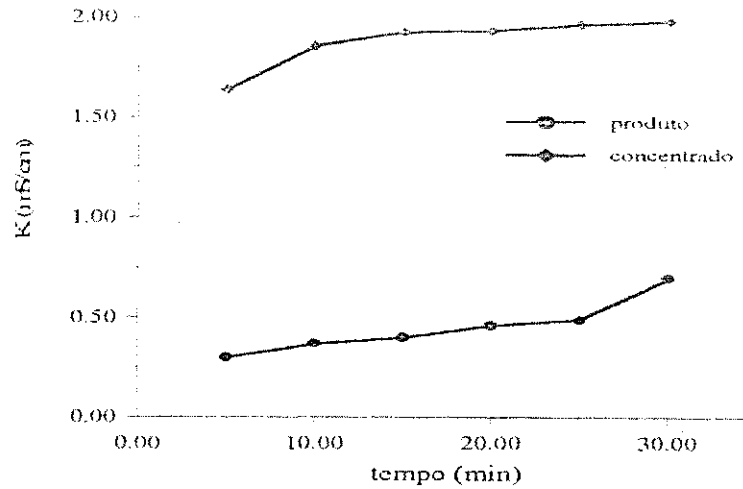


Figura 4.1: Condutividade elétrica em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm); $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada)

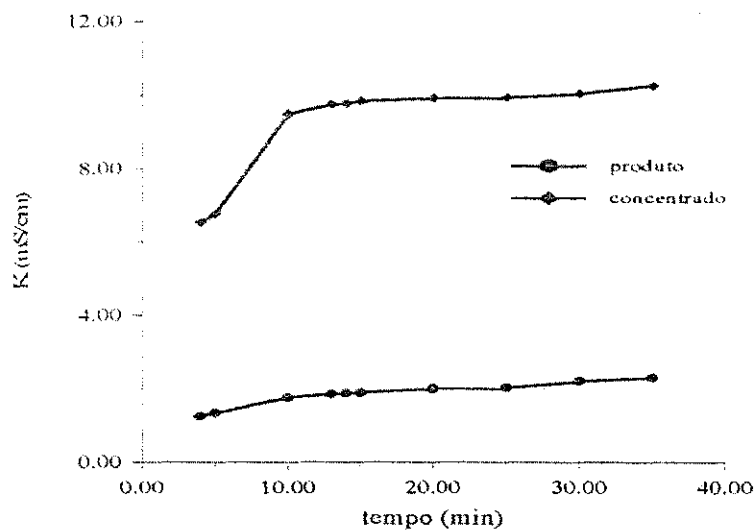


Figura 4.2: Condutividade elétrica em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

A variação da condutividade elétrica do produto foi crescente nas três horas iniciais, sob o efeito dos potenciais elétricos de 38, 40 e 50 volts, respectivamente. Após esse período, ainda sob o efeito da ddp de 50 volts, observa-se que a condutividade elétrica do produto começou a decrescer. Supõe-se que o efeito do potencial elétrico de 50 volts provocou uma maior produção de íons de cargas negativas e positivas nas superfícies das membranas, formando um potencial de concentração iônico na camada limite das mesmas diminuindo a taxa de transporte durante o processo.

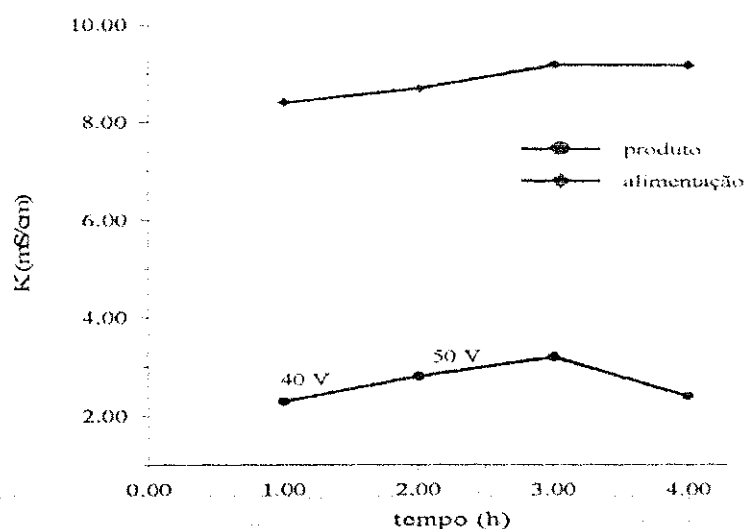


Figura 4.3: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada e i = inicial).

Etapa 2

Na primeira série de bateladas com o MR2, foram utilizadas soluções de alimentação numa faixa de concentração de 1000 a 10000 ppm para diferenças de potencial de 40 e 50 volts e modelo de fluxo de alimentação FA1.

As Figuras 4.4 a 4.17 e as Tabelas 4.3 a 4.9 do apêndice, representam o comportamento da condutividade elétrica dos efluentes do produto e do concentrado para os casos estudados. Através destas figuras, observa-se que os resultados obtidos foram semelhantes aos do reator MR1.

Analisando as Figuras 4.4 a 4.10 para concentrações de alimentação de 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 7000 e 10000 ppm sob uma diferença de potencial de 40 volts, verificou-se que a condutividade elétrica do produto durante o processo aumenta em função da concentração da solução de alimentação. As Figuras 4.8 a 4.10 comprovam a consistência do processo, pois tratam-se de bateladas mais longas, com uma duração superior, onde foi possível obter um maior número de dados.

Comparando o efeito do potencial elétrico de 50 volts (Figuras 4.11 a 4.17) com o de 40 volts nas bateladas realizadas, nota-se que na maioria delas o desempenho do reator foi melhor em relação a variação da condutividade elétrica do produto. Isso significa que o potencial elétrico é um dos parâmetros responsáveis pelo transporte iônico na produção da solução de hidróxido de sódio. Este fato também pode ser verificado através das Tabelas 4.3 a 4.9, do apêndice.

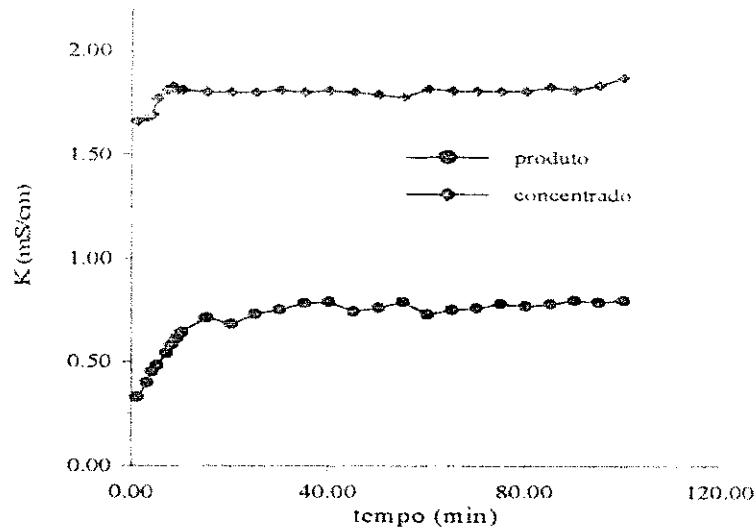


Figura 4.4: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

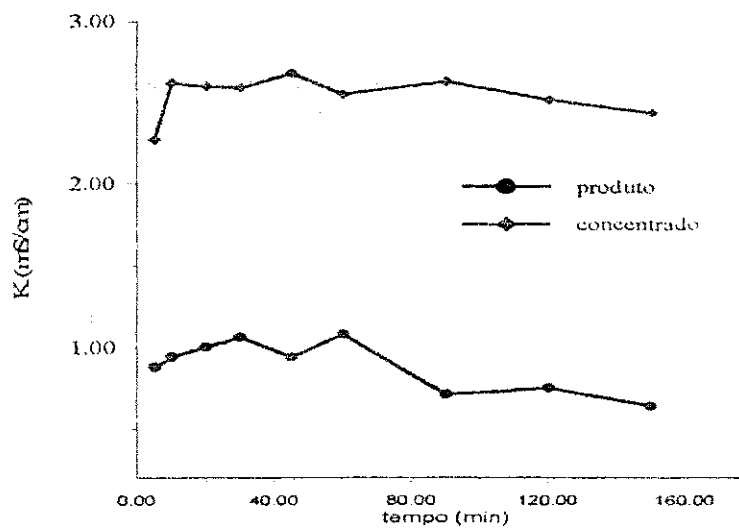


Figura 4.5: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

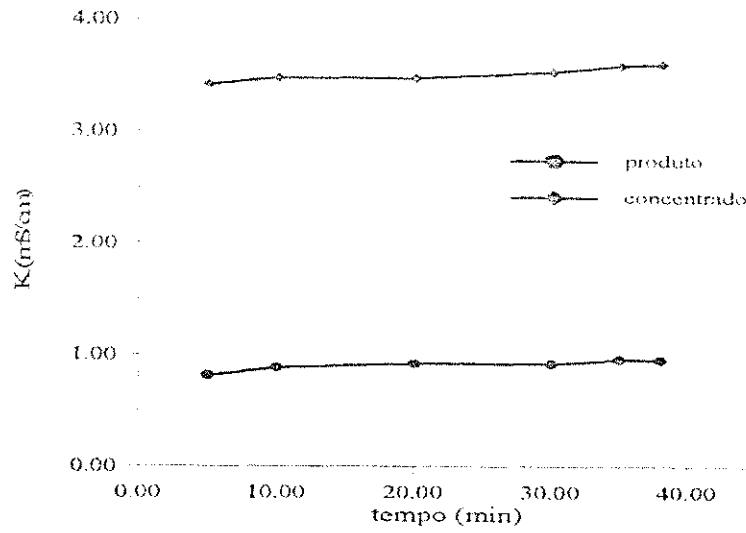


Figura 4.6: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

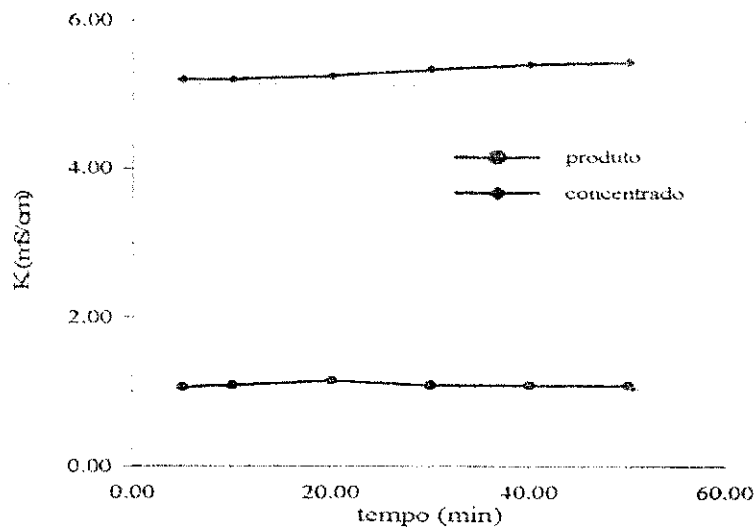


Figura 4.7: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

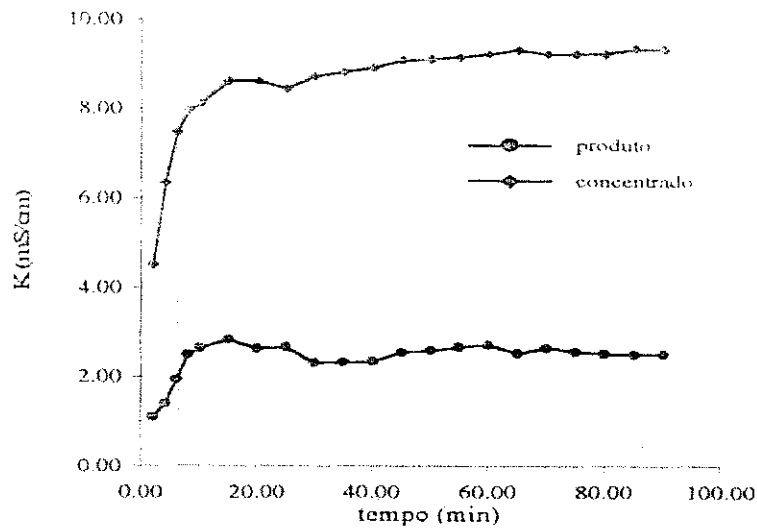


Figura 4.8: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

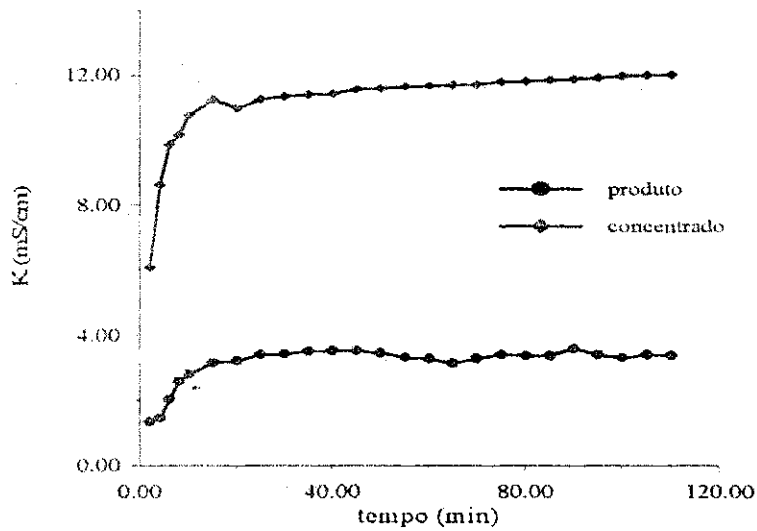


Figura 4.9: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

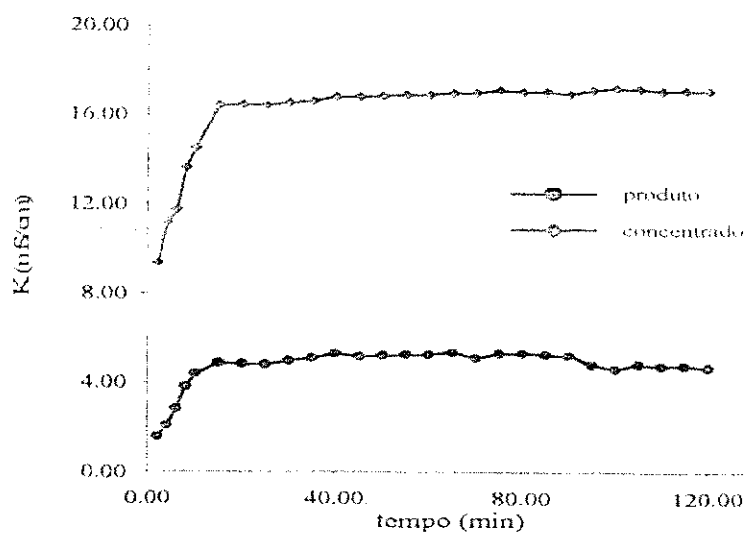


Figura 4.10: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

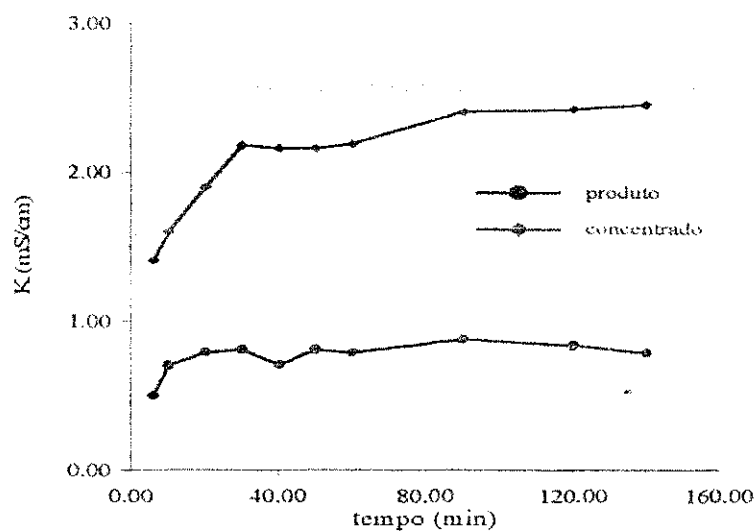


Figura 4.11: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

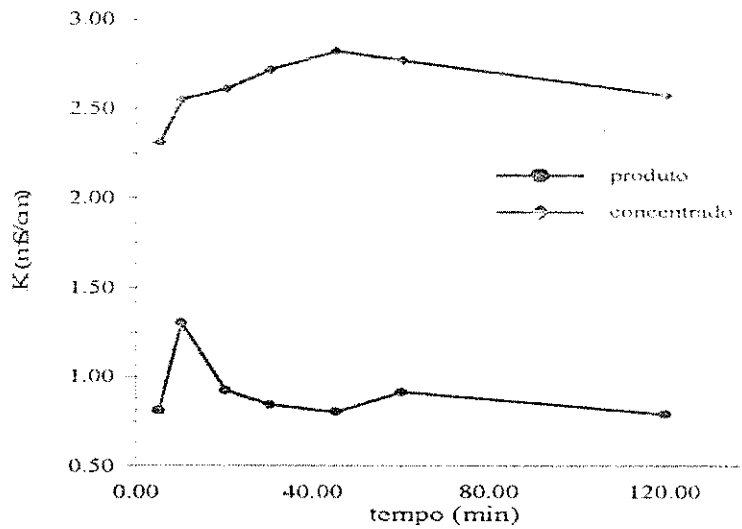


Figura 4.12: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

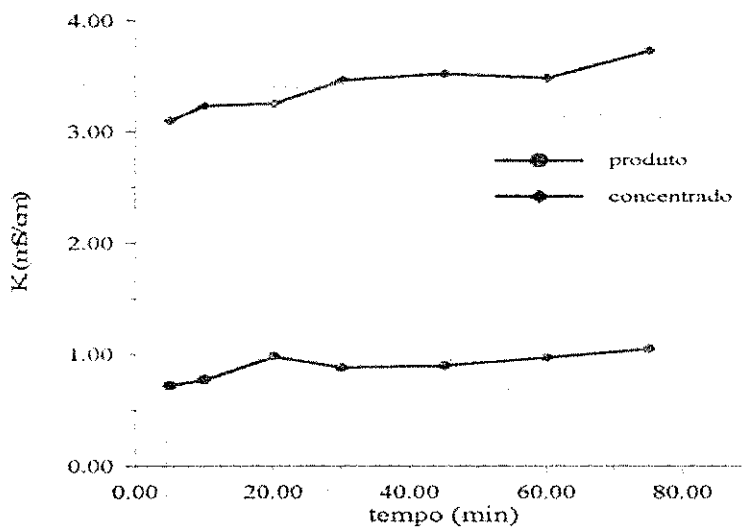


Figura 4.13: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 22,2 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

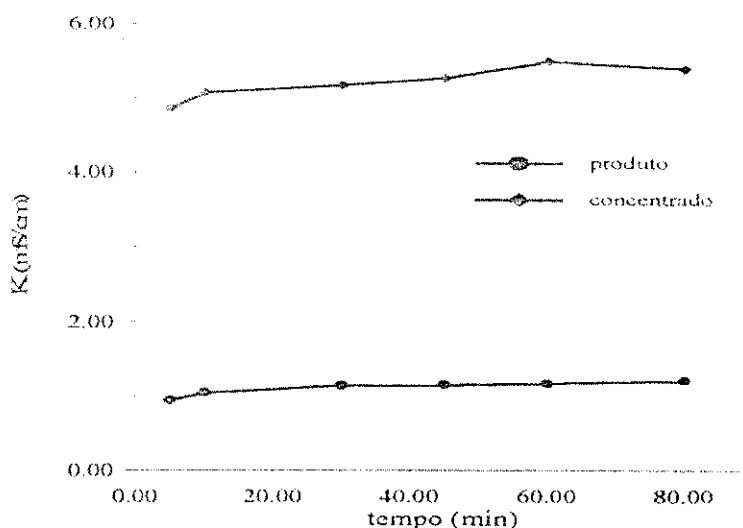


Figura 4.14: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 24,7 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

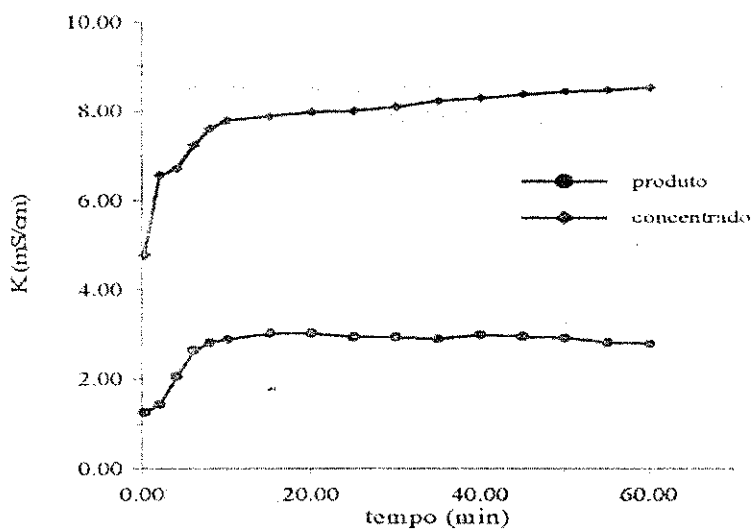


Figura 4.15: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 32,1 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

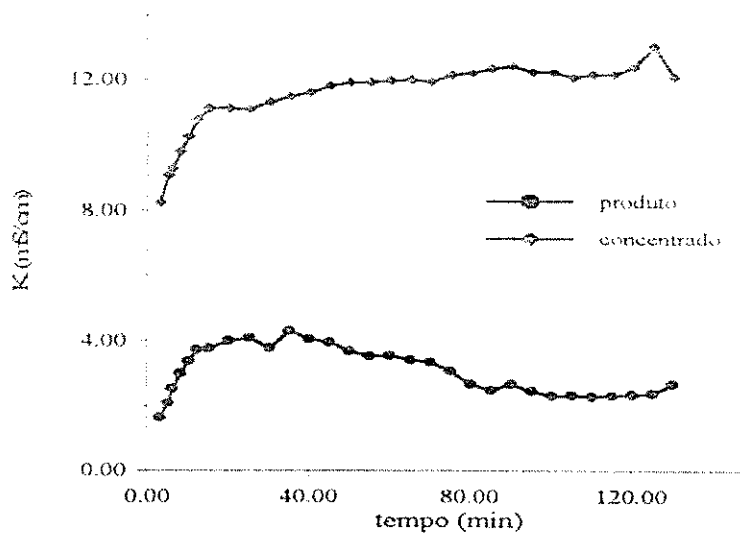


Figura 4.16: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 5 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

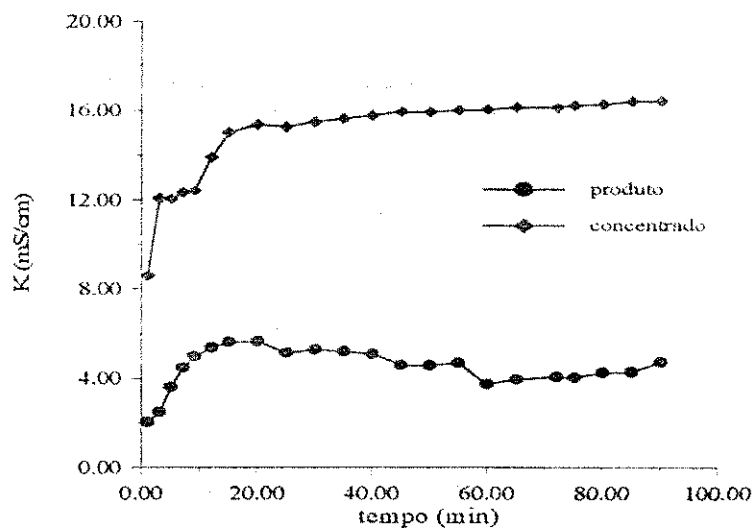


Figura 4.17: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 39 \text{ }\mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

A segunda série de bateladas com o MR2, foi realizada com o modelo de fluxo de alimentação FA2, onde soluções de alimentação com concentrações de 3000, 5000 e 7000 ppm foram testadas para diferenças de potencial de 40 e 50 volts. As Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 do apêndice e as Figuras 4.18 a 4.23 são bateladas representativas dessa segunda série de experimentos.

Nesses casos estudados, foram coletados dados de condutividade elétrica do efluente do produto e do tanque de alimentação, pois devido ao reciclo do concentrado a condutividade elétrica da solução de alimentação é alterada no decorrer do tempo.

Comparando os resultados obtidos com o modelo de alimentação FA2 em relação ao FA1, para as mesmas concentrações da alimentação, observa-se que a condutividade elétrica do produto e da alimentação para o modelo FA2 foram inferiores em relação as bateladas realizadas com o modelo FA1. Isto ocorre, por causa da diluição da solução de alimentação causada ao retornar o concentrado para tanque de alimentação, e com isso, a concentração iônica nos compartimentos do reator diminui, e conseqüentemente, o transporte iônico entre as membranas é menor, reduzindo a condutividade elétrica do produto.

As bateladas referentes as Figuras 4.18 a 4.20 foram realizadas sob uma ddp de 40 volts, onde verifica-se que a condutividade elétrica do produto apresenta valores maiores para soluções de alimentação mais concentradas. Esse comportamento também foi observado nas outras experiências, como foi descrito anteriormente.

Conferindo os dados obtidos sob uma ddp de 50 volts, constatamos que as condutividades do produto e da alimentação apresentaram valores um pouco inferiores, mas manteve-se em uma faixa constante durante todo o experimento, conforme mostram as Figuras 4.21 a 4.23 e as Tabelas 4.10 a 4.12 do apêndice. Para a alimentação de 7000 ppm a 50 volts foi observado valores superiores para a condutividade elétrica do produto, mas sempre na mesma faixa de valores obtidos sob uma ddp de 40 volts.

Apesar dessas observações serem de fundamental importância, o efeito do potencial continua sendo um dos parâmetros a ser investigado em função do número de membranas e da

concentração. Segundo Mani (1991), cerca de 2,5 volts são necessários por célula na eletrodialise bipolar, mas os efeitos irreversíveis da resistência elétrica oferecida pela membrana bipolar, aumentam o potencial necessário.

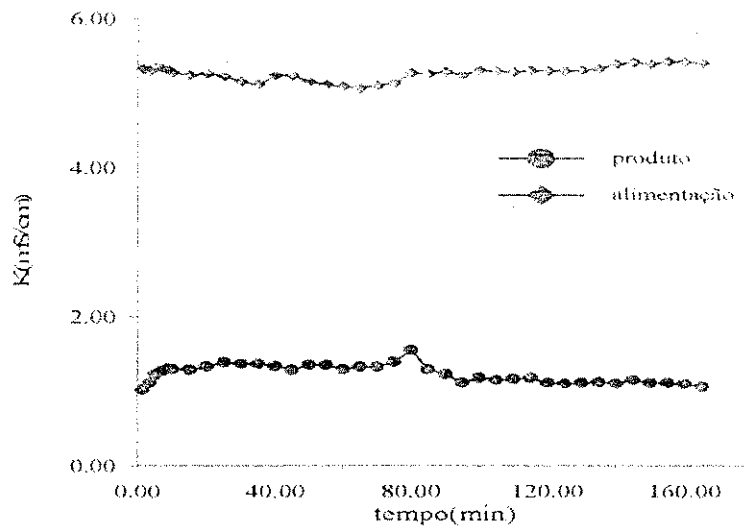


Figura 4.18: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

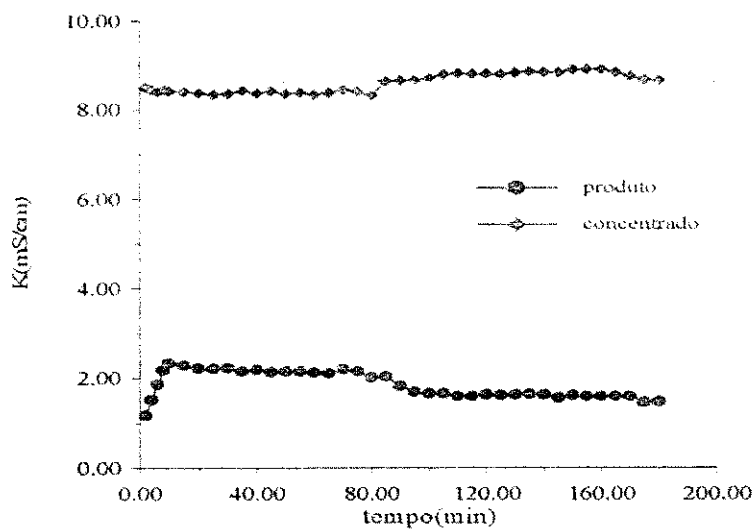


Figura 4.19: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

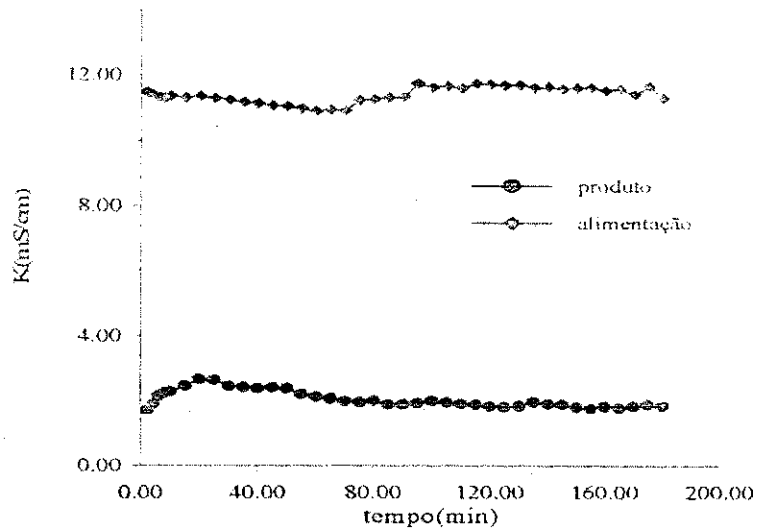


Figura 4.20: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

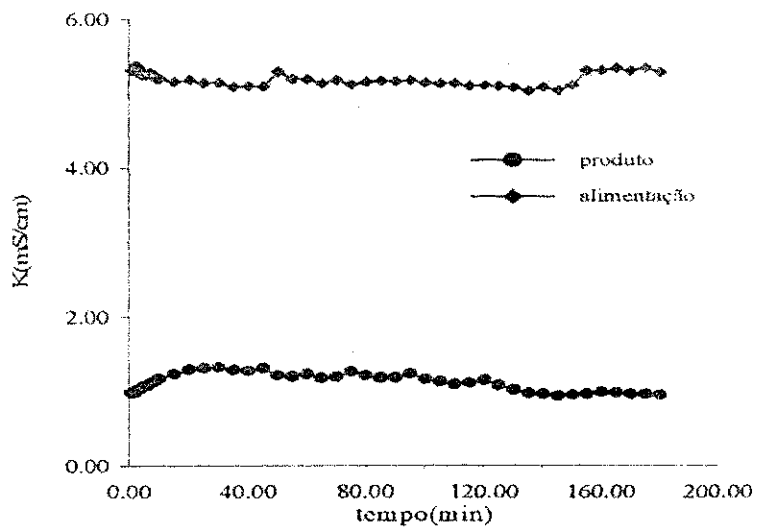


Figura 4.21: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 46,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

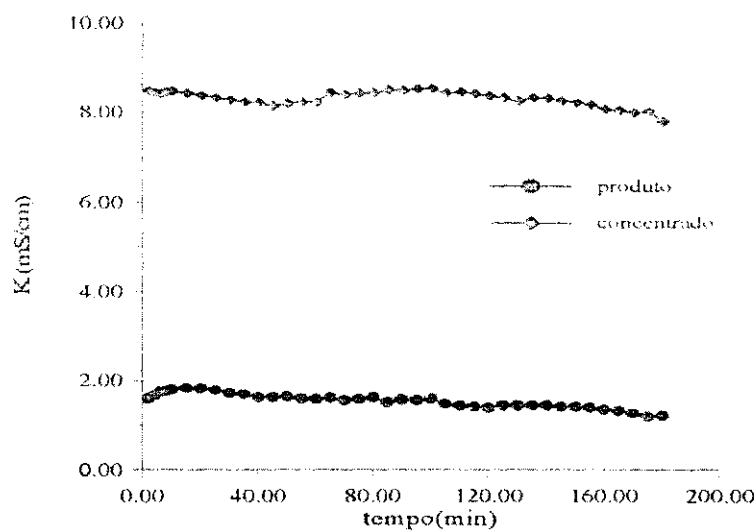


Figura 4.22: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

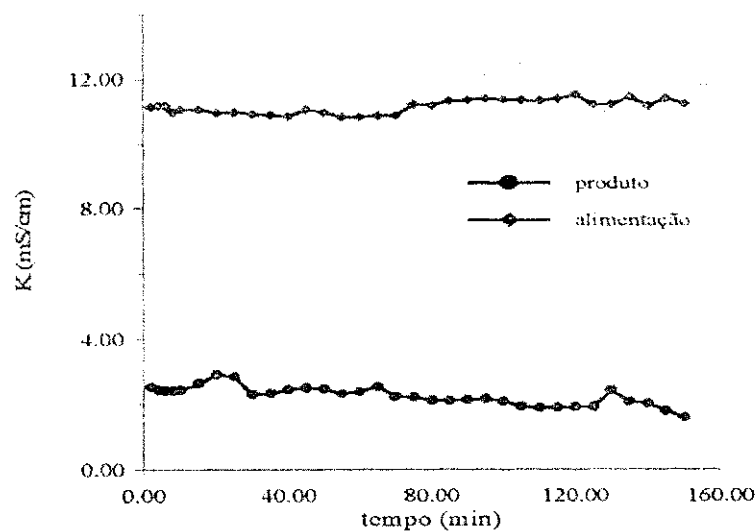


Figura 4.23: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

4.2 - VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE HIDROGÊNIO

Etapa I

A variação de pH dos efluentes do produto e do concentrado para o MRI estão representadas através das Figuras 4.24 a 4.26 e das Tabelas 4.13 e 4.14 do apêndice. O comportamento das curvas do pH do produto foram semelhantes, inicia-se com valores baixos e, logo após, a tendência é aumentar até atingir valores constantes.

Nota-se que a taxa de elevação do pH do produto em função do tempo aumenta em função do aumento da concentração da solução de alimentação, mostrando que a concentração da solução de alimentação está diretamente relacionada com o aumento do transporte iônico no reator e da condutividade elétrica do produto.

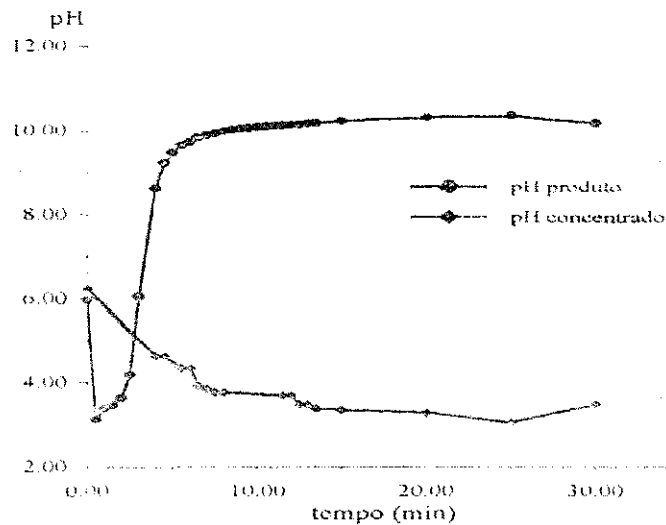


Figura 4.24: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm); $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Estudando o comportamento da Figura 4.26 (Tabela 4.14 do apêndice), observa-se o mesmo comportamento das Figuras 4.24 e 4.25, mas ao aumentar a ddp, a variação do pH foi mais acentuada para os potenciais de 40 e 50 volts. Isto significa dizer que ocorreu uma maior

produção de íons hidrogênio e hidroxila, aumentando assim o pH do produto e diminuindo o pH do concentrado.

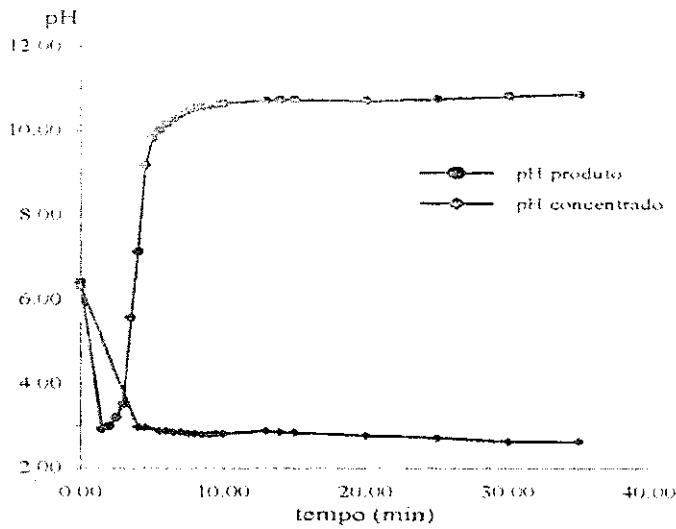


Figura 4.25: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9$ mS/cm (6000 ppm); $K_h = 0,13$ mS/cm; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $V = 36$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

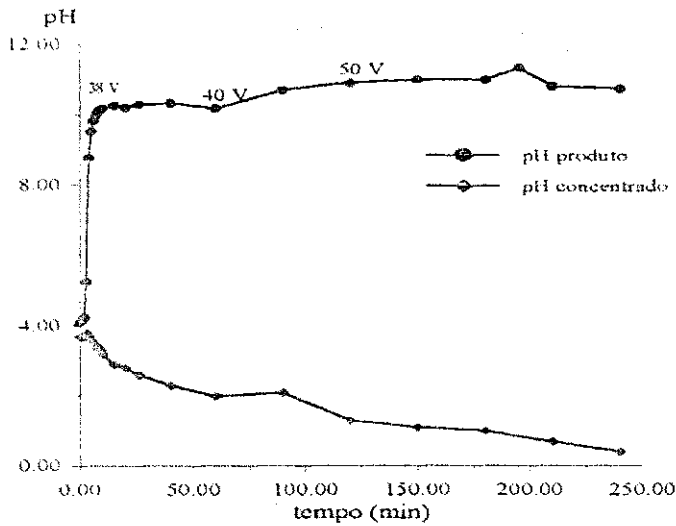


Figura 4.26: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MRI e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 4,87$ μ S/cm; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $V_i = 38$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada e i = inicial).

Esses resultados preliminares com o MRI foram de fundamental importância, comprovando que o sistema oferece condições de trabalho para soluções de cloreto de sódio com concentrações superiores as estudadas e que demonstrou, através de seus resultados, uma boa elevação do pH para o produto obtido.

Outro parâmetro determinado foi o pH médio, obtido quando a curva do pH do produto atinge uma faixa onde torna-se praticamente constante, desse instante em diante foi calculada uma média dos dados coletados.

O pH médio do produto nas bateladas realizadas podem ser visualizados através da Tabela 4.15 no parágrafo que segue, onde pode-se comprovar os resultados discutidos sobre a relação entre o potencial aplicado e a concentração da solução de alimentação. O aumento do potencial elétrico e da concentração de alimentação levam a um aumento do pH médio do produto.

Tabela 4.15: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MRI.

Ca (ppm)	V (volts)	pH médio
900	36	10,15
6000	36	10,72
5000*	38, 40 e 50	10,26; 10,60 e 10,97

* Batelada realizada com o modelo de fluxo de alimentação FA2.

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

V = diferença de potencial em volts.

Etapa 2

Os resultados de pH dos efluentes do produto e do concentrado para o reator MR2, com o modelo de alimentação FAI estão representados pelas Figuras 4.27 a 4.40 e pelas Tabelas 4.16 a 4.22 do apêndice, para concentrações de alimentação de 1000 a 10000 ppm e potenciais de 40 e 50 volts.

Nas Figuras 4.27 a 4.33 que representam os experimentos realizados sob uma ddp de 40 volts, constatou-se que as curvas do pH do produto e do concentrado, de uma maneira geral, apresentaram o mesmo comportamento obtido através do MR1.

Ao dar início a batelada, em alguns casos, foi detectado o pH inicial da solução de alimentação e, a partir desse ponto, iniciou-se a variação do pH dos efluentes. O pH do produto, em pequeno intervalo de tempo, cresce até um certo valor, permanecendo constante até o fim da batelada.

Comparando os resultados das bateladas de 40 volts com as de 50 volts, mostrados através das Figuras 4.34 e 4.40, observou-se que o pH do produto foi superior para as bateladas sob o efeito do potencial de 50 volts, conforme mostra as Tabelas 4.16 a 4.22 do apêndice. Nesse caso o potencial elétrico foi responsável por um aumento na dissociação das moléculas da água nas membranas bipolares, favorecendo a produção da solução alcalina. Segundo Strathmann et al (1993), a taxa de dissociação da água aumenta significativamente com o aumento do campo elétrico.

Esses resultados também podem ser observados através dos valores do pH médio do produto obtido para cada experimento. Através da Figura 4.40 e da Tabela 4.23 do apêndice, pode-se observar que o pH médio do produto foi superior para as bateladas com 50 volts, comparado com as de 40 volts.

Quando a concentração da solução de alimentação é muito elevada, pode ocorrer a migração do co-íon entre as membranas eletrodialíticas provocada pela alta concentração iônica no interior dos compartimentos. Esse fato foi verificado para a batelada realizada com

uma concentração de 10000 ppm, onde o pH médio obtido para o produto foi inferior ao esperado.

O pH dos efluentes do produto e do concentrado em alguns casos sofre variações, apresentando valores altos e baixos. Segundo Davis (1988), a membrana deve possuir uma boa permeabilidade à água, caso contrário, a taxa de geração dos íons H^+ e OH^- será prejudicada, acarretando uma diminuição do pH no compartimento básico e um aumento do pH no compartimento ácido.

O consumo de água na interface devido a dissociação a uma determinada densidade de corrente deve ser igual a taxa de difusão da água na membrana bipolar [Aritomi et al, 1996]. Nos casos estudados supõe-se que a taxa de difusão em alguns momentos foi menor do que o consumo de água na interface, devido a elevação da densidade de corrente. Supõe-se que isso ocorre, em consideração a qualidade da membrana bipolar utilizada no reator. Por se tratar da justaposição de duas membranas eletrodialíticas do tipo monopolar, onde a permeabilidade à água é mínima, originando uma resistência física. Normalmente, a transferência de água através da membrana ocorre por processo difusivo, independente da presença de um potencial elétrico.

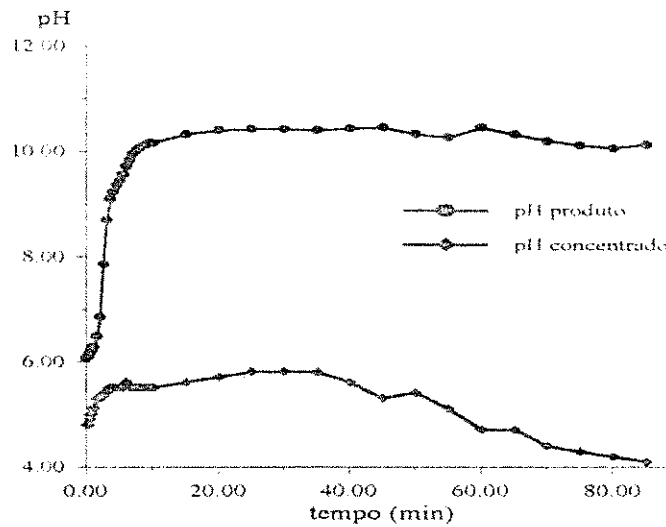


Figura 4.27: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

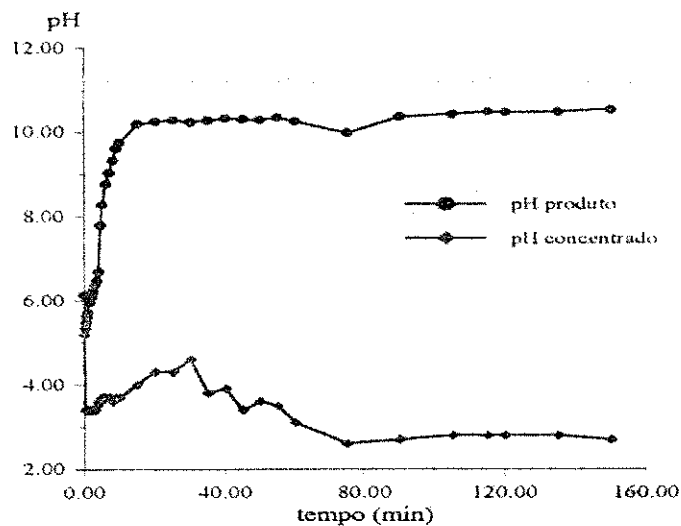


Figura 4.28: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

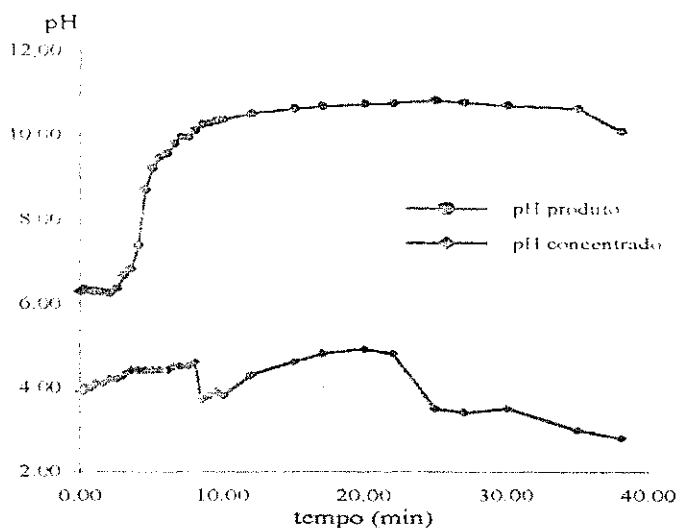


Figura 4.29: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

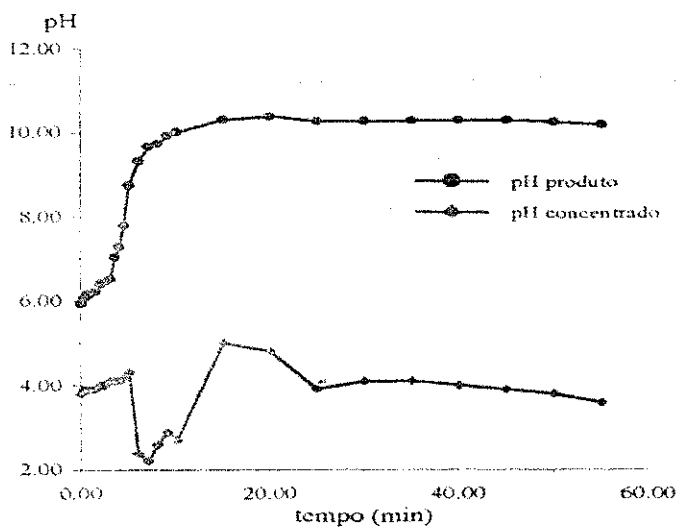


Figura 4.30: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

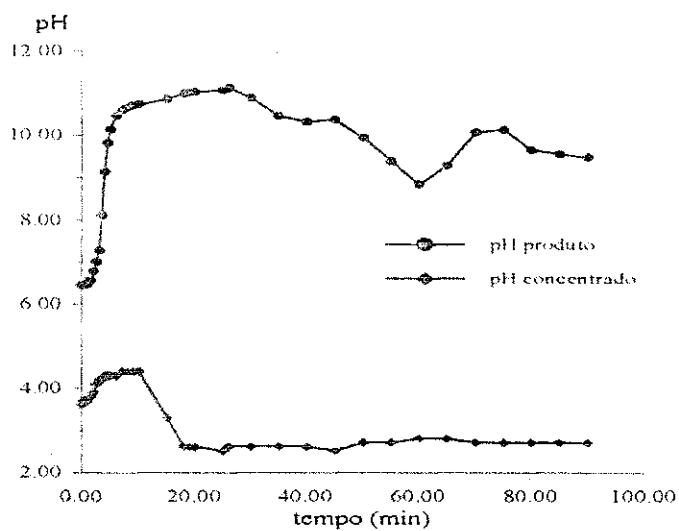


Figura 4.31: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

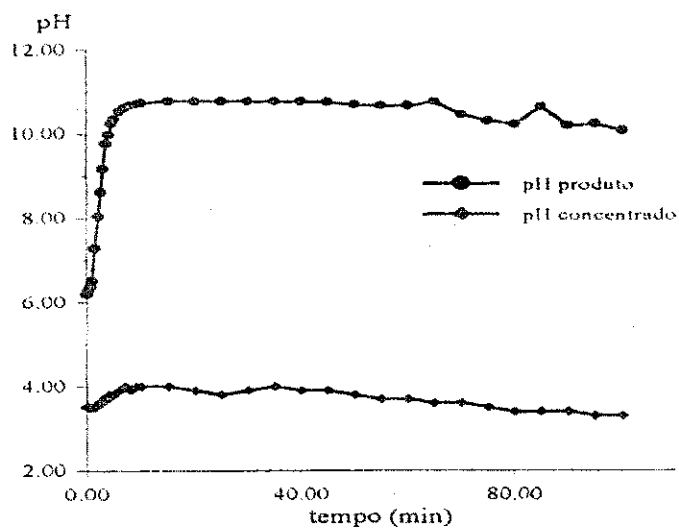


Figura 4.32: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

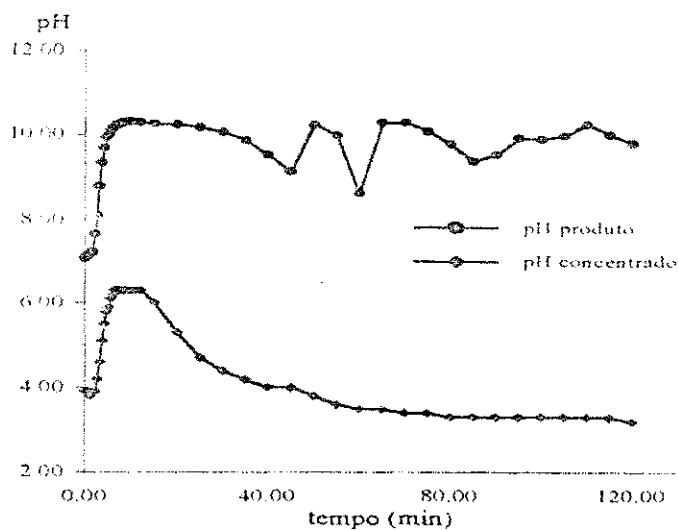


Figura 4.33: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

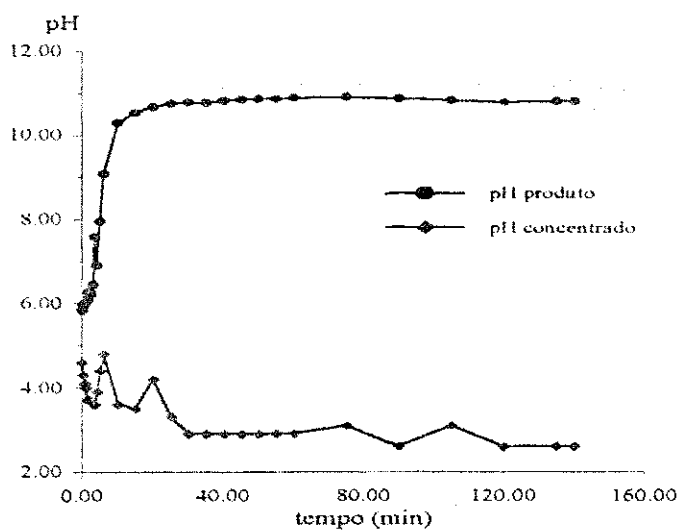


Figura 4.34: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

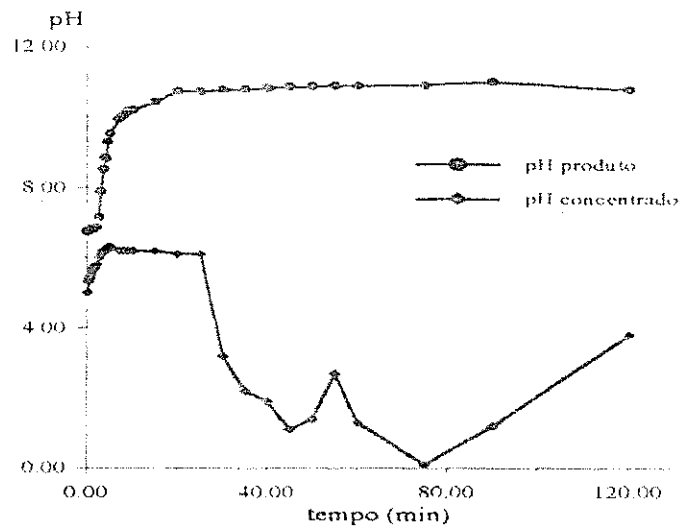


Figura 4.35: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm), $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

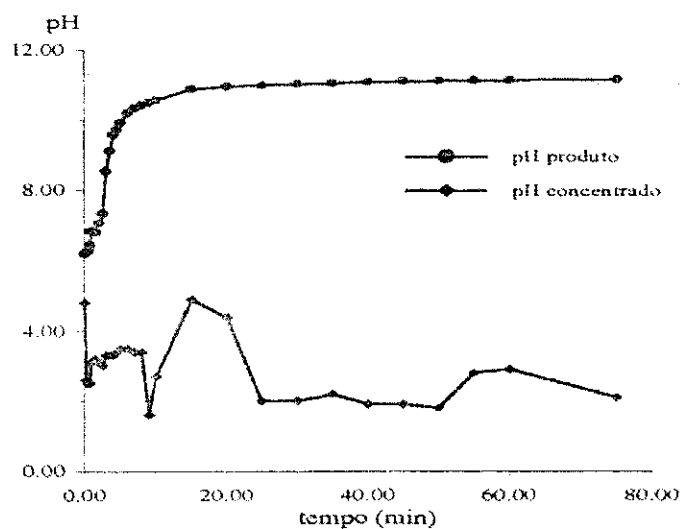


Figura 4.36: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm), $K_h = 22,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

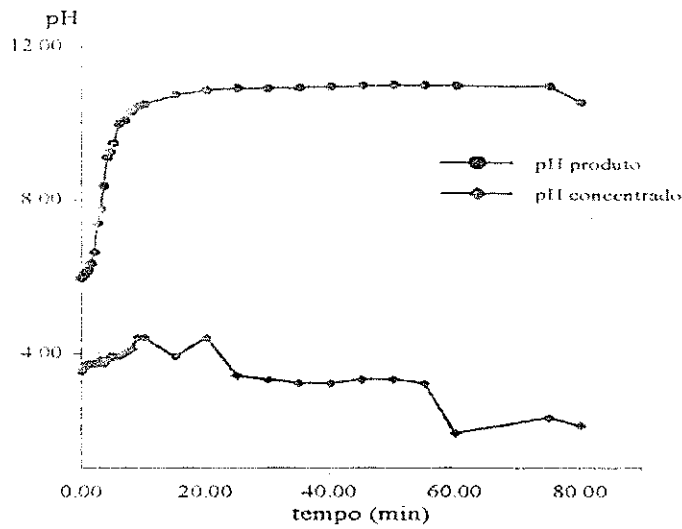


Figura 4.37: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 24,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

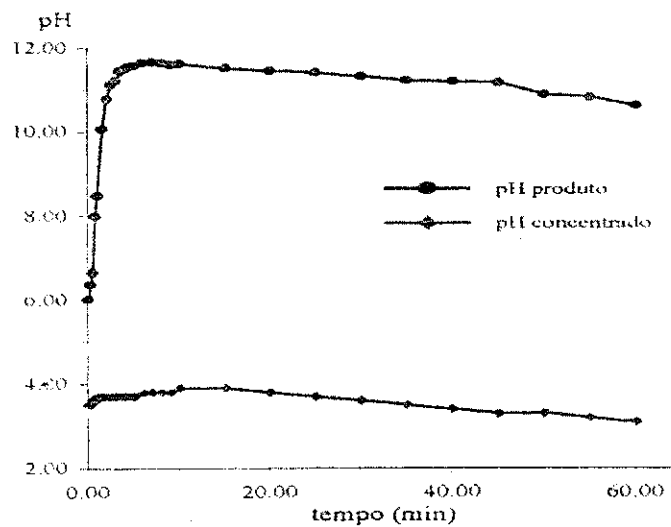


Figura 4.38: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 32,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

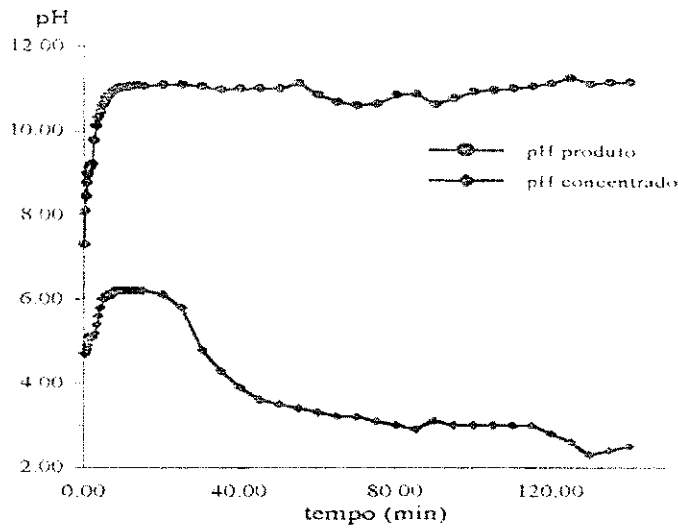


Figura 4.39: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

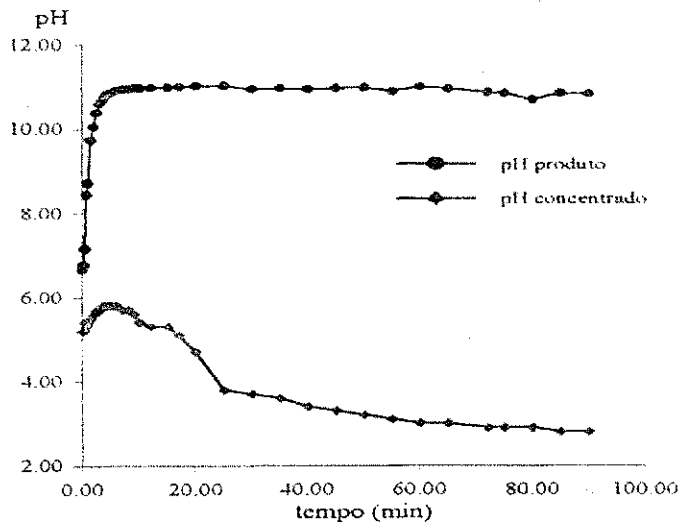


Figura 4.40: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

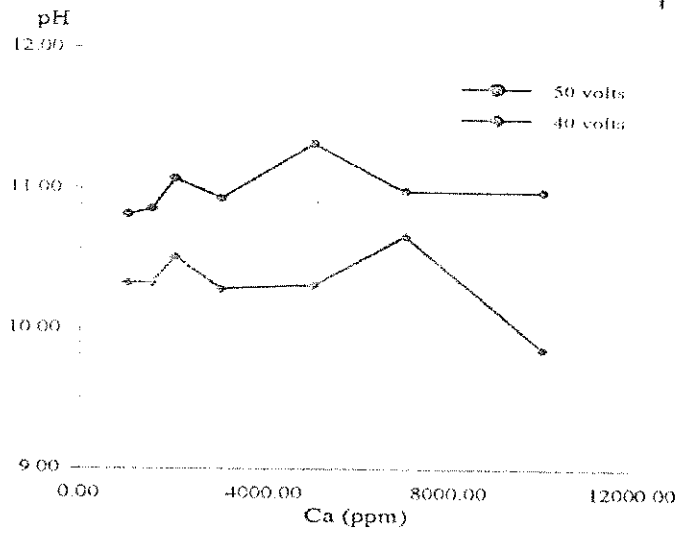


Figura 4.41: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA1.

Na segunda série de experimentos com o MR2, utilizando o modelo de alimentação FA2, os dados da variação do pH dos efluentes do produto e do concentrado se encontram representados pelas Figuras 4.42 a 4.47 e pelas Tabelas 4.24 a 4.26, no apêndice.

Comparando as bateladas realizadas sob o efeito de uma ddp de 40 volts (Figuras 4.42 e 4.44) com as bateladas realizadas sem o reciclo do concentrado sob as mesmas condições, verificou-se que o desempenho do pH do produto foi melhor para as bateladas realizadas com o reciclo do concentrado, com exceção da batelada realizada com uma alimentação de 7000 ppm. Apesar do reciclo do concentrado diluir a solução de alimentação, o potencial aplicado de 40 volts foi adequado, diminuindo a migração do co-íon, que geralmente acontece quando se impõe densidades de correntes elevadas à concentração iônica presente no meio.

As Figuras 4.45 e 4.47 são referentes as bateladas realizadas com reciclo do concentrado sob o efeito de uma ddp de 50 volts. Observou-se, através das bateladas realizadas sob as mesmas condições de operação do sistema sem reciclo do concentrado, que o desempenho do reator foi inferior com o reciclo do concentrado. Supõe-se que o efeito do reciclo do concentrado possibilitou em função do tempo, uma diluição da concentração de íons Na^+ da solução de alimentação e um acréscimo na concentração iônica de Cl^- . Deve-se considerar que a partir deste instante há uma tendência de aumentar a taxa de transporte do co-íon, devido a uma maior concentração de íons Cl^- , conseqüentemente há uma diminuição do pH no compartimento básico reduzindo o rendimento do sistema.

Considerando os comentários feitos anteriormente sobre o efeito do pH médio, observa-se que as bateladas sob uma diferença de potencial de 50 volts apresentaram maiores potenciais hidrogeniônicos. A Figura 4.48 mostra que o reator, aparentemente, oferece condições de operar à concentrações inferiores a 3000 ppm. Pois, observa-se uma tendência do pH médio obtido para o produto aumentar com a diminuição da concentração da solução de alimentação. Nesse sentido, seria interessante realizar mais bateladas para desenvolver um modelo matemático e investigar a melhor faixa de operação em termos de consumo de energia e qualidade do produto, ou seja, qual o melhor potencial elétrico poderia oferecer maior quantidade de produto.

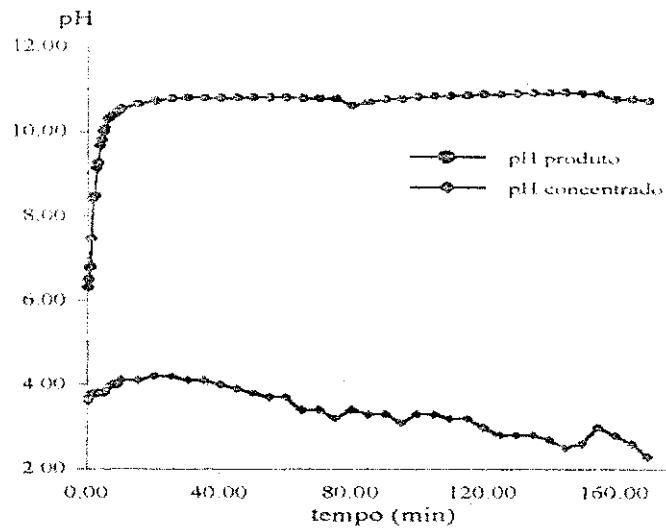


Figura 4.42: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

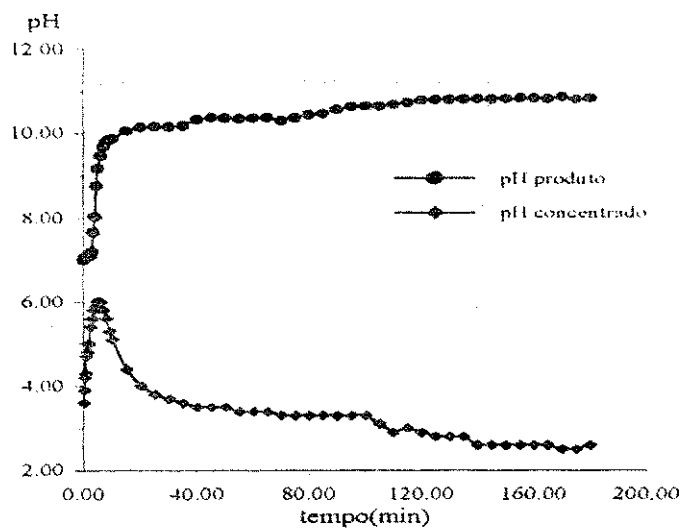


Figura 4.43: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

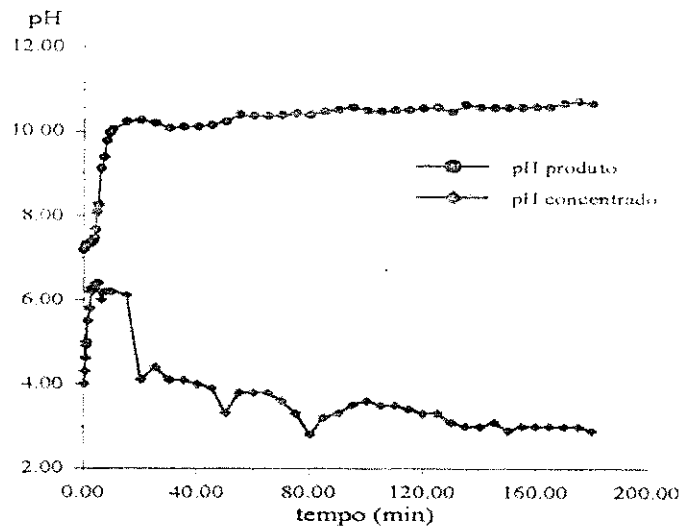


Figura 4.44: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

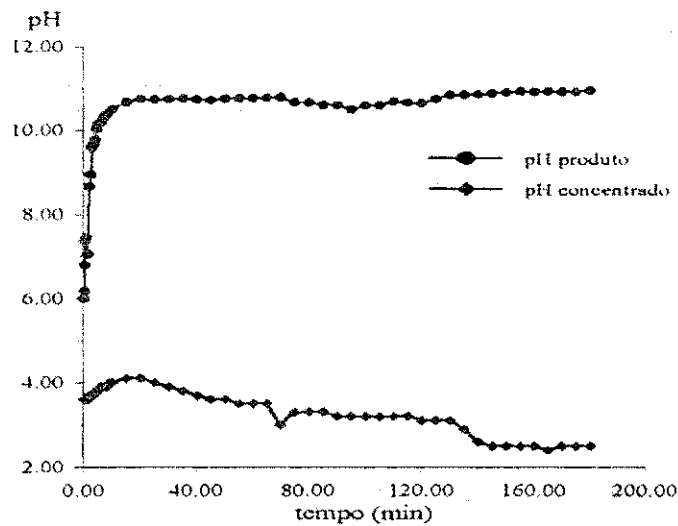


Figura 4.45: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

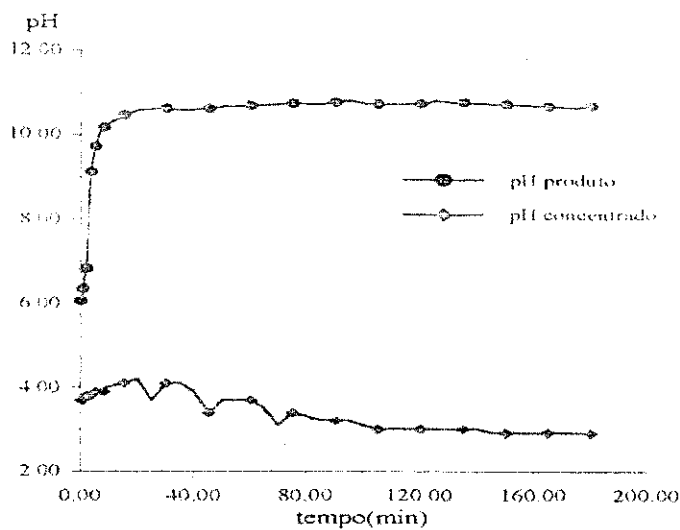


Figura 4.46: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm \text{ } 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

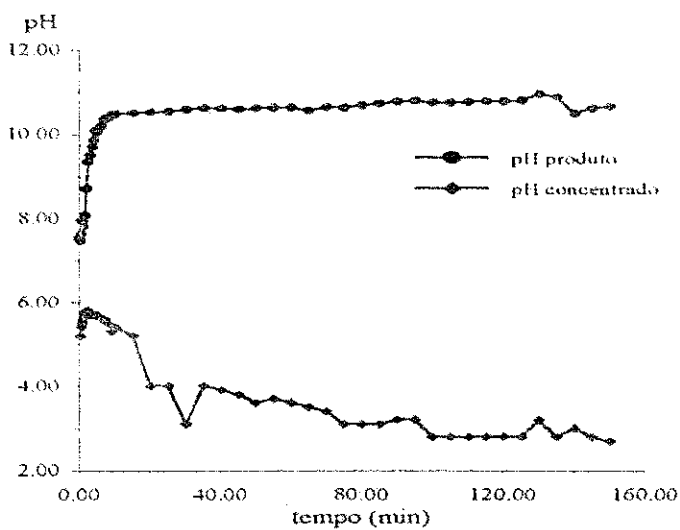


Figura 4.47: Potencial de hidrogênio em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \text{ } \pm \text{ } 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

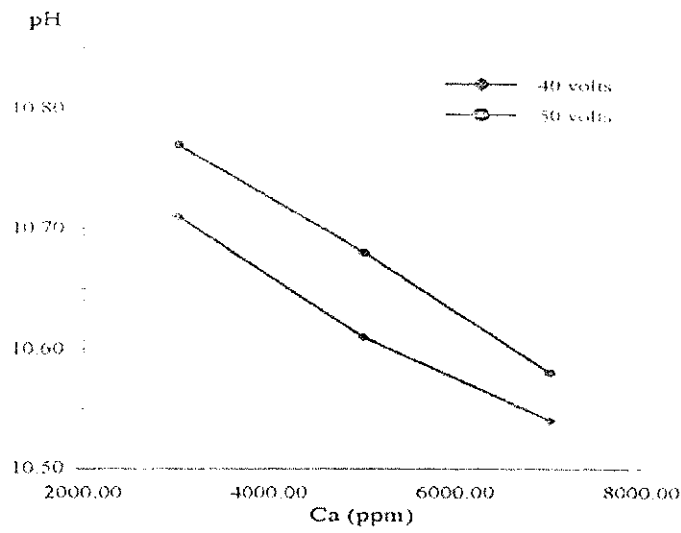


Figura 4.48: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA2.

4.3 - DENSIDADE DE CORRENTE E EFICIÊNCIA DE CORRENTE

Etapa 1

As Figuras 4.49 a 4.51 e as Tabelas 4.28 a 4.30 do apêndice, representam os dados de densidade de corrente e eficiência de corrente para o MRI, durante o processo eletrodialítico. A densidade de corrente representa o transporte iônico no interior do reator, o qual pode aumentar ou diminuir em função do caminho hidrodinâmico oferecido pelos compartimentos, da diferença de potencial aplicada e também da concentração das espécies iônicas presentes [Strathmann, 1992].

Nas bateladas realizadas sob o efeito de 36 volts e fluxo de alimentação FAI representadas pelas Figuras 4.49 e 4.50, observou-se que para os instantes iniciais, a densidade de corrente apresentou uma função impulso e logo após tende a aumentar progressivamente. Essa função impulso deve-se ao fato do sistema ainda não se encontrar em regime de estabilização. A medida que a resistência do meio aumenta, o transporte iônico através das membranas tende a diminuir e a medida que ocorre o transporte iônico, existe uma tendência do sistema atingir o equilíbrio iônico nos compartimentos. Isto se comprova observando que para alguns instantes a densidade de corrente permanece constante e a medida que o transporte iônico ocorre entre as membranas eletrodialíticas, a densidade de corrente tende a aumentar.

O comportamento da resistência elétrica durante a eletrodialise mostrou-se de forma inversa a densidade de corrente para todos os experimentos. Portanto, à medida que a concentração iônica no interior do reator aumenta, o transporte iônico torna-se maior entre as células diminuindo a resistência do meio. O dados da resistência ôhmica para o MRI podem ser observados nas Tabelas 4.28 a 4.30, do apêndice.

Comparando os dados de densidade de corrente das Figuras 4.49 e 4.50, observou-se que ambas iniciam com valores muito inferiores, mas o experimento de maior concentração da solução de alimentação (6000 ppm) apresentou valores superiores ao longo da batelada.

Mais uma vez, pode-se notar que o potencial de transporte iônico formado no interior do reator depende da concentração inicial da solução de alimentação.

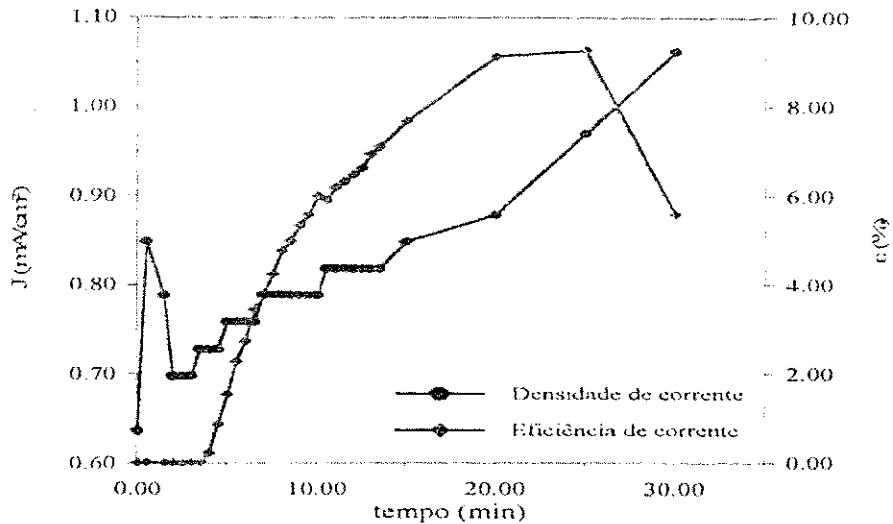


Figura 4.49: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm); $K_h = 5,96 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

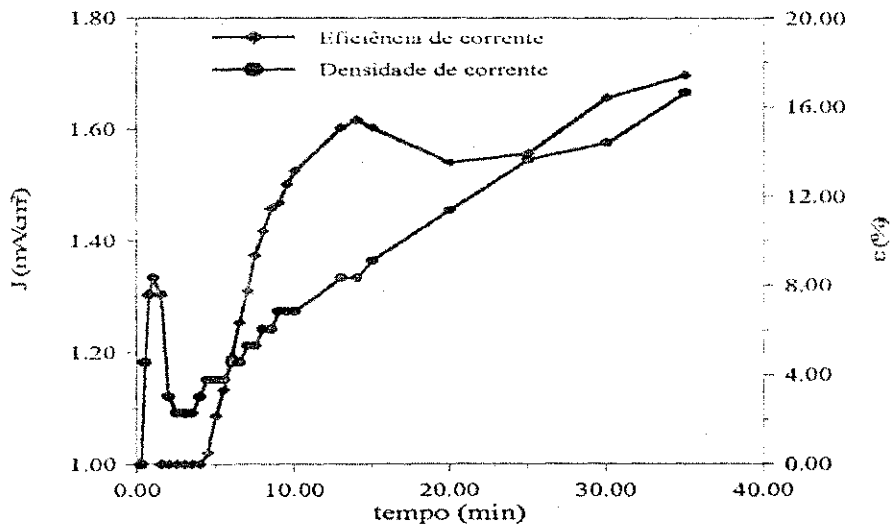


Figura 4.50: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V = 36 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

As curvas experimentais representadas na Figura 4.51 (Tabela 4.30, no apêndice) ilustram diferentes potenciais elétricos para o fluxo de alimentação FA2. Sob a ação do reciclo do concentrado, o aumento da densidade de corrente foi favorecido, observando que a densidade de corrente para os primeiros 40 minutos aumentou praticamente sob a mesma taxa de evolução da batelada a 36 volts para uma concentração de 6000 ppm, sem uso do reciclo. O comportamento da densidade de corrente aumentou também em função do aumento da diferença de potencial. Esse estudo ofereceu condições de perceber a influência do aumento da ddp sobre o transporte iônico no interior do reator, conforme pode-se observar a partir dos 60 minutos iniciais.

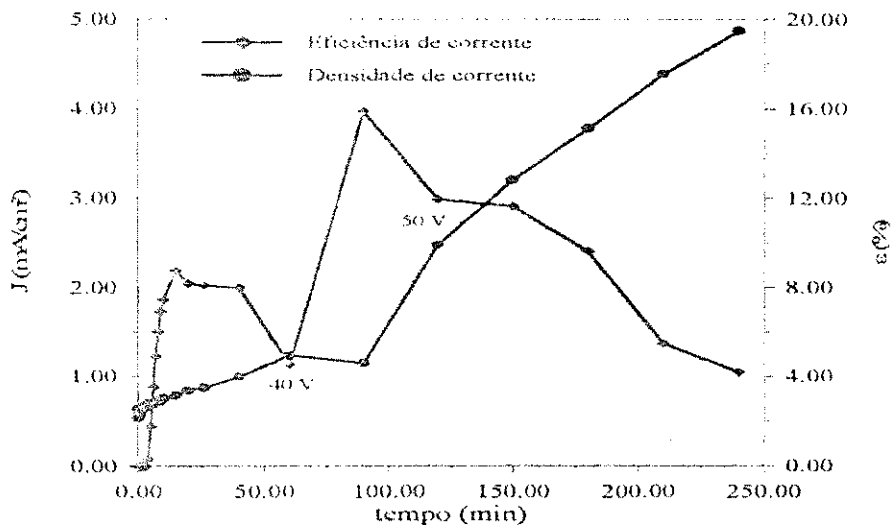


Figura 4.51: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MRI e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada e i = inicial).

O gradiente de potencial elétrico e o gradiente de concentração formado entre as células, são basicamente os responsáveis pela transferência iônica no reator eletrodialítico com membranas seletivas. Quando o gradiente de concentração entre os compartimentos é relativamente pequeno, o processo de transferência iônica ocorre rapidamente. Mas quando trata-se de altos gradientes de concentração pode ocorrer um aumento na migração do co-íon [Shah & Scamehorn, 1978].

O transporte dos co-ions através das membranas contribuem para a perda da eficiência de corrente na produção do ácido e da base e limita a concentração e a pureza dos mesmos [Graillon et al, 1996]

Observando as curvas de eficiência de corrente, verifica-se o mesmo comportamento para todos os experimentos. Quando a dissociação eletrodialítica da água inicia no reator a eficiência de corrente aumenta progressivamente e, após um certo tempo, sofre variações, apresentando perdas de eficiência de corrente sempre associadas a um aumento repentino da densidade de corrente ou a uma diminuição do pH do produto.

O aumento da densidade de corrente acarreta um maior consumo de água na interface da membrana bipolar devido a dissociação da água, ultrapassando a taxa de difusão da água da superfície até a interface. Este fato contribui para a diminuição da produção dos íons H^+ e OH^- . Dessa forma, a concentração iônica no compartimento ácido torna-se baixa favorecendo a migração do co-ion através da membrana bipolar para o compartimento básico, diminuindo a eficiência de corrente na produção da solução alcalina .

A baixa permeabilidade à água da membrana bipolar utilizada, também prejudica a produção dos prótons e íons hidroxila, explicando as perdas de eficiência de corrente devido a diminuição do pH do produto, mesmo sem ocorrer aumentos na densidade de corrente. Este fato pode ser verificado observando os dados obtidos para o pH do produto (Tabelas 4.13 a 4.14 do apêndice).

Etapa 2

As Figuras 4.52 a 4.65 e as Tabelas 4.31 a 4.44 do apêndice, apresentam o comportamento da densidade de corrente e da eficiência de corrente para a primeira de série de bateladas realizadas com o MR2, utilizando o modelo de alimentação FAI.

Analisando as Figuras 4.52 a 4.58 e as Tabelas 4.31 a 4.37 do apêndice, que representam a série de bateladas realizadas sob o efeito do potencial elétrico de 40 volts, observou-se para os instantes iniciais, o mesmo comportamento obtido nos experimentos realizados com o MRI. A densidade de corrente sofre um impulso e depois tende a se estabilizar, para em seguida ocorrer novas oscilações apresentando patamares de estabilizações. O fato da densidade de corrente originar valores superiores em pequeno espaço de tempo pode ser devido ao aumento da concentração iônica nos compartimentos ácido e básico do reator.

O experimento representado pela Figura 4.57 foi uma exceção entre as bateladas realizadas sob uma ddp de 40 volts, pois neste, observou-se que a densidade de corrente apresentou um perfil semelhante aos demais, mas sempre no sentido crescente em função do tempo. Quanto ao comportamento da eficiência de corrente, pode-se considerar os mesmos argumentos atribuídos ao modelo MRI.

Comparando os resultados obtidos para as bateladas realizadas sob uma ddp de 50 volts, os quais estão representados pelas Figuras 4.59 e 4.65 e pelas Tabelas 4.38 a 4.44 do apêndice, nota-se que a densidade de corrente não apresenta muitas oscilações no decorrer do tempo, como foi observado nos resultados das bateladas com 40 volts.

A resistência elétrica como uma função da concentração dos ions, diminui com o aumento da densidade de corrente, conforme mostram as Tabelas 4.31 a 4.37 do apêndice. O aumento da resistência da eletrodialise bipolar pode ser assumido como um decréscimo na difusão e dissociação da água no interior da membrana bipolar [Strathmann, 1993].

As Tabelas 4.45 e 4.46 abaixo, comprovam a alta migração do co-íon (Cl^-) para o compartimento básico baseado em dados das concentrações de sódio e cloro nos efluentes do produto e do concentrado determinados para o MR2 e FA1. As concentrações de sódio foram determinadas por espectrofotometria e as concentrações de cloro por titulação.

Os resultados obtidos a partir das análises comprovam que o potencial de concentração dos íons Na^+ aumenta em função da concentração de alimentação. Essa grandeza depende, conforme foi comentado na seção 4.2, da presença dos co-íons (interferentes) durante o processo. Um outro parâmetro importante é o tempo de residência da solução de alimentação no interior do reator, o qual pode oferecer outras condições de transporte em função da concentração da solução de alimentação.

Tabela 4.45: Concentrações de sódio e cloro no produto e no concentrado para o MR2 e FA1, sob uma diferença de potencial de 40 volts.

Ca (ppm)	Produto		Concentrado	
	Na^+ (g/l)	Cl^- (g/l)	Na^+ (g/l)	Cl^- (g/l)
1500	0,16	0,28	0,67	0,96
2000	0,26	0,50	0,82	1,31
3000	0,24	0,43	1,15	1,95

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

Tabela 4.46: Concentrações de sódio e cloro no produto e no concentrado para o MR2 e FA1, sob uma diferença de potencial de 50 volts.

Ca (ppm)	Produto		Concentrado	
	Na^+ (g/l)	Cl^- (g/l)	Na^+ (g/l)	Cl^- (g/l)
1000	0,18	0,25	0,58	0,71
1500	0,17	0,39	0,62	0,96
2000	0,18	0,32	0,77	1,24
3000	0,24	0,43	1,15	1,85

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

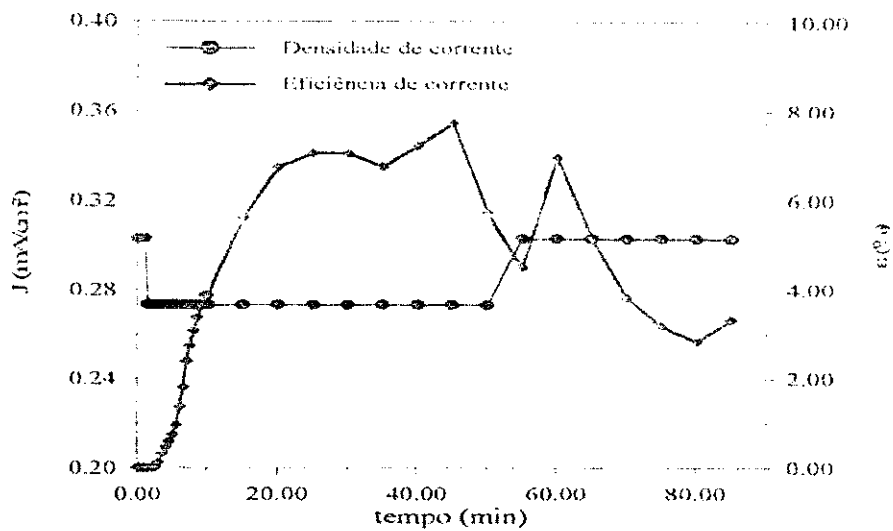


Figura 4.52: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

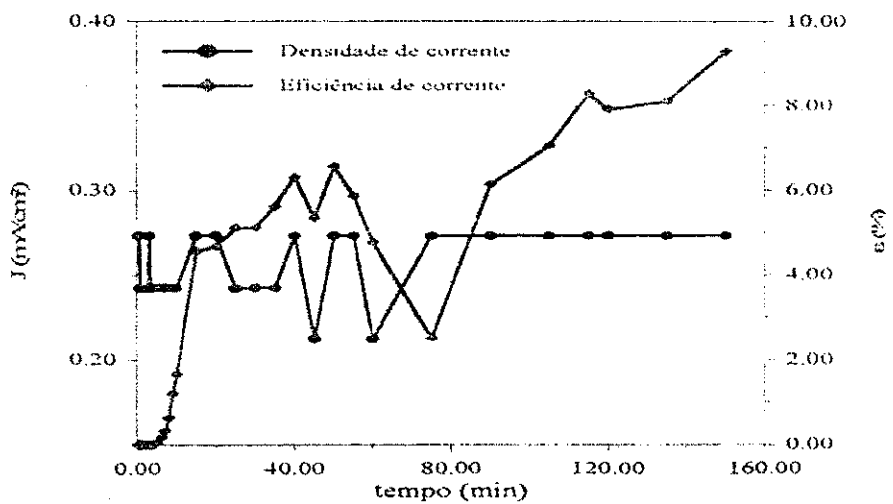


Figura 4.53: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

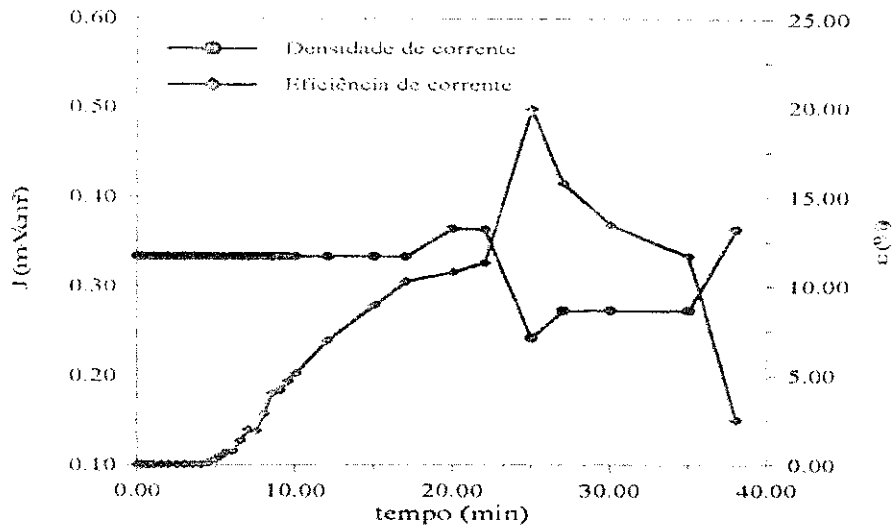


Figura 4.54: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

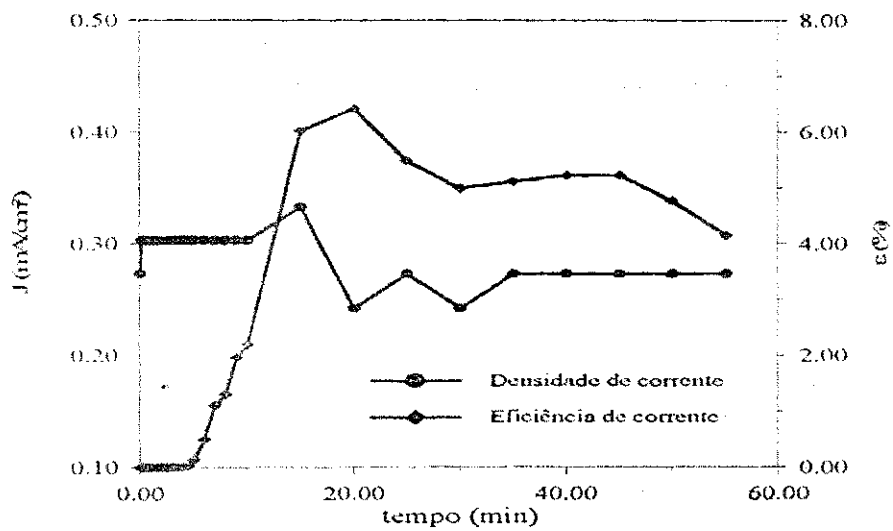


Figura 4.55: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

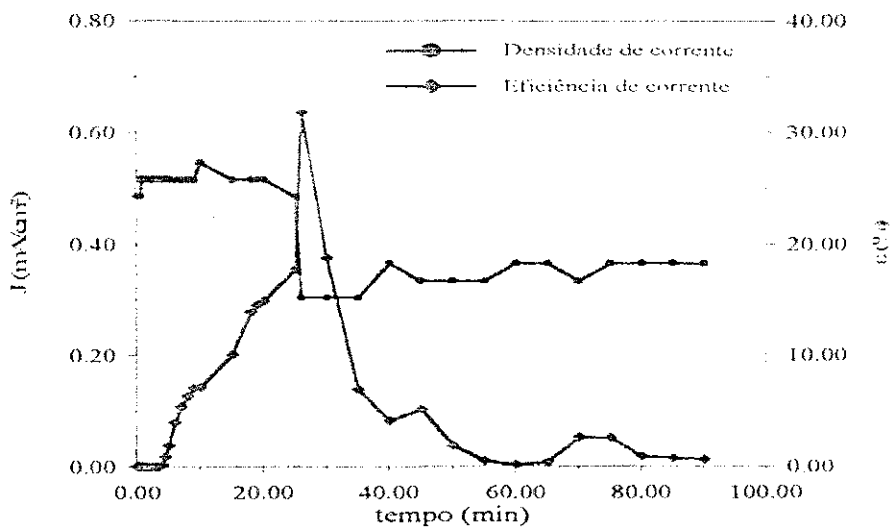


Figura 4.56: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

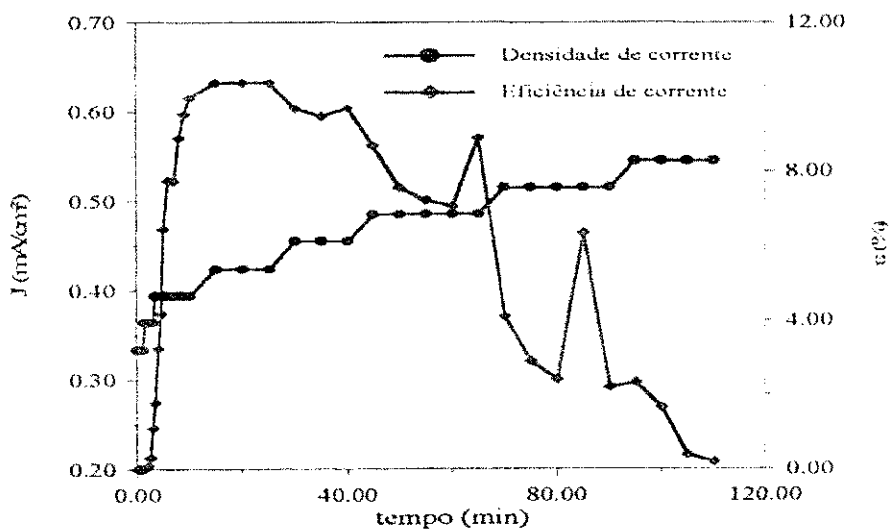


Figura 4.57: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

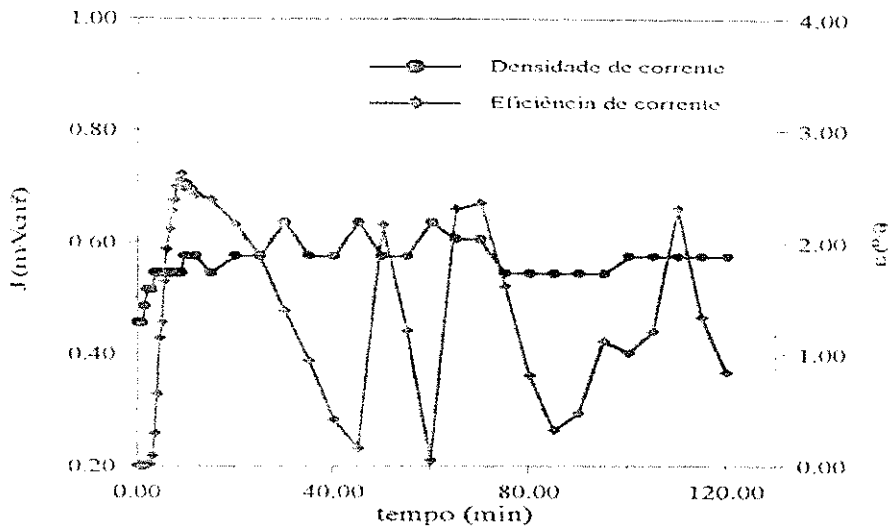


Figura 4.58: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

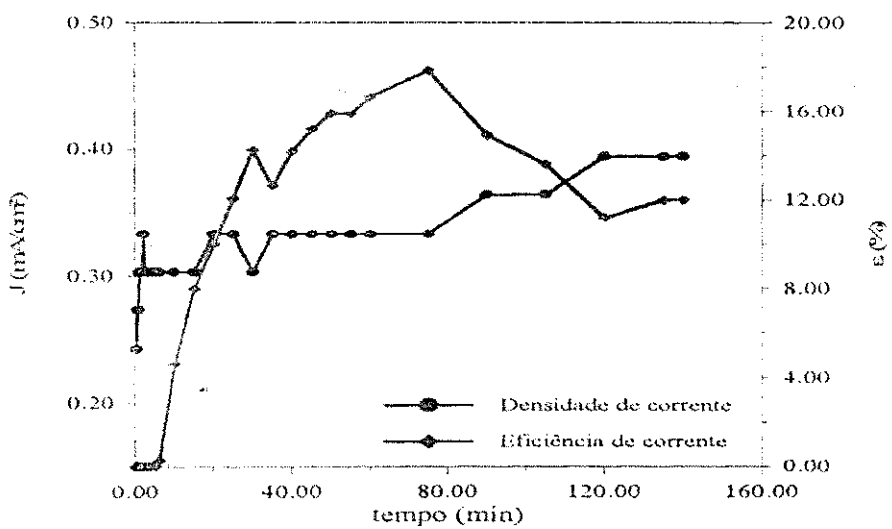


Figura 4.59: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

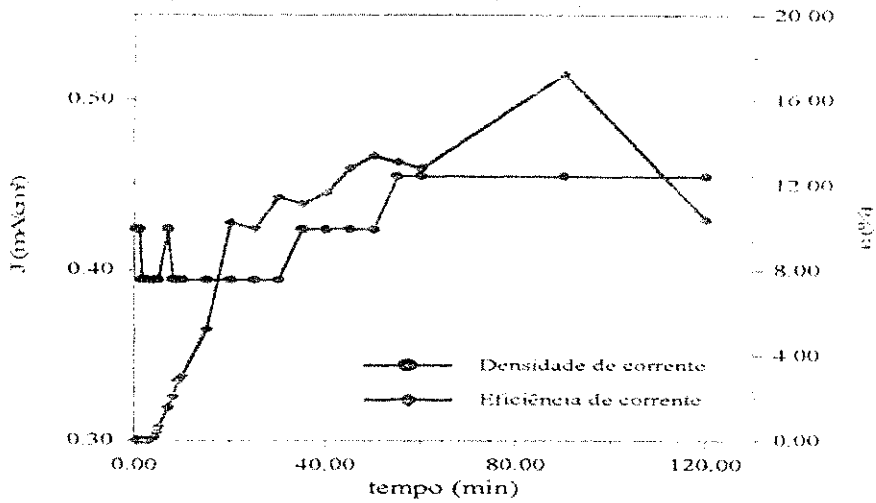


Figura 4.60: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

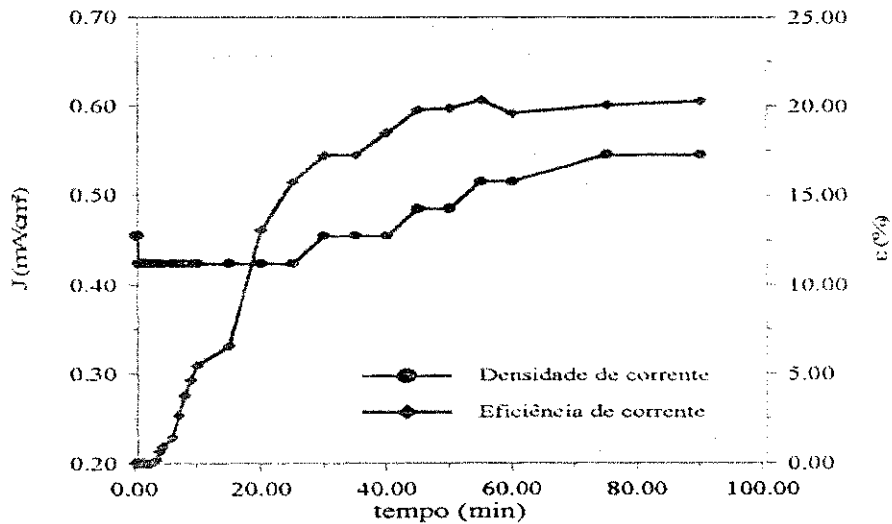


Figura 4.61: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 22,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

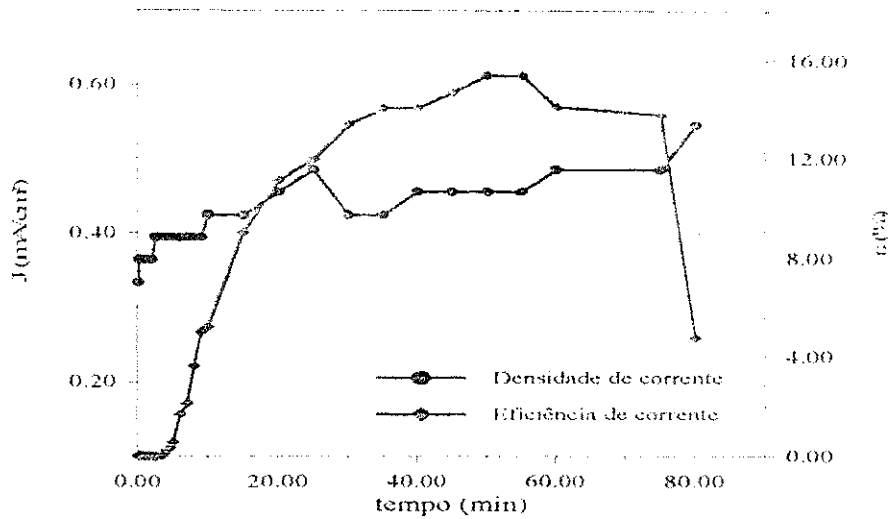


Figura 4.62: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 24,7$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

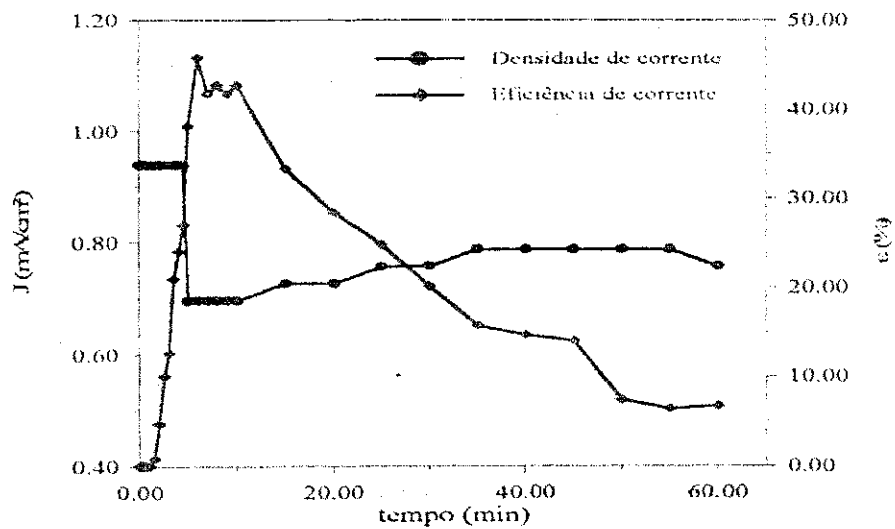


Figura 4.63: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 32,1$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 50$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

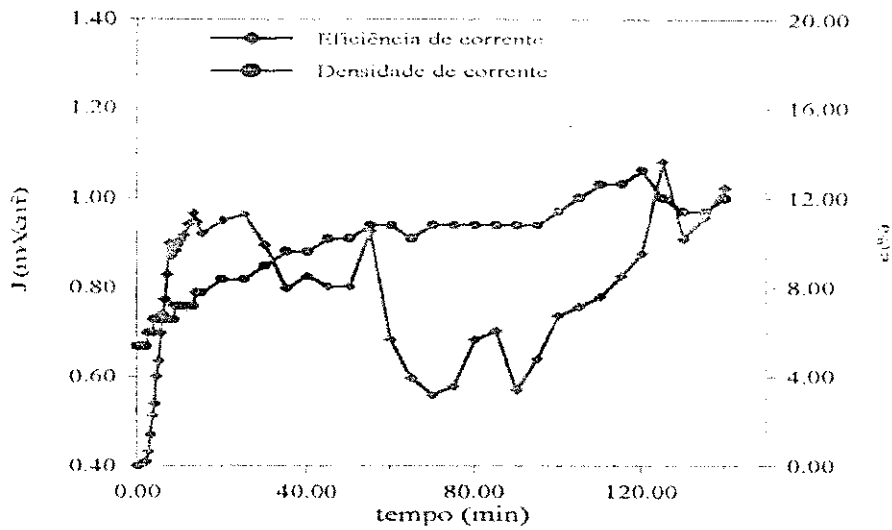


Figura 4.64: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

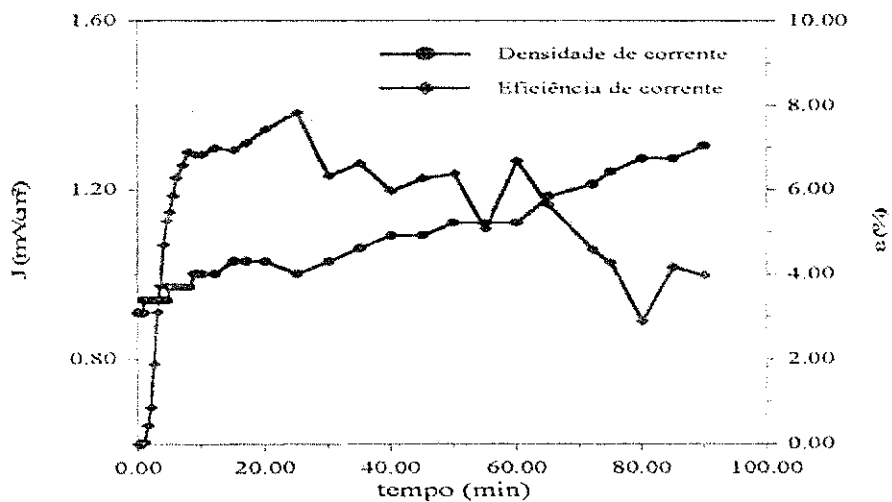


Figura 4.65: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

As Figuras 4.66 a 4.71 e as Tabelas 4.47 a 4.52 do apêndice, representam a densidade de corrente e a eficiência de corrente para a segunda de série de bateladas realizadas com o MR2, utilizando o modelo de alimentação FA2

Analisando as bateladas realizadas com o potencial elétrico de 40 volts, conforme mostram as Figuras 4.66 e 4.68 e as Tabelas 4.47 a 4.49 do apêndice, podemos verificar o mesmo comportamento das bateladas realizadas com o modelo de alimentação FA1, para as mesmas concentrações das soluções de alimentação (3000, 5000 e 7000 ppm), onde a densidade de corrente apresenta o mesmo perfil com a tendência de permanecer constante durante a batelada, mas apresentando oscilações em pequenos intervalos de tempo, conforme foi observado em casos anteriores. Observou-se também que esse comportamento constante foi mais longo para as bateladas de concentrações de alimentação elevadas. Este fato ocorre, devido ao transporte iônico no interior do reator permanecer mais homogêneo com o aumento da concentração da solução de alimentação.

Observando os resultados obtidos com uma ddp de 50 volts representados pelas Figuras 4.69 e 4.71 e pelas Tabelas 4.50 a 4.52 do apêndice, verificou-se que os experimentos realizados com o reciclo do concentrado apresentaram um perfil praticamente constante no decorrer do tempo, o que não ocorreu nos experimentos realizados sem o reciclo sob as mesmas condições, onde a densidade de corrente observada é sempre crescente. Quando as bateladas com ddp de 50 volts são comparadas com as de 40 volts, nesta segunda série de experimentos realizados com o MR2, verifica-se que o comportamento constante foi superior para as bateladas de 50 volts nas mesmas condições de alimentação. Isso significa que o processo ocorreu sem interferências, ou seja, sem aumento ou diminuição de corrente, logo o fluxo iônico foi praticamente constante.

Como foi mencionado anteriormente, a resistência ôhmica apresentou-se de forma inversa a densidade de corrente, isso foi comprovado em todas as bateladas (Tabelas 4.47 a 4.52, no apêndice), onde a resistência diminui, geralmente, em função do aumento da concentração da solução de alimentação. Uma solução de alimentação de maior concentração aumenta a mobilidade iônica nos compartimentos do reator, favorecendo o aumento da densidade de corrente e o decréscimo da resistência durante o processo. Os resultados obtidos

para a eficiência de corrente apresentaram o mesmo comportamento e os comentários feitos anteriormente são válidos para todas as bateladas.

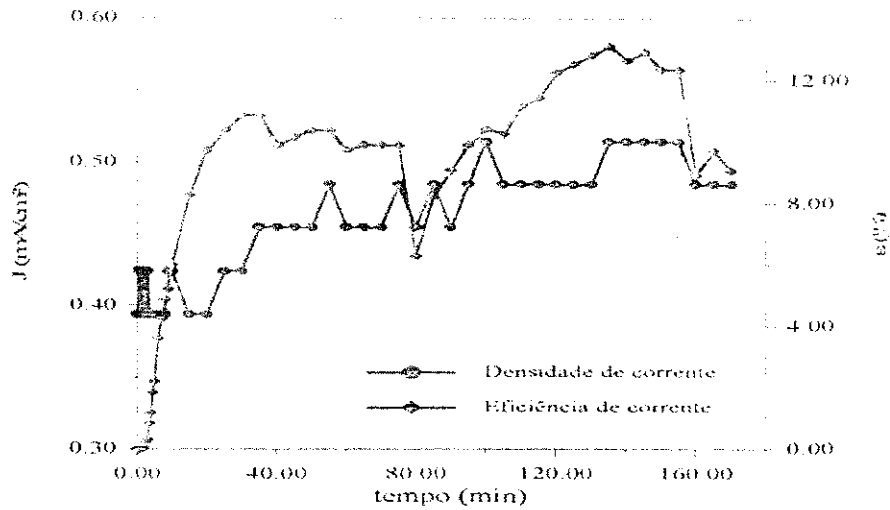


Figura 4.66: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 54,5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

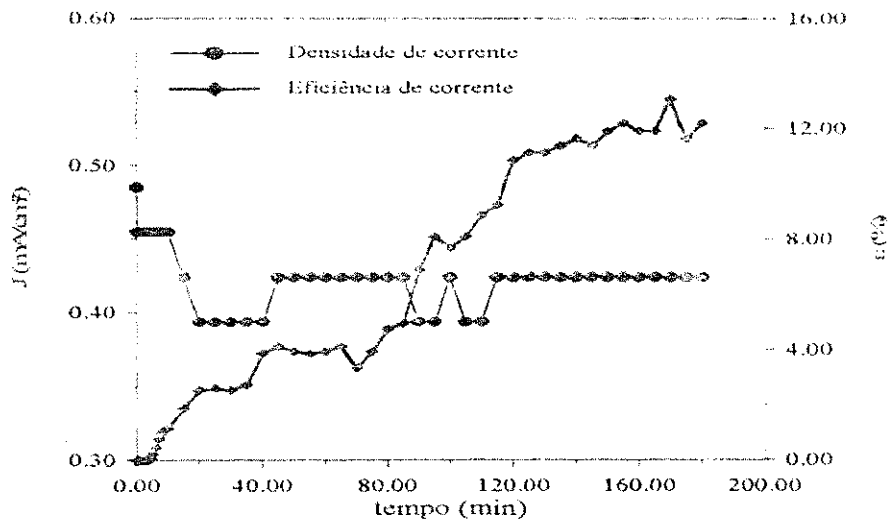


Figura 4.67: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 45,5$ μ S/cm; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $V = 40$ V; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

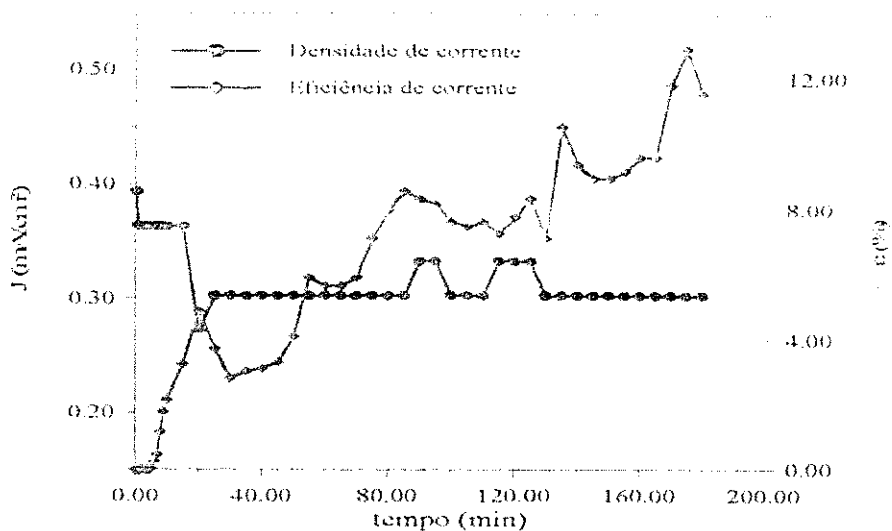


Figura 4.68: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 40 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

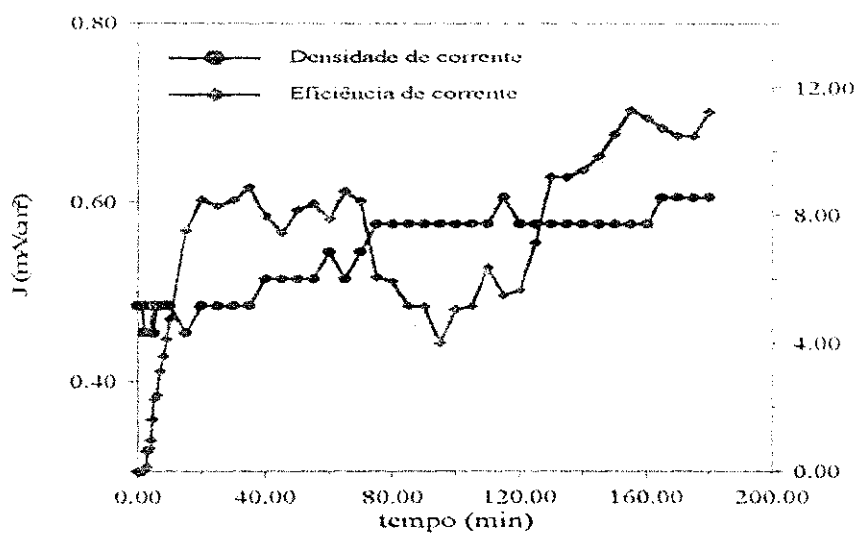


Figura 4.69: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,6 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 46,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

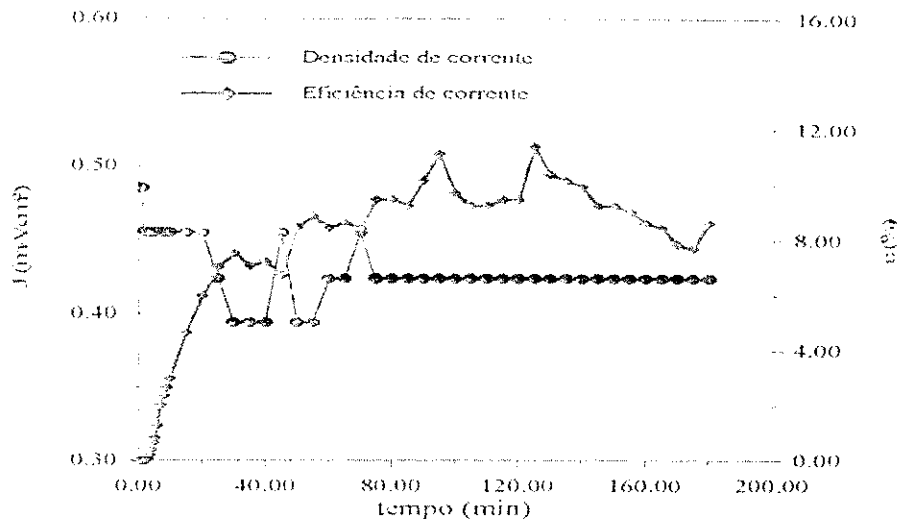


Figura 4.70: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

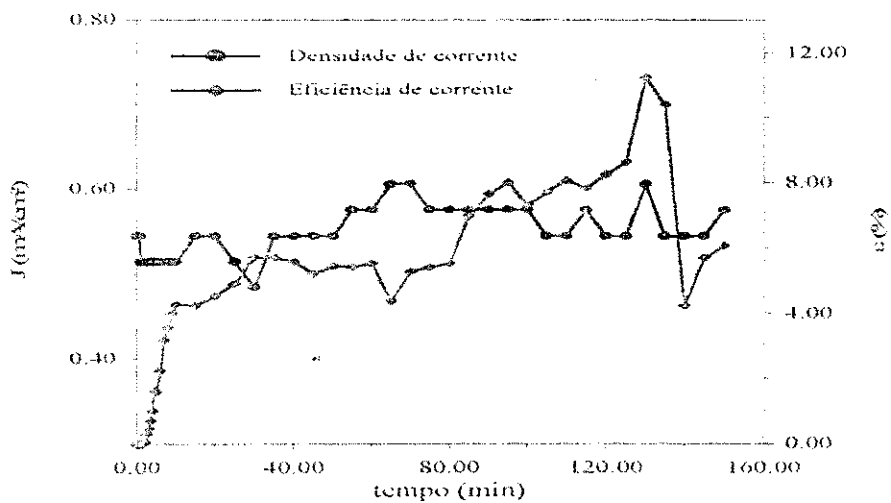


Figura 4.71: Densidade de corrente e eficiência de corrente em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 68,0 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

4.4 - EFICIÊNCIA DE CORRENTE E CONSUMO DE ENERGIA

As Tabelas 4.53 e 4.54 mostram o desempenho da eficiência de corrente para os dois reatores estudados (MR1 e MR2). Na determinação desses resultados, foi necessário utilizar os valores da corrente média e do pH médio obtido para cada batelada.

A eficiência de corrente depende da concentração inicial da solução, da diferença de potencial aplicado, do número de células eletrodialíticas e do tempo de residência da solução no reator. Como nesse caso, a vazão do produto, o número de células eletrodialíticas e o número de Faraday são constantes, a eficiência de corrente dependerá da corrente e da concentração do produto na solução alcalina. A concentração do produto foi avaliada em função do pH médio do produto.

Os resultados da eficiência de corrente para o MR1 encontram-se na Tabela 4.53. Observa-se que aumento da concentração de alimentação a uma ddp de 36 volts aumentou a eficiência de corrente do sistema. Para a faixa de concentração estudada, o aumento da concentração de alimentação a uma ddp constante favoreceu o transporte iônico no interior do reator e a produção da solução alcalina. Para o modelo FA2 o MR1, apresentou um aumento da eficiência de corrente para a ddp de 40 volts, enquanto que, o aumento da ddp para 50 volts diminuiu a eficiência de corrente, devido ao aumento da densidade de corrente, favorecendo a migração do co-íon.

Tabela 4.53: Eficiência de corrente em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR1.

Ca (ppm)	V (volts)	ϵ (%)
900	36	6,55
6000	36	15,07
5000*	38,40 e 50	9,54; 12,16 e 9,1

* Batelada realizada com o modelo de fluxo de alimentação FA2.

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

V = diferença de potencial em volts.

ϵ = eficiência de corrente em percentagem.

Os resultados da eficiência de corrente para o MR2 encontram-se na Tabela 4.54. Comparando os modelos FA1 e FA2 a 40 volts, observa-se que a eficiência do modelo FA2 foi superior, já a mesma coisa não ocorreu a 50 volts. Para explicar este fato deve-se levar em consideração que a diferença de potencial aplicada foi superior e conseqüentemente seu efeito na produção da solução alcalina apresentou os melhores valores para o modelo FA1, já para o caso da concentração de alimentação de 7000 ppm, existe uma tendência significativa para os dois modelos da eficiência de corrente diminuir. Sabe-se que a diferença de potencial elevada contribui com o efeito de polarização no compartimento salino, favorecendo a migração do ion H^+ livre para o compartimento do produto. Quando isso ocorre o potencial hidrogeniônico diminui.

Tabela 4.54: Eficiência de corrente em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2.

Ca (ppm)	ϵ (%)			
	40 volts		50 volts	
	FA1	FA2	FA1	FA2
3000	4,79	8,46	15,02	8,16
5000	3,37	6,93	18,46	8,01
7000	6,68	7,72	8,47	5,10

Onde: C_s = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

ϵ = eficiência de corrente em percentagem.

Nas Tabelas 4.55 e 4.56 estão representados os consumos de energia para todos os experimentos realizados. Analisando a Tabela 4.55 referente ao modelo de reator MR1, observou-se que o consumo energético aumenta em função da concentração da solução de alimentação. Estes resultados concordaram com estudos realizados por Strathmann (1992). Tendo em vista que um aumento da concentração da alimentação faz com que a concentração iônica no interior do reator seja maior e com isso, o transporte iônico entre as membranas eletrodialíticas é mais acentuado, exigindo assim um maior consumo de energia para a dissociação e transporte iônico, obviamente deve ser considerado outros parâmetros como perdas por fricção (através da dissipação térmica devido ao atrito oferecido pelos

componentes do reator), taxa de aquecimento, áreas ativas de membranas e eletrodos, distâncias entre as membranas, número de compartimentos, etc.

Tabela 4.55: Consumo de energia em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR1.

Ca (ppm)	V (volts)	E_p (kWh/m ³)
900	36	1,05
6000	36	1,66
5000*	38,40 e 50	0,96; 1,75 e 6,88

* Batelada realizada com o modelo de fluxo de alimentação FA2.

Onde: C_s = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

V = diferença de potencial em volts.

E_p = consumo de energia prático em kWh/m³.

Tabela 4.56: Consumo de energia em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2.

Ca (ppm)	E_p (kWh/m ³)			
	40 volts		50 volts	
	FA1	FA2	FA1	FA2
3000	0,55	0,84	0,76	1,24
5000	0,83	0,81	1,93	1,03
7000	0,94	0,62	1,94	1,29

Onde: C_s = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

E_p = consumo de energia prático em kWh/m³.

Em termos de potencial elétrico, verificou-se que de um modo geral as bateladas realizadas sob o efeito de uma ddp de 50 volts apresentou maior consumo energético. Isto ocorre porque o consumo de energia é diretamente proporcional a queda de potencial elétrico aplicado ao eletrodos do reator [Applegate, 1984]. As bateladas realizadas com o modelo de alimentação FA2, apresentaram sob as mesmas condições de operação um consumo

energético inferior as bateladas realizadas com o modelo de alimentação FA1, conforme mostra a Tabela 4.56. Observa-se que o consumo de energia para a maioria dos casos estudados aumentou em função da concentração iônica da solução de alimentação, com exceção da batelada de 7000 ppm (modelo FA2) a 40 volts. Para esses resultados deve ser considerado o comportamento da densidade de corrente durante o processo, o qual é um parâmetro que relata diretamente a quantidade de íons que trafegam durante o processo, ou seja, são dados que levam a crer que o reator se encontrava operando sob condições adequadas, com o mínimo de interferentes do tipo: transporte de co-íons, perdas de corrente, etc. Quando o consumo de energia tende a diminuir durante o processo, pode-se concluir que o reator se encontra operando dentro das condições de corrente limite, ou seja, o efeito de polarização é mínimo.

Um outro ponto importante é a presença de íons monovalentes e divalentes na água de alimentação do reator, oriunda do destilador do laboratório. Esses componentes devem ser considerados como interferentes, podendo assim em alguns casos mascarar os dados experimentais.*

* A água destilada do laboratório vinha sofrendo alterações devido as mudanças diárias das características físico-químicas da água da torneira.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Em função do estudo realizado para os dois reatores eletrodialíticos, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. A condutividade elétrica do produto e do concentrado aumentou em função da concentração inicial da solução de cloreto de sódio.
2. A densidade de corrente, a resistência ôhmica e a variação do pH durante as bateladas são parâmetros que estão diretamente relacionados com a concentração inicial da solução de cloreto de sódio e do potencial elétrico aplicado ao sistema.
3. As bateladas realizadas sob o potencial elétrico de 50 Volts apresentaram melhor desempenho do que as bateladas sob a ddp de 40 Volts no que diz respeito ao pH médio.
4. Com relação ao pH médio obtido para o produto, as bateladas realizadas com o modelo de fluxo de alimentação FA1 apresentaram melhor desempenho do que as bateladas realizadas com o modelo FA2.
5. Os experimentos realizados com o modelo de alimentação FA1 apresentaram uma maior eficiência de corrente para o potencial elétrico de 50 volts, enquanto que o modelo FA2 apresentou uma maior eficiência de corrente para o potencial elétrico de 40 volts.
6. A eficiência de corrente é um parâmetro que depende de vários fatores tais como: concentração da solução de alimentação, potencial elétrico aplicado, densidade de corrente, concentração do produto, número de células do reator, seletividade das membranas, etc.
7. Considerando as perdas pelos efeitos dos interferentes, existe uma tendência do consumo de energia aumentar em função da concentração da solução de alimentação e do potencial elétrico aplicado.

8. Os experimentos realizados com o modelo de alimentação FA2 apresentaram um consumo de energia inferior aos realizados com o modelo FA1.
9. A produção de Na^+ depende do potencial elétrico e da concentração de alimentação da solução de cloreto de sódio.

CAPÍTULO 6 - PERSPECTIVAS

1. Investigar o desempenho do reator utilizando membranas bipolares comerciais.
2. Determinar a concentração do sódio presente no efluente produzido, para diferentes concentrações do afluente (cloreto de sódio).
3. Estudar o efeito da eletrodialise na produção de hidróxido de sódio em função da vazão de alimentação para uma faixa de concentração da solução de alimentação de cloreto de sódio.
4. Estudar a eficiência de corrente em função da concentração do co-íon no efluente produzido.
5. Estudar o processo introduzindo uma solução de hidróxido de sódio de concentração conhecida no reator, ao invés da água destilada, com o objetivo de detectar quantitativamente a concentração de hidróxido de sódio produzido no sistema por diferença, introduzindo uma saída no reator para solução ácida. Isso evita o efeito de mistura (NaCl e HCl) da solução de alimentação para os modelos FA2.
6. Investigar a melhor faixa de operação do sistema na produção de uma solução de hidróxido de sódio em função dos seguintes parâmetros: condutividade elétrica, variação do pH, densidade de corrente, resistência ôhmica, eficiência de corrente e consumo energético.
7. Com o andamento da pesquisa há uma grande perspectiva do sistema operar com uma solução contendo diferentes íons, como é o caso do concentrado produzido durante a dessalinização de uma água salobra de um poço tubular profundo via osmose inversa.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREWS, L. S. & WITT, G. M., *An overview of RO concentrate disposal methods*, In Zahid Amjad (ed.), *Reverse Osmosis-Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1993.

APPLEGATE, L. E., *Electrodialysis*, *Chemical Engineering*, v 91, n 12, p 77-88, June, 1984.

ARITOMI, T., van den BOOMGAARD, Th., & STRATHMANN, H., *Current-voltage curve of a bipolar membrane at high current density*, *Desalination*, v 104, p 13-18, 1996

ARRUDA, A. C. C., *Avaliação de um reator eletrodialítico para dessalinização do soro do leite via eletrodialise*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1996.

BAUER, B., GERNER, F. J. & STRATHMANN, H., *Development of bipolar membranes*, *Desalination*, v 68, p 279-292, 1988.

BOYAVAL, P., SETA, J. & GAVACH, C., *Concentrated propionic acid production by electrodialysis*, *Enzyme Microb. Technol.*, v 15, p 683-686, August, 1993.

BYSZEWSKI, C. H. & BOGEATZES, A. S., *AQUATECH systems – A commercial process for recycling spent pickle liquor*, *Iron Steel Eng.*, p 40-44, March, 1988.

CAVALCANTI, E. B. *Avaliação de um reator eletrodialítico para dessalinização de um hidrolizado protéico via eletrodialise*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1991.

CHIAO, Y. C., CHLANDA, F. P. & MANI, K. N., *Bipolar membranes for purification of acids e bases*, *Journal of Membrane Science*, v 61, p 239-252, 1991.

DAVIS, T. A., *Electrodialysis*, Handbook of Industrial Membrane Technology, In Mark C. Porter (ed.), ch. 8, p 482-510, 1988.

DONNAN, F. G. & GUGGENHEIM, E. A., *Exact thermodynamics of membrane equilibrium*, Z. Phys. Chem., v A162, p 346-360, 1932.

ESCUDIER, J. L., COTTEREAU, P. & MOUTOUNET, M., *Electrodialysis Applications in the Treatment of Grape Musts*, Bull. O.I.V., v 62, p 695-696, 1989.

FARIAS NETO, S. R., *Estudo e avaliação de alguns parâmetros de dessalinização a partir de um reator eletrodialítico via eletrodialise*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1992.

GRAILLON, S., PERSIN, F., POURCELLY, G. & GAVACH, C., *Development of electrodialysis with bipolar membrane for the treatment of concentrated nitrate effluents*, Desalination, v 107, p 159-169, 1996.

HOWE, E. D., *Fundamentals of water desalination*, Environmental Science and Technology Series, v 1, p 271, New York, Marcel Dek Ker, 1974.

JEFFRIES, T. W., OMSTEAD, D. R., CARDENAS, R. R. & GREGOR, H. P., *Membrane-controlled digestion: effect of ultrafiltration and anaerobic digestion of glucose*, Biotechnology and Bio-Engineering Symp.(USA), n 8, p 37-49, 1978, John Wiley and Sons, 1979.

KATZ, W. E., *The eletrodialysis reversal (EDR) process*, Desalination, v 28, p 31-40, 1979.

KORNGOLD, E., *Electrodialysis - Membranes and Mass Transport*, In G. Belfort (ed.), Synthetic Membrane Process, Academic Press, New York, 1984.

LACEY, R. E., *Handbook of separation technics for chemical engineers*, New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1979.

- LEITZ, F. B. & EISENMANN, J. L., *Electrodialysis as a Separation Process*, AIChE Symposium Series, v 77, n 204, p 204-212, 1981.
- LEITZ, F. B., *Apparatus for electrodialysis of electrolytes employing bilaminar ion-exchange membranes*, U. S. patent 3, 654, 125, 1972.
- LEITZ, F. B., *Desalination of Seawater by Electrodialysis*, In 5th International Symposium on Fresh Water from the Sea, Alghero, Sardinie, Italy, v 3, p 105-114, 1976.
- LIU, K. J., CHLANDA, F. P. & NAGASUBRAMANIAN, K., *Use of bipolar membranes for generation of acid and base – An engineering and economic analysis*, Journal of Membrane Science, v 2, n 2, p 109, 1977.
- MANI, K. N., CHLANDA, F. P. & BYSZEWSKI, C. H., *AQUATECH membrane technology for recovery of acid/acid values from salt streams*, Desalination, v 68, p 149-166, 1988.
- MANI, K. N., *Electrodialysis Water Splitting Technology*, Journal of Membrane Science, v 58, p 117-138, 1991.
- MASON, E. A. & KIRKHAM, T. A., *Design of electrodialysis equipment*, Chemical Eng. Progress, Symposium Series, v 55, n 24, p 172-189, 1959.
- Mc ARDLE, J. C., PICCARI, J. A. & THORNBURG, G. G., *AQUATECH systems pickle liquor recovery process- Washington steel reduces waste disposal costs and liability*, Iron Steel Eng., p 39-43, May, 1991.
- MELLER, F. H., *Electrodialysis (ED) & electrodialysis reversal (EDR) technology*, Ionics Incorporated, March, 1984.
- MINTZ, M. S., *Electrodialysis principles of process design*, Industrial and Engineering Chemistry, v 55, n 18, p 18-28, 1963.

NOVALIC, S., OKWOR, J. & KULBE, K. D., *The characteristics of citric acid separation using electrodialysis with bipolar membranes*, Desalination, v 105, p 277-282, 1996.

PALEOLOGOU, M., BERRY, R. M. & FLEMING, B. I., *Sodium chlorate splitting: a new solution to the problems of chemical imbalance in kraft mills*, Journal of Pulp and Paper Science, v 20, n 2, p J39-J44, February, 1994.

PERRY, R. H. & GREEN, D. W., *Chemical Engineering Handbook*, 6^a ed., sec. 17, p 36-45, 1984.

RAUCQ, D., POURCELLY, G. & GAVACH, C., *Production of sulphuric acid and caustic soda from sodium sulphate by electromembrane processes. Comparison between electroelectrodialysis and electrodialysis on bipolar membrane*, Desalination, v 91, p 163-175, 1993.

REGES, I. S., *Avaliação de parâmetros eletroquímicos para dois sistemas de fluxo, tortuoso e linear, em um reator eletrodialítico via eletrodialise*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1995.

SCHUTTE, C. F., *Desalination: a South African perspective*, Water Research Commission, Pretoria, South African, 1983.

SCOTT, K., *Membrane separation technology-Industrial applications and markets*, Scientific and Technical Information, Oxford, England, 1990.

SHAFFER, L. H. & MINTZ, M. S., *Electrodialysis in principle of desalination*, Ed. Spiegle, New York, p 199-289, 1966.

STRATHMANN, H., RAPP, H. J., BAUER, B. & BELL, C. M., *Theoretical and practical aspects of preparing bipolar membranes*, Desalination, v 90, p 303-323, 1993.

STRATHMANN, H., BAUER, B. & RAPP, H. J., *Better bipolar membranes*, CHEMTECH, p 17-24, June, 1993.

STRATHMANN, H., *Electrodialysis and Related Processes*, In Workshop CEE- Brazil on Membrane Separation Processes, Rio de Janeiro, p 334-437, 1992.

VILAR, E. O., *Avaliação de um reator eletrodialítico para dessalinização de águas salobras*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1989.

APÉNDICE

Tabela 4.1: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_h = 5,96 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$ (#); $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	$K_a = 2 \text{ mS/cm}$ (900 ppm)*		$K_a = 10,9 \text{ mS/cm}$ (6000 ppm)#	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
4,0	-	-	1,26	6,55
5,0	0,30	1,64	1,34	6,77
10,0	0,37	1,86	1,77	9,50
13,0	-	-	1,87	9,76
14,0	-	-	1,89	9,79
15,0	0,40	1,93	1,91	9,86
20,0	0,46	1,94	2,02	9,95
25,0	0,49	1,97	2,04	9,97
30,0	0,70	1,99	2,23	10,07
35,0	-	-	2,32	10,30

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.2: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR1 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$, (*) $V = 40 \text{ V}$, (#) $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, i = inicial, p = produto e c = concentrado).

Tempo (h)	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)
1*	2,29	8,40
2#	2,80	8,70
3	3,20	9,20
4	2,4	9,20

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.3: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15$ mS/cm (1000 ppm); $K_h = 44,7$ μ S/cm (*); $K_h = 19$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1,0	0,33	1,66	-	-
3,0	0,40	1,68	-	-
4,0	0,45	1,69	-	-
5,0	0,48	1,77	-	-
6,0	-	-	0,50	1,41
7,0	0,54	1,81	-	-
8,0	0,58	1,83	-	-
9,0	0,61	1,81	-	-
10,0	0,64	1,81	0,70	1,60
15,0	0,71	1,80	-	-
20,0	0,68	1,80	0,79	1,90
25,0	0,73	1,80	-	-
30,0	0,75	1,81	0,81	2,18
35,0	0,78	1,80	-	-
40,0	0,79	1,81	0,71	2,16
45,0	0,74	1,80	-	-
50,0	0,76	1,79	0,81	2,16
55,0	0,79	1,78	-	-
60,0	0,73	1,82	0,79	2,19
65,0	0,75	1,81	-	-
70,0	0,76	1,81	-	-
75,0	0,78	1,81	-	-
80,0	0,77	1,81	-	-
85,0	0,78	1,83	-	-
90,0	-	-	0,88	2,41
120,0	-	-	0,84	2,43
140,0	-	-	0,79	2,46

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.4: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
5,0	0,88	2,27	0,81	2,31
10,0	0,94	2,62	1,30	2,55
20,0	1,00	2,60	0,92	2,61
30,0	1,06	2,59	0,84	2,72
45,0	0,94	2,68	0,80	2,82
60,0	1,08	2,55	0,91	2,77
90,0	0,71	2,63	-	-
120,0	0,75	2,52	0,79	2,58
150,0	0,64	2,44	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.5: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8 \text{ mS/cm}$ (2000 ppm); $K_h = 23,9 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 22,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
5,0	0,81	3,42	0,72	3,10
10,0	0,88	3,48	0,77	3,24
20,0	0,92	3,48	0,98	3,26
30,0	0,92	3,54	0,88	3,47
35,0	0,96	3,60	-	-
38,0	0,96	3,62	-	-
45,0	-	-	0,90	3,53
60,0	-	-	0,97	3,49
75,0	-	-	1,05	3,74

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.6: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm (*); $K_h = 24,7$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
5,0	1,06	5,20	-	-
6,0	-	-	0,94	4,86
10,0	1,09	5,20	1,04	5,07
20,0	1,15	5,25	-	-
30,0	1,09	5,34	1,14	5,17
40,0	1,09	5,41	-	-
45,0	-	-	1,15	5,27
50,0	1,09	5,45	-	-
60,0	-	-	1,17	5,50
80,0	-	-	1,21	5,40

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.7: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 26,6$ μ S/cm (*); $K_h = 32,1$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
0,25	-	-	1,25	4,78
2,0	1,10	4,51	1,43	6,56
4,0	1,40	6,33	2,05	6,71
6,0	1,93	7,46	2,63	7,23
8,0	2,50	7,97	2,81	7,61
10,0	2,64	8,12	2,88	7,79
15,0	2,83	8,61	3,02	7,88
20,0	2,63	8,62	3,02	7,98
25,0	2,67	8,44	2,94	8,01
30,0	2,31	8,72	2,94	8,10
35,0	2,33	8,82	2,89	8,23
40,0	2,35	8,92	2,99	8,29
45,0	2,54	9,10	2,95	8,38
50,0	2,59	9,12	2,92	8,45
55,0	2,67	9,17	2,82	8,48
60,0	2,72	9,25	2,79	8,54
65,0	2,53	9,33	-	-
70,0	2,65	9,25	-	-
75,0	2,57	9,26	-	-
80,0	2,53	9,26	-	-
85,0	2,51	9,38	-	-
90,0	2,52	9,37	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.8: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$, $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
2,0	1,34	6,09	-	-
3,0	-	-	1,63	8,24
4,0	1,46	8,63	-	-
5,0	-	-	2,09	9,07
6,0	2,03	9,85	2,52	9,28
8,0	2,58	10,15	2,99	9,80
10,0	2,79	10,76	3,37	10,26
12,0	-	-	3,72	10,79
15,0	3,16	11,25	3,76	11,13
20,0	3,20	10,98	3,98	11,13
25,0	3,40	11,25	4,08	11,11
30,0	3,43	11,34	3,78	11,33
35,0	3,51	11,40	4,30	11,49
40,0	3,52	11,43	4,05	11,61
45,0	3,52	11,57	3,94	11,83
50,0	3,44	11,59	3,68	11,93
55,0	3,32	11,66	3,53	11,94
60,0	3,27	11,68	3,54	11,98
65,0	3,14	11,71	3,40	12,02
70,0	3,28	11,72	3,34	11,95
75,0	3,40	11,80	3,07	12,17
80,0	3,38	11,83	2,67	12,22
85,0	3,37	11,87	2,48	12,37
90,0	3,59	11,90	2,67	12,45
95,0	3,40	11,94	2,47	12,26
100,0	3,32	12,00	2,31	12,26
105,0	3,41	12,04	2,33	12,10
110,0	3,39	12,05	2,29	12,20
115,0	-	-	2,32	12,20
120,0	-	-	2,35	12,43
125,0	-	-	2,39	13,07
130,0	-	-	2,67	12,13

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.9: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 47,7$ μ S/cm (*); $K_h = 39$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts "	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1,0	-	-	2,03	8,57
2,0	1,57	9,40	-	-
3,0	-	-	2,48	12,05
4,0	2,07	11,18	-	-
5,0	-	-	3,61	12,04
6,0	2,82	11,75	-	-
7,0	-	-	4,48	12,33
8,0	3,80	13,62	-	-
9,0	-	-	4,97	12,41
10,0	4,37	14,50	-	-
12,0	-	-	5,37	13,90
15,0	4,86	16,45	5,62	15,02
20,0	4,84	16,47	5,64	15,37
25,0	4,81	16,46	5,15	15,26
30,0	4,98	16,56	5,28	15,49
35,0	5,09	16,63	5,21	15,62
40,0	5,30	16,83	5,10	15,76
45,0	5,17	16,83	4,60	15,95
50,0	5,23	16,89	4,58	15,94
55,0	5,27	16,95	4,69	16,02
60,0	5,27	16,94	3,75	16,04
65,0	5,36	17,02	3,96	16,16
70,0	5,11	17,06	4,07	16,16
75,0	5,31	17,18	4,06	16,24
80,0	5,33	17,12	4,27	16,31
85,0	5,28	17,13	4,31	16,45
90,0	5,25	17,00	4,76	16,47
95,0	4,82	17,20	-	-
100,0	4,63	17,27	-	-
105,0	4,84	17,26	-	-
110,0	4,76	17,17	-	-
115,0	4,80	17,20	-	-
120,0	4,70	17,17	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.10: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 54,5$ μ S/cm (*); $K_h = 46,7$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada e p = produto).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)
1,0	-	-	0,97	5,32
2,0	1,03	5,34	0,98	5,38
3,0	-	-	1,02	5,36
4,0	1,12	5,30	1,04	5,26
5,0	-	-	1,06	5,27
6,0	1,22	5,36	1,07	5,26
7,0	-	-	1,10	5,29
8,0	1,27	5,35	1,11	5,26
9,0	-	-	1,14	5,21
10,0	1,31	5,32	1,16	5,21
12,0	-	-	-	-
15,0	1,30	5,29	1,22	5,17
20,0	1,29	5,25	1,28	5,19
25,0	1,33	5,28	1,31	5,15
30,0	1,39	5,24	1,32	5,16
35,0	1,37	5,17	1,28	5,10
40,0	1,37	5,13	1,27	5,11
45,0	1,34	5,25	1,31	5,10
50,0	1,29	5,25	1,21	5,30
55,0	1,36	5,17	1,20	5,21
60,0	1,36	5,13	1,22	5,20
65,0	1,30	5,10	1,17	5,15
70,0	1,33	5,08	1,19	5,19
75,0	1,33	5,12	1,26	5,13
80,0	1,40	5,15	1,21	5,17
85,0	1,56	5,29	1,17	5,18
90,0	1,30	5,28	1,18	5,18
95,0	1,24	5,30	1,23	5,19
100,0	1,12	5,26	1,16	5,16
105,0	1,19	5,33	1,13	5,15
110,0	1,16	5,31	1,09	5,15
115,0	1,17	5,30	1,11	5,12
120,0	1,19	5,32	1,15	5,13

Continua...

Continuação da Tabela 4.10

125,0	1,12	5,32	1,08	5,12
130,0	1,11	5,32	1,02	5,10
135,0	1,12	5,33	0,97	5,05
140,0	1,13	5,35	0,96	5,10
145,0	1,11	5,41	0,94	5,06
150,0	1,16	5,44	0,95	5,13
155,0	1,12	5,41	0,96	5,33
160,0	1,12	5,45	0,99	5,33
165,0	1,11	5,45	0,98	5,36
170,0	1,07	5,43	0,96	5,33
175,0	-	-	0,96	5,36
180,0	-	-	0,95	5,31

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.11: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 45,5$ μ S/cm (*); $K_h = 48,3$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada e p = produto).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)
2,0	1,19	8,51	1,59	8,47
4,0	1,53	8,46	1,66	8,43
6,0	1,88	8,42	1,73	8,41
8,0	2,19	8,46	1,75	8,46
10,0	2,35	8,43	1,79	8,47
15,0	2,30	8,42	1,82	8,43
20,0	2,24	8,39	1,81	8,38
25,0	2,22	8,35	1,78	8,33
30,0	2,23	8,37	1,72	8,28
35,0	2,17	8,45	1,68	8,23
40,0	2,20	8,39	1,62	8,22
45,0	2,15	8,43	1,62	8,15
50,0	2,16	8,38	1,63	8,20
55,0	2,16	8,40	1,59	8,24
60,0	2,14	8,34	1,57	8,23
65,0	2,12	8,39	1,60	8,44
70,0	2,21	8,46	1,55	8,40
75,0	2,16	8,42	1,57	8,43
80,0	2,03	8,33	1,62	8,45
85,0	2,05	8,65	1,51	8,51
90,0	1,84	8,67	1,56	8,50
95,0	1,71	8,67	1,56	8,55
100,0	1,67	8,73	1,59	8,54
105,0	1,67	8,81	1,47	8,45
110,0	1,61	8,84	1,43	8,47
115,0	1,61	8,82	1,41	8,43
120,0	1,64	8,82	1,38	8,39
125,0	1,63	8,81	1,43	8,35
130,0	1,65	8,85	1,43	8,28
135,0	1,66	8,88	1,43	8,34
140,0	1,65	8,86	1,44	8,33
145,0	1,58	8,85	1,41	8,28
150,0	1,63	8,92	1,41	8,25
155,0	1,61	8,94	1,39	8,21
160,0	1,61	8,93	1,35	8,10
165,0	1,61	8,87	1,32	8,07
170,0	1,61	8,78	1,26	8,03
175,0	1,48	8,70	1,20	8,06
180,0	1,49	8,69	1,21	7,82

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.12: Condutividade elétrica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 48,1$ μ S/cm (*); $K_h = 68$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada e p = produto).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_a (mS/cm)
2,0	1,69	11,47	2,53	11,15
4,0	1,87	11,38	2,44	11,18
6,0	2,14	11,32	2,41	11,18
8,0	2,24	11,31	2,40	10,98
10,0	2,27	11,36	2,42	11,07
15,0	2,45	11,30	2,64	11,08
20,0	2,66	11,37	2,91	10,98
25,0	2,03	11,29	2,84	11,00
30,0	2,44	11,24	2,29	10,94
35,0	2,41	11,18	2,33	10,90
40,0	2,37	11,14	2,45	10,85
45,0	2,40	11,08	2,51	11,07
50,0	2,38	11,05	2,46	10,98
55,0	2,19	10,98	2,32	10,84
60,0	2,11	10,90	2,38	10,83
65,0	2,05	10,94	2,53	10,87
70,0	1,97	10,92	2,24	10,88
75,0	1,95	11,24	2,22	11,22
80,0	1,98	11,26	2,12	11,18
85,0	1,86	11,33	2,10	11,34
90,0	1,87	11,34	2,14	11,36
95,0	1,90	11,74	2,16	11,41
100,0	1,99	11,64	2,08	11,39
105,0	1,93	11,68	1,93	11,36
110,0	1,88	11,62	1,89	11,34
115,0	1,86	11,75	1,89	11,40
120,0	1,81	11,73	1,90	11,53
125,0	1,79	11,70	1,90	11,23
130,0	1,82	11,70	2,42	11,23
135,0	1,95	11,64	2,07	11,47
140,0	1,89	11,66	2,02	11,19
145,0	1,86	11,59	1,79	11,42
150,0	1,78	11,64	1,59	11,27
155,0	1,73	11,64	-	-
160,0	1,80	11,56	-	-
165,0	1,76	11,60	-	-
170,0	1,81	11,42	-	-
175,0	1,87	11,69	-	-
180,0	1,83	11,33	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.13: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,96 \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 0,13 \text{ mS/cm}$ (#); $V = 36 \text{ V}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	$K_a = 2 \text{ mS/cm (900 ppm)}^*$		$K_a = 10,9 \text{ mS/cm (6000 ppm)}^\#$	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	5,99	6,25	6,42	6,30
0,5	3,14	-	-	-
1,0	3,40	-	-	-
1,5	3,48	-	2,93	-
2,0	3,64	-	3,00	-
2,5	4,20	-	3,21	-
3,0	6,07	-	3,53	-
3,5	-	-	5,58	-
4,0	8,64	-	7,14	-
4,5	9,24	4,65	9,20	2,98
5,0	9,50	-	9,83	-
5,5	9,67	-	10,02	-
6,0	9,75	4,36	10,19	2,89
6,5	9,85	3,94	10,31	-
7,0	9,91	3,88	10,41	2,86
7,5	9,96	3,79	10,49	-
8,0	10,01	3,79	10,55	2,82
8,5	10,03	-	10,59	-
9,0	10,06	-	10,61	2,80
9,5	10,08	-	10,64	-
10,0	10,11	-	10,66	2,82
10,5	10,12	-	-	-
11,0	10,14	-	-	-
11,5	10,15	-	-	-
12,0	10,16	3,71	-	-
12,5	10,17	-	-	-
13,0	10,19	3,46	10,74	2,89
13,5	10,20	3,40	-	-
14,0	-	-	10,75	2,86
15,0	10,25	3,36	10,75	2,85
20,0	10,34	3,30	10,73	2,77
25,0	10,39	3,07	10,77	2,72
30,0	10,21	3,50	10,85	2,63
35,0	-	-	10,90	2,65
40,0	-	-	10,62	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.14: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MRI e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 4,87 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $Q_a = 7 \text{ l/h}$; $Q_h = 11 \text{ l/h}$; $V_i = 38 \text{ V}$, (*) $V = 40 \text{ V}$, (#) $V = 50 \text{ V}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, i = inicial, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	pH _p	pH _c
0,0	4,09	3,70
1,0	4,14	3,70
1,50	4,18	3,70
2,0	4,23	3,70
3,0	5,24	3,80
4,0	8,79	3,70
5,0	9,53	3,60
6,0	9,83	3,50
7,0	9,99	3,40
8,0	10,08	3,40
9,0	10,14	3,30
10,0	10,19	3,20
15,0	10,26	2,90
20,0	10,28	2,80
26,0	10,29	2,60
40,0	10,34	2,30
60,0*	10,19*	2,00*
90,0	10,70	2,10
120,0#	10,91#	1,30#
150,0	11,01	1,10
180,0	11,00	1,00
195,0	11,35	-
210,0	10,82	0,70
240,0	10,75	0,40

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.16: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15 \text{ mS/cm}$ (1000 ppm); $K_h = 44,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 19 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,06	4,80	5,83	4,6
0,25	6,09	4,80	5,93	4,3
0,5	6,16	4,90	5,98	4,1
0,75	6,20	5,00	6,00	4,0
1,0	6,28	5,10	6,02	3,7
1,5	6,48	5,30	6,09	3,7
2,0	6,85	5,30	6,28	3,7
2,5	7,86	5,40	6,21	3,6
3,0	8,69	5,40	6,44	3,6
3,5	9,09	5,50	7,58	3,9
4,0	9,23	5,50	6,90	4,4
4,5	9,34	5,50	-	-
5,0	9,44	5,50	7,95	4,8
5,5	9,55	5,50	-	-
6,0	9,71	5,60	9,07	3,6
6,5	9,83	5,50	-	-
7,0	9,95	5,50	-	-
7,5	10,01	5,50	-	-
8,0	10,06	5,50	-	-
8,5	10,10	5,50	-	-
9,0	10,13	5,50	-	-
9,5	10,16	5,50	-	-
10,0	10,16	5,50	10,28	3,5
15,0	10,32	5,60	10,52	4,2
20,0	10,40	5,70	10,66	3,3
25,0	10,42	5,80	10,74	2,9
30,0	10,42	5,80	10,77	2,9
35,0	10,40	5,80	10,76	2,9
40,0	10,43	5,60	10,81	2,9
45,0	10,46	5,30	10,84	2,9
50,0	10,33	5,40	10,86	2,9
55,0	10,27	5,10	10,86	2,9

Continua...

Continuação da Tabela 4.16

60,0	10,46	4,70	10,88	2,9
65,0	10,33	4,70	-	-
70,0	10,20	4,40	-	-
75,0	10,12	4,30	10,91	3,1
80,0	10,07	4,20	-	-
85,0	10,14	4,10	-	-
90,0	-	-	10,87	2,6
105,0	-	-	10,83	3,1
120,0	-	-	10,78	2,6
135,0	-	-	10,81	2,6
140,0	-	-	10,81	2,6

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.17: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 63,4 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,12	5,10	6,74	5,0
0,25	5,34	3,40	6,81	5,3
0,5	5,47	3,40	6,80	5,4
0,75	5,61	3,40	6,80	5,5
1,0	5,71	3,40	6,79	5,6
1,5	5,94	3,40	6,83	5,7
2,0	6,08	3,40	6,87	5,8
2,5	6,21	3,40	7,17	6,0
3,0	6,37	3,40	7,89	6,1
3,5	6,47	3,50	8,53	6,2
4,0	6,68	3,60	8,83	6,2
4,5	7,78	3,60	9,31	6,3
5,0	8,27	3,70	9,53	6,3
6,0	8,76	3,70	-	-
7,0	9,02	3,70	9,95	6,2
8,0	9,32	3,60	10,04	6,2
9,0	9,60	3,70	10,18	6,2
10,0	9,74	3,70	10,21	6,2
15,0	10,18	4,00	10,45	6,2
20,0	10,24	4,30	10,74	6,1
25,0	10,28	4,30	10,73	6,1
30,0	10,23	4,60	10,79	3,2
35,0	10,27	3,80	10,81	2,2
40,0	10,32	3,90	10,83	1,9
45,0	10,30	3,40	10,87	1,1
50,0	10,28	3,60	10,89	1,4
55,0	10,34	3,50	10,91	2,7
60,0	10,25	3,10	10,90	1,3
75,0	9,97	2,60	-	-
90,0	10,36	3,70	11,03	1,3
105,0	10,42	2,80	-	-
115,0	10,49	2,80	-	-
120,0	10,47	2,80	10,81	3,8
135,0	10,48	2,80	-	-
150,0	10,54	2,70	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.18: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 23,9$ μ S/cm (*); $K_h = 22,2$ μ S/cm (#); $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,27	3,90	6,19	4,8
0,25	6,33	3,90	6,21	2,6
0,5	6,31	4,00	6,27	2,5
0,75	6,29	4,00	6,42	2,5
1,0	6,29	4,10	6,82	3,1
1,5	6,27	4,10	6,79	3,2
2,0	6,25	4,20	7,06	3,1
2,5	6,36	4,20	7,32	3,0
3,0	6,68	4,30	8,53	3,3
3,5	6,84	4,40	9,11	3,3
4,0	7,38	4,40	9,58	3,3
4,5	8,69	4,40	9,73	3,4
5,0	9,20	4,40	9,92	3,5
5,5	9,46	4,40	-	-
6,0	9,54	4,40	10,19	3,5
6,5	9,78	4,50	-	-
7,0	9,95	4,50	10,34	3,4
7,5	9,94	4,50	-	-
8,0	10,11	4,60	10,43	3,4
8,5	10,26	3,70	-	-
9,0	10,28	3,80	10,50	1,6
9,5	10,33	3,90	-	-
10,0	10,37	3,80	10,58	2,7
12,0	10,50	4,30	-	-
15,0	10,61	4,60	10,88	4,9
17,0	10,67	4,80	-	-
20,0	10,73	4,90	10,96	4,4
22,0	10,75	4,80	-	-
25,0	10,82	3,50	11,00	2,0
27,0	10,77	3,40	-	-
30,0	10,70	3,50	11,03	2,0
35,0	10,64	3,00	11,06	2,2
38,0	10,10	2,80	-	-
40,0	-	-	11,09	1,9
45,0	-	-	11,12	1,9
50,0	-	-	11,13	1,8
55,0	-	-	11,14	2,8
60,0	-	-	11,15	2,9
75,0	-	-	11,18	2,1

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.19: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 24,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	5,92	3,80	5,95	3,5
0,25	6,04	3,90	5,98	3,6
0,5	6,09	3,90	6,06	3,7
0,75	6,17	3,90	6,10	3,7
1,0	6,17	3,90	6,13	3,7
1,5	6,21	3,90	6,31	3,7
2,0	6,40	4,00	6,62	3,7
2,5	6,45	4,00	7,37	3,7
3,0	6,51	4,10	7,74	3,8
3,5	7,04	4,10	8,33	3,7
4,0	7,29	4,10	9,08	3,8
4,5	7,78	4,20	9,24	3,9
5,0	8,74	4,30	9,47	3,9
6,0	9,32	2,40	9,96	3,9
7,0	9,66	2,20	10,06	4,0
8,0	9,73	2,60	10,29	4,1
9,0	9,91	2,90	10,43	4,4
10,0	10,00	2,70	10,48	4,4
15,0	10,30	5,00	10,72	3,9
20,0	10,38	4,80	10,84	4,4
25,0	10,29	3,90	10,90	3,4
30,0	10,27	4,10	10,89	3,3
35,0	10,28	4,10	10,91	3,2
40,0	10,29	4,00	10,94	3,2
45,0	10,29	3,90	10,96	3,3
50,0	10,25	3,80	10,98	3,3
55,0	10,19	3,60	10,98	3,2
60,0	-	-	10,97	1,9
75,0	-	-	10,96	2,3
80,0	-	-	10,55	2,1

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.20: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm), $K_h = 26,6 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 32,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,44	3,60	6,00	3,50
0,25	6,45	3,70	6,36	3,50
0,5	6,46	3,70	6,64	3,60
0,75	6,46	3,70	7,98	3,60
1,0	6,47	3,70	8,47	3,70
1,5	6,57	3,80	10,05	3,70
2,0	6,78	3,90	10,78	3,70
2,5	6,99	4,10	11,11	3,70
3,0	7,27	4,20	11,21	3,70
3,5	8,10	4,20	11,43	3,70
4,0	9,12	4,30	11,49	3,70
4,5	9,80	4,30	11,54	3,70
5,0	10,13	4,30	11,56	3,70
6,0	10,45	4,30	11,64	3,80
7,0	10,58	4,40	11,66	3,80
8,0	10,65	4,40	11,64	3,80
9,0	10,70	4,40	11,60	3,80
10,0	10,73	4,40	11,61	3,90
15,0	10,85	3,30	11,52	3,90
18,0	10,99	2,60	-	-
19,0	11,01	2,60	-	-
20,0	11,02	2,60	11,45	3,80
25,0	11,07	2,50	11,41	3,70
26,0	11,12	2,60	-	-
30,0	10,89	2,60	11,32	3,60
35,0	10,46	2,60	11,23	3,50
40,0	10,31	2,60	11,20	3,40
45,0	10,37	2,50	11,18	3,30
50,0	9,94	2,70	10,90	3,30
55,0	9,38	2,80	10,84	3,20
60,0	8,84	2,70	10,63	3,10
65,0	9,28	2,70	-	-
70,0	10,07	2,80	-	-
75,0	10,14	2,80	-	-
80,0	9,65	2,70	-	-
85,0	9,55	2,70	-	-
90,0	9,48	2,70	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.21: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,19	3,50	7,30	4,70
0,25	6,28	3,50	8,09	4,70
0,5	6,34	3,50	8,43	4,80
0,75	6,39	3,50	8,76	4,90
1,0	6,50	3,50	8,96	5,10
1,5	7,28	3,50	9,12	5,10
2,0	8,04	3,60	9,20	5,10
2,5	8,62	3,60	9,78	5,20
3,0	9,17	3,70	10,12	5,40
3,5	9,77	3,70	10,33	5,60
4,0	9,98	3,80	10,44	5,80
4,5	10,24	3,80	10,60	6,00
5,0	10,35	3,80	10,67	6,00
5,5	-	-	10,77	6,10
6,0	10,54	3,90	10,83	6,10
6,5	-	-	10,87	6,10
7,0	10,62	4,00	10,93	6,10
7,5	-	-	10,95	6,20
8,0	10,68	3,90	10,97	6,20
8,5	-	-	10,99	6,20
9,0	10,71	4,00	11,00	6,20
9,5	-	-	11,01	6,20
10,0	10,73	4,00	11,02	6,20
11,0	-	-	11,03	6,20
12,0	-	-	11,05	6,20
13,0	-	-	11,07	6,20
14,0	-	-	11,07	6,20
15,0	10,78	4,00	11,05	6,20
20,0	10,78	3,90	11,09	6,10
25,0	10,78	3,80	11,10	5,80
30,0	10,78	3,90	11,06	4,80
35,0	10,77	4,00	10,98	4,30
40,0	10,78	3,90	11,01	3,90
45,0	10,76	3,90	11,00	3,60

Continua...

Continuação da Tabela 4 21

50,0	10,70	3,80	11,00	3,50
55,0	10,68	3,70	11,13	3,40
60,0	10,67	3,70	10,86	3,30
65,0	10,77	3,60	10,69	3,20
70,0	10,46	3,60	10,61	3,20
75,0	10,31	3,50	10,66	3,10
80,0	10,23	3,40	10,86	3,00
85,0	10,65	3,40	10,89	2,90
90,0	10,19	3,40	10,64	3,10
95,0	10,24	3,30	10,79	3,00
100,0	10,09	3,30	10,95	3,00
105,0	9,45	3,30	10,99	3,00
110,0	9,15	3,30	11,03	3,00
115,0	-	-	11,08	3,00
120,0	-	-	11,14	2,80
125,0	-	-	11,27	2,60
130,0	-	-	11,13	2,30
135,0	-	-	11,17	2,40
140,0	-	-	11,19	2,50

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.22: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 47,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_c = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	7,07	3,90	6,66	5,20
0,25	7,12	3,90	6,77	5,20
0,5	7,14	3,90	7,16	5,40
0,75	7,15	3,90	8,44	5,30
1,0	7,17	3,80	8,71	5,40
1,5	7,22	3,90	9,74	5,50
2,0	7,65	3,90	10,04	5,60
2,5	8,09	4,20	10,38	5,70
3,0	8,78	4,60	10,60	5,70
3,5	9,33	5,10	10,68	5,80
4,0	9,68	5,50	10,78	5,80
4,5	9,93	5,80	10,83	5,80
5,0	9,98	5,90	10,86	5,80
5,5	10,09	6,10	10,89	5,80
6,0	10,16	6,20	10,92	5,80
6,5	10,20	6,30	-	-
7,0	10,23	6,30	10,94	5,70
7,5	10,25	6,30	-	-
8,0	10,27	6,30	10,96	5,70
8,5	10,28	6,30	-	-
9,0	10,29	6,30	10,97	5,60
9,5	10,20	6,30	-	-
10,0	10,30	6,30	10,97	5,40
11,0	10,29	6,30	-	-
12,0	10,28	6,30	10,98	5,30
15,0	10,25	6,00	10,99	5,30
17,0	-	-	11,00	5,10
20,0	10,23	5,30	11,02	4,70
25,0	10,17	4,70	11,03	3,80
30,0	10,06	4,40	10,95	3,70
35,0	9,87	4,20	10,97	3,60
40,0	9,52	4,00	10,95	3,40
45,0	9,12	4,00	10,97	3,30
50,0	10,23	3,80	10,99	3,20

Continua...

Continuação da Tabela 4.22

55,0	9,98	3,60	10,89	3,10
60,0	8,62	3,50	11,01	3,00
65,0	10,28	3,50	10,96	3,00
70,0	10,29	3,50	10,88	2,90
75,0	10,08	3,40	10,86	2,90
80,0	9,78	3,40	10,70	2,90
85,0	9,38	3,30	10,86	2,80
90,0	9,54	3,30	10,85	2,80
95,0	9,92	3,30	-	-
100,0	9,90	3,30	-	-
105,0	9,98	3,30	-	-
110,0	10,26	3,30	-	-
115,0	10,02	3,30	-	-
120,0	9,82	3,20	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.23: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA1.

Ca (ppm)	pH médio	
	40 volts	50 volts
1000	10,32	10,81
1500	10,32	10,85
2000	10,51	11,07
3000	10,28	10,93
5000	10,31	11,32
7000	10,66	10,98
10000	9,86	10,98

Onde: C_3 = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

Tabela 4.24: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 46,7 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,30	3,60	6,00	3,60
0,25	6,50	3,70	6,17	3,60
0,5	6,78	3,70	6,80	3,60
0,75	6,81	3,70	7,37	3,60
1,0	7,45	3,70	7,46	3,60
1,5	8,41	3,80	7,05	3,60
2,0	8,45	3,80	8,66	3,70
2,5	9,12	3,80	8,94	3,70
3,0	9,24	3,80	9,59	3,70
3,5	9,66	3,80	9,67	3,70
4,0	9,81	3,80	9,79	3,80
4,5	10,00	3,80	10,03	3,80
5,0	10,08	3,80	10,15	3,80
6,0	10,29	3,90	10,20	3,90
7,0	10,36	4,00	10,32	3,90
8,0	10,42	4,00	10,38	3,90
9,0	10,48	4,00	10,44	4,00
10,0	10,54	4,10	10,50	4,00
15,0	10,65	4,10	10,67	4,10
20,0	10,72	4,20	10,75	4,10
25,0	10,78	4,20	10,74	4,00
30,0	10,80	4,10	10,75	3,90
35,0	10,80	4,10	10,77	3,80
40,0	10,79	4,00	10,75	3,70
45,0	10,80	3,90	10,72	3,60
50,0	10,81	3,80	10,76	3,60
55,0	10,81	3,70	10,77	3,50
60,0	10,81	3,70	10,77	3,50
65,0	10,79	3,40	10,79	3,50
70,0	10,79	3,40	10,80	3,00
75,0	10,79	3,20	10,68	3,30
80,0	10,62	3,40	10,67	3,30

Continua...

Continuação da tabela 4.24

85,0	10,71	3,30	10,61	3,30
90,0	10,78	3,30	10,61	3,20
95,0	10,79	3,10	10,50	3,20
100,0	10,84	3,30	10,60	3,20
105,0	10,86	3,30	10,61	3,20
110,0	10,87	3,20	10,70	3,20
115,0	10,88	3,20	10,66	3,20
120,0	10,91	3,00	10,65	3,10
125,0	10,92	2,80	10,75	3,10
130,0	10,93	2,80	10,86	3,10
135,0	10,94	2,80	10,86	2,90
140,0	10,95	2,70	10,87	2,60
145,0	10,96	2,50	10,89	2,50
150,0	10,94	2,60	10,92	2,50
155,0	10,94	3,00	10,95	2,50
160,0	10,80	2,80	10,94	2,50
165,0	10,81	2,60	10,95	2,40
170,0	10,78	2,30	10,94	2,50
175,0	-	-	10,94	2,50
180,0	-	-	10,97	2,50

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.25: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	6,99	3,60	6,05	3,70
0,25	7,04	3,90	6,14	3,70
0,5	7,04	4,20	6,23	3,70
0,75	7,07	4,30	6,34	3,70
1,0	7,07	4,70	6,42	3,70
1,5	7,08	4,80	6,64	3,80
2,0	7,08	5,00	6,81	3,80
2,5	7,10	5,40	7,67	3,80
3,0	7,20	5,60	8,58	3,80
3,5	7,66	5,80	9,11	3,80
4,0	8,02	5,90	9,38	3,90
4,5	8,76	6,00	9,60	3,90
5,0	9,17	6,00	9,71	3,90
6,0	9,46	6,00	9,90	3,90
7,0	9,68	5,80	10,10	3,90
8,0	9,79	5,60	10,17	3,90
9,0	9,84	5,30	10,22	4,00
10,0	9,86	5,10	10,27	4,00
15,0	10,04	4,40	10,46	4,10
20,0	10,14	4,00	10,57	4,20
25,0	10,15	3,80	10,61	3,70
30,0	10,14	3,70	10,61	4,10
35,0	10,17	3,60	10,58	4,10
40,0	10,32	3,50	10,59	3,90
45,0	10,38	3,50	10,62	3,40
50,0	10,36	3,50	10,66	3,70
55,0	10,35	3,40	10,68	3,70
60,0	10,36	3,40	10,69	3,70
65,0	10,38	3,40	10,70	3,50
70,0	10,29	3,30	10,72	3,10
75,0	10,36	3,30	10,74	3,40
80,0	10,44	3,30	10,74	3,30

Continua...

Continuação da Tabela 4.25

85,0	10,46	3,30	10,73	3,20
90,0	10,57	3,30	10,77	3,20
95,0	10,64	3,30	10,81	3,20
100,0	10,65	3,30	10,75	3,10
105,0	10,64	3,10	10,73	3,00
110,0	10,68	2,90	10,73	3,00
115,0	10,73	3,00	10,74	3,00
120,0	10,80	2,90	10,74	3,00
125,0	10,81	2,80	10,82	3,00
130,0	10,81	2,80	10,78	3,00
135,0	10,82	2,80	10,77	3,00
140,0	10,83	2,60	10,76	3,00
145,0	10,82	2,60	10,73	2,90
150,0	10,84	2,60	10,73	2,90
155,0	10,85	2,60	10,72	2,90
160,0	10,84	2,60	10,70	2,90
165,0	10,84	2,60	10,69	2,90
170,0	10,88	2,50	10,66	2,90
175,0	10,83	2,50	10,65	2,90
180,0	10,85	2,60	10,70	2,90

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.26: Potencial hidrogeniônico em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 48,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (*); $K_i = 68 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (#); $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação, h = água destilada, p = produto e c = concentrado).

Tempo (min)	V = 40 volts *		V = 50 volts #	
	pH _p	pH _c	pH _p	pH _c
0,0	7,19	4,00	7,52	5,20
0,25	7,25	4,30	7,47	5,20
0,5	7,28	4,60	7,62	5,40
0,75	7,30	4,90	7,93	5,50
1,0	7,32	5,00	7,80	5,60
1,5	7,34	5,50	8,05	5,70
2,0	7,36	5,80	8,70	5,80
2,5	7,35	6,20	9,34	5,80
3,0	7,38	6,30	9,50	5,70
3,5	7,47	6,30	9,69	5,70
4,0	7,66	6,40	9,85	5,70
4,5	8,08	6,40	10,06	5,70
5,0	8,25	6,40	10,05	5,70
6,0	9,11	6,00	10,20	5,60
7,0	9,37	6,20	10,35	5,60
8,0	9,77	6,20	10,40	5,50
9,0	9,95	6,20	10,45	5,30
10,0	10,03	6,20	10,48	5,40
15,0	10,21	6,10	10,50	5,20
20,0	10,26	4,10	10,53	4,00
25,0	10,19	4,40	10,54	4,00
30,0	10,07	4,10	10,58	3,10
35,0	10,10	4,10	10,63	4,00
40,0	10,11	4,00	10,62	3,90
45,0	10,14	3,90	10,59	3,80
50,0	10,23	3,30	10,61	3,60
55,0	10,39	3,80	10,63	3,70
60,0	10,37	3,80	10,64	3,60
65,0	10,37	3,80	10,56	3,50
70,0	10,39	3,60	10,64	3,40
75,0	10,47	3,30	10,63	3,10
80,0	10,52	2,80	10,64	3,10

Continua...

Continuação da Tabela 4.26

85,0	10,55	3,20	10,74	3,10
90,0	10,58	3,30	10,78	3,20
95,0	10,57	3,50	10,80	3,20
100,0	10,50	3,60	10,76	2,80
105,0	10,49	3,50	10,76	2,80
110,0	10,50	3,50	10,78	2,80
115,0	10,52	3,40	10,79	2,80
120,0	10,55	3,30	10,79	2,80
125,0	10,58	3,30	10,81	2,80
130,0	10,47	3,10	10,97	3,20
135,0	10,64	3,00	10,89	2,80
140,0	10,59	3,00	10,50	3,00
145,0	10,57	3,10	10,63	2,00
150,0	10,57	2,90	10,68	2,70
155,0	10,58	3,00	-	-
160,0	10,60	3,00	-	-
165,0	10,60	3,00	-	-
170,0	10,69	3,00	-	-
175,0	10,73	3,00	-	-
180,0	10,68	2,90	-	-

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão de alimentação em l/h, V = potencial elétrico em volts.

Tabela 4.27: Potencial de hidrogênio médio em função da concentração de alimentação (NaCl) e da diferença de potencial aplicada para o MR2 e FA2.

Ca (ppm)	pH médio	
	40 volts	50 volts
3000	10,71	10,77
5000	10,61	10,68
7000	10,54	10,58

Onde: C_a = concentração de alimentação em ppm (partes por milhão).

Tabela 4.28: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MRI e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2$ mS/cm (900 ppm); $K_h = 5,96$ μ S/cm; $V = 36$ V; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,636	0,00	171,43
0,5	0,848	0,00	128,57
1,5	0,788	0,00	138,45
2,0	0,697	0,00	156,50
2,5	0,697	0,00	156,50
3,0	0,697	0,00	156,50
4,0	0,727	0,22	150,00
4,5	0,727	0,87	150,00
5,0	0,758	1,53	144,00
5,5	0,758	2,26	144,00
6,0	0,758	2,71	144,00
6,5	0,758	3,42	144,00
7,0	0,788	3,77	138,45
7,5	0,788	4,23	138,45
8,0	0,788	4,75	138,45
8,5	0,788	4,97	138,45
9,0	0,788	5,33	138,45
9,5	0,788	5,58	138,45
10,0	0,788	5,98	138,45
10,5	0,818	5,89	133,35
11,0	0,818	6,17	133,35
11,5	0,818	6,31	133,35
12,0	0,818	6,46	133,35
12,5	0,818	6,61	133,35
13,0	0,818	6,92	133,35
13,5	0,818	7,08	133,35
15,0	0,848	7,66	128,55
20,0	0,879	9,10	124,15
25,0	0,970	9,25	112,50
30,0	1,061	5,59	102,85

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.29: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR1 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 10,9$ mS/cm (6000 ppm); $K_h = 0,13$ mS/cm; $V = 36$ V; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada)

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,25	1,000	-	109,10
0,5	1,182	-	92,30
0,75	1,303	-	83,70
1,0	1,333	-	81,80
1,5	1,303	0,00	83,70
2,0	1,121	0,00	97,30
2,5	1,091	0,00	100,00
3,0	1,091	0,00	100,00
3,5	1,091	0,00	100,00
4,0	1,121	0,01	97,30
4,5	1,151	0,50	94,75
5,0	1,151	2,15	94,75
5,5	1,151	3,32	94,75
6,0	1,182	4,79	92,30
6,5	1,182	6,32	92,30
7,0	1,212	7,75	90,00
7,5	1,212	9,32	90,00
8,0	1,242	10,44	87,80
8,5	1,242	11,47	87,80
9,0	1,273	11,70	85,70
9,5	1,273	12,54	85,70
10,0	1,273	13,13	85,70
13,0	1,333	15,07	81,80
14,0	1,333	15,42	81,80
15,0	1,364	15,07	80,00
20,0	1,455	13,50	75,00
25,0	1,545	13,93	70,60
30,0	1,576	16,42	69,25
35,5	1,666	17,42	65,50

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ε = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.30: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MRI e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 4,87$ μ S/cm; $V_i = 38$ V, (*) $V = 40$ V, (#) $V = 50$ V; $Q_a = 7$ l/h; $Q_h = 11$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação, h = água destilada e i = inicial).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,636	0,00	180,95
0,25	0,545	-	211,10
0,5	0,545	-	211,10
0,75	0,576	-	200,00
1,0	0,606	0,00	190,00
1,25	0,606	-	190,00
1,5	0,636	0,00	180,95
1,75	0,636	-	180,95
2,0	0,636	0,00	180,95
2,5	0,666	-	172,70
3,0	0,666	0,00	172,70
3,5	0,666	-	172,70
4,0	0,697	0,32	165,20
4,5	0,697	-	165,20
5,0	0,697	1,78	165,20
6,0	0,697	3,55	165,20
7,0	0,727	4,91	158,35
8,0	0,727	6,04	158,35
9,0	0,727	6,94	158,35
10,0	0,758	7,47	152,00
15,0	0,789	8,78	152,00
20,0	0,848	8,21	135,70
26,0	0,879	8,11	131,05
40,0	1,000	8,00	115,15
60,0*	1,242*	4,56*	97,55*
90,0	1,152	15,91	105,25
120,0#	2,485#	11,96#	60,95#
150,0	3,212	11,65	47,15
180,0	3,788	9,65	40,00
210,0	4,394	5,50	34,05
240,0	4,879	4,21	31,05

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.31: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15$ mS/cm (1000 ppm); $K_h = 44,7$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,303	0,00	400,00
0,25	0,303	0,00	400,00
0,5	0,303	0,00	400,00
0,75	0,303	0,00	400,00
1,0	0,303	0,00	400,00
1,5	0,273	0,00	444,38
2,0	0,273	0,00	444,38
2,5	0,273	0,01	444,38
3,0	0,273	0,13	444,38
3,5	0,273	0,33	444,38
4,0	0,273	0,46	444,38
4,5	0,273	0,59	444,38
5,0	0,273	0,74	444,38
5,5	0,273	0,95	444,38
6,0	0,273	1,38	444,38
6,5	0,273	1,81	444,38
7,0	0,273	2,39	444,38
7,5	0,273	2,74	444,38
8,0	0,273	3,08	444,38
8,5	0,273	3,38	444,38
9,0	0,273	3,62	444,38
9,5	0,273	3,88	444,38
10,0	0,273	3,88	444,38
15,0	0,273	5,60	444,38
20,0	0,273	6,73	444,38
25,0	0,273	7,05	444,38
30,0	0,273	7,05	444,38
35,0	0,273	6,73	444,38
40,0	0,273	7,22	444,38
45,0	0,273	7,73	444,38
50,0	0,273	5,73	444,38
55,0	0,303	4,49	400,01
60,0	0,303	6,96	400,01
65,0	0,303	5,16	400,01
70,0	0,303	3,82	400,01
75,0	0,303	3,18	400,01
80,0	0,303	2,84	400,01
85,0	0,303	3,33	400,01

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ε = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.32: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3$ mS/cm (1500 ppm); $K_h = 63,4$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,273	0,00	444,38
0,25	0,273	0,00	444,38
0,5	0,242	0,00	444,38
0,75	0,242	0,00	449,97
1,0	0,242	0,00	449,97
1,5	0,242	0,00	449,97
2,0	0,242	0,00	449,97
2,5	0,242	0,00	449,97
3,0	0,273	0,00	444,38
3,5	0,242	0,00	449,97
4,0	0,242	0,00	449,97
4,5	0,242	0,02	449,97
5,0	0,242	0,06	449,97
6,0	0,242	0,17	449,97
7,0	0,242	0,32	449,97
8,0	0,242	0,63	449,97
9,0	0,242	1,20	449,97
10,0	0,242	1,66	449,97
15,0	0,242	4,56	449,97
20,0	0,273	4,66	444,38
25,0	0,273	5,11	444,38
30,0	0,242	5,12	449,97
35,0	0,242	5,62	449,97
40,0	0,242	6,30	449,97
45,0	0,273	5,35	444,38
50,0	0,212	6,57	571,37
55,0	0,273	5,86	444,38
60,0	0,273	4,77	444,38
75,0	0,273	2,50	444,38
90,0	0,273	6,14	444,38
105,0	0,273	7,05	444,38
115,0	0,273	8,28	444,38
120,0	0,273	7,91	444,38
135,0	0,273	8,10	444,38
150,0	0,273	9,29	444,38

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.33: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 23,9$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,333	0,00	363,63
0,25	0,333	0,00	363,63
0,5	0,333	0,00	363,63
0,75	0,333	0,00	363,63
1,0	0,333	0,00	363,63
1,5	0,333	0,00	363,63
2,0	0,333	0,00	363,63
2,5	0,333	0,00	363,63
3,0	0,333	0,00	363,63
3,5	0,333	0,00	363,63
4,0	0,333	0,01	363,63
4,5	0,333	0,11	363,63
5,0	0,333	0,35	363,63
5,5	0,333	0,63	363,63
6,0	0,333	0,76	363,63
6,5	0,333	1,32	363,63
7,0	0,333	1,96	363,63
7,5	0,333	1,91	363,63
8,0	0,333	2,83	363,63
8,5	0,333	3,99	363,63
9,0	0,333	4,18	363,63
9,5	0,333	4,69	363,63
10,0	0,333	5,14	363,63
12,0	0,333	6,94	363,63
15,0	0,333	8,94	363,63
17,0	0,333	10,26	363,63
20,0	0,364	10,80	333,37
22,0	0,364	11,31	333,37
25,0	0,242	19,92	499,97
27,0	0,273	15,78	444,38
30,0	0,273	13,44	444,38
35,0	0,273	11,70	444,38
38,0	0,364	2,53	333,37

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.34: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 25,2$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,273	0,00	444,38
0,25	0,303	0,00	400,01
0,5	0,303	0,00	400,01
0,75	0,303	0,00	400,01
1,0	0,303	0,00	400,01
1,5	0,303	0,00	400,01
2,0	0,303	0,00	400,01
2,5	0,303	0,00	400,01
3,0	0,303	0,00	400,01
3,5	0,303	0,00	400,01
4,0	0,303	0,01	400,01
4,5	0,303	0,02	400,01
5,0	0,303	0,13	400,01
6,0	0,303	0,50	400,01
7,0	0,303	1,10	400,01
8,0	0,303	1,30	400,01
9,0	0,303	1,96	400,01
10,0	0,333	2,19	363,63
15,0	0,242	6,02	499,97
20,0	0,273	6,43	444,38
25,0	0,242	5,49	499,97
30,0	0,273	4,99	444,38
35,0	0,273	5,12	444,38
40,0	0,273	5,23	444,38
45,0	0,273	5,23	444,38
50,0	0,273	4,77	444,38
55,0	0,273	4,15	444,38

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.35: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 26,6$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,485	0,00	249,90
0,25	0,485	0,00	249,90
0,5	0,485	0,00	249,90
0,75	0,515	0,00	235,28
1,0	0,515	0,00	235,28
1,5	0,515	0,00	235,28
2,0	0,515	0,00	235,28
2,5	0,515	0,00	235,28
3,0	0,515	0,00	235,28
3,5	0,515	0,02	235,28
4,0	0,515	0,19	235,28
4,5	0,515	0,90	235,28
5,0	0,515	1,91	235,28
6,0	0,515	4,00	235,28
7,0	0,515	5,40	235,28
8,0	0,515	6,34	235,28
9,0	0,515	7,11	235,28
10,0	0,545	7,20	222,19
15,0	0,515	10,05	235,28
18,0	0,515	13,87	235,28
19,0	0,515	14,52	235,28
20,0	0,515	14,86	235,28
25,0	0,485	17,72	249,90
26,0	0,303	31,80	400,01
30,0	0,303	18,73	400,01
35,0	0,303	6,96	400,01
40,0	0,364	4,11	333,37
45,0	0,333	5,14	363,63
50,0	0,333	1,91	363,63
55,0	0,333	0,53	363,63
60,0	0,364	0,14	333,37
65,0	0,364	0,38	333,37
70,0	0,333	2,58	363,63
75,0	0,364	2,76	333,37

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ε = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.36: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12 \text{ mS/cm}$ (7000 ppm); $K_h = 36,1 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,333	0,00	363,63
0,25	0,333	0,00	363,63
0,5	0,333	0,00	363,63
0,75	0,333	0,00	363,63
1,0	0,333	0,00	363,63
1,5	0,364	0,00	333,37
2,0	0,364	0,02	333,37
2,5	0,364	0,08	333,37
3,0	0,364	0,30	333,37
3,5	0,394	1,09	307,70
4,0	0,394	1,77	307,70
4,5	0,394	3,23	307,70
5,0	0,394	4,16	307,70
6,0	0,394	6,44	307,70
7,0	0,394	7,74	307,70
8,0	0,394	8,88	307,70
9,0	0,394	9,52	307,70
10,0	0,394	9,97	307,70
15,0	0,424	10,38	385,77
20,0	0,424	10,38	385,77
25,0	0,424	10,38	385,77
30,0	0,455	9,69	266,73
35,0	0,455	9,47	266,73
40,0	0,455	9,69	266,73
45,0	0,485	8,68	249,90
50,0	0,485	7,56	249,90
55,0	0,485	7,22	249,90
60,0	0,485	7,05	249,90
65,0	0,485	8,88	249,90
70,0	0,515	4,09	235,28
75,0	0,515	2,90	235,28
80,0	0,515	2,41	235,28
85,0	0,515	6,34	235,28
90,0	0,515	2,20	235,28
95,0	0,545	2,33	222,19
100,0	0,545	1,65	222,19
105,0	0,545	0,38	222,19
110,0	0,545	0,19	222,19

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ε = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.37: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86$ mS/cm (10000 ppm); $K_h = 47,7$ μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,455	0,00	266,73
0,25	0,455	0,00	266,73
0,5	0,455	0,00	266,73
0,75	0,455	0,00	266,73
1,0	0,455	0,00	266,73
1,5	0,485	0,00	249,90
2,0	0,515	0,01	235,28
2,5	0,515	0,02	235,28
3,0	0,515	0,09	235,28
3,5	0,545	0,29	222,19
4,0	0,545	0,64	222,19
4,5	0,545	1,14	222,19
5,0	0,545	1,28	222,19
5,5	0,545	1,65	222,19
6,0	0,545	1,94	222,19
6,5	0,545	2,12	222,19
7,0	0,545	2,28	222,19
7,5	0,545	2,38	222,19
8,0	0,545	2,50	222,19
8,5	0,545	2,55	222,19
9,0	0,545	2,61	222,19
9,5	0,576	2,48	210,46
10,0	0,576	2,53	210,46
11,0	0,576	2,48	210,46
12,0	0,576	2,42	210,46
15,0	0,545	2,38	222,19
20,0	0,576	2,16	210,46
25,0	0,576	1,88	210,46
30,0	0,636	1,39	199,92
35,0	0,576	0,94	210,46
40,0	0,576	0,42	210,46
45,0	0,636	0,16	199,92
50,0	0,576	2,16	210,46

Continua...

Continuação da Tabela 4.37

55,0	0,576	1,21	210,46
60,0	0,636	0,05	190,40
65,0	0,606	2,30	199,92
70,0	0,606	2,35	199,92
75,0	0,545	1,61	222,19
80,0	0,545	0,81	222,19
85,0	0,545	0,32	222,19
90,0	0,545	0,47	222,19
95,0	0,545	1,12	222,19
100,0	0,576	1,01	210,46
105,0	0,576	1,21	210,46
110,0	0,576	2,31	210,46
115,0	0,576	1,33	210,46
120,0	0,576	0,84	210,46

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.33: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 2,15$ mS/cm (1000 ppm); $K_h = 19$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,242	0,00	624,92
0,25	0,242	0,00	624,92
0,5	0,273	0,00	555,56
0,75	0,273	0,00	555,56
1,0	0,303	0,00	499,97
1,5	0,303	0,00	499,97
2,0	0,333	0,00	454,58
2,5	0,303	0,00	499,97
3,0	0,333	0,00	454,58
3,5	0,333	0,01	499,97
4,0	0,303	0,00	499,97
5,0	0,303	0,02	499,97
6,0	0,303	0,28	499,97
10,0	0,303	4,60	499,97
15,0	0,303	7,99	499,97
20,0	0,333	10,03	454,58
25,0	0,333	12,05	454,58
30,0	0,303	14,21	499,97
35,0	0,333	12,62	454,58
40,0	0,333	14,16	454,58
45,0	0,333	15,17	454,58
50,0	0,333	15,89	454,58
55,0	0,333	15,89	454,58
60,0	0,333	16,64	454,58
75,0	0,333	17,83	454,58
90,0	0,364	14,90	416,67
105,0	0,364	13,59	416,67
120,0	0,394	11,18	384,54
135,0	0,394	11,98	384,54
140,0	0,394	11,98	384,54

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.39: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3 \text{ mS/cm}$ (1500 ppm); $K_h = 25,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,424	0,00	357,00
0,25	0,424	0,00	357,00
0,5	0,424	0,00	357,00
0,75	0,424	0,00	357,00
1,0	0,424	0,00	357,00
1,5	0,394	0,00	384,54
2,0	0,394	0,00	384,54
2,5	0,394	0,00	384,54
3,0	0,394	0,01	384,54
3,5	0,394	0,06	384,54
4,0	0,394	0,13	384,54
4,5	0,394	0,38	384,54
5,0	0,394	0,63	384,54
7,0	0,424	1,54	357,00
8,0	0,394	2,04	384,54
9,0	0,394	2,81	384,54
10,0	0,394	3,01	384,54
15,0	0,394	5,23	384,54
20,0	0,394	10,20	384,54
25,0	0,394	9,97	384,54
30,0	0,394	11,44	384,54
35,0	0,424	11,13	357,00
40,0	0,424	11,65	357,00
45,0	0,424	12,77	357,00
50,0	0,424	13,38	357,00
55,0	0,455	13,07	333,37
60,0	0,455	12,78	333,37
90,0	0,455	17,23	333,37
120,0	0,455	10,38	333,37

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.40: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 3,8$ mS/cm (2000 ppm); $K_h = 22,2$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,25	0,455	0,00	333,37
0,5	0,455	0,00	333,37
0,75	0,424	0,00	357,00
1,0	0,424	0,00	357,00
1,5	0,424	0,00	357,00
2,0	0,424	0,00	357,00
2,5	0,424	0,00	357,00
3,0	0,424	0,06	357,00
3,5	0,424	0,22	357,00
4,0	0,424	0,66	357,00
4,5	0,424	0,93	357,00
5,0	0,424	1,43	357,00
6,0	0,424	2,67	357,00
7,0	0,424	3,77	357,00
8,0	0,424	4,64	357,00
9,0	0,424	5,45	357,00
10,0	0,424	6,55	357,00
15,0	0,424	13,10	357,00
20,0	0,424	15,72	357,00
25,0	0,424	17,23	357,00
30,0	0,455	17,23	333,37
35,0	0,455	18,47	333,37
40,0	0,455	19,79	333,37
45,0	0,485	19,88	312,46
50,0	0,485	20,34	312,46
55,0	0,515	19,59	294,10
60,0	0,515	20,05	294,10
75,0	0,545	20,29	277,78

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.41: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 24,7$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,333	0,00	455,58
0,25	0,364	0,00	416,67
0,5	0,364	0,00	416,67
0,75	0,364	0,00	416,67
1,0	0,364	0,00	416,67
1,5	0,364	0,00	416,67
2,0	0,364	0,00	416,67
2,5	0,394	0,00	384,54
3,0	0,394	0,01	384,54
3,5	0,394	0,04	384,54
4,0	0,394	0,22	384,54
4,5	0,394	0,32	384,54
5,0	0,394	0,55	384,54
6,0	0,394	1,69	384,54
7,0	0,394	2,13	384,54
8,0	0,394	3,62	384,54
9,0	0,394	5,00	384,54
10,0	0,424	5,20	357,00
15,0	0,424	9,04	357,00
20,0	0,455	11,13	333,37
25,0	0,485	11,98	312,46
30,0	0,424	13,38	357,00
35,0	0,424	14,01	357,00
40,0	0,455	14,01	333,37
45,0	0,455	14,67	333,37
50,0	0,455	15,36	333,37
55,0	0,455	15,36	333,37
60,0	0,485	14,07	312,46
75,0	0,485	13,75	312,46
80,0	0,545	4,76	277,78

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.42: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 9$ mS/cm (5000 ppm); $K_h = 32,1$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,939	0,00	161,33
0,25	0,939	0,00	161,33
0,5	0,939	0,00	161,33
0,75	0,939	0,01	161,33
1,0	0,939	0,02	161,33
1,5	0,939	0,87	161,33
2,0	0,939	4,69	161,33
2,5	0,939	10,03	161,33
3,0	0,939	12,62	161,33
3,5	0,939	20,95	161,33
4,0	0,939	24,05	161,33
4,5	0,939	26,98	161,33
5,0	0,697	38,08	217,43
6,0	0,697	45,79	217,43
7,0	0,697	47,95	217,43
8,0	0,697	45,79	217,43
9,0	0,697	41,76	217,43
10,0	0,697	42,73	217,43
15,0	0,727	33,29	208,25
20,0	0,727	28,33	208,25
25,0	0,758	24,80	199,92
30,0	0,758	20,16	199,92
35,0	0,788	15,76	192,27
40,0	0,788	14,71	192,27
45,0	0,788	14,04	192,27
50,0	0,788	7,87	192,27
55,0	0,788	6,42	192,27
60,0	0,758	6,68	199,92

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.43: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 5$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,667	0,00	227,29
0,25	0,667	0,01	227,29
0,5	0,667	0,03	227,29
0,75	0,667	0,06	227,29
1,0	0,667	0,10	227,29
1,5	0,667	0,15	227,29
2,0	0,667	0,17	227,29
2,5	0,697	0,63	217,43
3,0	0,697	1,38	217,43
3,5	0,697	2,24	217,43
4,0	0,727	2,77	208,25
4,5	0,727	4,00	208,25
5,0	0,727	4,70	208,25
5,5	0,727	5,92	208,25
6,0	0,727	6,80	208,25
6,5	0,727	7,45	208,25
7,0	0,727	8,56	208,25
7,5	0,727	8,96	208,25
8,0	0,727	9,38	208,25
8,5	0,727	9,82	208,25
9,0	0,758	9,65	199,92
9,5	0,758	9,88	199,92
10,0	0,758	10,11	199,92
11,0	0,758	10,34	199,92
12,0	0,758	10,83	199,92
13,0	0,758	11,34	199,92
14,0	0,788	10,90	192,27
15,0	0,788	10,41	192,27
20,0	0,818	10,99	185,13
25,0	0,818	11,25	185,13
30,0	0,848	9,89	178,50
35,0	0,879	7,95	172,38
40,0	0,879	8,51	172,38
45,0	0,909	8,04	166,60
50,0	0,909	8,04	166,60
55,0	0,939	10,50	161,33
60,0	0,939	5,64	161,33
65,0	0,909	3,94	166,60

Continua...

Continuação da Tabela 4.43

70,0	0,939	3,17	161,33
75,0	0,939	3,56	161,33
80,0	0,939	5,64	161,33
85,0	0,939	6,04	161,33
90,0	0,939	3,40	161,33
95,0	0,939	4,80	161,33
100,0	0,970	6,72	156,23
105,0	1,000	7,14	151,47
110,0	1,030	7,60	147,05
115,0	1,030	8,53	147,05
120,0	1,061	9,52	142,80
125,0	1,000	13,61	151,47
130,0	0,970	10,17	156,23
135,0	0,970	11,15	156,23
140,0	1,000	12,46	151,47

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.44: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA1, sob as seguintes condições: $K_a = 16,86 \text{ mS/cm}$ (10000 ppm); $K_h = 39 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,909	0,00	166,60
0,25	0,909	0,00	166,60
0,5	0,909	0,00	166,60
0,75	0,909	0,02	166,60
1,0	0,939	0,04	161,33
1,5	0,939	0,43	161,33
2,0	0,939	0,85	161,33
2,5	0,939	1,87	161,33
3,0	0,939	3,10	161,33
3,5	0,939	3,73	161,33
4,0	0,939	4,69	161,33
4,5	0,939	5,26	161,33
5,0	0,970	5,46	156,23
5,5	0,970	5,85	156,23
6,0	0,970	6,27	156,23
7,0	0,970	6,57	156,23
8,0	0,970	6,88	156,23
9,0	1,000	6,82	151,47
10,0	1,000	6,82	151,47
12,0	1,000	6,98	151,47
15,0	1,030	6,93	147,05
17,0	1,030	7,10	147,05
20,0	1,030	7,43	147,05
25,0	1,000	7,83	151,47
30,0	1,030	6,82	147,05
35,0	1,061	6,62	142,80
40,0	1,091	5,97	138,89
45,0	1,091	6,25	138,89
50,0	1,121	6,37	135,15
55,0	1,121	5,06	135,15
60,0	1,121	6,67	135,15
65,0	1,182	5,64	128,18
70,0	1,212	4,58	124,95
75,0	1,242	4,26	121,89
80,0	1,273	2,88	119,00
85,0	1,273	4,16	119,00
90,0	1,303	3,97	116,28

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.47: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62 \text{ mS/cm}$ (3000 ppm); $K_h = 54,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,394	0,00	307,70
0,25	0,394	0,00	307,70
0,5	0,424	0,00	385,77
0,75	0,424	0,00	385,77
1,0	0,424	0,01	385,77
1,5	0,394	0,05	307,70
2,0	0,424	0,05	285,77
2,5	0,394	0,25	307,70
3,0	0,394	0,32	285,77
3,5	0,394	0,85	307,70
4,0	0,394	1,20	307,70
4,5	0,394	1,86	307,70
5,0	0,394	2,23	307,70
6,0	0,394	3,62	307,70
7,0	0,394	4,25	307,70
8,0	0,394	4,88	307,70
9,0	0,424	5,20	285,77
10,0	0,424	5,98	285,77
15,0	0,394	8,29	307,70
20,0	0,394	9,74	307,70
25,0	0,424	10,38	285,77
30,0	0,424	10,87	285,77
35,0	0,424	10,87	285,77
40,0	0,455	9,92	266,73
45,0	0,455	10,15	266,73
50,0	0,455	10,38	266,73
55,0	0,455	10,38	266,73
60,0	0,485	9,74	250,07
65,0	0,455	9,92	266,73
70,0	0,455	9,92	266,73
75,0	0,455	9,92	266,73
80,0	0,485	6,28	250,07
85,0	0,455	8,25	266,73

Continua...

Continuação da Tabela 4.47

90,0	0,485	9,09	250,67
95,0	0,455	9,92	266,73
100,0	0,485	10,43	250,07
105,0	0,515	10,28	235,28
110,0	0,485	11,18	250,07
115,0	0,485	11,44	250,07
120,0	0,485	12,26	250,07
125,0	0,485	12,54	250,07
130,0	0,485	12,83	250,07
135,0	0,485	13,13	250,07
140,0	0,515	12,65	235,28
145,0	0,515	12,94	235,28
150,0	0,515	12,36	235,28
155,0	0,515	12,36	235,28
160,0	0,515	8,95	235,28
165,0	0,485	9,74	250,07
170,0	0,485	9,09	250,07

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.48: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 45,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 40 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,485	0,00	250,07
0,25	0,455	0,00	666,73
0,5	0,455	0,00	666,73
0,75	0,455	0,00	666,73
1,0	0,455	0,00	666,73
1,5	0,455	0,00	666,73
2,0	0,455	0,00	666,73
2,5	0,455	0,00	666,73
3,0	0,455	0,00	666,73
3,5	0,455	0,01	666,73
4,0	0,455	0,02	666,73
4,5	0,455	0,09	666,73
5,0	0,455	0,24	666,73
6,0	0,455	0,47	666,73
7,0	0,455	0,77	666,73
8,0	0,455	0,99	666,73
9,0	0,455	1,11	666,73
10,0	0,455	1,17	666,73
15,0	0,424	1,89	285,77
20,0	0,394	2,56	307,70
25,0	0,394	2,62	307,70
30,0	0,394	2,56	307,70
35,0	0,394	2,75	307,70
40,0	0,394	3,88	307,70
45,0	0,424	4,13	285,77
50,0	0,424	3,95	285,77
55,0	0,424	3,86	285,77
60,0	0,424	3,95	285,77
65,0	0,424	4,13	285,77
70,0	0,424	3,36	285,77
75,0	0,424	3,95	285,77
80,0	0,424	4,75	285,77
85,0	0,424	4,97	285,77

Continua...

Continuação da Tabela 4.48

90,0	0,394	6,90	307,70
95,0	0,394	8,10	307,70
100,0	0,424	7,70	285,77
105,0	0,394	8,10	307,70
110,0	0,394	8,88	307,70
115,0	0,424	9,25	285,77
120,0	0,424	10,87	285,77
125,0	0,424	11,13	285,77
130,0	0,424	11,13	285,77
135,0	0,424	11,39	285,77
140,0	0,424	11,65	285,77
145,0	0,424	11,39	285,77
150,0	0,424	11,92	285,77
155,0	0,424	12,20	285,77
160,0	0,424	11,92	285,77
165,0	0,424	11,92	285,77
170,0	0,424	13,07	285,77
175,0	0,424	11,65	285,77
180,0	0,424	12,20	285,77

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.49: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 48$, l μ S/cm; $V = 40$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,394	0,00	307,70
0,25	0,394	0,00	307,70
0,5	0,394	0,00	307,70
0,75	0,364	0,00	333,37
1,0	0,364	0,00	333,37
1,5	0,364	0,00	333,37
2,0	0,364	0,01	333,37
2,5	0,364	0,01	333,37
3,0	0,364	0,01	333,37
3,5	0,364	0,01	333,37
4,0	0,364	0,01	333,37
4,5	0,364	0,02	333,37
5,0	0,364	0,04	333,37
6,0	0,364	0,26	333,37
7,0	0,364	0,47	333,37
8,0	0,364	1,84	333,37
9,0	0,364	1,79	333,37
10,0	0,364	2,15	333,37
15,0	0,364	3,26	333,37
20,0	0,273	4,88	444,38
25,0	0,303	3,74	400,01
30,0	0,303	2,83	400,01
35,0	0,303	3,04	400,01
40,0	0,303	3,11	400,01
45,0	0,303	3,33	400,01
50,0	0,303	4,10	400,01
55,0	0,303	5,92	400,01
60,0	0,303	5,66	400,01
65,0	0,303	5,66	400,01
70,0	0,303	5,92	400,01
75,0	0,303	7,12	400,01
80,0	0,303	7,99	400,01
85,0	0,303	8,56	400,01

Continua...

Continuação da Tabela 4.49

90,0	0,333	8,34	363,63
95,0	0,333	8,15	363,63
100,0	0,303	7,63	400,01
105,0	0,303	7,46	400,01
110,0	0,303	7,63	400,01
115,0	0,333	7,26	363,63
120,0	0,333	7,78	363,63
125,0	0,333	8,34	363,63
130,0	0,303	7,12	400,01
135,0	0,303	10,53	400,01
140,0	0,303	9,39	400,01
145,0	0,303	8,96	400,01
150,0	0,303	8,96	400,01
155,0	0,303	9,17	400,01
160,0	0,303	9,60	400,01
165,0	0,303	9,60	400,01
170,0	0,303	11,82	400,01
175,0	0,303	12,96	400,01
180,0	0,303	11,55	400,01

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.50: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 5,62$ mS/cm (3000 ppm); $K_h = 46,7$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ε (%)	R (ohm)
0,0	0,485	0,00	312,46
0,25	0,485	0,00	312,46
0,5	0,485	0,00	312,46
0,75	0,485	0,00	312,46
1,0	0,485	0,00	312,46
1,5	0,485	0,00	312,46
2,0	0,455	0,07	333,37
2,5	0,455	0,14	333,37
3,0	0,455	0,63	333,37
3,5	0,455	0,75	333,37
4,0	0,455	0,99	333,37
4,5	0,485	1,62	312,46
5,0	0,455	2,27	333,37
6,0	0,485	2,39	312,46
7,0	0,485	3,15	312,46
8,0	0,485	3,62	312,46
9,0	0,485	4,15	312,46
10,0	0,485	4,77	312,46
15,0	0,455	7,52	333,37
20,0	0,485	8,48	312,46
25,0	0,485	8,29	312,46
30,0	0,485	8,48	312,46
35,0	0,485	8,88	312,46
40,0	0,515	7,98	295,29
45,0	0,515	7,45	295,29
50,0	0,515	8,17	295,29
55,0	0,515	8,36	295,29
60,0	0,545	7,89	277,78
65,0	0,515	8,75	295,29
70,0	0,545	8,46	277,78
75,0	0,576	6,08	263,16
80,0	0,576	5,94	263,16
85,0	0,576	5,17	263,16

Continua...

Continuação da Tabela 4.50

90,0	0,576	5,17	263,16
95,0	0,576	4,02	263,16
100,0	0,576	5,06	263,16
105,0	0,576	5,17	263,16
110,0	0,576	6,36	263,16
115,0	0,606	5,51	250,07
120,0	0,576	5,67	263,16
125,0	0,576	7,14	263,16
130,0	0,576	9,20	263,16
135,0	0,576	9,20	263,16
140,0	0,576	9,41	263,16
145,0	0,576	9,86	263,16
150,0	0,576	10,56	263,16
155,0	0,576	11,32	263,16
160,0	0,576	11,06	263,16
165,0	0,606	10,75	250,07
170,0	0,606	10,51	250,07
175,0	0,606	10,51	250,07
180,0	0,606	11,26	250,07

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.51: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 9 \text{ mS/cm}$ (5000 ppm); $K_h = 48,3 \text{ } \mu\text{S/cm}$; $V = 50 \text{ V}$; $Q_a = 5 \text{ l/h}$; $Q_h = 9 \text{ l/h}$; $T = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,485	0,00	312,46
0,25	0,485	0,00	312,46
0,5	0,485	0,00	312,46
0,75	0,485	0,00	312,46
1,0	0,485	0,00	312,46
1,5	0,455	0,00	333,37
2,0	0,455	0,00	333,37
2,5	0,455	0,00	333,37
3,0	0,455	0,06	333,37
3,5	0,455	0,21	333,37
4,0	0,455	0,39	333,37
4,5	0,455	0,64	333,37
5,0	0,455	0,83	333,37
6,0	0,455	1,28	333,37
7,0	0,455	2,03	333,37
8,0	0,455	2,38	333,37
9,0	0,455	2,67	333,37
10,0	0,455	3,00	333,37
15,0	0,455	4,64	333,37
20,0	0,455	5,98	333,37
25,0	0,424	7,02	357,00
30,0	0,394	7,56	384,54
35,0	0,394	7,10	384,54
40,0	0,394	7,22	384,54
45,0	0,455	6,71	333,37
50,0	0,394	8,48	384,54
55,0	0,394	8,88	384,54
60,0	0,424	8,44	357,00
65,0	0,424	8,64	357,00
70,0	0,455	8,44	333,37
75,0	0,424	9,47	357,00
80,0	0,424	9,47	357,00
85,0	0,424	9,25	357,00

Continua...

Continuação da Tabela 4.51

90,0	0,424	10,15	357,00
95,0	0,424	11,13	357,00
100,0	0,424	9,69	357,00
105,0	0,424	9,25	357,00
110,0	0,424	9,25	357,00
115,0	0,424	9,47	357,00
120,0	0,424	9,47	357,00
125,0	0,424	11,39	357,00
130,0	0,424	10,38	357,00
135,0	0,424	10,15	357,00
140,0	0,424	9,92	357,00
145,0	0,424	9,25	357,00
150,0	0,424	9,25	357,00
155,0	0,424	9,05	357,00
160,0	0,424	8,64	357,00
165,0	0,424	8,44	357,00
170,0	0,424	7,88	357,00
175,0	0,424	7,70	357,00
180,0	0,424	8,64	357,00

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm^2 , ϵ = eficiência de corrente em porcentagem, R = resistência ôhmica em ohm.

Tabela 4.52: Densidade de corrente, eficiência de corrente e resistência ôhmica em função do tempo para o MR2 e FA2, sob as seguintes condições: $K_a = 12$ mS/cm (7000 ppm); $K_h = 68$ μ S/cm; $V = 50$ V; $Q_a = 5$ l/h; $Q_h = 9$ l/h; $T = 25 \pm 2$ °C (a = alimentação e h = água destilada).

Tempo (min)	J (mA/cm ²)	ϵ (%)	R (ohm)
0,0	0,545	0,00	277,78
0,25	0,545	0,00	277,78
0,5	0,545	0,01	277,78
0,75	0,545	0,01	277,78
1,0	0,515	0,01	294,10
1,5	0,515	0,02	294,10
2,0	0,515	0,07	294,10
2,5	0,515	0,31	294,10
3,0	0,515	0,45	294,10
3,5	0,515	0,70	294,10
4,0	0,515	1,01	294,10
4,5	0,515	1,63	294,10
5,0	0,515	1,59	294,10
6,0	0,515	2,25	294,10
7,0	0,515	3,18	294,10
8,0	0,515	3,57	294,10
9,0	0,515	4,00	294,10
10,0	0,515	4,29	294,10
15,0	0,545	4,24	277,78
20,0	0,545	4,54	277,78
25,0	0,515	4,92	294,10
30,0	0,485	5,73	312,46
35,0	0,545	5,72	277,78
40,0	0,545	5,59	277,78
45,0	0,545	5,21	277,78
50,0	0,545	5,46	277,78
55,0	0,576	5,42	263,16
60,0	0,576	5,54	263,16
65,0	0,606	4,38	250,07
70,0	0,606	5,27	250,07
75,0	0,576	5,42	263,16
80,0	0,576	5,54	263,16
85,0	0,576	6,98	263,16

Continua...

Continuação da Tabela 4.52

90,0	0,576	7,65	263,16
95,0	0,576	8,01	263,16
100,0	0,576	7,31	263,16
105,0	0,545	7,71	277,78
110,0	0,545	8,08	277,78
115,0	0,576	7,83	263,16
120,0	0,545	8,26	277,78
125,0	0,545	8,65	277,78
130,0	0,606	11,26	250,07
135,0	0,545	10,40	277,78
140,0	0,545	4,24	277,78
145,0	0,545	5,72	277,78
150,0	0,576	6,08	263,16

Onde: J = densidade de corrente em mA/cm², ϵ = eficiência de corrente em percentagem, R = resistência ôhmica em ohm.