



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

AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA
DESSALINIZAÇÃO DO SORO DO LEITE VIA ELETRODIÁLISE

ANA CLAUDIA CAVALCANTE DE ARRUDA

CAMPINA GRANDE - PB
Julho 1996

ANA CLAUDIA CAVALCANTE DE ARRUDA

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA
DESSALINIZAÇÃO DO SORO DO LEITE VIA ELETRODIÁLISE**

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

Prof. KEPLER B. FRANÇA (Ph.D.)

Orientador

CAMPINA GRANDE - PB
Julho 1996



A773a

Arruda, Ana Claudia Cavalcante de.

Avaliacao de um reator eletrodialitico para
dessalinizacao do soro do leite via eletrodialise / Ana
Claudia Cavalcante de Arruda. - Campina Grande, 1996.
121 f.

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

1. Dessalinizacao - Leite. 2. Leite - Dessalinizacao -
Eletrodialise. 3. Reator Eletrodialitico - Dessalinizacao.
4. Dissertacao - Engenharia Quimica. I. Franca, Kepler
Borges. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina
Grande (PB). III. Titulo

CDU 66.065.31(043)

AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETRODIALÍTICO PARA
DESSALINIZAÇÃO DO SORO DO LEITE VIA ELETRODIÁLISE

ANA CLAUDIA CAVALCANTE DE ARRUDA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 26 / 07 / 1996

BANCA EXAMINADORA:

PROF. KEPLER BORGES FRANÇA (Ph.D)
ORIENTADOR

PROF. EUDESIO OLIVEIRA VILAR (Dr.)
COMPONENTE DA BANCA

PROF. MICHEL FRANÇOIS FOSSY (Dr.)
COMPONENTE DA BANCA

PROF. GUILLERMO DE NAHUI PALOMINO (Dr.)
COMPONENTE DA BANCA

CAMPINA GRANDE - PB
Julho 1996

DEDICATÓRIA

A meus queridos pais e tios

A meu irmão, Júnior (in memoriam)

A meu tio José Telécio

A João Oliveira Lima Neto

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me dado força, coragem e o dom do saber para chegar ao fim desta longa caminhada na vida.

Aos meus pais, cuja dedicação e incentivo foram o maior sustentáculo do meu êxito.

Ao professor Kepler Borges França, pela orientação, paciência e empenho no desenvolvimento desta pesquisa.

A Micheline pela dedicação, companhia e apoio nos momentos oportunos.

A Márcia Isabel e Thalma, pela atenção e companheirismo de todas as horas.

A todos os colegas, amigos e parentes que de forma direta e indireta deram a sua parcela de colaboração.

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

A todos os professores do Departamento de Engenharia Química pelas informações, experiências e conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro dispensado.

A ILCASA (Indústria de Laticínios de Campina Grande S.A.), pelo apoio na realização desta pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar a performance de um reator eletrodialítico, para fins de dessalinização do soro do leite via eletrodiálise. Para isso foi desenvolvido no Laboratório de Dessalinização do Departamento de Engenharia Química, um protótipo de reator eletrodialítico tipo mistura sob circulação contínua com capacidade volumétrica de 500 cm³, constituído de membranas semipermeáveis e eletrodos de titânio platinizado, apresentando uma área efetiva total de troca iônica de 352 cm². A performance do sistema foi avaliada para três potenciais elétricos de 20, 40 e 60 volts. Esta avaliação foi realizada através de um estudo comparativo com os dados obtidos a partir da densidade de corrente, resistência ohmica, taxa de extração e consumo de energia. Observa-se que o potencial elétrico de 40 volts apresentou melhores condições de trabalho, apresentando para algumas amostras de soro um rendimento superior ao de 60 volts e um consumo de energia inferior. As amostras de soro de leite foram coletadas na ILCASA - Indústria de Laticínios de Campina Grande S.A.

Esta pesquisa pode apresentar outros resultados, se for aumentado o número de membranas do reator e diferentes condições de trabalho forem testadas em termos de vazão e potencial elétrico, com objetivo de determinar uma melhor faixa de densidade de corrente para diferentes amostras de soro de leite.

ABSTRACT

The present work has the objective to study the performance of an electrodialitic mixed reactor to desalinate the whey milk by electrodialysis. The reactor was developed in the desalination laboratory of the Chemical Engineering Department. It was fitted with two pair electrodialitic membranes showing a total area of 352 cm² with sheet of titanium platiniced with 2,5 μ Pt electrodes and its volumetric capacity 500 cm³. The performance of system was evaluated with three electrical potential 20, 40 and 60 volts. The data to electrical potential mentioned above of current density, ohmic resistance, extraction rate and energy consumption were compared. The electrical potential of 40 volts presented better conditions for some whey milk samples. The results showed that occurred more energy consumption when was used the electrical potential of 60 volts. The samples was collected from ILCASA - Dairy Industry of Campina Grande S.A.

This work can be improved if the number of membranes in the reactor are increased and different conditions in term of flow rate and potential electrical should be applied to obtain a reasonable current density for different whey milk samples quality.

ÍNDICE

	Páginas
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - FUNDAMENTO TEÓRICO	3
2.1 - Leite	3
2.1.1 - Componentes do leite	3
2.1.2 - Considerações sobre os Componentes Principais do Leite	5
2.2 - Soro	8
2.2.1 - Composição Química e Propriedades	8
2.2.2 - Obtenção de Produtos a partir do Soro do Leite	12
2.3 - Eletrodialise	16
2.4 - Sistema Eletrodialítico	18
2.5 - Membranas Eletrodialíticas	20
2.6 - Eletrodos	22
2.7 - Densidade de Corrente	23
2.8 - Resistência Ohmica	24
2.9 - Eficiêncie de Corrente	26
2.10 - Polarização	28
2.11 - Taxa de Extração	29
2.12 - Consumo de Energia	30
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 - Material Utilizado	32
3.2 - Sistema Eletrodialítico e Equipamentos de Medidas	32
3.2.1 - Fonte de Alimentação	32

3.2.2 - Sistema Hidráulico	34
3.2.3 - Unidade de Registro	34
3.2.4 - Reator Eletrodialítico	35
3.3 - Metodologia	36
3.3.1 - Dessalinização	36
3.3.2 - Leitura de Dados Experimentais	38
3.3.3 - Conversão da Condutividade para Concentração	40
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 - Avaliação do potencial elétrico em função da concentração iônica do soro do leite	41
4.2 - Parâmetros eletroquímicos para um potencial elétrico de 40 Volts	42
4.2.1 - Concentração iônica	42
4.2.2 - Densidade de corrente e resistência ohmica	51
4.3 - Parâmetros eletroquímicos para um potencial elétrico de 60 Volts	60
4.3.1 - Concentração iônica	60
4.3.2 - Densidade de corrente e resistência ohmica	66
4.4 - Estudo comparativo do consumo de energia	71
4.5 - Análise das propriedades físico-químicas	76
4.5.1 - Densidade e viscosidade	76
4.5.2 - Análise físico-química do soro do leite	78
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO	79
CAPÍTULO VI - PERSPECTIVAS	81
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE 1 - TABELAS	89
APÊNDICE 2 - DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE E VISCOSIDADE DO SORO DO LEITE	114
APÊNDICE 3 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SORO DO LEITE	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produtos do soro do leite e suas aplicações	13
Figura 2.2 - Representação do sistema eletrodialítico.....	20
Figura 2.3 - Resistências em série de um sistema eletrodialítico.....	25
Figura 2.4 - Diagrama esquemático da determinação da corrente limite.....	29
Figura 3.1 - O sistema eletrodialítico	33
Figura 3.2 - Diagrama do sistema eletrodialítico	39
Figura 3.3 - Curva de calibração do condutivímetro Digimed a 25°C	40
Figura 4.1 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}, V = 20 \text{ Volts}$	44
Figura 4.2 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}, V = 60 \text{ Volts}$	44
Figura 4.3 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}, V = 40 \text{ Volts}$	45
Figura 4.4 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}, V = 40 \text{ Volts}$	45
Figura 4.5 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}, V = 40 \text{ Volts}$	46

Figura 4.6 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	46
Figura 4.7 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	47
Figura 4.8 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	47
Figura 4.8.1 - Representação das taxas de dessalinização em função do tempo, para $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	48
Figura 4.9 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	48
Figura 4.10 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	49
Figura 4.11 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	49
Figura 4.12 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	50
Figura 4.13 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$	50

Figura 4.14 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 1975 p.p.m.....	54
Figura 4.15 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 2016 p.p.m.....	54
Figura 4.16 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 2886 p.p.m.....	55
Figura 4.17 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3139 p.p.m.....	55
Figura 4.18 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3294 p.p.m.....	56
Figura 4.19 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3365 p.p.m.....	56
Figura 4.20 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3660 p.p.m.....	57
Figura 4.21 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3737 p.p.m.....	57
Figura 4.22 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 40 Volts e Co = 3785 p.p.m.....	58

Figura 4.23 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100\text{ l/h}$, $V = 40$ Volts e $C_0 = 3867$ p.p.m.....	58
Figura 4.24 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100\text{ l/h}$, $V = 40$ Volts e $C_0 = 4790$ p.p.m.....	59
Figura 4.25 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	61
Figura 4.26 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	61
Figura 4.27 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	62
Figura 4.27.1 - Representação das taxas de dessalinização em função do tempo, para $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	62
Figura 4.28 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	63
Figura 4.29 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	63
Figura 4.30 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$	64

Figura 4.31 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 1934 p.p.m.....	68
Figura 4.32 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 2519 p.p.m.....	68
Figura 4.33 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 3016 p.p.m.....	69
Figura 4.34 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 3264 p.p.m.....	69
Figura 4.35 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 3524 p.p.m.....	70
Figura 4.36 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: Q = 100l/h, V = 60 Volts e Co = 3607 p.p.m.....	70
Figura 4.37 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e Q = 100 l/h.....	73
Figura 4.38 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e Q = 100 l/h.....	73
Figura 4.39 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e Q = 100 l/h.....	74
Figura 4.40 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 60 Volts e Q = 100 l/h.....	75

Figura 4.41 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 60 Volts e $Q = 100 \text{ l/h}$	75
Figura 4.42 - Densidade inicial em função da concentração inicial do soro do leite a 25°C	77
Figura 4.43 - Viscosidade antes e após a eletrodiálise em função da concentração inicial do soro do leite, para 40 e 60 volts.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição percentual média de leite (g/100ml).....	4
Tabela 2.2 - Proteínas do leite.....	6
Tabela 2.3 - Os principais constituintes sólidos do soro.....	7
Tabela 2.4 - Composição de soros doce e ácido.....	9
Tabela 2.5 - Composição média dos soros dos queijos Minas frescal, Prato, Cheddar e Coalho.....	10
Tabela 2.6 - Composição média dos sais no leite e no soro.....	11
Tabela 3.1 - Unidades de registro	35
Tabela 3.2 - Características das membranas utilizadas.....	35
Tabela 4.1 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite (C/C_0) e da temperatura em função do tempo, para diferentes potenciais elétricos e $Q = 100 \text{ l/h}$	90
Tabela 4.2 - Taxa de extração para diferentes potenciais elétricos e concentrações iniciais de sais no soro do leite (C_0).....	42
Tabela 4.3 - Concentração inicial de sais no soro do leite (C_0) de 1975 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de $1,005 \text{ g/cm}^3$; $\eta = 0,945 \text{ cp a } T = 24^\circ\text{C}$	91
Tabela 4.4 - Concentração inicial de sais no soro do leite (C_0) de 2016 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,82; Densidade de $1,005 \text{ g/cm}^3$; $\eta = 0,946 \text{ cp a } T = 24^\circ\text{C}$	92
Tabela 4.5 - Concentração inicial de sais no soro do leite (C_0) de 2886 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,32; Densidade de $1,014 \text{ g/cm}^3$; $\eta = 0,957 \text{ cp a } T = 22^\circ\text{C}$	93

Tabela 4.6 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3139 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de 1,022 g/cm ³ ; $\eta = 0,987$ cp a T = 21°C.....	94
Tabela 4.7 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3294 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,32; Densidade de 1,022 g/cm ³	95
Tabela 4.8 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3365 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,12; Densidade de 1,024 g/cm ³ ; $\eta = 1,062$ cp a T = 21°C.....	96
Tabela 4.9 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3660 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,02.....	97
Tabela 4.10 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3737 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,11; Densidade de 1,024 g/cm ³	98
Tabela 4.11 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3785 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; Densidade de 1,024 g/cm ³ ; $\eta = 1,088$ cp a T = 27°C.....	99
Tabela 4.12 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3867 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,20; Densidade de 1,025 g/cm ³ ; $\eta = 1,157$ cp a T = 27°C.....	100
Tabela 4.13 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 4790 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,86; Densidade de 1,026 g/cm ³	101
Tabela 4.14 - Valores dos coeficientes das equações obtidas ao longo da batelada para uma concentração inicial de sais, Co = 3365 p.p.m.....	43

Tabela 4.15 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 1934 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,57; Densidade de 1,004 g/cm ³ ; $\eta = 0,944$ cp a T = 22°C.....	102
Tabela 4.16 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 2519 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de 1,011 g/cm ³ ; $\eta = 0,956$ cp a T = 20°C.....	103
Tabela 4.17 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3016 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 6,10; Densidade de 1,022 g/cm ³ ; $\eta = 0,960$ cp a T = 21°C.....	104
Tabela 4.18 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3264 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,0; Densidade de 1,024 g/cm ³ ; $\eta = 0,998$ cp a T = 28°C.....	105
Tabela 4.19 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3524 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,76; Densidade de 1,024 g/cm ³	106
Tabela 4.20 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3607 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,02.....	107
Tabela 4.21 - Valores dos coeficientes das equações obtidas ao longo da batelada para uma concentração inicial de sais, Co = 3016 p.p.m.....	60
Tabela 4.22 - Consumo de energia (E-Wh) em função do tempo para diferentes concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co), sob as seguintes condições: Q = 100 l/h, V = 40 Volts.....	108
Tabela 4.23 - Consumo de energia (E-Wh) em função do tempo para diferentes concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co), sob as seguintes condições: Q = 100 l/h, V = 40 Volts.....	109

Tabela 4.24 - Consumo de energia (E-Wh) em função do tempo para diferentes concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co), sob as seguintes condições: Q = 100 l/h, V = 60 Volts.....	110
Tabela 4.25 - Variação da temperatura $\Delta T(^{\circ}C)$ e o consumo de energia final de cada batelada.....	111
Tabela 4.26- Valores do consumo de energia (E-kWh/m ³) em função da concentração inicial de sais no soro do leite (Co) e do potencial elétrico.....	112
Tabela 4.27 -Concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co) e suas densidades a 25°C.....	112
Tabela 4.28 -Concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co) e suas viscosidades antes e após a eletrodiálise, para diferentes potenciais elétricos.....	113
Tabela 4.29 - Análise físico-química do soro do leite antes e após a eletrodiálise a 25°C, realizada a um potencial elétrico de 40 volts.....	113

SIMBOLOGIA

A	- Ampére
A_e	- Área efetiva (cm^2)
a	- Coeficiente angular
b	- Coeficiente linear
C_i	- Concentração das espécies iônicas (mol/cm^3)
C_0	- Concentração inicial de sais no soro do leite (p.p.m.)
C_t	- Concentração de sais no soro do leite no instante "t" (p.p.m.)
C	- Coulomb
Cal	- Calorias
cm	- Centímetro
cp	- Centipoise
CPS	- Concentrados proteínicos de soro
$^{\circ}\text{C}$	- Grau Centígrado
D_i	- Coeficiente de difusão do íon (cm^2/s)
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
$^{\circ}\text{D}$	- Grau Dornic
E	- Consumo de Energia (Wh)
E_p	- Consumo de Energia Prático (kWh/m^3)
EST	- Extrato Seco Total
eq-g	- Equivalente-grama
F	- Constante de Faraday (96500 C/eq-g)
f	- Taxa de Extração (%)
g	- Grama

<i>h</i>	- Hora
<i>I</i>	- Corrente total do sistema (A)
<i>I_L</i>	- Corrente lida (A)
in	- Polegada
<i>J</i>	- Densidade de corrente (mA/cm ²)
<i>J</i>	- Joule
K	- Condutividade lida a temperatura ambiente (mS)
<i>k</i>	- Condutividade elétrica (mho/cm)
kWh	- Quilowatts-hora
kgf	- Quilograma-força
K	- Grau Kelvin
l	- Litro
meq-g	- Miliequivalente-grama
mg	- Miligrama
min	- Minuto
ml	- Mililitro
mm	- Milímetro
<i>m₀</i>	- Peso do picnômetro vazio
<i>m₁</i>	- Peso do picnômetro cheio com a água destilada
<i>m₂</i>	- Peso do picnômetro cheio com o soro
M	- Molar
N	- Normal
<i>N_i</i>	- Fluxo da espécie iônica (mol/cm ² .s)
<i>n</i>	- Número de pares de células no reator
pH	- Potencial Hidrogeniônico
p.p.m.	- Partes por milhão
<i>Q</i>	- Taxa de fluxo do diluído (l/h)
<i>R</i>	- Constante dos gases ideais (8,3143 J/mol.K)
<i>R_c</i>	- Resistência ohmica da célula concentrada (Ω)

R_d	- Resistência ohmica da célula diluída (Ω)
R_{ma}	- Resistência específica da membrana aniónica (Ω)
R_{mc}	- Resistência específica da membrana catiônica (Ω)
R_p	- Resistência de um par de célula (Ω)
R_e	- Resistência ohmica do reator (Ω)
R_δ	- Resistência ohmica oferecida pela camada limite de difusão na interface da membrana (Ω)
s	- Segundo
t	- Tempo de dessalinização (min.)
T	- Temperatura de trabalho ($^{\circ}\text{C}$)
T_a	- Temperatura absoluta (K)
u_i	- mobilidade iônica ($\text{mol.cm}^2/\text{J.s}$)
v	- Velocidade convectiva da solução (cm/s)
V	- Tensão aplicada aos eletrodos (V)
V	- Volts
z_i	- Valência da espécie iônica
W	- Watts

Letras Gregas

$\nabla\Phi$	- Gradiente do Campo elétrico (V/cm)
∇	- Gradiente
ε	- Eficiênciam de corrente (%)
λ_i	- Condutância iônica das espécies ($\text{cm}^2/\text{ohm. eq-g}$)
δ	- Espessura da camada limite de difusão (cm)
ρ	- Densidade do soro (g/cm^3)
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	- Densidade da água (g/cm^3)

Ω	- Ohm
μ	- Viscosidade do soro do leite (cp)
μ_{H_2O}	- Viscosidade da água (cp)
Δ	- Variação
ΔC	- Variação da concentração da alimentação e da saída do reator (p.p.m.)
ΔT	- Variação da temperatura ($^{\circ}C$)
Σ	- Somatório
%	- Percentagem

Subíndices

i	- espécie iônica
m	- membrana
o	- condição inicial
+	- cátion
-	- ânion

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As indústrias químicas ao longo dos anos vem enfrentando problemas do tipo, como reaproveitar o sub-produto de um dado processo químico, buscando obter um novo produto. Uma tecnologia que vem sendo empregada a nível mundial nesse sentido é a eletrodiálise. A eletrodiálise é um processo de separação de massa no qual membranas eletrodialíticas e uma diferença de potencial são utilizadas para separar espécies iônicas a partir de uma solução aquosa concentrada para outra diluída. Atualmente essa tecnologia vem mostrando considerável economia dentro do campo industrial como: Tratamento de efluentes industriais, na desacidificação de sucos de frutas, obtenção de água potável a partir de águas salobras, na indústria de alimentos e de fluidos farmacêuticos, e na dessalinização do soro do leite, sendo este último uma excelente fonte de proteínas, lactose, vitaminas e sais minerais. O soro do leite por apresentar altos níveis de concentrações de sais inorgânicos, prejudiciais ao consumo humano, especialmente no caso dos recém nascidos, não pode ser utilizado diretamente como uma fonte alimentícia. O soro do leite geralmente é tratado como rejeito industrial, servindo assim como alimentação suína ou descartado no meio ambiente, constituindo um dos maiores problemas para o sistema de tratamento de resíduos líquidos de laticínios, pelo seu elevado poder poluidor e sua alta taxa de demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Sua grande concentração de matéria orgânica e deficiência de nitrogênio dificulta enormemente sua estabilização pelo método convencional de tratamento biológico. A desmineralização do soro do leite apresenta-se como uma opção economicamente viável para recuperar as proteínas e outras substâncias de alto valor nutritivo existentes no soro. Suas proteínas vem sendo utilizadas como fonte de alimentos para crianças e lactentes, e além disso aplicada na produção de sorvetes, sobremesas lácticas, maioneses, mousses, produtos de

panificação, etc., devido a sua capacidade de geleificar, formar emulsões e espumas (PEREIRA, 1990).

O trabalho que aqui apresentamos, teve como finalidade dar uma contribuição ao conhecimento da eletrodiálise na indústria de alimentos e de laticínios bastante difundida mundialmente em países como França, Holanda, Alemanha, Estados Unidos, Itália, na desmineralização do soro do leite, devido ao seu baixo consumo energético e a capacidade de remover altas percentagens de sólidos ionizáveis do soro.

Apesar deste trabalho representar apenas o início de um conhecimento mais aprofundado sobre este processo, ele também procura consolidar novas perspectivas de implantação desta tecnologia em regiões onde o problema da carência de alimentos é agravante. Para isto, alguns testes foram realizados com um reator eletrodialítico projetado e construído em nossos laboratórios em escala de bancada.

Em suma, a pesquisa tratou apenas de avaliar globalmente o desempenho do reator na dessalinização do soro do leite, e através desse processo tentar ampliar o uso do soro para consumo humano com a idéia de ajudar a aliviar a escassez de alimentos.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 - Leite

O produto fundamental da indústria láctea é o leite, este tem sido intensamente estudado, por ser uma substância complexa. O leite e outras bebidas derivadas são alimentos essenciais e indispensáveis para a espécie humana em todas as etapas, desde os primeiros meses de vida, enquanto não podem digerir e assimilar outras substâncias necessárias à sua subsistência até a velhice. O leite é um produto muito sensível e apresenta um alto poder de absorção e quando exposto a luz, adquire sabores indesejáveis, assim como destruição de vitaminas. Para elevadas temperaturas, pode ocorrer fermentações indesejáveis por ser um produto grandemente nutritivo e que sofre alterações com grande facilidade, num curto espaço de tempo. Por esse motivo, torna-se um excelente veículo para o desenvolvimento de bactérias e microrganismos patogênicos, prejudiciais para a saúde humana (MADRID, 1981).

2.1.1 - Componentes do leite

O leite pode ser definido como uma emulsão de matéria gordurosa, em forma globular, em uma solução líquida que se assemelha com o plasma sanguíneo. Esse líquido é uma suspensão de matérias protéicas em um soro, constituído por uma solução neutra que contém, principalmente lactose, sais minerais e orgânicos e pequenas quantidades de vários produtos, tais como: lecitina, uréia, aminoácidos, ácido cítrico, ácido láctico, ácido acético, álcool, lactocromo, vitaminas, enzimas, etc., (ALAIS, 1985).

Uma das propriedades fundamentais do leite é ser uma mistura tanto física como química. Quimicamente pode ser considerado como uma mistura de substâncias

definidas como: lactose, glicerídeos de ácidos graxos, caseínas, albuminas, sais, etc. Do ponto de vista físico, coexistem vários estados: emulsão, suspensão e solução. A emulsão da matéria graxa sob a forma globular; a suspensão da caseína, ligada aos sais minerais; a solução ou fase aquosa, que forma o meio mais volumoso e contínuo (ALAIS, 1985; WALSTRA & JENNES, 1987).

O maior consumo de leite no Brasil é o bovino por apresentar as seguintes características: líquido branco, opaco, com sabor ligeiramente doce, com grau de salinidade pouco perceptível e odor pouco pronunciado. Devido a sua importância comercial como alimento e como matéria-prima de alimentos, se conhece muito mais este leite que de outros mamíferos.

A composição do leite depende de diferentes fatores: a) raça ou individualidade transmitida por herança; b) período de lactância que dura uns 10 meses depois da parição; c) regime alimentício, diminuindo o conteúdo protéico do leite, se reduz a alimentação e especialmente seu valor calórico, enquanto que o conteúdo graxo diminui, ao baixar o conteúdo celulósico da reação; d) período de anos e condições climáticas, que influenciam também no conteúdo graxo e protéico; e) estado de saúde do animal; f) idade e número de paragens (BEHMER, 1984).

A Tabela 2.1, apresenta a composição de leite produzidos por diferentes mamíferos (AQUARONE, 1983).

Tabela 2.1 - Composição percentual média de leite (g/100 ml).

Mamífero	Água	Proteína	Gordura	Açúcar	Cinza
Mulher	87,5	2,1	3,7	6,5	0,2
Vaca	87,3	3,4	3,8	4,8	0,7
Égua	90,0	2,1	1,2	6,2	0,4
Cabra	87,0	3,9	4,2	3,9	0,8
Ovelha	81,0	5,4	8,0	4,5	0,9

Quanto às propriedades físico-químicas podemos destacar:

Densidade a 15°C	De 1,030 a 1,034 g/cm ³
Calor específico	0,93 Cal/g °C
Ponto de congelação	-0,55 °C
pH	De 6,5 a 6,6
Acidez em graus Dornic (°D)	De 16 a 18
Viscosidade a 20°C	2 centipoises
Índice de refração	1,35

2.1.2 - Considerações sobre os componentes principais do leite

Considerando isoladamente os componentes principais do leite, observa-se as seguintes características (BEHMER, 1984):

1) Em volume a água é o principal componente do leite. Em média seu percentual é da ordem de 87,3%, influenciando sensivelmente na densidade do leite. Os fatores que podem influenciar neste percentual é o tipo da raça do animal e o tempo de lactação.

2) A matéria gorda do leite é formada de glóbulos de diversos tamanhos que se encontram em suspensão no líquido, dando-lhe aspecto emulsivo e opaco, seu peso específico de 0,93 a 15°C, funde-se a uma temperatura de 33°C e solidifica-se entre 20 e 75°C. Sua constituição apresenta os seguintes ácidos: butírico, caprônico, caprílico, láurico, mirístico, palmítico, esteárico, oleíco e didroxisteárico. Em termos de gordura pode apresentar uma variação de 1,5 a 7,0%, sendo em média para o leite de diversas procedências de 3,5%, a qual pode ser separada por centrifugação ou por decantação.

3) A caseína é o principal componente dos queijos e das coalhadas e normalmente se apresenta na forma de uma solução coloidal com aproximadamente 77 a 92% de suas proteínas totais, conforme mostra a Tabela 2.2 (MADRID, 1981).

A mesma pode ser obtida através da precipitação natural (fermentação) ou com o auxílio de coalhos e ácidos, tais como : clorídrico, sulfúrico, lático, cítrico, acético, etc.

Tabela 2.2 - Proteínas do leite

Conteúdo total em proteínas	32 - 37 g/l
Conteúdo total em caseína	25 - 30 g/l
Conteúdo total em proteínas do soro	5 - 6,5 g/l
Conteúdo total em substâncias nitrogenadas não protéicas	1,6 - 1,8 g/l

A caseína obtida por qualquer desses processos ácidos, é usada na indústria alimentícia como agente emulsificante, ingrediente para a fabricação de sucedâneos de leite e nata, caramelos, géis, indústria farmacêutica, clarificação de vinho, confecção de papel, indústria de plásticos, cosméticos, pinturas e em particular nas colas em geral, onde seu uso é empregado em maior escala (BEHMER, 1963).

4) A albumina, também chamada lactoalbumina, é a película que se forma no leite logo após o seu cozimento, denominada na linguagem coloquial como a espuma que se forma quando o leite se encontra em ebulição.

5) A lactose, ou açúcar do leite, pertence ao grupo dos sacarídeos é encontrada no leite de todos os mamíferos. A transformação da lactose em ácido láctico causa a precipitação da caseína, a qual resulta na coagulação do leite.

A lactose apresenta propriedades físico-químicas que oferece diferentes vantagens sobre outros açúcares em certos alimentos e aplicações farmacêuticas (McDONOUGH, 1977).

Segundo MADRID (1981) as propriedades mais importantes da lactose são:

- As bactérias lácteas a atacam transformando-a em ácido láctico e outros.
- É um açúcar muito raro que praticamente só se encontram no leite e numa composição muito constante.

- É solúvel em água, porque depois da fermentação láctica ou coagulação para a produção de queijo, aparece no soro resultante.

- A solubilidade da lactose aumenta por aquecimento, cristalizando ao esfriar-se quando está em soluções concentradas.

- Tem um fraco sabor doce em comparação com outros açúcares (sacarose, glicose).

- A temperaturas altas (110-150°C) e períodos prolongados de tempos (10-20 minutos) se degrada, clareando o leite e dando-lhe um sabor cozido.

A lactose, que apresenta mais de 70% dos sólidos do soro, como mostra a Tabela 2.3 não é simplesmente um glicídio energético para os seres humanos e animais (LACEY & LOEB, 1972). Na prática, é a única fonte de galactose, que é um componente dos tecidos nervosos (MADRID, 1981; ALAIS, 1985). Exerce ainda uma forte ação na absorção do cálcio e na formação do tecido ósseo (VIEIRA & NEVES, 1989). Algumas das suas propriedades dietéticas são: o favorecimento à síntese de vitaminas, impedir a deposição de gordura no corpo, ajudar a manter uma apropriada proporção de cálcio, fósforo, e magnésio no sangue, melhorar a absorção de cálcio no intestino, tanto pelo favorecimento de uma fermentação do tipo ácido, como também pela formação de um lactato de cálcio muito assimilável (MADRID, 1981; MADRID, 1979; ALAIS 1985).

Tabela 2.3 - Os principais constituintes sólidos do soro.

Matéria Sólida	(%)
Lactose	70-75
Proteínas	14
Gordura	1
Minerais	8-10
Ácido Láctico	0,1-1,0

Na indústria alimentícia a lactose tem inúmeras aplicações: em panificação e massas, na preparação de alimentos dietéticos, como componente estrutural da elaboração do leite condensado, sorvetes, dentre outros. Na indústria farmacêutica é utilizada na elaboração de comprimidos, álcool butílico, ácido cítrico, láctico, acético e propiônico, acetil metil carbinol, e ainda como substrato para a produção de riboflavina e penicilina. A lactose pode também ser usada como base para a produção de lactulose, lactitol e ácido lactobiônico (MADRID, 1981).

6) Os sais entram em pequena percentagem de 0,7% na composição do leite (BEHMER, 1984).

2.2 - SORO

2.2.1- Composição Química e Propriedades

O soro, "sub-produto" da indústria de laticínios, é um fluido de cor verde-amarelada proveniente da coagulação natural, ácida ou enzimática, do leite integral (pasteurizado ou "in natura") durante a fabricação de diversos tipos de queijos (MADRID, 1981). MARWAHA & KENNEDY (1988), denominaram de "soro doce", àquele soro proveniente da coagulação do leite por uma enzima (renina) extraída do estômago de bezerros cujo pH é 5,6, e "soro ácido", àquele obtido por acidificação direta do leite com pH inferior a 5,1.

O soro ácido pode ser usado em sobremesas congeladas, em produtos fermentados e refinados, e como um acidulante para queijo Ricota e para um número de outros produtos (McDONOUGH, 1977).

A Tabela 2.4, nos dá a composição média de ambos tipos de soro (MADRID, 1981).

Tabela 2.4 - Composição de soros doce e ácido.

Constituintes	Soro Doce (%)	Soro Ácido (%)
Umidade	93 - 94	94 - 95
Gordura	0,3 - 0,5	0,3 - 0,6
Proteínas	0,8 - 1,0	0,8 - 1,0
Lactose	4,5 - 5,0	3,8 - 4,2
Minerais	0,5 - 0,7	0,7 - 0,8
Ácido Láctico e outros	0,1	0,1 - 0,8

A composição do soro líquido depende não só da composição original do leite como também do processo e das técnicas de fabricação pelo qual o mesmo é obtido como "sub-produto" (METTLER, 1980).

As proteínas do soro são de alto valor biológico, e são uma mistura de haloproteínas e glicoproteínas, que contém diversas atividades biológicas (como enzimas, inibidores, anticorpos, etc) e são de difícil separação em estado puro (MADRID, 1979). Em valores aproximados existe no soro cerca de 50% de betaglobulina, 25% de alfa-globulina e 25% de outras proteínas (MARWAHA & KENNEDY, 1988).

As proteínas do soro são também valorizadas pelas suas propriedades funcionais, ou seja, a sua capacidade de geleificação, formar emulsão e espuma, o que possibilita o seu emprego em alimentos como: maionese, produtos de salsicharia, sorvetes, sobremesas lácteas (pudins e flans), mousses, purês, "baby-foods" e produtos de panificação (GUZMÁN, 1979; MELLO, 1989).

Quando no processo de fabricação de queijo, se separa o soro, este arrasta uma série de proteínas (albumina, globulina). Efetivamente pela ação do coalho ou de ácidos sobre o leite, a caseína precipita formando uma coalhada que não retém as proteínas antes citadas.

O soro contém como média 0,8 - 0,9% de proteínas de alto valor biológico de utilidade para a preparação de alimentos infantis, produtos farmacêuticos, e para sua reincorporação no próprio processo de fabricação de queijo aumentando sensivelmente o rendimento.

Um soro típico de queijo contém lactose (3,3-6,0%), proteína (0,32-0,7%), gordura (0,15-1,0%), além das vitaminas A, B e C e minerais - cálcio, fósforo, magnésio e potássio (KOSIKOWISKI, 1979; MADRID, 1981; AQUINO, 1983; ALAIS, 1985; MARWAHA & KENNEDY, 1988; ARNDT & WHELING, 1989).

Para queijos de coagulação enzimática, outros autores encontraram valores diferenciados para essas determinações, conforme mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Composição média dos soros dos queijos Minas frescal, Prato, Cheddar e Coalho (TRAVASSOS, 1991).

Constituintes (%)	Minas Frescal	Prato	Cheddar	Coalho
Umidade	93,25	93,23	93,70	93,30
Proteína	0,75	0,73	0,80	1,02
Gordura	0,52	0,70	0,50	1,10
Lactose	4,99	4,84	4,90	-
Cinzas	0,49	0,49	0,50	-
EST*	6,94	6,88	6,35	7,68

* EST = Extrato Seco Total

No soro, normalmente se encontra as vitaminas A, B e C, cujas concentrações dependerão do tipo de queijo fabricado. Em geral, as vitaminas lipossolúveis, principalmente a vitamina A, são retidas no queijo (80-85%), dependendo do seu teor de gordura. As hidrossolúveis, na sua maioria, estão presentes no soro. Os valores para tiamina, ácido nicotínico, ácido fólico e ácido ascórbico estão entre 80 a 90% no soro; riboflavina e biotina entre 70-80%; pirodoxina e ácido pantotênico entre 55

e 75% e cobalamina entre 40 e 70%, percentagens estas relativas ao conteúdo destas vitaminas no leite. A vitamina B₂ (riboflavina ou lactoflavina) é a responsável pela cor verde-amarelada do soro. A vitamina B₁₂ ou cobalamina, existe em pouca quantidade no soro e tem ação contra anemias perniciosas. A vitamina B₁ ou tiamina influí no crescimento e na utilização dos glúcideos. A vitamina C ou ácido ascórbico é uma lactona muito sensível ao calor e a luz, que tem diversas propriedades: antiescorbútica, intervém nos fenômenos redox celulares, ação estimulante, etc (MELLO, 1989; MADRID, 1979).

O soro obtido por coagulação enzimática é um líquido com ponto de congelamento -0,532 °C e pH = 6,81. O seu conteúdo em sais minerais está entre 0,5-0,6% (ALAIS, 1985; WALSTRA & JENNES, 1987). A composição média dos sais minerais de um "soro doce" obtido por coagulação enzimática está representada na Tabela 2.6 (GUZMÁN, 1979). Entre esses elementos, o cálcio e o fósforo são os de maior interesse, em virtude do seu valor nutricional. Os outros apresentam um sabor acentuado, que se torna mais pronunciado no soro concentrado e é de difícil remoção (MADRID, 1981).

Tabela 2.6 - Composição média dos sais no leite e no soro.

Constituintes	Leite (mg/100g)	Soro (mg/100g)
Cálcio	114,2	39,9
Magnésio	11,0	7,8
Sódio	50,0	47,0
Potássio	148,0	143,0
Fósforo	84,8	37,4
Cloreto	106,0	106,0

2.2.2 - Obtenção de produtos a partir do soro do leite

Uma área que tem recebido pouca atenção dos pesquisadores brasileiros é a produção de matérias-primas químicas a partir de subprodutos de laticínios. De elevado poder poluente, o soro apresenta uma demanda bioquímica de oxigênio (D.B.O) de 30.000 a 50.000 p.p.m., devido ao seu nível elevado em lactose (PEREIRA, 1990).

A melhor solução para o problema ambiental e das perdas econômicas advindas do descarte do soro será o aproveitamento como matéria-prima para obtenção de inúmeros produtos como ilustrados na Figura 2.1.

Os processos envolvidos para obtenção de tais produtos estão fundamentados sob três aspectos: a) Processos que utilizam o calor (termocoagulação, concentração, concentração à vácuo e secagem); b) Processos que não utilizam o calor (ultrafiltração, osmose reversa, filtração sobre gel, troca iônica e eletrodiálise, seja individualmente ou associados) e c) Processos fermentativos (utilizando bactérias, leveduras e bolores).

O soro líquido de queijo, integral e não tratado, é usado como ração animal, principalmente para suínos e, em menor escala, para ovinos e bovinos (COTON, 1985; MARWAHA & KENNEDY, 1988). Na Europa, 45% do soro produzido é destinado a alimentação animal. No Brasil, e em particular no Estado da Paraíba, a principal destinação do soro do leite ou queijo é a alimentação animal (principalmente suínos), quando não é descartado ao meio ambiente indiscriminadamente, especialmente quando produzido em pequena escala (COTON, 1985).

Segundo MADRID (1981), a obtenção do soro em pó só é viável economicamente com um volume de soro da ordem de 25.000 a 75.000 l/h, tendo em vista o alto custo de investimento em equipamentos. Os processos de obtenção de soro em pó, envolvem operações de concentração à vácuo em operadores de múltiplos estágios e secagem por atomização em ar quente ou "spray-dried" (ZALL, 1984). O soro em pó tem sido utilizado como ingrediente na elaboração de diversos alimentos: leite em

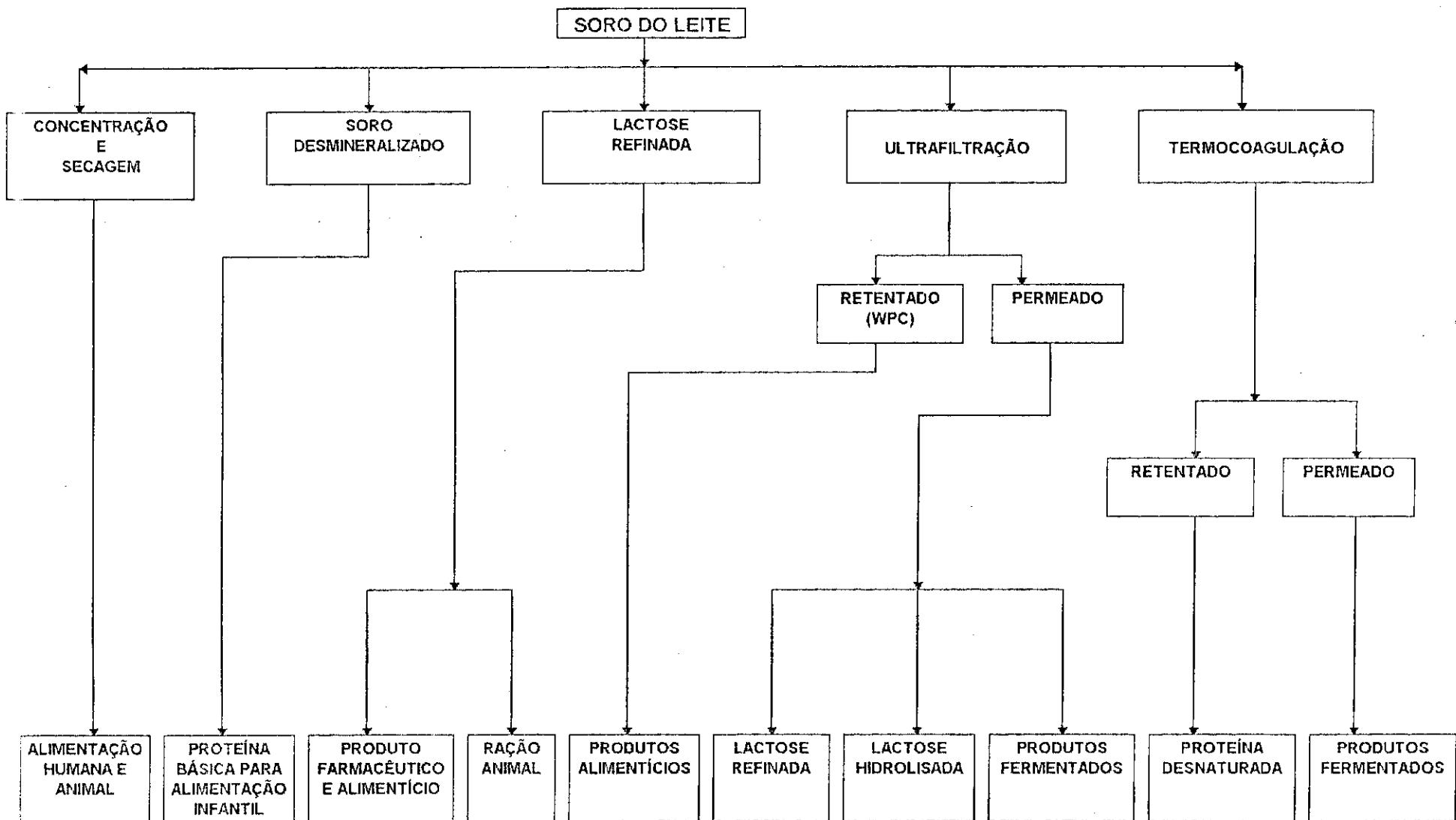


FIGURA 2.1 - PRODUTOS DO SORO DO LEITE E SUAS APLICAÇÕES (Adaptado de ZALL, 1984; MARWAHA, 1988).

pó modificado, preparados alimentícios à base de cereais, produtos lácteos como iogurtes, sorvetes, pudins e flans (MADRID, 1981; ZALL, 1984; COTON, 1985; MELLO, 1989; MARWAHA & KENNEDY, 1988).

Os processos utilizados para desmineralização do soro são: eletrodiálise, troca iônica, osmose reversa e filtração sobre gel (MADRID, 1981; ALAIS, 1985; MARWAHA & KENNEDY, 1988). O processo de troca iônica apresenta desvantagens devido ao grande volume de águas residuárias resultantes. O soro desmineralizado é destinado a elaboração de lactose refinada para a indústria farmacêutica e principalmente para a produção de alimentos infantis (METTLER, 1980; BOOJI, 1985).

Concentrados Proteínicos de Soro (CPS), podem ser obtidos por diversos processos os quais visam a recuperação e modificação das proteínas do soro. Dentre esses incluem-se: termocoagulação, filtração em gel, eletrodiálise, troca iônica, precipitação por polifosfatos, osmose inversa e ultrafiltração (ZALL, 1984; RIBEIRO, GANDARA & RAPACI, 1991).

Diversos trabalhos têm sido publicados sobre as propriedades funcionais do CPS e o seu emprego na alimentação humana e animal como uma fonte de proteína em certos produtos como geléias de frutas, substâncias gelatinosas e conservas, sucos de frutas, bebidas carbonatadas e outras bebidas suaves (ZALL, 1984; METTLER, 1980; AMUNDSON, WATANAWANICHAKORN & HILL JR., 1982; PEARCE, 1983; JULIANO, PETRUS & TORRANO, 1987; MELLO, ROIG & MORAES, 1987; HUFFMAN, 1988).

O fracionamento do soro de queijo resulta, geralmente em dois produtos: uma fração semi-sólida constituída pelas proteínas séricas (retentado) e uma fração líquida constituída de lactose, vitaminas e sais minerais (permeado).

O conteúdo de lactose (40,0 - 50,0 g/l) do permeado faz com que este seja um potencial para a obtenção de lactose refinada, lactose hidrolisada ou ainda um rico substrato para fermentações do tipo ácido láctico (COTON, 1985; MARWAHA & KENNEDY, 1988; MELLO, 1989; ZALL, 1984). O soro permeado e lactose hidrolisada de soro permeado, foram utilizados na preparação da salmoura no enlatamento de

feijões e ameixas (CHANDAN, UESBESAX & SAYLOCK, 1982).

Diversos tipos de bebidas podem ser obtidas a partir de soro: a) Bebidas de soro integral; b) Bebidas não alcoólicas de soro desproteinizado; c) Bebidas alcoólicas de soro desproteinizado; e d) Bebidas proteinizadas (HOLSINGER, POTASI & DeVILBISS, 1974).

Bebidas fermentadas de soro desproteinizado como a "Rivella", de origem Holandesa ou Suíça, é fermentada pela ação de bactérias lácticas (HOLSINGER, POTASI & DeVILBISS, 1974; ALAIS, 1985; PRENDERGAST, 1985).

Bebidas alcoólicas com menos de 1% de álcool semelhante à cerveja, assim como cerveja de soro foram produzidas durante a Segunda Guerra Mundial, na Alemanha. Vinho de soro tem sido produzido nos E.U.A. e, 25% do vinho produzido neste país é feito à partir de soro (HOLSINGER, POTASI & DeVILBISS, 1974).

Segundo ALAIS (1985), nos E.U.A. já foi autorizado o uso do soro hidrolisado no mosto para produção de cerveja.

No Brasil, bebidas à base de soro de queijo aromatizado com diversos tipos de frutas foram desenvolvidos por TORRES, BRANDÃO & PINHEIRO (1989).

PRENDERGAST (1985), relatou métodos de produção de bebidas fermentadas à base de soro e suco de frutas, tendo boa aceitação na Europa.

Produção de ácido láctico à partir de soro de queijo pode ser uma alternativa economicamente viável, desde que, sejam solucionados os problemas decorrentes da sua recuperação e purificação (PEREIRA, 1990).

BARALLE & BORZANI (1987), estudaram a fermentação de soro não esterilizado, utilizando como inóculo cultura liofilizada de "Lactobacillus bulgaricus" em fermentador, por processo descontínuo.

Digestão anaeróbica do soro em escala laboratório foi pesquisada por LACERDA, OLIVEIRA & CARUSO (1991).

Segundo FRIEND & SHAHANI (1979), a fermentação do soro e dos seus constituintes podem ser analisadas sob quatro aspectos: a) Fermentação alcoólica; b) Fermentação ácido láctica onde o soro é utilizado como meio de cultura; c) Produção de

proteínas e ácidos orgânicos através da fermentação; e d) Fermentação dos constituintes do soro durante o tratamento de águas resíduárias.

Os mesmos autores, relataram métodos de processamento sobre a fermentação do soro na produção de vinho e de álcool combustível, para a produção de culturas lácticas, de ácidos orgânicos (ácido láctico e cítrico), e "single cell protein" (SCP), na obtenção de lactato de amônia para ração animal e no tratamento de águas resíduárias.

O processamento de CPS em escala industrial, já vem sendo efetuado nos E.U.A., e na França. Em países como a Finlândia, Irlanda e Nova Zelândia, instalações para produção de álcool a partir do soro permeado, vêm sendo vistas como um potencial, devido a peculiar carência de outras fontes de carboidratos nestes países (MARWAHA & KENNEDY, 1988).

Em um processamento denominado "PROTIBEL" desenvolvido por pesquisadores da "Bel Industries" na França, fermento láctico é produzido em escala industrial a partir de soro desproteinizado inoculado com cepas de "*Kluyveromyces lactis*" e "*Kluyveromyces fragilis*", as quais utilizam a lactose como única fonte de carboidratos (GUÉRIVIÈRE, 1981).

Uso de soro de queijo inoculado com "*Lactobacillus plantarum*" foi estudado por diversos autores (ANON, 1983; COQUIN, 1983) e, GARCIA & MARTINS (1987), utilizaram este microrganismo na fermentação da ensilagem de batata doce para ração de animais leiteiros.

2.3 - Eletrodiálise

A eletrodiálise é um processo de separação de massa em que íons são removidos de uma solução salina através de membranas semipermeáveis, com o auxílio de um potencial elétrico (APPLEGATE, 1984).

O processo de dessalinização via eletrodiálise vem sendo largamente empregado para obtenção de água potável a partir de águas salobras, na remoção de

constituíntes minerais, lavagem de emulsões fotográficas, tratamento de águas residuais contendo 1000 a 5000 p.p.m. de sais inorgânicos.

Em muitas aplicações a eletrodiálise compete com outros processos de separação como: destilação, resina de troca iônica e osmose reversa.

Com o estímulo no desenvolvimento de novas membranas com melhor seletividade, baixa resistência elétrica, melhores propriedades químicas e mecânicas, a eletrodiálise teve um grande desenvolvimento, sendo usada extensamente nos últimos anos nas indústrias de alimentos e de medicamentos. Várias aplicações tem mostrado considerável economia dentro do campo industrial. Uma delas é a desmineralização do soro do leite, o qual contém 5,5 a 6,5% de sólidos dissolvidos em água. O soro fornece uma excelente fonte de proteínas, lactose, vitaminas e minerais, mas normalmente ele não é considerado como produto alimentício devido a seu alto teor de sais. Uma vez dessalinizado, sua composição protéica aproxima-se ao do leite humano o qual passa ser uma excelente fonte de produção de alimentos para lactentes e crianças (STRATHMANN, 1992). O soro também pode ser desmineralizado através de resinas trocadoras de íons, mas o produto no final normalmente apresenta alto teor de sódio. Esse fato não ocorre com a eletrodiálise que reduz a concentrações de sal acima de 60-70%; íons monovalentes tais como Na^+ , K^+ , Cl^- são mais facilmente removidos do que os íons divalentes ou polivalentes, tais como Ca^{2+} , PO_4^{3-} , etc, (LACEY & LOEB, 1972).

Através da eletrodiálise pode-se realizar separações úteis em virtude da diferença de mobilidade dos íons, moléculas ou partículas quando submetidas a um campo elétrico.

Nas soluções eletrodialíticas, a migração das espécies iônicas devido a presença de um campo elétrico constitui um mecanismo de transporte de massa. O fluxo de uma espécie iônica N_i , em $\text{mol/cm}^2 \cdot \text{s}$, numa solução diluída, pode ser expresso pela seguinte equação:

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

onde

$z_i \cdot u_i \cdot F \cdot C_i \cdot \nabla\Phi$, corresponde ao termo de migração sob a ação do campo elétrico; $D_i \cdot \nabla C_i$, corresponde ao termo de difusão; $C_i \cdot v$, corresponde ao termo convectivo; $\nabla\Phi$, gradiente do campo elétrico, (V/cm); C_i , a concentração das espécies iônicas, (mol/cm^3); v , velocidade convectiva da solução, (cm/s); D_i , coeficiente de difusão do íon, (cm^2/s); u_i , é a mobilidade iônica sob a ação de um campo elétrico unitário, ($\text{mol.cm}^2/\text{J.s}$); z_i , valência da espécie iônica; F , constante de Faraday, (96500 C/eq-g).

Os termos da difusão e da convecção na Equação 2.1, são os mesmos para a transferência de massa para os não-eletrolíticos. A mobilidade iônica " u_i ", pode ser relacionada ao coeficiente de difusão do íon " D_i " e a condutância iônica da espécie i , " λ_i ", pela seguinte equação (PERRY & GREEN, 1984):

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

onde, T_a é a temperatura absoluta (K), R é a constante dos gases ideais (8,3143 J/mol.K), F é a constante de Faraday (96.500 C/eq-g) e " λ_i " a condutância iônica da espécie i , ($\text{cm}^2/\text{ohm.eq-g}$). O coeficiente de difusão " D " do eletrólito é dado pela Equação 2.3:

$$D = \frac{z_+ u_+ D_+ - z_- u_- D_-}{z_+ u_+ + z_- u_-} \quad (2.3)$$

que representa a relação entre os coeficientes de difusão dos dois íons, onde z corresponde a valência; u corresponde a mobilidade iônica das partículas; D corresponde ao coeficiente de difusão; +, - as espécies catiônicas e aniônicas, respectivamente.

2.4 - Sistema Eletrodialítico

Um sistema eletrodialítico típico é mostrado na Figura 2.2. As membranas

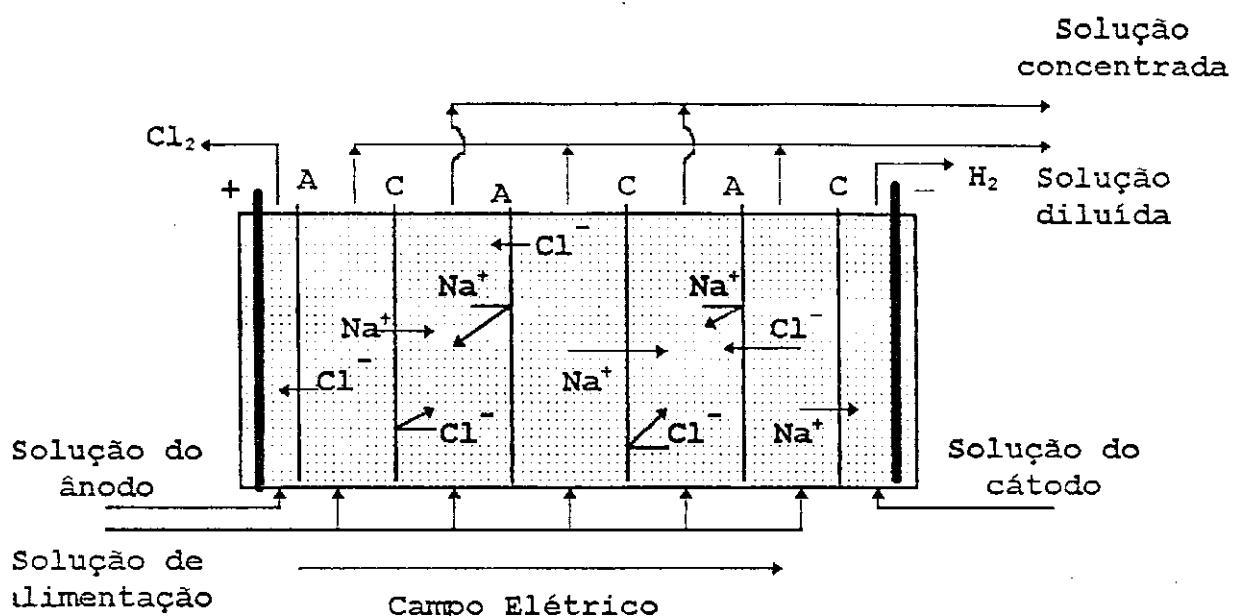


Figura 2.2 - Representação do sistema eletrodialítico

2.5 - Membranas Eletrodialíticas

As membranas seletivas são as partes mais sensíveis do sistema eletrodialítico e que requer cuidados especiais. Experimentos com eletrodiálise foram realizadas por volta da mudança do século, mas a necessidade de membranas adequadas impedia o desenvolvimento. Durante a II Guerra Mundial, trabalhos sobre a tecnologia de troca iônica, conduziram ao desenvolvimento de membranas mais duráveis e de alta capacidade sintética de troca iônica, que permitem a realização dos processos eletrodialíticos nos dias de hoje (APPLEGATE, 1984).

Segundo (STRATHMANN, 1992) a constituição das membranas eletrodialíticas são de resinas de troca iônica na forma de filme. Existem dois diferentes tipos de membranas:

- (1) Membranas de troca catiônica contém grupos de cargas negativas fixadas à matriz polimérica.
- (2) Membranas de troca aniônica contém grupos de cargas positivas fixadas à matriz polimérica.

As membranas seletivas aos cátions tem a sua matriz geralmente feita de

poliestireno de cadeia cruzada que é sulfonada com grupos sulfônicos ($-SO_3^-$) presos ao polímero. As membranas aniônicas são de poliestireno de cadeia cruzada contendo grupos de amônia quaternária ($-NR_3^+$) presos ao polímero.

As membranas são semelhantes a folhas planas contendo cerca de 30 a 50% de água, cujos poros não permitem a passagens da água, mas apenas permitem a passagem dos íons. O tempo de vida útil da membrana, geralmente é estimado entre 5 e 6 anos, tudo irá depender das condições do processo como: potencial elétrico aplicado ou do tipo de solução a ser tratada. As membranas podem ser inutilizadas pela formação de precipitados de carbonato de cálcio ou hidróxido de magnésio, pelo rompimento de sua estrutura ou ainda pela formação de cadeias iônicas polivalentes sobre a sua superfície.

Para que a neutralidade elétrica seja mantida, cada um dos grupos fixados nas membranas deve ser associado com 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 outro através da membrana, enquanto que íons de mesma carga dos grupos fixados nas membranas, denominados de co-íons são repelidos pelas mesmas (APPLEGATE, 1984).

Para satisfazer as condições de operação na eletrodiálise as membranas seletivas aos íons devem satisfazer a determinadas propriedades, tais como:

(1) Alta permeabilidade: 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 alta 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) Resistência à oxidação: Deve ser bastante resistente, principalmente para as membranas próximas ao eletrodo (SHAFFER & MINTZ, 1966).

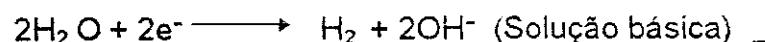
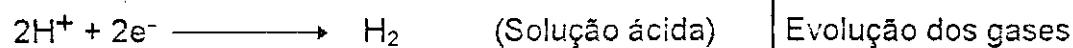
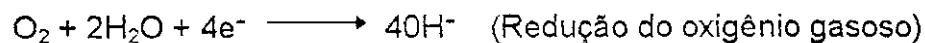
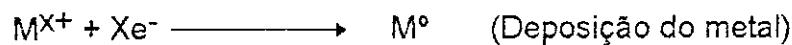
2.6 - Eletrodos

A distribuição da corrente elétrica sobre a área ativa das células eletrodialíticas é realizada pelos eletrodos colocados nas extremidades do reator. Normalmente os eletrodos são de metal liso ou flocos de carbono. Entre cada eletrodo e a primeira membrana há a formação de um compartimento, que denomina-se compartimento eletródico ou de lavagem, onde durante a eletrodiálise uma solução de ácido sulfúrico passa através de um processo contínuo, com o objetivo de carrear os íons que possam atravessar as membranas e os gases formados (HOWE, 1974). A referida solução de lavagem com pH acidificado 1,5 a 2,0 (SHAH & SCAMEHORN, 1987) é também usada para evitar a formação de bases como o $Mg(OH)_2$ no compartimento catódico, bem como a precipitação de carbonatos insolúveis como $CaCO_3$ (APPLEGATE, 1984).

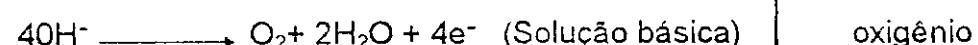
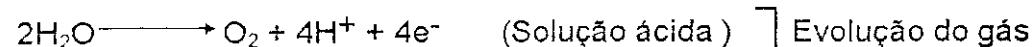
Durante a eletrodiálise podem ocorrer reações nos compartimentos eletródicos. Essas reações dependem da composição e do pH da solução com que elas estão em contato.

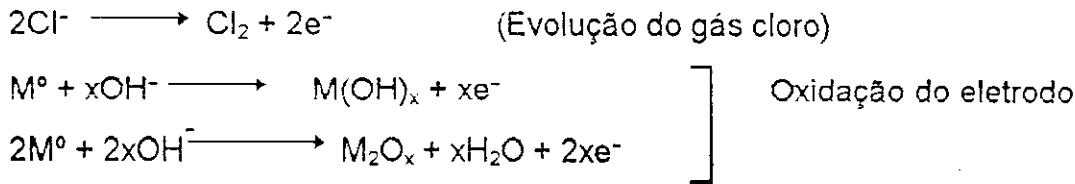
As possíveis reações nestes compartimentos, são mostradas abaixo:

Reações no Cátodo:



Reações no Ânodo:





Teoricamente utiliza-se o ânodo de níquel e o cátodo de aço inox, no entanto os materiais mais empregados são aqueles que resistem às condições oxidativas como ligas de titânio ou tântalo. Eletrodos de carbono já foram utilizados anteriormente, mas sem grande sucesso, degradam-se facilmente pela oxidação. A platina apesar de seu alto custo apresenta-se, dentre os metais, o mais adequado (LACEY, 1979).

2.7 - Densidade de Corrente

A densidade de corrente "J" (mA/cm^2) é um parâmetro muito importante observado durante a eletrodiálise, porque representa o fluxo das espécies iônicas no interior do reator durante a eletrodiálise a qual pode ser definida pela somatório dos fluxos das parcelas correspondentes a todas as espécies presentes, conforme mostra a Equação 2.4:

$$J = F \sum z_i N_i \quad (2.4)$$

Substituindo a Equação 2.1 na Equação 2.4, têm-se:

$$J = k \cdot \nabla \Phi - F \cdot \sum z_i D_i \cdot \nabla C_i + F \cdot v \sum z_i C_i \quad (2.5)$$

onde, a condutividade elétrica k é dada em mho/cm, como sendo

$$k = F^2 \cdot \sum z_i^2 \cdot u_i \cdot C_i \quad (2.6)$$

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

$$\sum z_i C_i = 0 \quad (2.7)$$

Em soluções de composição uniforme, o termo que representa o fluxo difusivo desaparece, e a Equação 2.5 passa a obedecer a Lei de Ohm (PERRY & GREEN, 1984).

Os dados experimentais da densidade de corrente são obtidos a partir da Equação 2.8.

$$J = \frac{I_L}{A_e} \quad (2.8)$$

onde, I_L é a corrente lida durante a dessalinização (A) e A_e é a área efetiva da membrana (cm^2).

2.8 - Resistência Ohmica

A resistência ohmica é um outro parâmetro observado durante a eletrodiálise, e que depende de vários fatores como: concentração das espécies iônicas presente no meio aquoso, tipo de escoamento no interior dos compartimentos e o potencial elétrico aplicado ao sistema. A resistência total é obtida pelo produto da resistência em um par de célula pelo número de pares de células do reator. A resistência ohmica de um par de célula é dividida em duas partes: a resistência da membrana e a resistência da solução. Um reator eletrodialítico é constituído de vários pares de células, sendo estes formados por compartimentos diluídos e concentrados. Em um par de célula existe um somatório de resistências atuando durante a eletrodiálise, conforme mostra a Figura 2.3 e representada pela Equação 2.9.

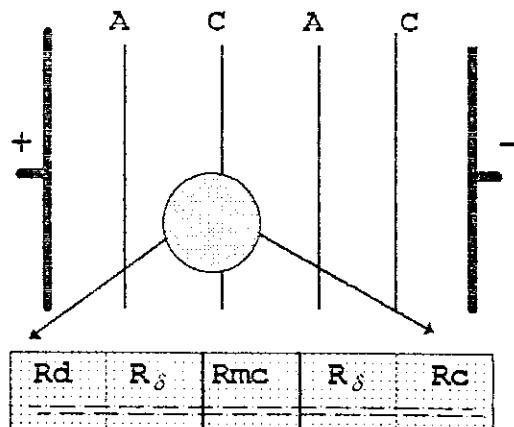


Figura 2.3 - Resistências em série de um sistema eletrodialítico

$$R_p = R_{mc} + R_{ma} + R_c + R_d + R_\delta \quad (2.9)$$

onde, R_p é a resistência do par de célula, R_{mc} e R_{ma} são as resistências específicas das membranas catiônica e aniónica respectivamente, R_c e R_d as resistências das células concentrada e diluída, e R_δ a resistência oferecida pela camada limite de difusão na interface da membrana (SHAFFER & MINTZ, 1966).

A resistência das membranas dependem da resistência específica do material, espessura, dimensão da malha pela qual os íons passam (que geralmente se encontra entre 10 a 14 Å), temperatura da solução e, permanecem praticamente inalteradas, para concentrações abaixo de 0,1N (NaCl). Acima deste valor, a resistência decai em virtude do aumento da condutividade do eletrólito na resina (MASON & KIRKHAM, 1959).

A resistência dos fluxos são dependentes da concentração, e varia de ponto a ponto ao longo do caminho percorrido. A resistência do fluxo concentrado é reduzida para baixos valores devido a recirculação, e não tem importância relativa na resistência total, comparado com o aumento da resistência do fluxo diluído. Já a resistência do fluxo diluído o seu alto valor, possui considerável importância em relação a resistência oferecida pelo fluxo concentrado.

A resistência do sistema pode diminuir com o aumento da concentração do eletrólito no compartimento diluído, por outro lado a medida que ocorre a transferência iônica durante a eletrodiálise, a concentração neste compartimento tende a diminuir e a concentração do compartimento concentrado a crescer, logo este gradiente tenderá a reduzir a transferência dos íons selecionados pela membrana (contra-íon) e aumentará a transferência de outra espécie (co-íon), como consequência a eficiência de corrente é reduzida (SHAH & SCAMEHORN, 1987).

Na prática a resistência total do sistema pode ser avaliada de maneira simplificada pela seguinte equação (HOWE, 1974):

$$R_s = \frac{V}{I} \quad (2.10)$$

onde, R_s é a resistência total do sistema (Ω), V corresponde ao potencial elétrico aplicado aos eletrodos (Volts) e I a corrente total do sistema (A), obtida a partir da seguinte equação:

$$I = I_L \cdot n \quad (2.11)$$

onde, I_L corresponde a corrente lida no par de eletrodos (A) e n o número de pares de célula.

2.9 - Eficiência de Corrente

A eficiência de corrente é um parâmetro muito importante na eletrodiálise porque representa a fração de corrente que passa em um par de célula, proveniente da transferência de íons do compartimento diluído para o concentrado. A eficiência de corrente está relacionada com a seletividade das membranas usadas, concentração da solução e com a taxa de dessalinização. Para fins práticos, a eficiência de corrente é determinada pela seguinte expressão (SHAH & SCAMEHORN, 1987):

$$\varepsilon = \frac{F.Q.\Delta C}{n.I_L} \quad (2.12)$$

onde, ε é a eficiência de corrente (%), Q é a taxa de fluxo do diluído (cm^3/s), ΔC a diferença entre a concentração da alimentação e da saída do reator nos compartimentos diluídos (mol/cm^3), n é o número de pares de células, I_L é a corrente lida nos eletrodos (A), e F é a constante de Faraday (A.s/mol).

A eficiência de corrente depende dos seguintes parâmetros:

1- As membranas não são perfeitamente semipermeáveis, uma vez que os co-ions, que possuem a mesma carga dos grupos fixados na membrana, não são completamente rejeitados, principalmente quando a alimentação do sistema possui altas taxas de concentrações.

2 -Certa quantidade de corrente elétrica flui através do reator eletrodialítico.

3 -Certa quantidade de água é transferida através das membranas por fluxo osmótico (osmose) (APPLEGATE, 1984).

Existem basicamente dois tipos de forças que impulsionam a transferência iônica de uma membrana ionicamente seletiva: o gradiente de potencial elétrico e o gradiente de concentração formado entre as células. A diferença de potencial tende a acentuar a transferência de ambas as espécies iônicas (catiônica e aniônica), através da membrana, seja ela seletiva a cátions ou a ânions. Agora supondo que a célula concentrada possua, por exemplo, o triplo da concentração da célula diluída, este gradiente de concentração tenderá a reduzir a transferência iônica do íon selecionado pela membrana (contra-íon) e aumentará a transferência de outra espécie (co-íon). Como consequência a eficiência de corrente é reduzida e consequentemente a resistência ohmica do sistema e o consumo energético aumentam (SHAH & SCAMEHORN, 1987).

2.10 - Polarização

A polarização é um fenômeno que pode ocorrer durante a eletrodiálise em função do potencial elétrico e da concentração das espécies iônicas. O efeito de polarização pode alterar a qualidade da solução do diluído em termos de pH, o rendimento do sistema, afetar seriamente as membranas, diminuir a eficiência de corrente e consequentemente aumentar o custo energético.

A densidade de corrente em cujos efeitos de polarização tornam-se significativos na eletrodiálise é referenciado como sendo a densidade de corrente limite. Conforme os experimentos realizados, a densidade de corrente limite gerada pelos efeitos de polarização foi determinada experimentalmente através da variação da resistência ohmica e do pH do efluente do diluído em função do inverso da corrente, conforme mostra a Figura 2.4 (COWAN & BROWN, 1959). Observa-se que para baixas densidades de corrente, a resistência ohmica do meio tende a crescer e o pH da solução cai rapidamente. Neste instante pode-se determinar a corrente limite de polarização, ou seja, o valor da corrente que o sistema pode operar numa faixa econômica em termos de consumo de energia para uma dada concentração de íons num par de célula. O potencial elétrico e a densidade de corrente encontram-se neste instante muito alto para a concentração de íons remanescentes na camada limite da membrana no lado dos compartimentos do diluído. Quando isso ocorre, os íons H^+ e OH^- provenientes da dissociação natural da molécula da água, passam a ser significativos, fazendo com que a membrana aniónica passe a conduzir a hidroxila aumentando assim o pH da célula concentrada e os cátions remanescentes, fazem com que o valor do pH decaia na célula diluída, variando assim o pH do meio. Esse fato altera a eficiência de corrente de forma que dependendo da concentração da solução, a densidade de corrente pode se mostrar muito alta. Logo o consumo de energia aumenta e o rendimento do sistema diminui em função do tempo (STRATHMANN, 1992).

A eletrodiálise na prática apresenta vários parâmetros operacionais que estão relacionados diretamente com o processo e o projeto do reator os quais tem

grande influência técnica no processo econômico. Estes são a densidade de corrente limite, resistência ohmica do sistema e a queda de pressão do líquido que flui no interior do reator. Os problemas operacionais que podem afetar a performance do processo geralmente são: concentração de polarização, impurezas nas membranas, transporte de água através das membranas devido a efeitos osmótico e eletro-osmótico e vazamento de corrente através do conjunto de membranas.

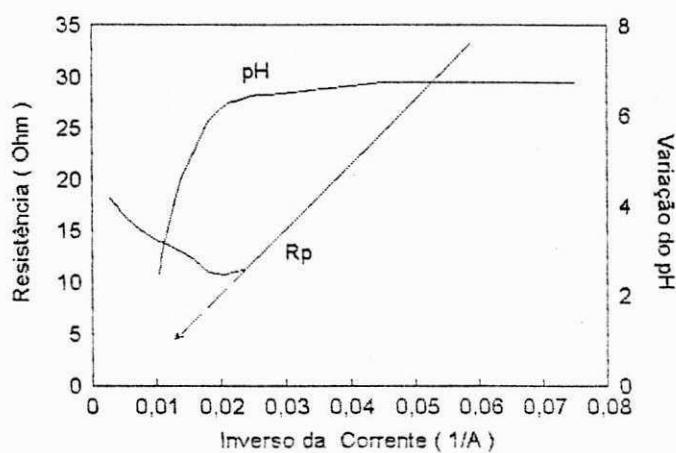


Figura 2.4 - Diagrama esquemático da determinação da corrente limite.

2.11 - Taxa de Extração

Segundo (MANSON & KIRKHAM, 1959) a taxa de extração (f) quantifica a fração do eletrólito que é transferido dos compartimentos diluídos para os compartimentos concentrados, definido pela Equação 2.13.

$$f(\%) = \left[1 - \frac{C}{C_0} \right] \times 100 \quad (2.13)$$

onde, f é a taxa de extração (%), C_0 a concentração inicial de sais no soro do leite (p.p.m.) e C é a concentração de sais no soro do leite no instante "t" (p.p.m.).

2.12 - Consumo de Energia

A energia requerida em um processo eletrodialítico é o resultado da adição de dois termos principais:

(1) A energia elétrica necessária para transferir os componentes iônicos de uma solução, através da membrana, para outra solução no lado oposto à do primeiro.

(2) A energia necessária para bombear as soluções através da unidade eletrodialítica.

De maneira geral, a energia elétrica é consumida de diversas formas: no trabalho de dissociação do eletrólito na solução, nas reações químicas de óxido-redução dos compartimentos eletródicos (que depende do material empregado, reações químicas envolvidas, concentração da solução de alimentação e composição iônica, densidade de corrente utilizada, bem como da velocidade de fluxo de lavagem), na compensação de eventuais vazamentos ou baixa seletividade das membranas, na dissipação térmica do efeito Joule por diversos componentes, nas bombas centrífugas e, finalmente, na conversão da corrente alternada para contínua pela fonte retificadora. Segundo (STRATHMANN, 1992) os itens (1) e (2) mencionados acima são tomados como os pontos mais relevantes para estimar os custos de energia global.

A energia necessária para remover sais a partir de uma solução é diretamente proporcional a corrente total que flui através das membranas e a queda de potencial entre os dois eletrodos do reator. O consumo de energia (E , Wh) em um processo de eletrodiálise pode ser obtido a partir da seguinte equação (APPLEGATE, 1984).

$$E = I^2 n R_p t \quad (2.14)$$

onde, I é a corrente que atravessa o conjunto de membranas (A), n é o número de células, R_p é a resistência de um par de célula (Ω), e t é o tempo (min.).

A Equação 2.14, é utilizada para estudar os perfis das curvas de consumo de energia

em função do tempo.

Combinando a Equação (2.12) com a Equação (2.14) têm-se:

$$E = \left(\frac{I_L \cdot n \cdot R_p \cdot z_i \cdot F \cdot Q \cdot \Delta C}{\epsilon} \right) t \quad (2.15)$$

onde, E é o consumo de energia na eletrodiálise (Wh), I_L é a corrente elétrica lida (A), n é o número de pares de células, R_p é a resistência de um par de célula (Ω), t é o tempo (s), z é a valência da espécie iônica, F é a constante de Faraday (A.seg./mol), Q é o fluxo do diluído (l/h), ΔC é a diferença entre a concentração da alimentação e da saída do reator (mol/cm^3), e ϵ é a eficiência de corrente (%).

A Equação (2.15) indica que a energia elétrica requerida na eletrodiálise é portanto diretamente proporcional a quantidade de sais removida a partir de um certo volume de alimentação para atingir uma concentração desejada. O consumo de energia é também função do número de compartimentos ou pares de células que formam o reator. A resistência ohmica do sistema depende da resistência das membranas e da solução no interior do reator. Desde que a resistência da solução é inversamente proporcional a concentração de seus íons, a resistência total é determinada pela resistência da solução das células do diluído. Durante a eletrodiálise a concentração nas células diluídas diminui aumentando assim a resistência ohmica do sistema e consequentemente diminuindo a transferência iônica (STRATHMANN, 1992).

O consumo de energia prático (E_p) referente ao processo de remoção de sais pela eletrodiálise em (kWh/m^3) é obtida através da seguinte equação (PERRY & GREEN, 1984).

$$E_p = \frac{I_L^2 \cdot R_s}{Q} \quad (2.16)$$

onde, I_L é a corrente elétrica lida (A), R_s é a resistência total do sistema (Ω), e Q é o fluxo do diluído (l/h). Quando se faz uso da Equação 2.16, toma-se a média logarítmica da corrente lida durante o processo, com o objetivo de se obter um consumo operacional mais real.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Material Utilizado

- Cloreto de sódio (NaCl) P.A. da MERCK
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄) P.A. da REAGEN
- Policloreto de vinila (PVC) de 1 cm de espessura
- Placas de titânio platinizado de 1 mm de espessura
- Parafusos de cobre de 1/3 in
- Membranas eletrodialíticas - ASAHI CHEMICAL IND. CO., JAPÃO
- Soro proveniente da ILCASA - Indústria de Laticínios de Campina Grande

S.A., com concentração salina entre 2000 e 5000 p.p.m.

3.2 - Sistema Eletrodialítico e Equipamentos de Medidas

O sistema eletrodialítico é composto por quatro unidades principais: Fonte de alimentação elétrica, sistema hidráulico, unidades de registro de dados e reator eletrodialítico, conforme mostra a Figura 3.1.

3.2.1 - Fonte de Alimentação

É 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.

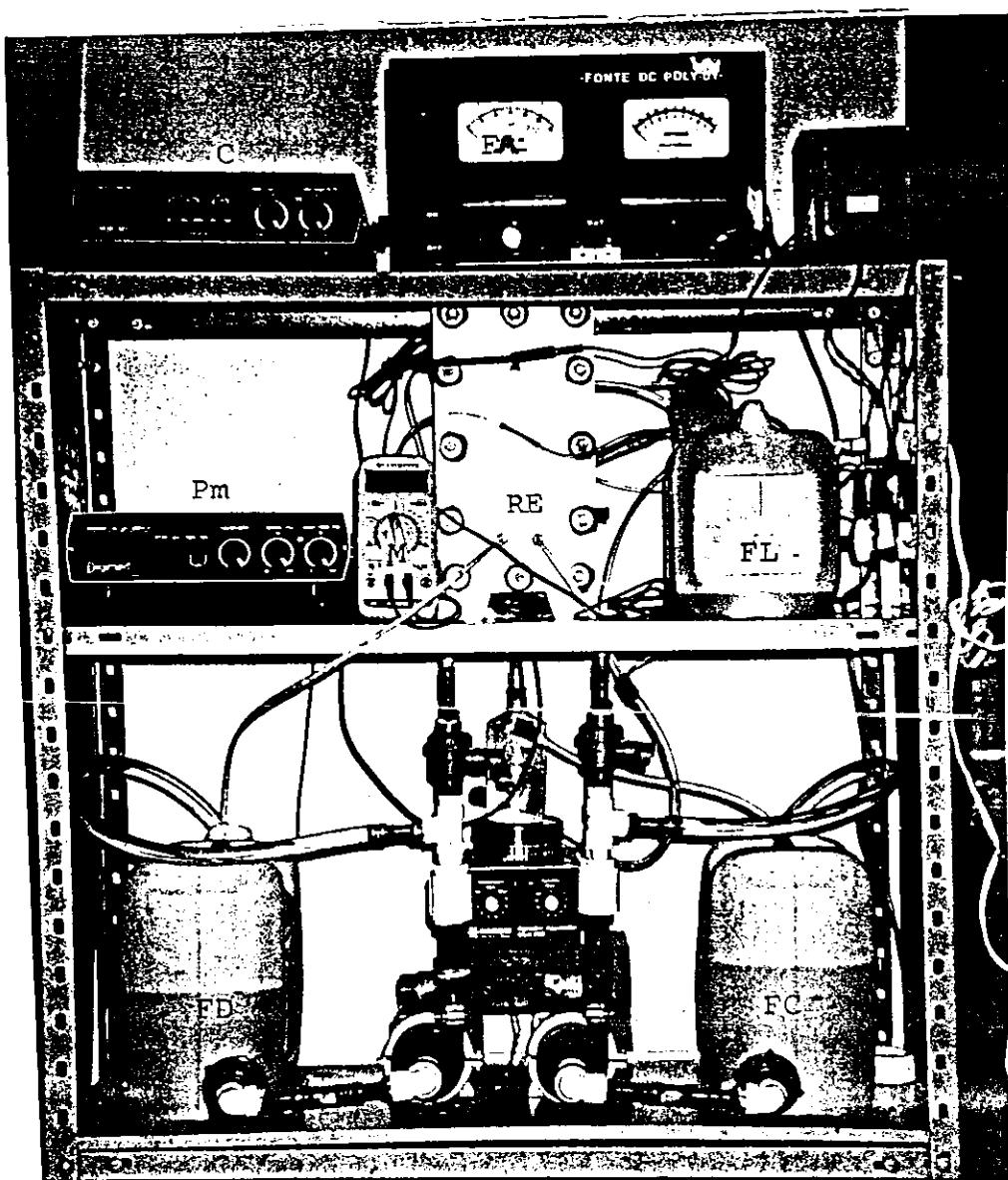


Figura 3.1 - O Sistema Eletrodialítico composto das seguintes unidades: FA - Fonte de alimentação, C - condutivímetro, FL - fluxo de lavagem dos eletrodos, FD - fluxo diluído, FC - fluxo concentrado, RE - reator eletrodialítico, Pm - medidor de pH (pHmetro), M - multitempo para leitura da corrente.

3.2.2 - Sistema Hidráulico

Foram utilizadas duas bombas centrífugas de 1/20 HP modelo 1.5 da Sulplastic, conectadas a dois tanques de alimentação com capacidade para 10 litros cada. Uma bomba centrífuga de 1/200 HP modelo 1A-Md da New Pumps, foi utilizada na lavagem dos compartimentos eletródicos através de uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentração $1,0 \times 10^{-3}$ M. No circuito hidráulico utilizou-se válvulas de passagem Deca de 1/2", tubos e conexões de PVC de 1/2" e mangueiras plásticas transparentes.

3.2.3 - Unidades de Registro

Foram utilizadas quatro unidades de registro conforme pode ser observado na Tabela 3.1, onde foi possível obter a leitura da condutividade, pH, voltagem e corrente durante o experimento. Com o auxílio de um condutivímetro modelo CD-20 da Digimed e um eletrodo do tipo DMC-01-K = 1cm^{-1} , imerso em uma pequena célula de leitura localizada na saída do reator sob a ação de um agitador magnético modelo 258 da Fanem, a variação da concentração da solução foi observada em função do tempo. Para medir a variação do potencial hidrogeniônico (pH) do produto foi utilizado um medidor de pH modelo DMPH-2 da Digimed.

Para um melhor ajuste da diferença de potencial aplicada ao sistema e leitura da corrente obtida, foram conectados ao reator dois multitestes: Sanwa, modelo 320-XB com precisão de $\pm 25\%$ e Homis, modelo DM-9090, respectivamente.

Tabela 3.1 - Unidades de Registro

Unidade	Tipo	Modelo	Fabricante
1	Condutivímetro	CD-20	DIGIMED
2	pH-metro	DMPH-2	DIGIMED
3	Multiteste	320-XB	SANWA
4	Multiteste	DM-9090	HOMIS

3.2.4 - Reator Eletrodialítico

O reator eletrodialítico é construído de placas de PVC de 1cm de espessura onde o conjunto como todo é pressionado por 12 parafusos de cobre rosqueados, de forma semelhante a um filtro prensa. Sendo que ele é constituído de quatro membranas, duas catiônicas (K-101) e duas aniônicas (A-201) da Asahi Chemical Ind. Co. (Tóquio-Japão), dispostas de forma alternada, cujas características são mostradas na Tabela 3.2. Cada membrana oferece uma área efetiva de troca iônica de 88 cm², como o sistema é constituído de 4 membranas a área efetiva total de troca iônica do sistema é de 352 cm². As membranas encontram-se separadas uma da outra pelos próprios compartimentos, por uma distância de 1 cm.

Tabela 3.2 - Características das membranas utilizadas (Asahi Chemical Ind. Co.)

Características	Membranas	
	Catiônica	Aniônica
Grupo iônico	ácido sulfônico	amônio quaternário
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

Dois eletrodos de titânio platinizado com espessura de 1mm foram colocados nas extremidades do reator. Cada eletrodo encontra-se conectado a uma placa de PVC de 1cm de espessura formando os compartimentos catódicos e anódicos. O reator possui duas entradas para alimentação com dois fluxos independentes soro/água destilada, e apresenta ainda duas saídas por onde os fluxos concentrados e diluídos ao saírem do reator retornam aos seus tanques de origem. Observa-se ainda dois orifícios de entrada e dois de saídas localizados nas partes inferiores e superiores do reator que tem a finalidade de receber uma solução de ácido sulfúrico ($\text{pH} \approx 3,0$) durante a eletrodiálise, com o objetivo de evitar possíveis incrustações na forma de bicarbonatos e/ou hidróxidos, e com o fim de aumentar a condutividade elétrica nos compartimentos, bem como carrear os gases de cloro e hidrogênio formados no ânodo e cátodo, respectivamente (APPLEGATE, 1984), e no final, a solução retorna ao tanque de lavagem através de um processo de recirculação contínua. O reator oferece uma capacidade volumétrica de 500 cm^3 e opera com uma vazão constante de 100 l/h.

3.3 - Metodologia

3.3.1 - Dessalinização

Foi utilizado soro obtido a partir da fabricação de queijo, proveniente da ILCASA - Indústria de Laticínios de Campina Grande S.A., com concentrações salinas na faixa de 2000 a 5000 p.p.m. e transportado em recipiente de PVC, capacidade de 10 litros, para o local do experimento. O ideal seria se fosse possível trabalhar com uma concentração constante para uma série de experimentos sob a mesma vazão, mas infelizmente a composição do soro após o processo de fabricação do queijo, varia em função composição original do leite e da tecnologia empregada para a fabricação do queijo.

O soro antes da eletrodiálise foi pré-tratado da seguinte forma:

- a) Filtração em filtro de nylon número 10.

- b) Em alguns casos foi aquecido com o objetivo de facilitar a remoção da gordura do soro.
- c) Após a etapa do item (b), o soro foi submetido a uma nova filtração.

Convém salientar que a etapa (b) só foi realizada para as primeiras quatro bateladas. Isso porque, é de conhecimento que as proteínas do soro e a lactose podem se degradar entre 110 a 150° C (MADRID, 1979). Em seguida, foram realizadas as determinações da densidade do soro, viscosidade antes e após a eletrodiálise, temperatura e pH. Todas as amostras de soro para a dessalinização do soro do leite foram coletadas somente no dia a serem realizadas as bateladas, isso porque o soro é um produto muito sensível a contaminação bacteriana e sofre um processo de envelhecimento muito rápido, em decorrência disso ocorre uma conversão bacteriana de lactose para ácido láctico. Os métodos de determinação destes parâmetros físicos se encontram no Apêndice 2.

Antes de iniciar o processo de dessalinização, um recipiente de 5 litros foi tomado como tanque do concentrado, no qual foi usado com água destilada (1,0 litros). Este tanque serviu como receptor da concentração iônica oriunda do processo de dessalinização do soro do leite. Um outro recipiente de mesma capacidade, tanque diluído, foi utilizado com o soro do leite (1,5 litros). Através de bombas centrífugas 1/20 HP modelo 1.5 da Sulplastic, tanto o soro quanto a água foram bombeados de forma contínua pelo reator sem aplicação do potencial elétrico por um período de aproximadamente 30 minutos com o objetivo de atingir a estabilização em termos de condutividade e fluxos de alimentação. Este fato foi observado através da condutividade elétrica das soluções nos afluentes e efluentes do reator. A segunda etapa foi estudar a variação da concentração iônica do soro em função do tempo para diferentes potências elétricas, com objetivo de escolher o que apresentasse a melhor performance. Infelizmente não foi possível realizar este estudo a uma mesma concentração. Durante a eletrodiálise as superfícies dos eletrodos foram lavadas com uma solução H₂SO₄ (pH ≥ 3) 0,1N, através de uma bomba centrífuga de 1/20 HP modelo 1.5 da Sulplastic. A lavagem nos compartimentos eletródicos teve como finalidade expulsar os gases de

cloro e hidrogênio e os possíveis precipitados de hidróxidos de magnésio, bicarbonatos de cálcio e outros, formados durante o processo de dessalinização.

Os valores de condutividade de cada batelada foram convertidos para concentração em p.p.m., através da Equação 3.1 e expostos em um gráfico na forma adimensional do tipo (C/C_0) em função do tempo em minutos, onde C representa a concentração de sais no soro do leite no instante "t", e C_0 a concentração inicial de sais no soro do leite. Foram utilizados dois multi-testes para leituras mais precisas de tensão aplicada e corrente obtida, conectados em paralelo e em série com a fonte retificadora respectivamente, com o objetivo de determinar a densidade de corrente, resistência elétrica do meio e outros parâmetros pertinentes ao processo.

Outro parâmetro observado durante o processo foi o pH do soro do leite no tanque diluído, através de um pHmetro do tipo DMPH-2 da Digimed. Foi observado que não ocorreu uma variação significativa do pH. Os valores obtidos situaram-se numa faixa entre 3,4 a 5,2 para as amostras do soro do leite durante a eletrodiálise. Quando este fato ocorre sabe-se que o potencial aplicado ao meio, além de estar atuando para dissociação dos íons tipos, Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} e outros, também pode dissociar as moléculas da água provocando assim uma variação no pH do tanque diluído. Esse fenômeno é chamado de efeito de polarização, conforme mencionado no Item 2.10 do Capítulo 2.

Após o término de cada batelada todo o sistema incluindo o reator foi realimentado com água destilada e mantido sob circulação contínua durante 30 minutos, com objetivo de remover todos os componentes remanescentes do sistema.

3.3.2 - Leitura de Dados Experimentais

Para cada batelada foram realizadas leituras de condutividade, pH, corrente elétrica, potencial elétrico. As leituras de condutividade foram feitas utilizando um condutivímetro digital, conforme mencionado acima, cujo eletrodo era imerso em uma célula de leitura localizada na saída do reator eletrodialítico, por onde a corrente do

diluído passa antes de retornar ao tanque diluído. Essa célula encontra-se sob a ação de um agitador magnético.

Os dados de corrente foram obtidos com auxílio de um amperímetro digital e o potencial elétrico aplicado foi observado através de um potenciômetro.

Para realizar o levantamento dos dados de pH no tanque diluído foram tomadas amostras do referido tanque em tempos diferenciados com auxílio de um medidor de pH digital da Digimed.

As leituras destes parâmetros foram tomadas nos primeiros 60 minutos em intervalos de 5 minutos e em seguida em intervalos de 10 minutos, com exceção para os dados de pH.

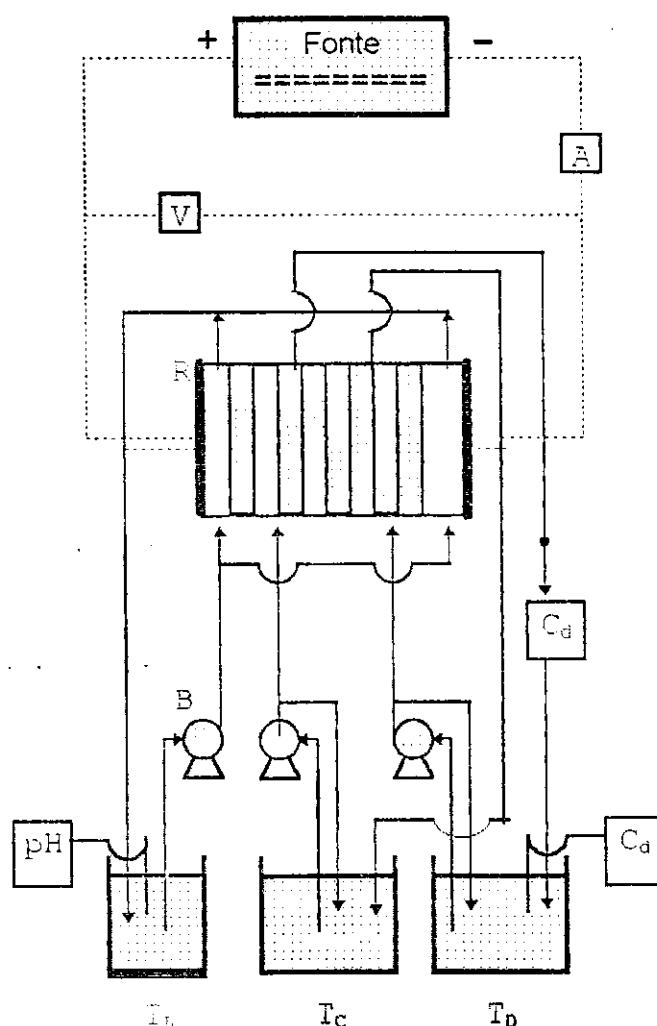


Figura 3.2 - Diagrama do Sistema eletrodialítico composto das seguintes unidades: Fonte elétrica, R - reator eletrodialítico, T_c - tanque concentrado, T_d - tanque diluído, T_L -

diluído, T_L - tanque de lavagem, A - amperímetro, V - voltímetro, C_d - condutivímetro, pH - pHmetro, B - bombas centrífugas.

3.3.3 - Conversão da Condutividade para Concentração

A conversão da condutividade para concentração em partes por milhão (p.p.m.), foi calculada através da seguinte equação:

$$C = \frac{K - 0,2004}{0,001691} \quad (3.1)$$

onde, K corresponde à condutividade lida em mS, e C a concentração de sais no soro do leite no instante "t", em p.p.m. Para obtê-la, foram preparadas soluções de cloreto de sódio cujas concentrações variaram de 0 a 10.000 p.p.m. e obteve-se uma curva de calibração, conforme mostra a Figura 3.3. A faixa de temperatura situou-se em $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

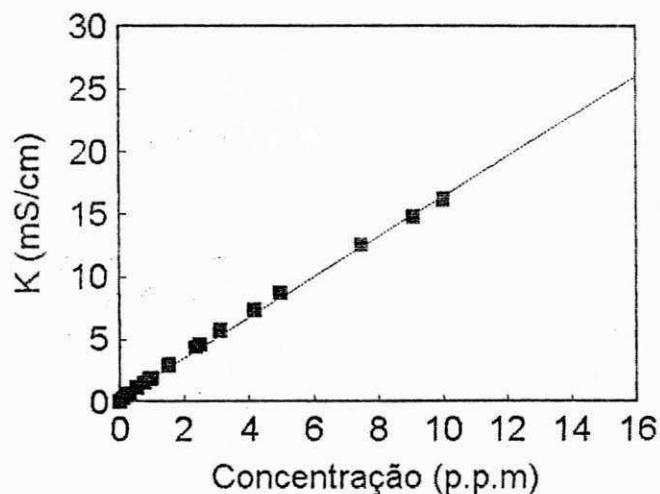


Figura 3.3 - Curva de calibração do condutivímetro
Digimed a 25C.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Neste capítulo serão discutidos os principais parâmetros eletroquímicos que regem a eletrodiálise, como variação da concentração iônica, densidade de corrente, resistência ohmica, potencial elétrico, consumo de energia e temperatura. Para analisar alguns deles, como por exemplo a densidade de corrente foi necessário recorrer aos gráficos relacionados com o comportamento da variação da concentração iônica durante o processo. As figuras se encontram no corpo do capítulo e as tabelas referentes as mesmas no Apêndice 1.

4.1 - Avaliação do potencial elétrico em função da concentração iônica do soro do leite.

O capítulo anterior descreve que as amostras coletadas do soro do leite não apresentaram concentrações constantes. Por este motivo foram tomada as amostras de concentrações mais próximas para se estudar o efeito do potencial elétrico aplicado durante a eletrodiálise. A partir deste estudo, foram analisados os potenciais que ofereceram melhores performances em termos de taxa de extração e consumo energético.

As Figuras 4.1 a 4.3 referentes a Tabela 4.1 (Apêndice 1), apresentam os dados do comportamento adimensional da concentração do soro do leite, expresso através de C/C_0 , onde C representa a concentração de sais no soro do leite no instante "t" e C_0 a concentração inicial de sais no soro do leite, para os potenciais de 20, 40 e 60 volts. Nestas figuras são mostradas também os dados referentes a variação da temperatura durante o processo. Sabe-se que na dessalinização do soro do leite via eletrodiálise a taxa de extração recomendada para os sais presentes é de 60 a 70% (LACEY, 1979; COCA & ALVAREZ, 1992). Em função desta informação algumas

bateladas apresentaram valores próximos a 60% e outras acima de 70%. Esse fato ocorreu para períodos diferentes de dessalinização. Em alguns casos as bateladas chegaram a atingir 240 minutos. Conforme pode-se observar, a medida que a concentração diminui a temperatura aumenta em função do tempo. Com o acréscimo de temperatura durante a eletrodiálise, a velocidade cinética das espécies iônicas aumentam e consequentemente favorece a condutividade elétrica. Observou-se que a elevação de temperatura se deve ao calor dissipado através da recirculação do soro pelas bombas de alimentação. Em função da taxa de extração pode-se observar que os potenciais de 40 e 60 volts foram os que ofereceram melhores resultados, conforme mostra a Tabela 4.2. Quanto ao potencial elétrico de 20 volts, observou-se que a taxa de extração atingida foi abaixo do valor percentual mostrado acima, logo foram escolhidos os dois últimos potenciais elétricos para estudar o efeito de dessalinização do soro do leite via eletrodiálise.

Tabela 4.2 - Taxa de extração para diferentes potenciais elétricos e concentrações iniciais de sais no soro do leite (C_0).

Potencial Elétrico (V)	Concentração inicial (p.p.m.)	Taxa de extração (f %)
20	3294	40
40	3294	76
60	3264	78

4.2 - Parâmetros eletroquímicos para um potencial elétrico de 40 Volts.

4.2.1 - Concentração iônica

As Figuras 4.3 a 4.13 e Tabelas 4.3 a 4.13 (Apêndice 1), apresentam como a concentração iônica presente no soro e a temperatura variaram durante a eletrodiálise para um potencial elétrico constante de 40 volts. Observou-se que a concentração diminuiu e a temperatura aumentou em função do tempo, para todas as bateladas. Esperava-se que para um potencial elétrico constante a velocidade de transferência iônica ocorresse mais rápido para concentrações mais baixas, no entanto em alguns casos isso não foi observado. Este fato pode estar relacionado com a forma

como os compartimentos diluídos e concentrado foram alimentados, ou seja, o reator em si, apresenta dois compartimentos concentrados e diluídos, onde nos compartimentos concentrados têm-se a presença de água destilada isenta de íons e no diluído o soro do leite. Isso significa que todos os íons presentes no soro tendem a passar para a água durante o processo de eletrodiálise. Em alguns casos foram extraídos cerca de 53% dos íons para as concentrações iniciais de 2016 e 4790 p.p.m. Por outro lado, a 1975 e 3660 p.p.m. foram extraídos acima de 77%. Esses valores podem ser observados no final de cada batelada, conforme mostram as tabelas mencionadas acima. A taxa média de extração obtida foi de 67,2% para as bateladas realizadas sob um potencial de 40 volts, a qual se encontra na faixa de extração atribuída por LACEY (1979), COCA & ALVAREZ (1992).

Observando a Figura 4.8.1, percebe-se através da curva que representa a adimensionalidade da concentração em função do tempo a presença de várias taxas de dessalinização. Verifica-se que o valor da taxa de dessalinização da segunda equação foi superior às demais, esse fato vem justificar como os íons se comportam no interior do reator. A Tabela 4.14 mostra as equações referentes a Figura 4.8.1, obtidas para os respectivos intervalos de tempo. Este mesmo comportamento também foi observado na Figura 4.7, em que após os 30 minutos a taxa de dessalinização aumentou acentuadamente. Esse estudo das taxas foi feito através de um método de linearização inserido no programa do Harvard Grafics com o objetivo de observar o comportamento linear das curvas.

Tabela 4.14 - Valores dos coeficientes das equações obtidas ao longo da batelada para uma concentração inicial de sais, $C_0 = 3365$ p.p.m.

Intervalo (min.)	$C/C_0 = a - b t$	
	a	b
0 - 30 (1)	1,000	0,0018
35 - 60 (2)	1,053	0,0034
70 - 190 (3)	0,996	0,0024
190 - 240 (4)	0,869	0,0017

Onde, a é o coeficiente angular da reta ; b é o coeficiente linear.

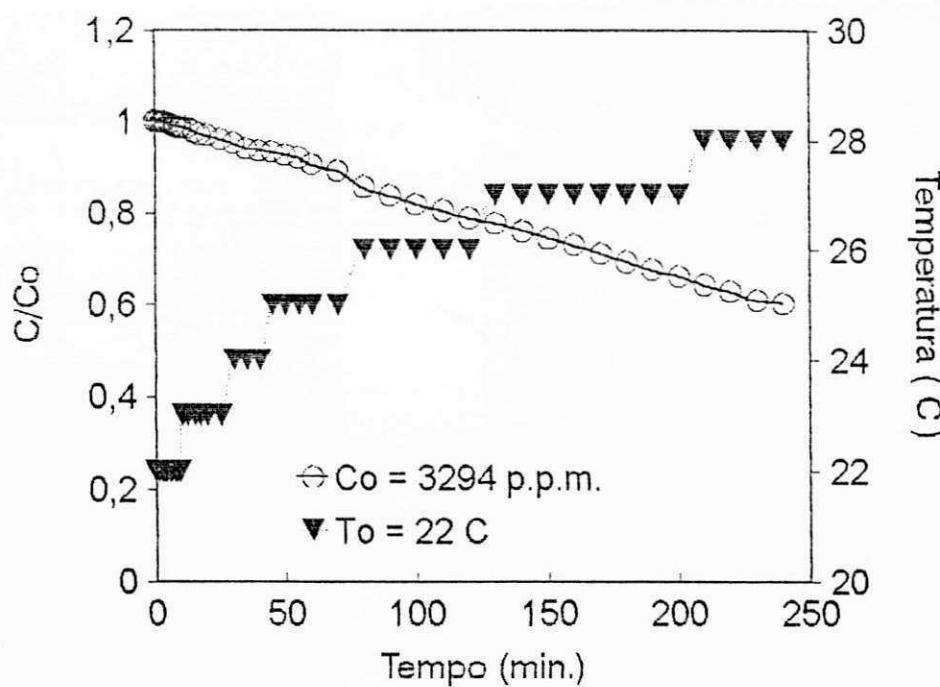


Figura 4.1- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 20 \text{ Volts}$.

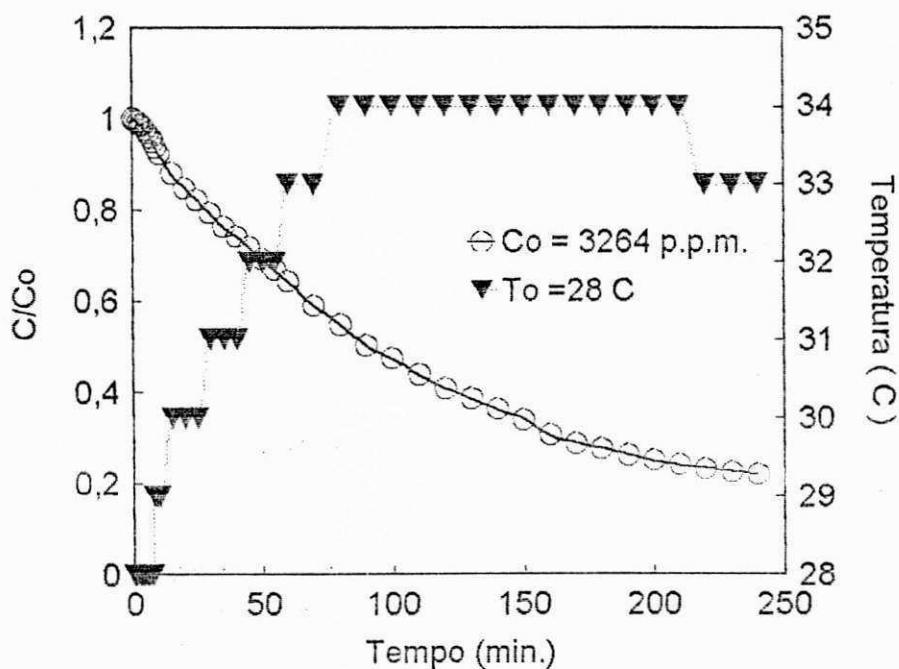


Figura 4.2 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

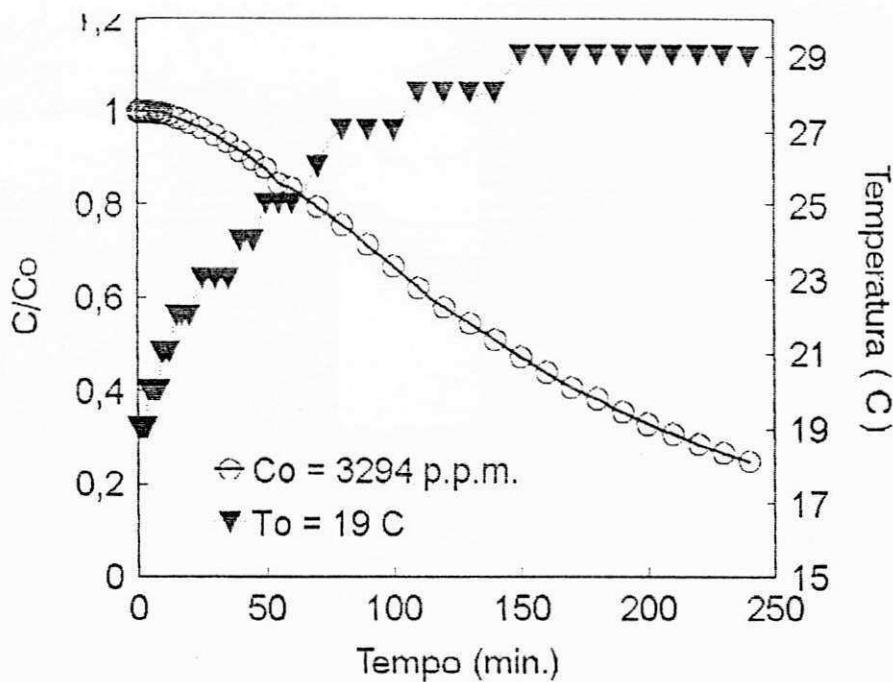


Figura 4.3- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 20 \text{ Volts}$.

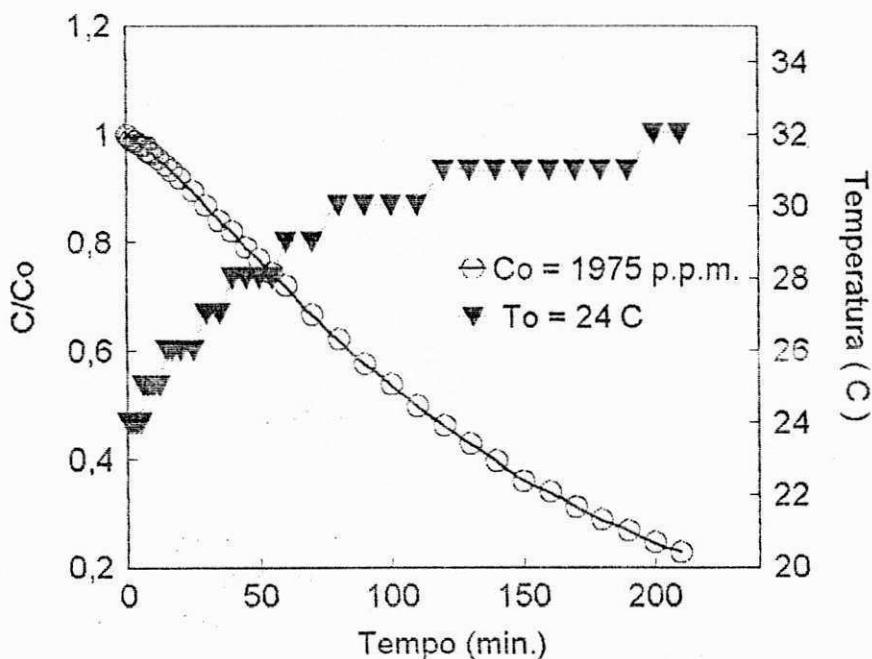


Figura 4.4- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 20 \text{ Volts}$.

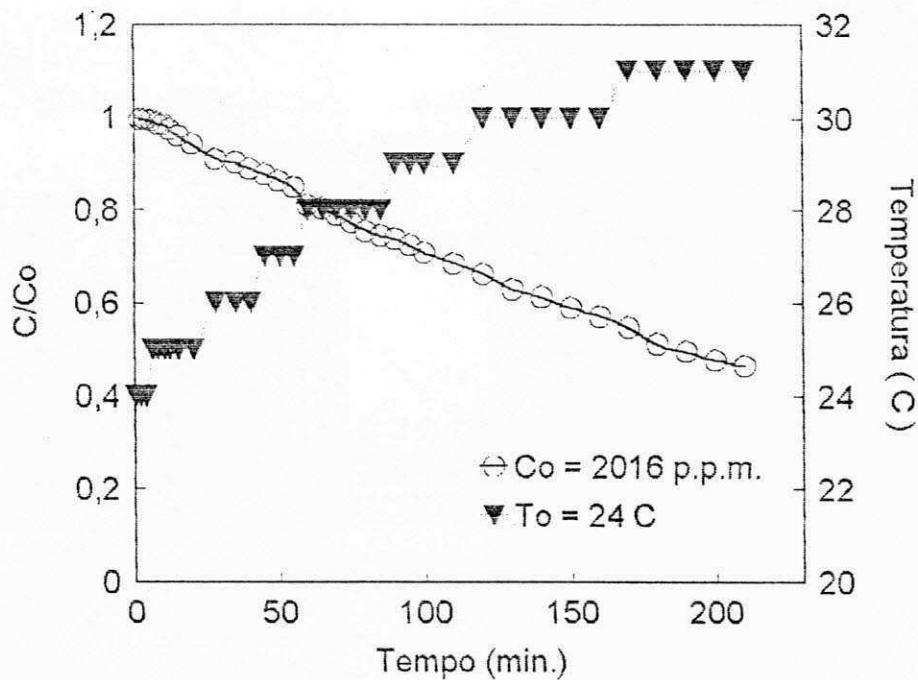


Figura 4.5- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 20 \text{ Volts}$.

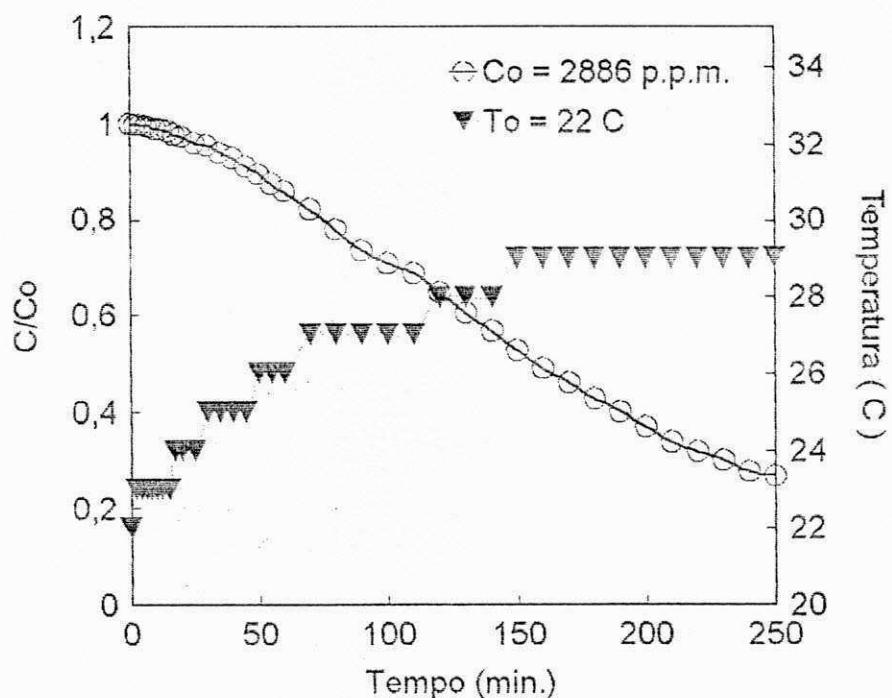


Figura 4.6- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 20 \text{ Volts}$.

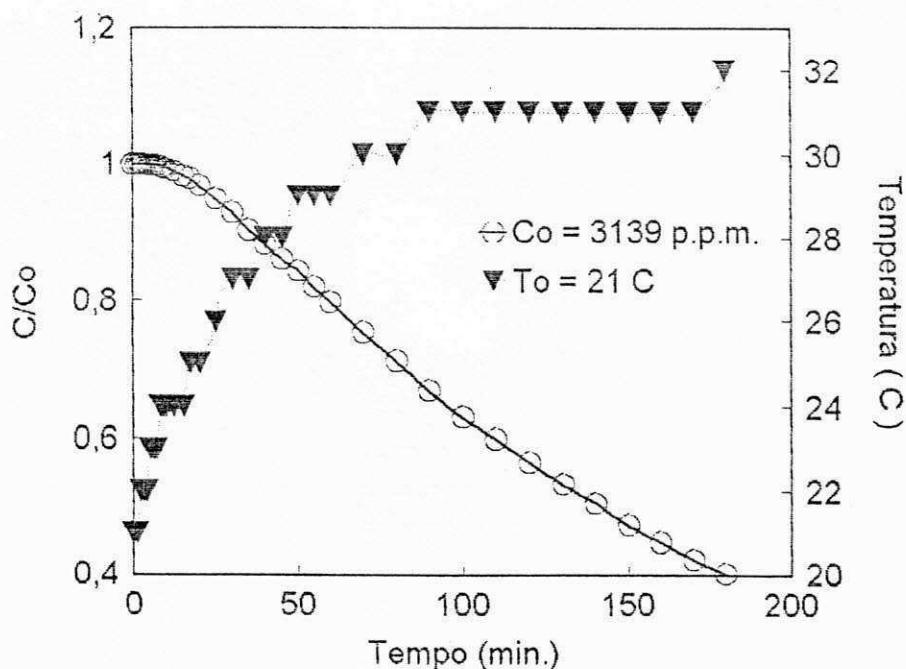


Figura 4.7- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100$ l/h, $V = 20$ Volts.

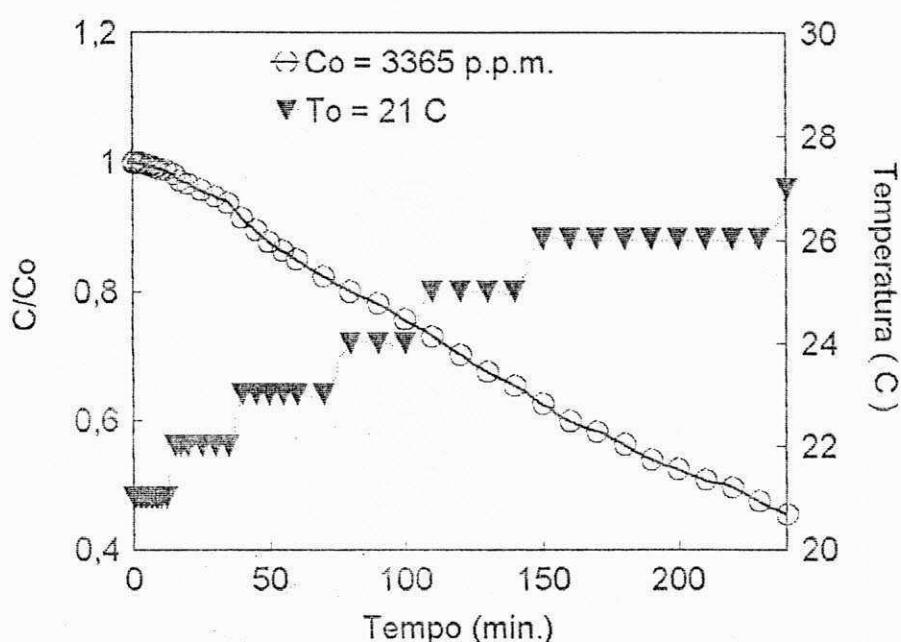


Figura 4.8- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100$ l/h, $V = 20$ Volts.

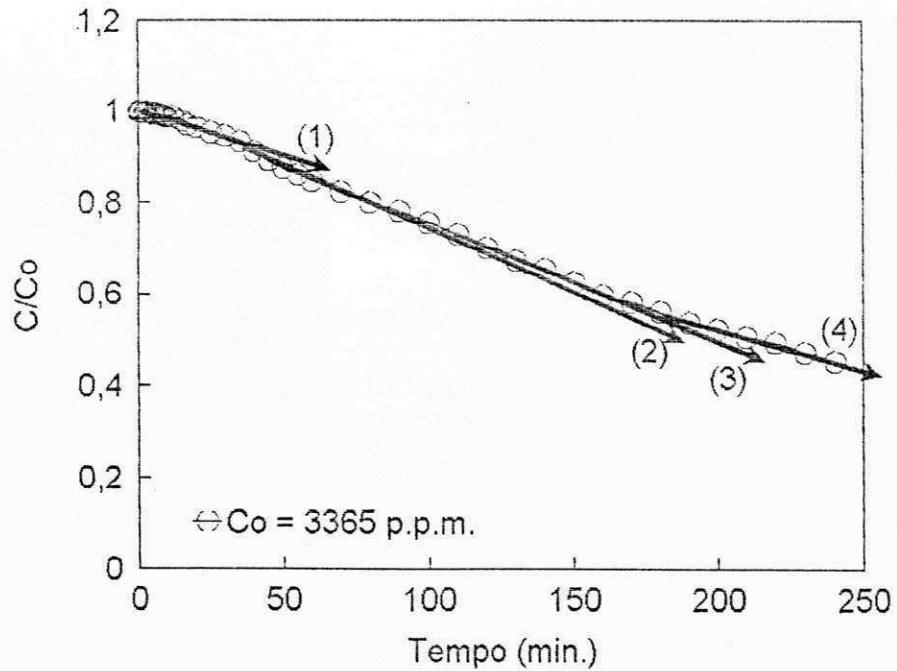


Figura 4.8.1 - Representação das taxas de dessalinização em função do tempo, para $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

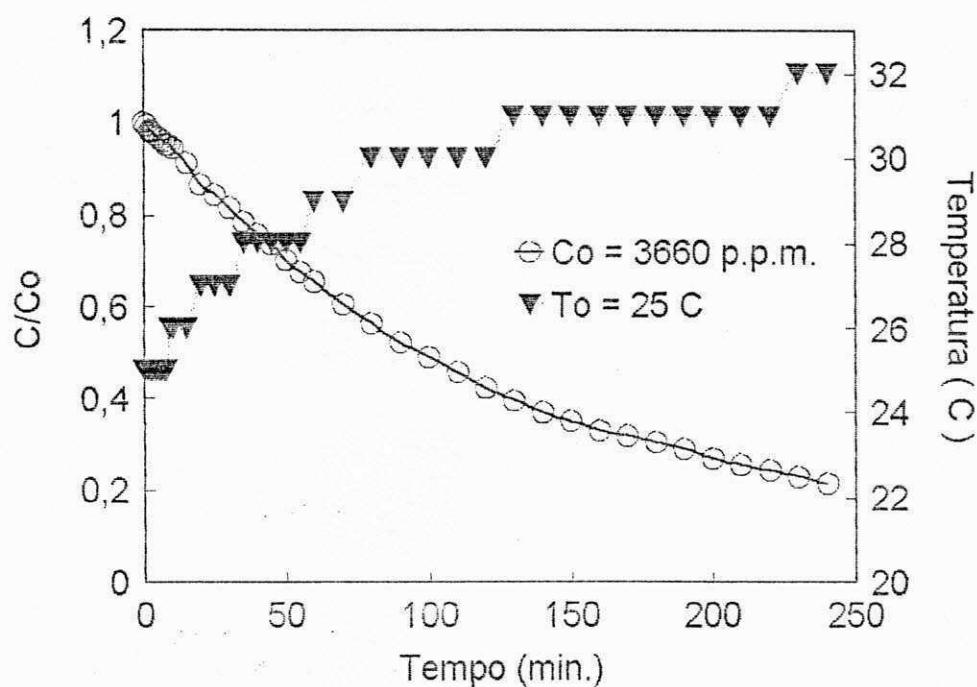


Figura 4.9 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

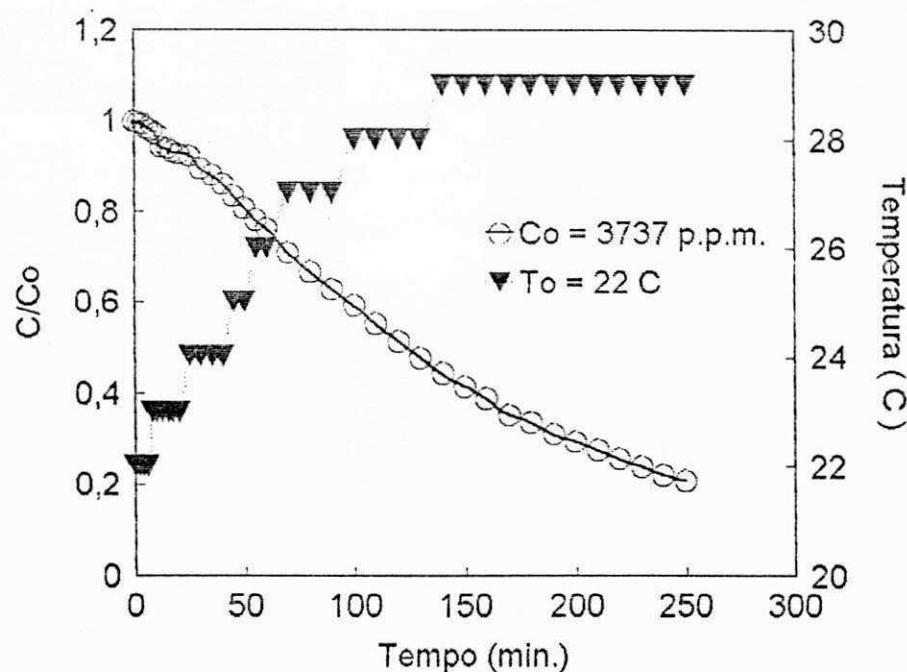


Figura 4.10 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

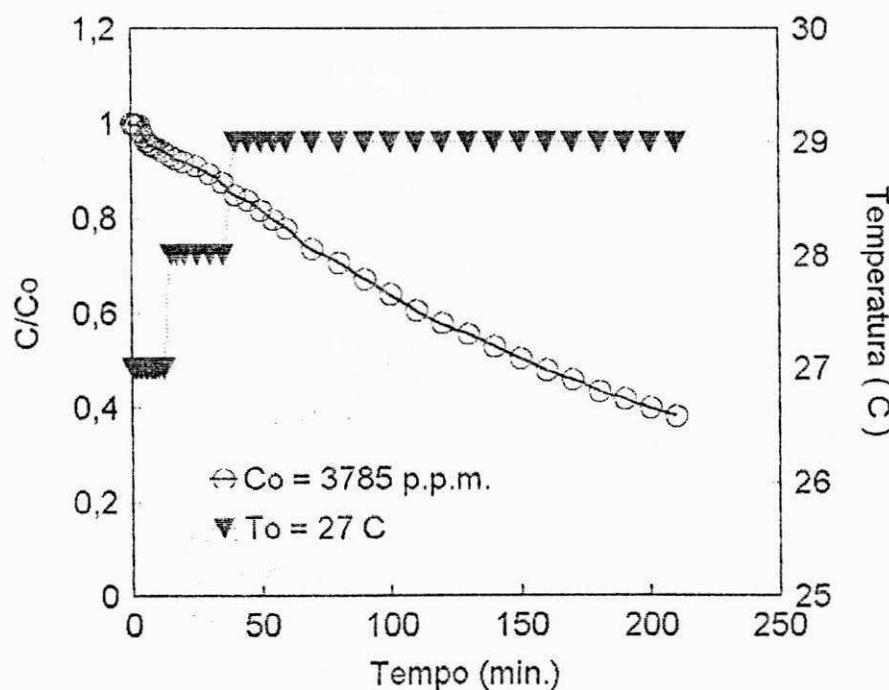


Figura 4.11- Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

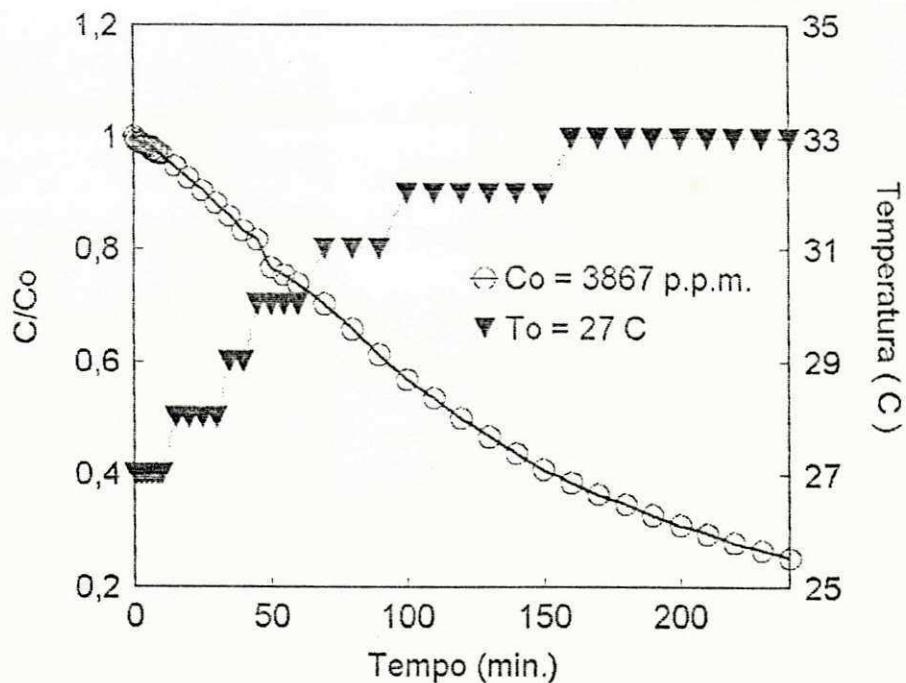


Figura 4.12 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

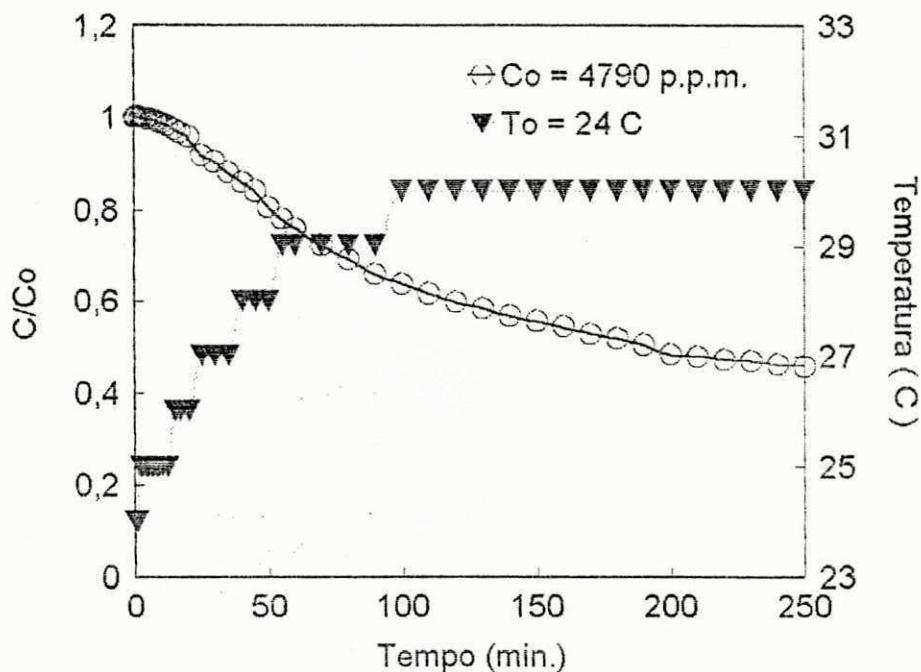


Figura 4.13 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

4.2.2 - Densidade de corrente e resistência ohmica

A densidade de corrente (J) foi determinada através da Equação 2.8 descrita no item 2.7 do Capítulo 2. No entanto, para o cálculo da densidade de corrente, a área efetiva (A_e) utilizada foi de 88 cm^2 . Os resultados encontram-se nas Tabelas 4.3 a 4.13 (Apêndice 1) e estão representadas nas Figuras 4.14 a 4.24.

O comportamento da variação da densidade de corrente está relacionada com o perfil da variação adimensional da concentração em função do tempo. Sabe-se que a região da camada limite da membrana apresenta a maior concentração de íons, e que sob o efeito do potencial elétrico haverá um fluxo iônico conforme mostra a Equação 2.1. O fato do reator em estudo apresentar um compartimento (concentrado) que é alimentado com água destilada sob circulação contínua, este apresenta uma vantagem de receber íons dos compartimentos adjacentes. Foi observado que a densidade de corrente para a maioria dos casos, tende a crescer e logo após diminui. Este fenômeno envolve não somente o "design" do reator mas também outros parâmetros tais como: velocidade do fluido, viscosidade, densidade absoluta, concentração inicial, e outros parâmetros do tipo, diâmetros dos orifícios de alimentação e saída, distância entre as membranas, etc. Sabe-se que durante o processo há formação de bolhas de ar na solução em estudo. Este último apresenta-se como uma das maiores fontes de erro na determinação da condutividade e consequentemente da corrente elétrica produzida durante o processo.

A densidade de corrente é um dos parâmetros que pode informar a taxa de concentração de íons presentes durante a eletrodiálise. A medida que a densidade de corrente decresce em um processo eletrolítico, isso significa que o meio se encontra pobre em íons e neste instante a resistência ohmica do meio cresce progressivamente. Como caso particular, a Figura 4.19 e a Tabela 4.8 (Apêndice 1), correspondente à concentração de 3365 p.p.m., mostram que a densidade de corrente aumentou durante 30 minutos, para em seguida apresentar durante 1h e 45 minutos um valor constante e logo após decrescer em forma de degrau. Partindo-se do princípio que durante os

primeiros minutos o potencial elétrico atua em um gradiente de concentração alto, formando assim uma "barreira de íons" entre a camada limite e a concentração no seio da solução no interior do compartimento. Quando essa "barreira" diminui por esvaziamento, haverá um maior transporte iônico e consequentemente a taxa de dessalinização aumenta. Logo após a repetividade deste processo, leva a uma diminuição na taxa de dessalinização.

Observou-se, que o comportamento das curvas de densidade de corrente nem todas foram semelhantes. Quando os valores iniciais de densidade de corrente foram altos, supõe-se que ocorreu um efeito de mistura no interior dos compartimentos favorecendo o transporte iônico através do contato fluído-membrana.

A temperatura, densidade do fluido, projeto da célula, tipo de escoamento no interior do reator (linear ou tortuoso), são parâmetros que estão relacionados com o processo (STRATHMANN,1992) e obviamente intrinsecamente responsáveis pelos comportamentos adversos das curvas representadas pelas Figuras 4.3 a 4.13.

A elevação de temperatura durante a eletrodiálise, tem-se mostrado muito importante na medição da condutividade. A condutividade aumenta aproximadamente de 2% por °C variando assim a viscosidade do fluido e consequentemente o limite de polarização, ou seja o quanto o potencial elétrico pode atuar sem que ocorra uma variação no pH da solução (SHAFFER & MINTZ,1966). Este acréscimo de temperatura de certa forma tem sido um dos parâmetros que influenciaram na taxa de dessalinização. Um outro parâmetro que está relacionado com o fluxo iônico é a viscosidade do soro, uma vez que a mesma diminui em função da temperatura, poderá ter ocorrido formação de aglomerados de proteínas e gorduras durante o processo chegando impedir a transferência de íons através das membranas. O ideal seria ter realizado as bateladas a temperatura constante, de forma que os parâmetros fossem avaliados em função da concentração de íons.

Em alguns casos a taxa de extração poderia apresentar valores superiores como por exemplo: no caso da batelada de Co = 3139 p.p.m., a densidade de corrente no final se encontrava a 3,07 mA/cm² quando foi extraído 60%, enquanto que, para

Co = 3294 p.p.m., a densidade de corrente registrava $1,93 \text{ mA/cm}^2$ para uma taxa de extração de 75,1%. Deve ser considerado que o soro do leite por apresentar substâncias em suspensão, as quais representadas por materiais protéicos, gordura, sais minerais e outros, que de certa forma durante a eletrodiálise em função da taxa de agitação no interior do reator estas substâncias podem formar blocos ou tipos de flocos que passam a impedir a transferência dos íons através das membranas. A formação desta resistência fica mais agravante quando a temperatura do meio aumenta progressivamente, chegando a provocar degradação das moléculas protéicas.

Sabe-se que em uma célula eletrodialítica a resistência ohmica total é o somatório da resistência da camada limite em ambos os lados da superfície da membrana, resistência específica das membranas aniónica e catiônica, resistência das células concentrada e diluída, conforme mencionado no Capítulo 2 e representado pela Equação 2.9 (SHAFFER & MINTZ, 1966). Na prática, a resistência ohmica total foi determinada através da corrente lida durante a eletrodiálise, conforme mostra a Equação 2.10. Nas Figuras 4.14 a 4.24, observa-se que a resistência ohmica apresentou um comportamento inverso da densidade de corrente, ou seja a medida que a densidade de corrente diminui o conjunto dos contra-íons nas superfícies das membranas vão diminuindo, em alguns casos como foi comentado acima, dependendo da concentração dos contra-íons na camada limite da membrana, poderá haver um transporte dos íons proveniente da dissociação da molécula da água em forma de H^+ e OH^- . Estes por apresentarem uma velocidade de transferência iônica de 3 a 5 vezes superior aos outros íons gera uma densidade de corrente que não contribui para o processo de dessalinização (SHAFFER & MINTZ, 1966). Este fato pode ser facilmente detectado através da mudança de pH durante a eletrodiálise.

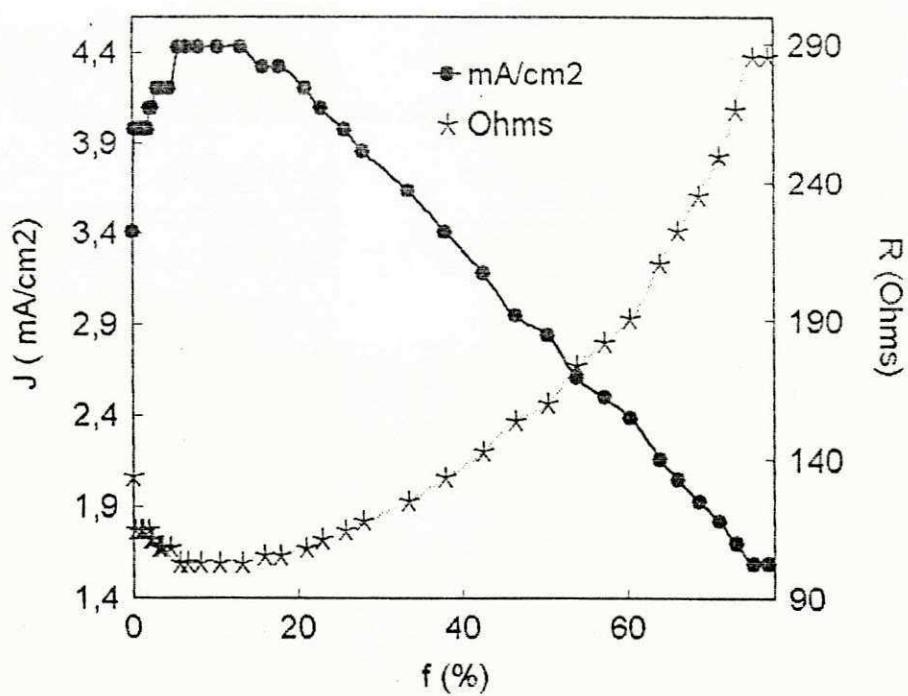


Figura 4.14 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 1975 \text{ p.p.m.}$

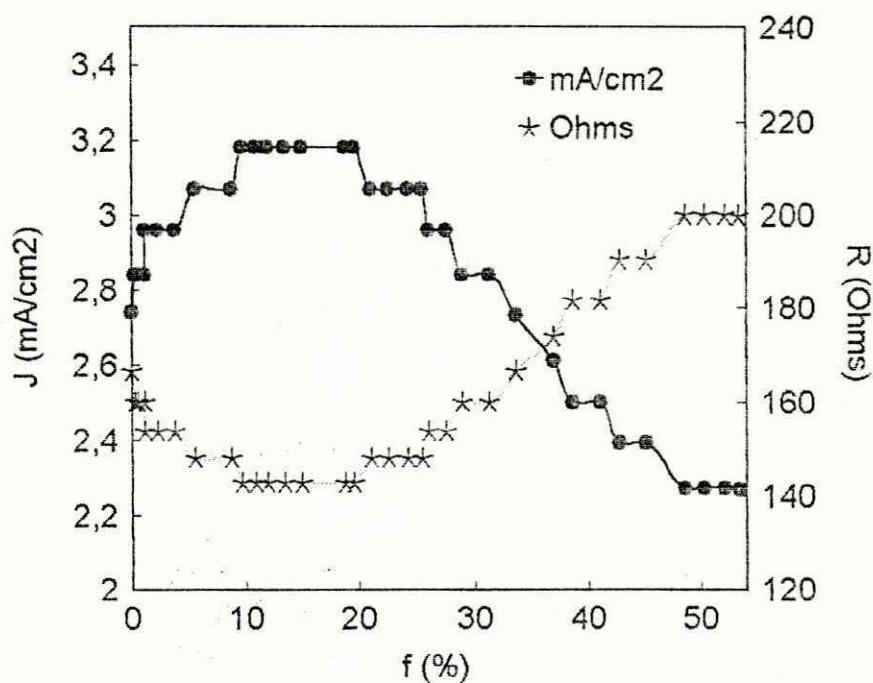


Figura 4.15 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 2016 \text{ p.p.m.}$

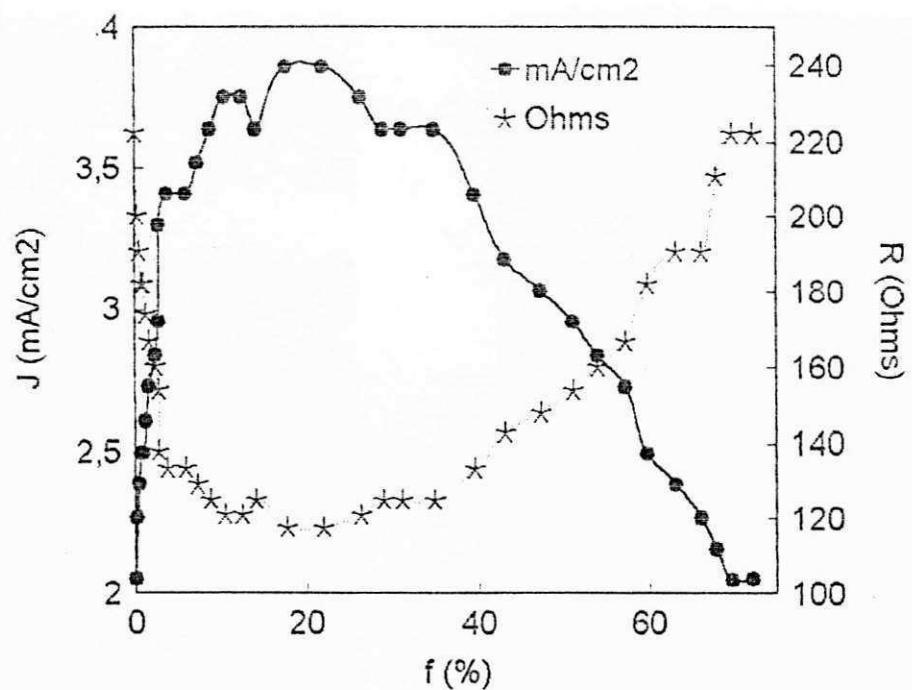


Figura 4.16 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 2886 \text{ p.p.m.}$

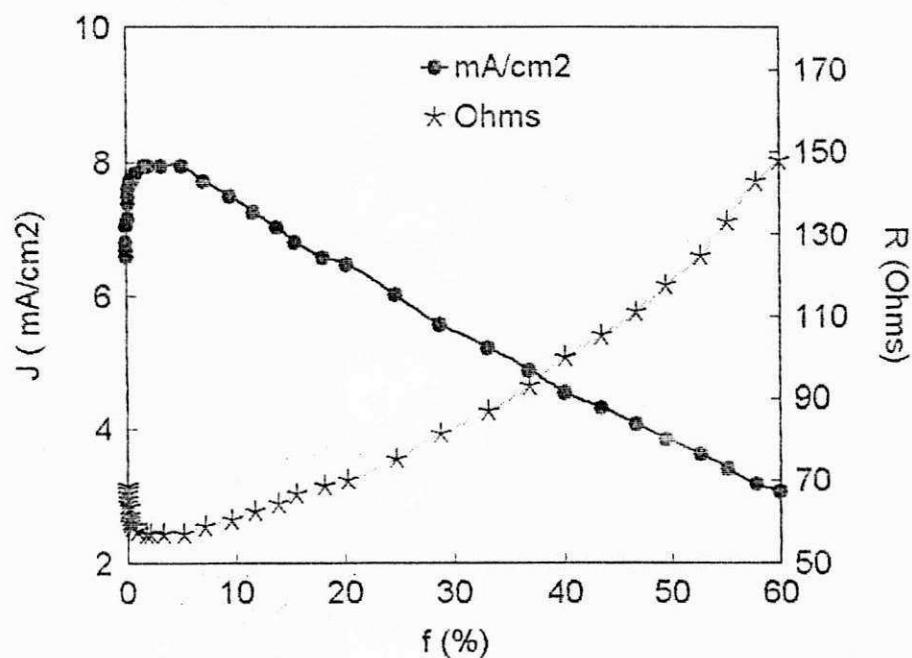


Figura 4.17- Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3139 \text{ ppm.}$

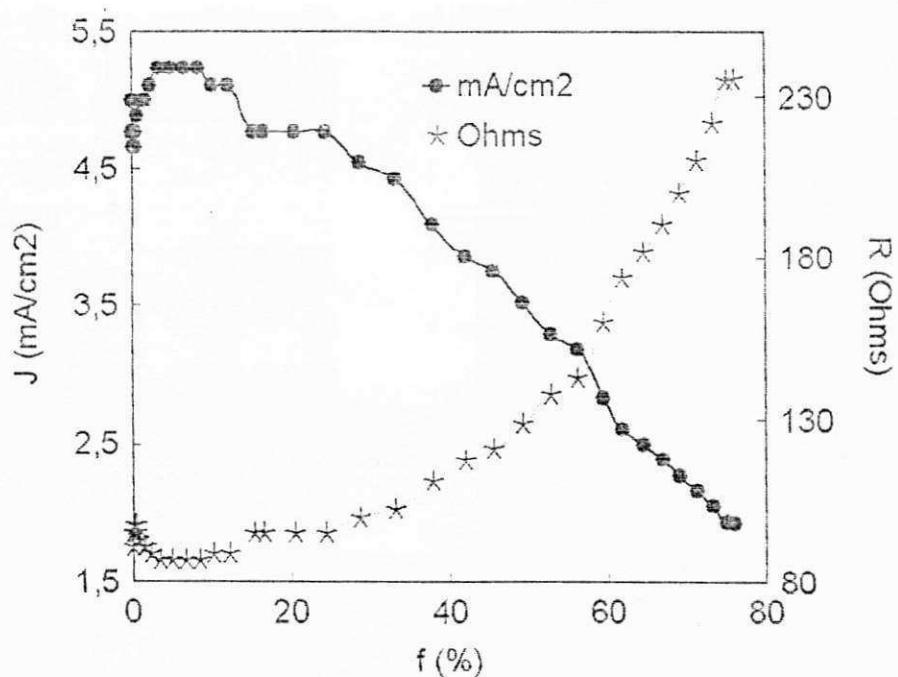


Figura 4.18 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3294 \text{ p.p.m.}$

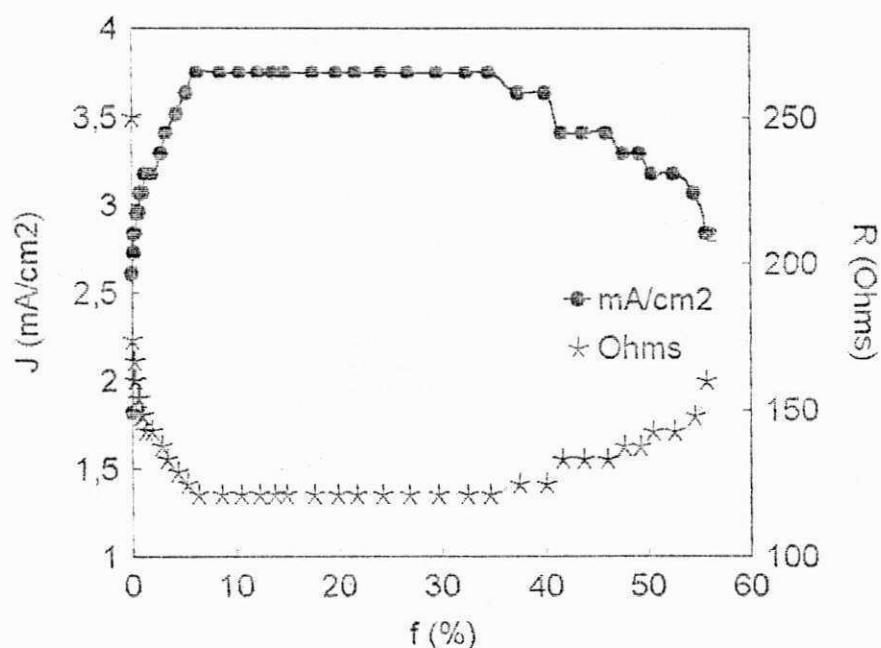


Figura 4.19 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3365 \text{ p.p.m.}$

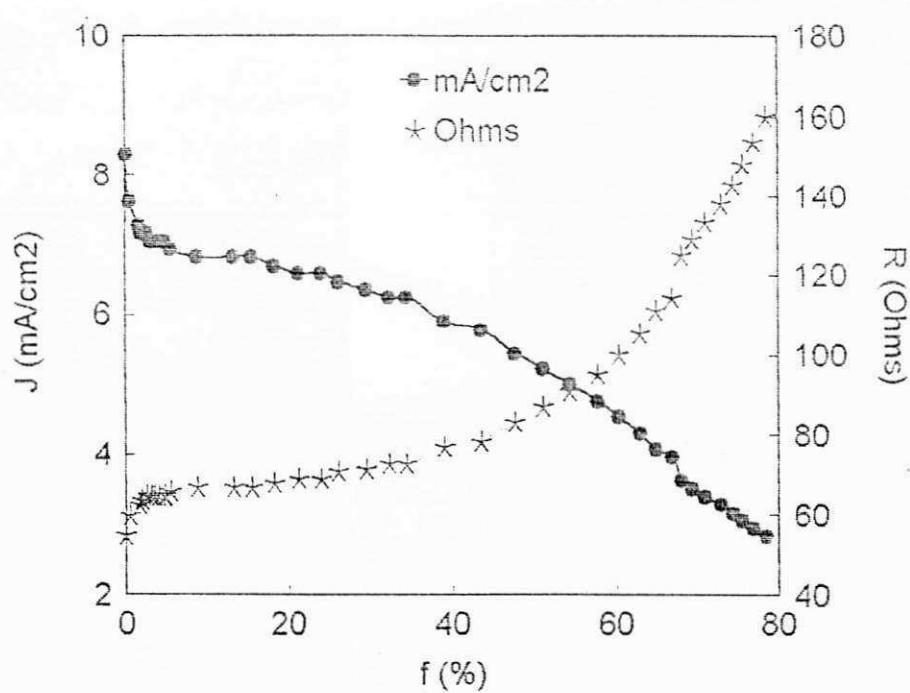


Figura 4.20 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3660 \text{ p.p.m.}$

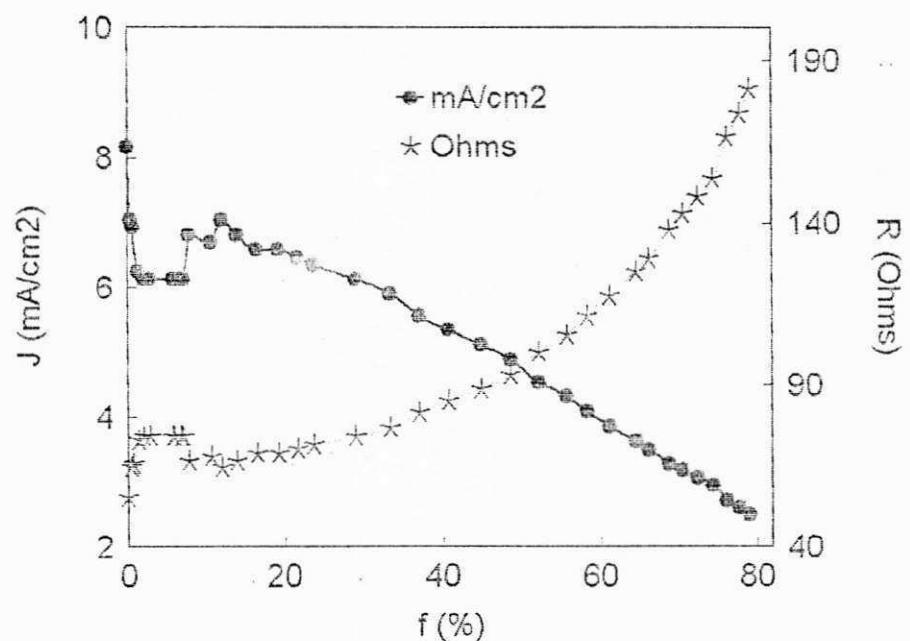


Figura 4.21 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3737 \text{ p.p.m.}$

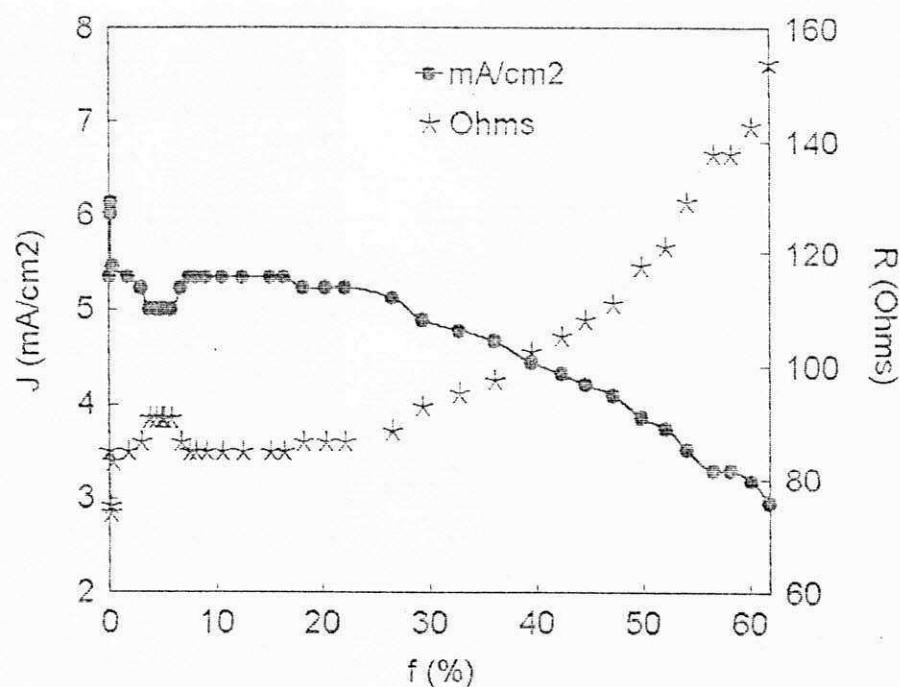


Figura 4.22 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3785 \text{ p.p.m.}$

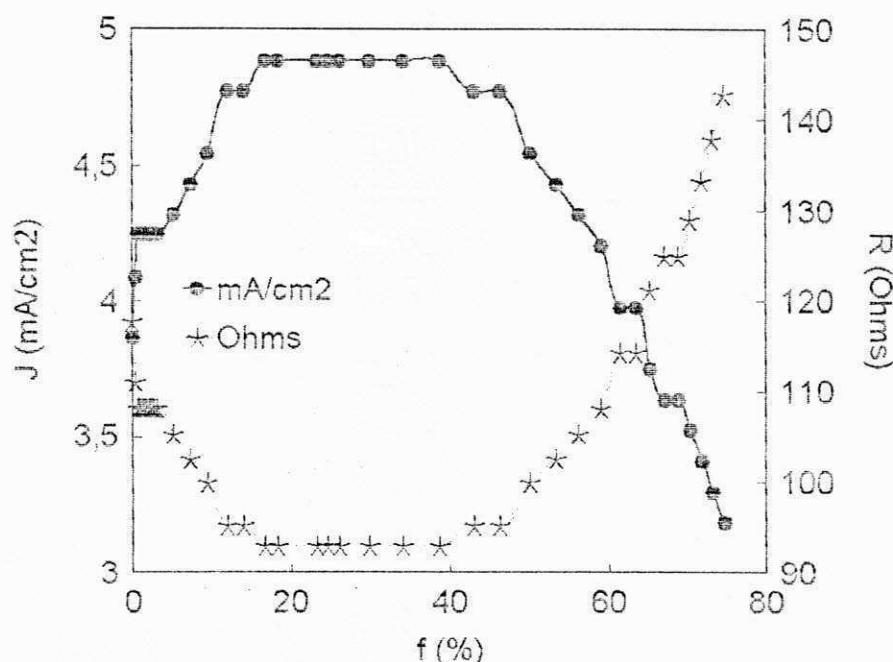


Figura 4.23 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3867 \text{ p.p.m.}$

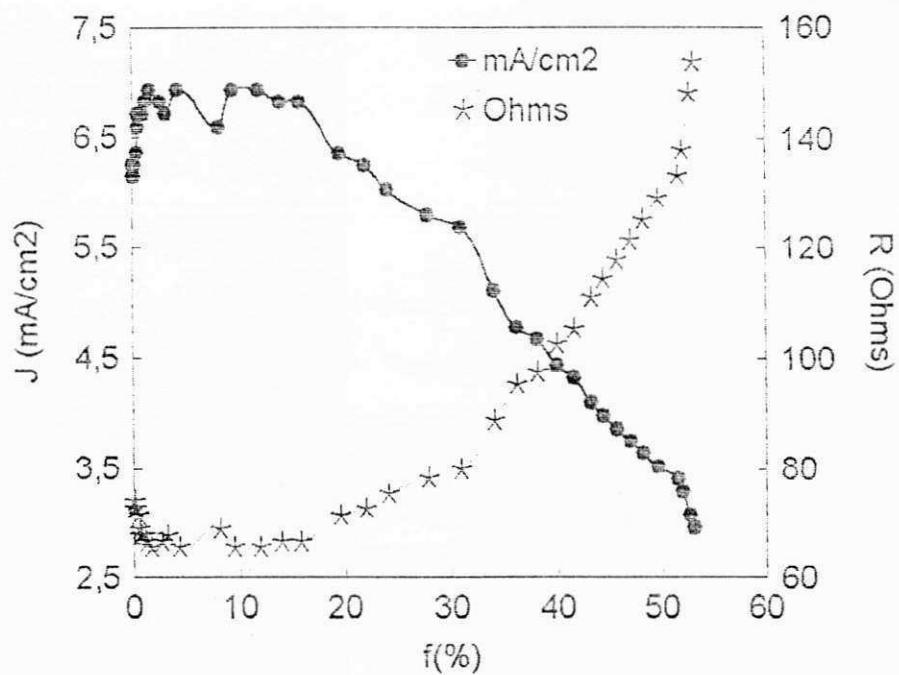


Figura 4.24 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 4790 \text{ p.p.m.}$

4.3 - Parâmetros eletroquímicos para um potencial elétrico de 60 Volts.

4.3.1 - Concentração iônica

A variação da concentração iônica para um potencial elétrico de 60 volts se encontra representada nas Figuras 4.25 a 4.30 e Tabelas 4.15 a 4.20 (Apêndice 1). O comportamento da variação adimensional da concentração e temperatura foram semelhantes aos obtidos para o potencial elétrico de 40 volts. Observa-se que em alguns casos como $C_0 = 3264$ p.p.m., a taxa de dessalinização foi mais acentuada que as demais, apresentando uma taxa de extração de 78%, enquanto que, para uma concentração de 3524 p.p.m., apresentou somente 64%. Mas observando os perfis das curvas conforme foi realizado para o potencial de 40 volts, percebe-se que a constituição físico-química do soro do leite conduz a uma variação de concentração através da eletrodiálise para apresentar diferentes taxas de dessalinização durante um certo intervalo de tempo. Como pode-se observar, a Figura 4.27.1 apresenta uma série de taxas de dessalinização semelhantes a Figura 4.8.1. Os resultados das equações referente a Figura 4.27.1, encontram-se na Tabela 4.21. O método de determinação dos coeficientes das taxas de dessalinização foi o mesmo utilizado no item 4.2.1.

Tabela 4.21 - Valores dos coeficientes das equações obtidas ao longo da batelada para uma concentração inicial de sais, $C_0 = 3016$ p.p.m.

Intervalo (min.)	$C/C_0 = a - b t$	
	a	b
0 - 15 (1)	1,004	0,0027
17 - 80 (2)	0,993	0,0037
90 - 170 (3)	0,880	0,0024
180 - 240 (4)	0,731	0,0015

Em função do grande gradiente de concentração na região da camada limite o valor da segunda taxa em relação a primeira foi superior, e aparentemente após este intervalo, o sistema entra em regime de estabilização em que a taxa do fluxo iônico procura se manter praticamente constante.

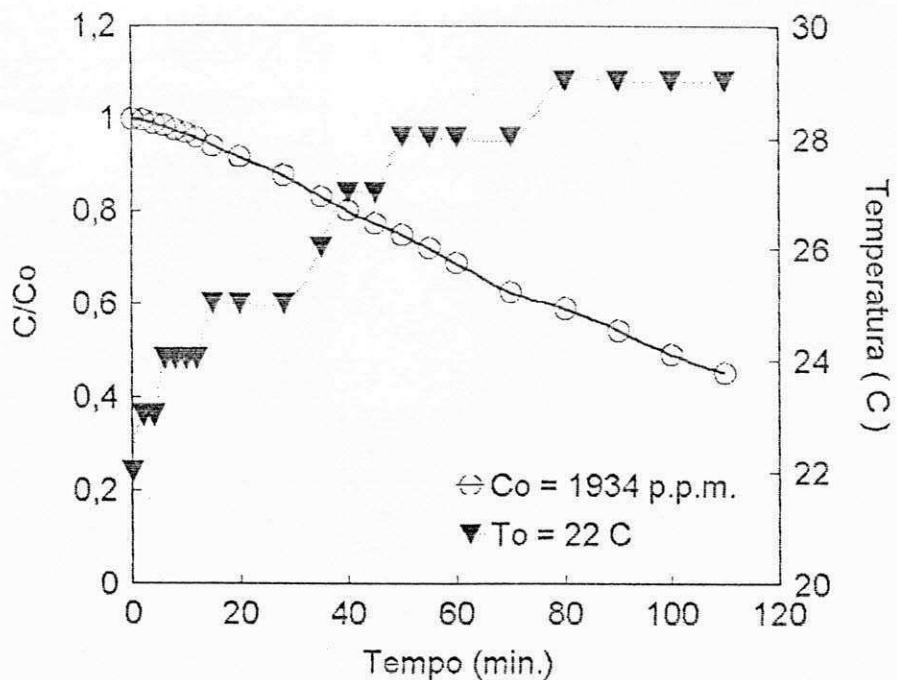


Figura 4.25 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

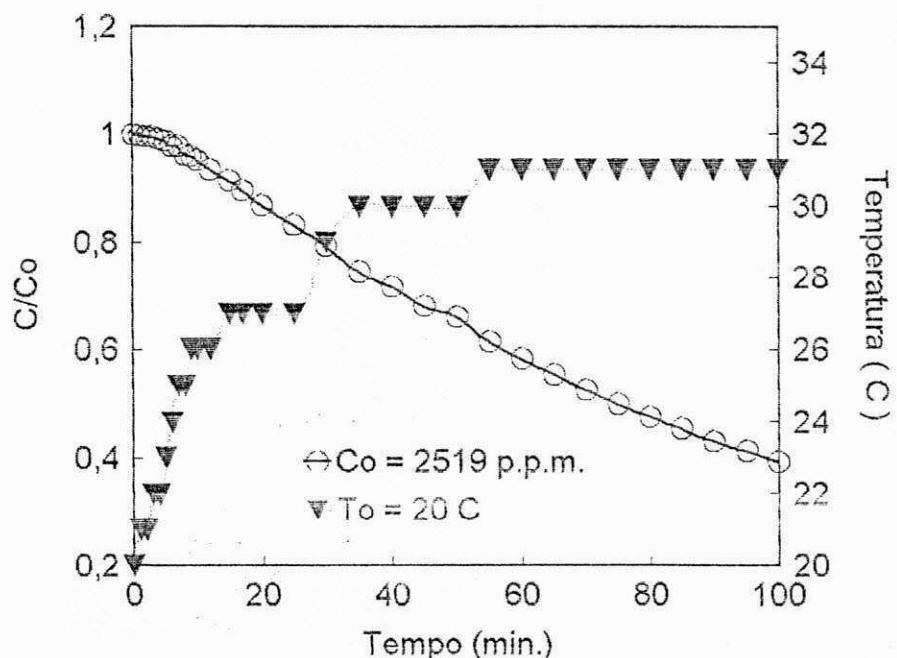


Figura 4.26 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

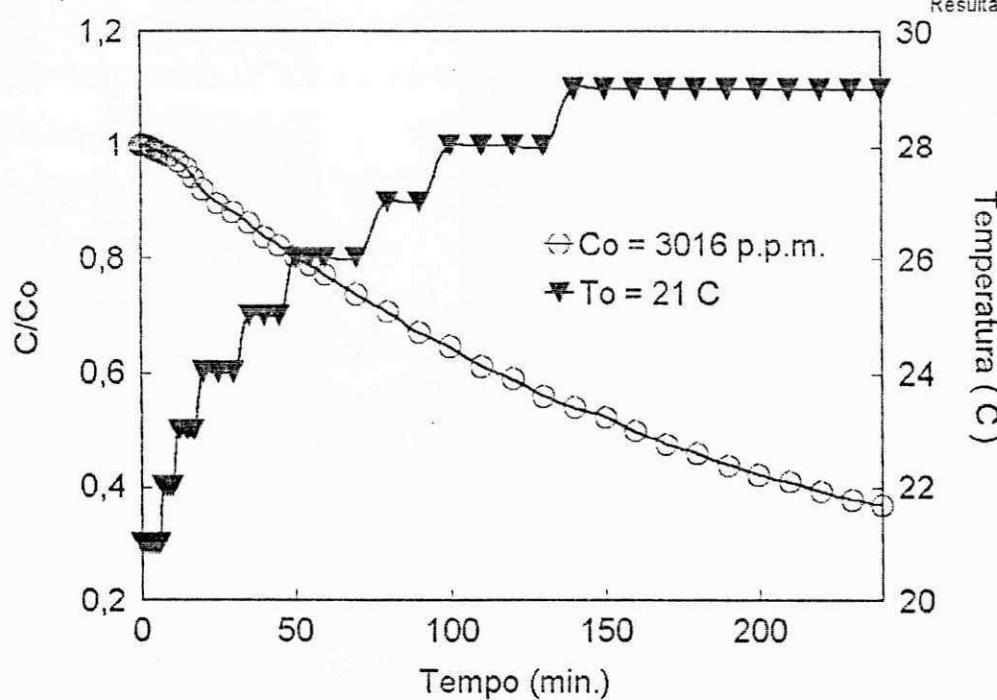


Figura 4.27 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

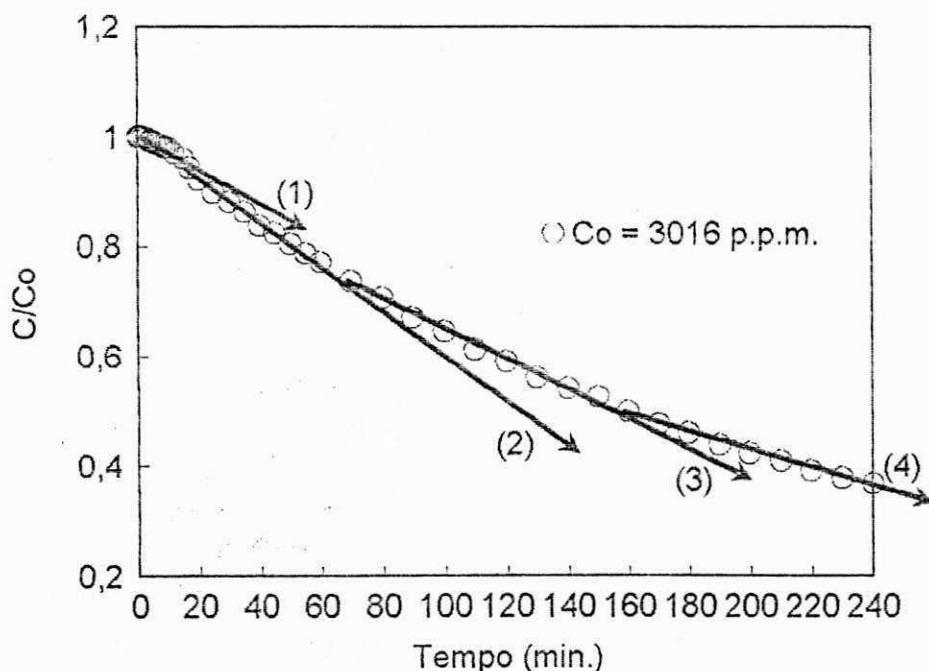


Figura 4.27.1- Representação das taxas de dessalinização em função do tempo, para $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

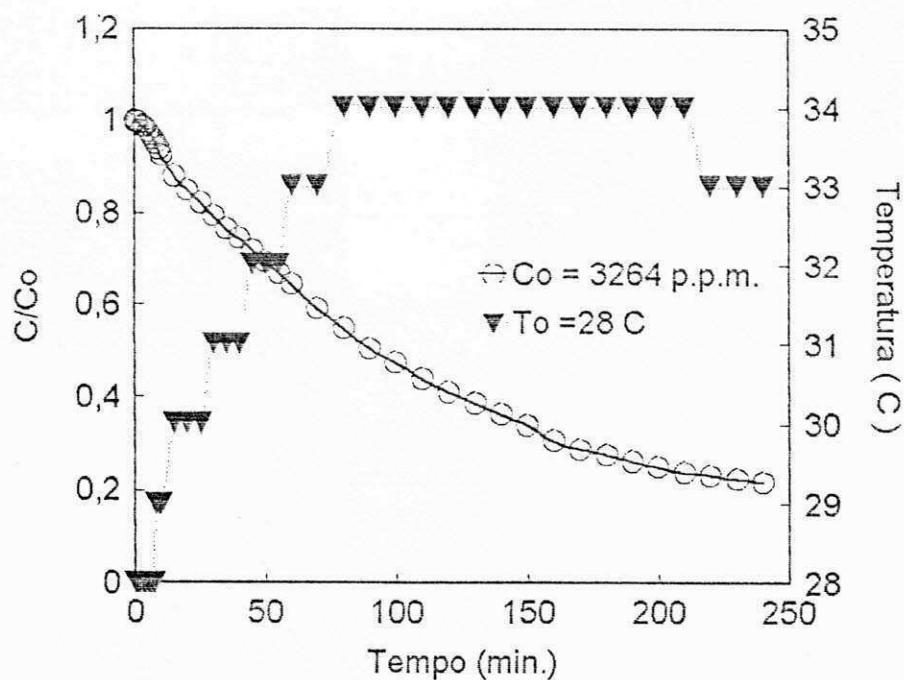


Figura 4.28 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

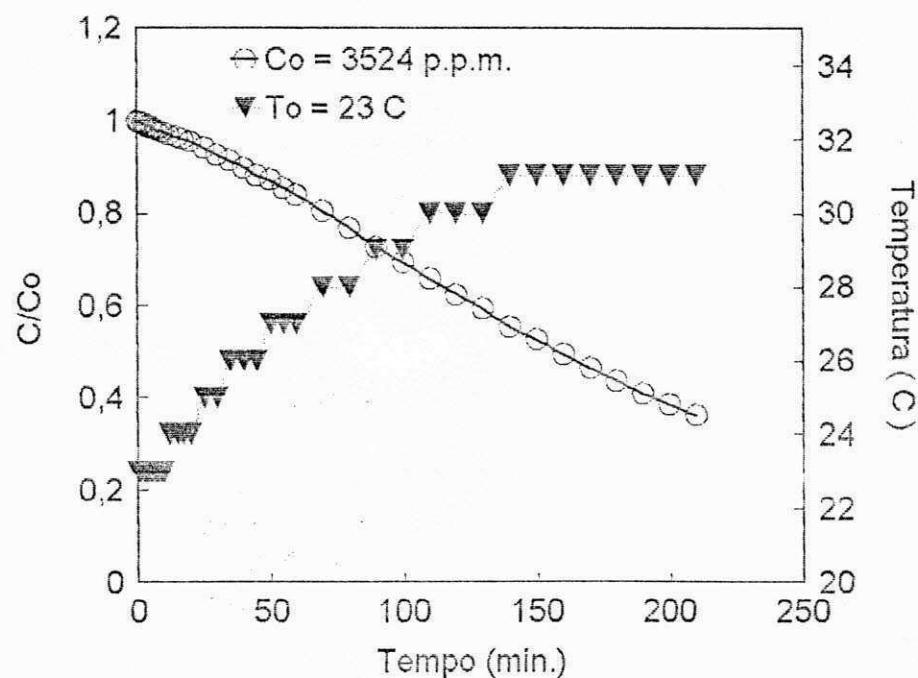


Figura 4.29 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

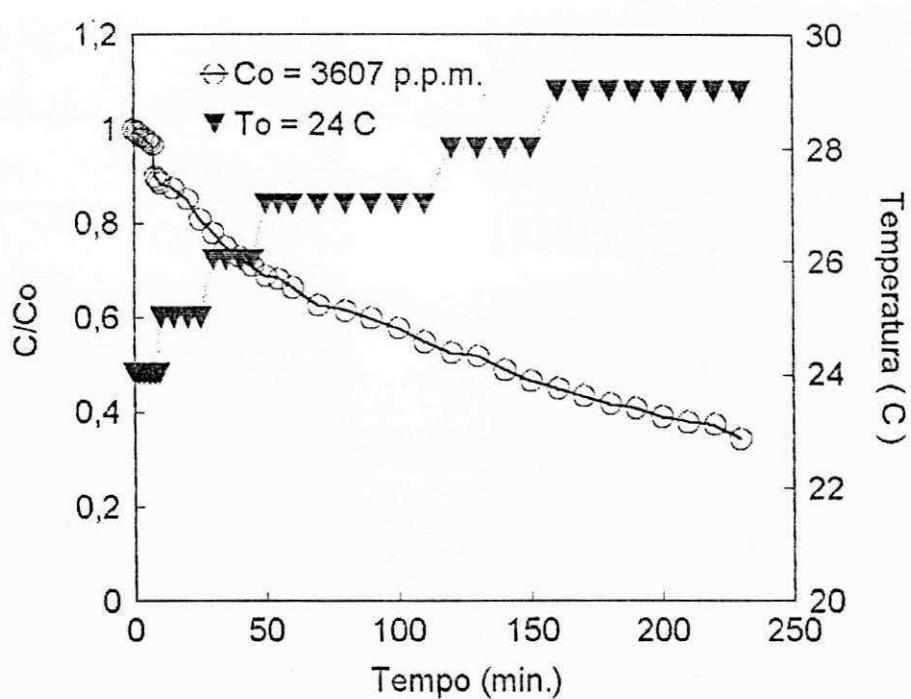


Figura 4.30 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite e temperatura em função do tempo, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$.

4.3.2 - Densidade de corrente e resistência ohmica

As Figuras 4.31 a 4.36 apresentam os resultados obtidos para densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração para um potencial elétrico de 60 volts, os dados referentes as figuras se encontram nas Tabelas 4.15 a 4.20 (Apêndice 1). Observou-se que para o maior número de bateladas realizadas, a densidade de corrente aumentou para em seguida diminuir. Durante este intervalo o transporte iônico ocorreu sob o efeito de uma baixa resistência ohmica, a partir do instante que a mesma começou a aumentar a densidade de corrente começou a diminuir. Este fato pode explicar o comportamento das curvas de dessalinização para certos intervalos de tempo, que apresentaram diferentes taxas de dessalinização durante a eletrodiálise. Isto também foi observado nos exemplos apresentados para as bateladas realizadas com 40 volts.

O fato da densidade aumentar durante os experimentos está relacionado com as concentrações que se encontram em cada compartimento, no caso do concentrado, conforme foi comentado anteriormente, este foi alimentado desde o início com água destilada. Este fato pode ter contribuído no acréscimo da densidade de corrente durante os experimentos. Quando a concentração iônica destes compartimentos se aproximam da concentração iônica dos compartimentos diluídos a densidade de corrente tende a diminuir. Para os casos onde isso não foi observado, supõe-se que o efeito das outras substâncias presentes no soro tenham ajudado a diminuir o fluxo de íons através das membranas. Portanto, o ideal é estudar o controle de concentração destes compartimentos durante a eletrodiálise, com objetivo de mantê-la sob um dado gradiente de concentração que venha favorecer o transporte iônico entre as membranas.

Em função dos resultados obtidos com o potencial elétrico de 40 e 60 volts, observou-se que não houve grande diferença no comportamento das curvas, acredita-se que para duas amostras de soro de mesma concentração inicial de sais, o potencial elétrico de 60 volts surtiria maior efeito em termos de dessalinização. Mas

infelizmente conforme foi comentado anteriormente, não foi possível realizar este estudo. Todavia, os valores das taxas de extração para as concentrações iniciais de sais no soro do leite próximas, mostram que o efeito do potencial elétrico para 40 e 60 volts não foram significativos, conforme apresentado na Tabela 4.2 no item 4.1.

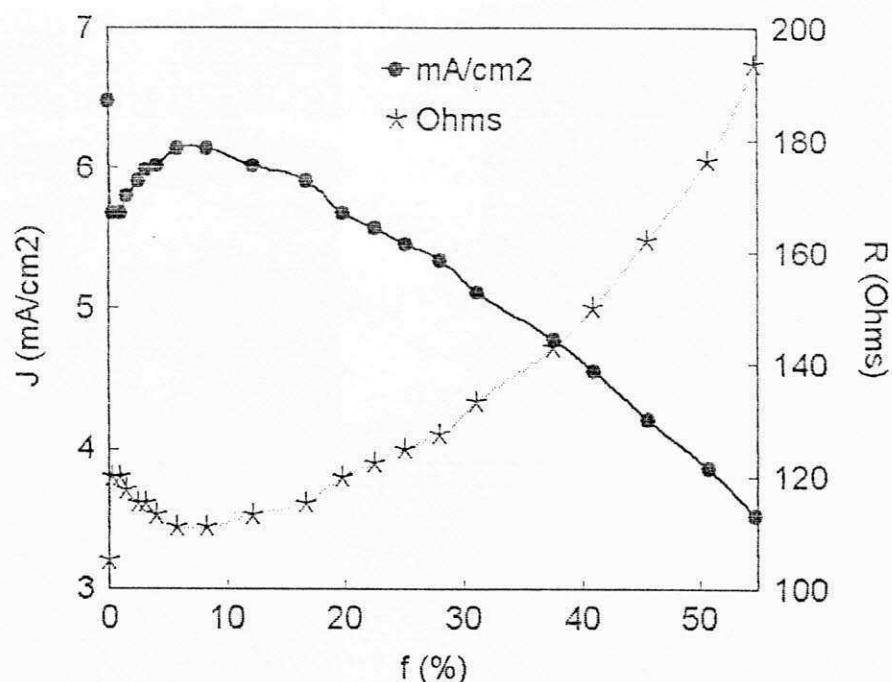


Figura 4.31 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 1934 \text{ p.p.m.}$

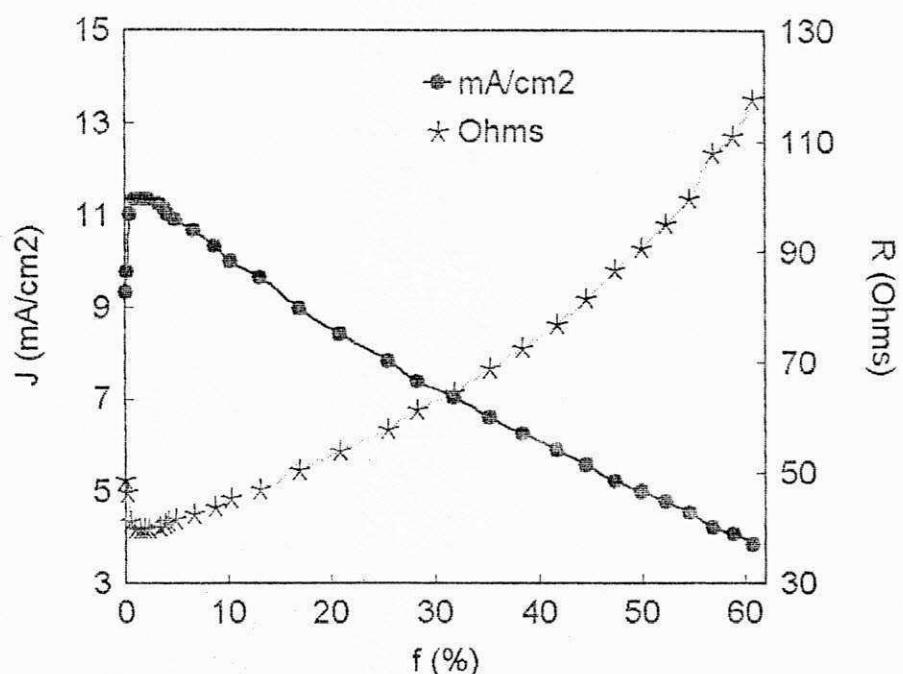


Figura 4.32 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 2519 \text{ p.p.m.}$

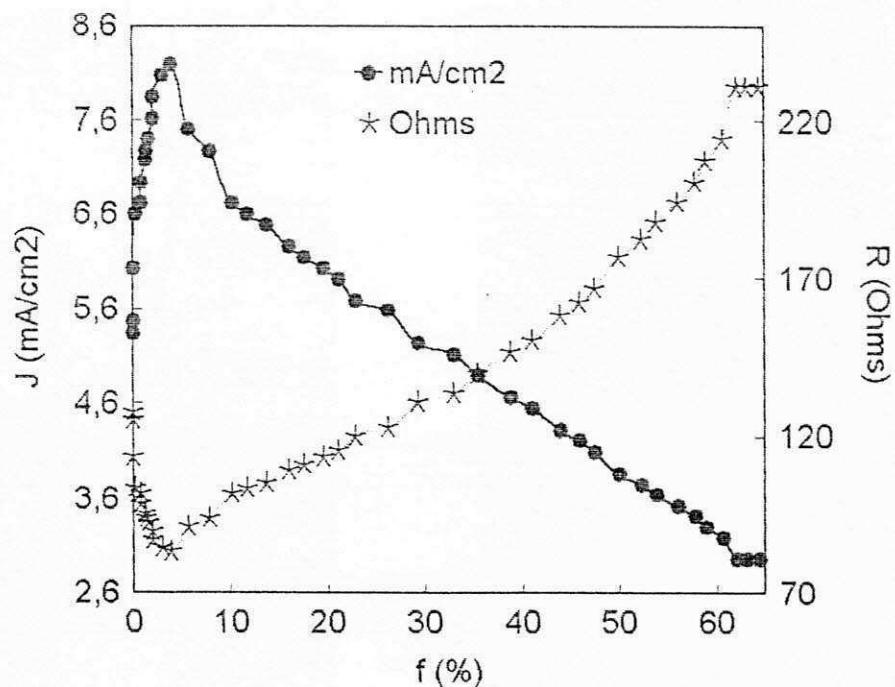


Figura 4.33 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3016 \text{ p.p.m.}$

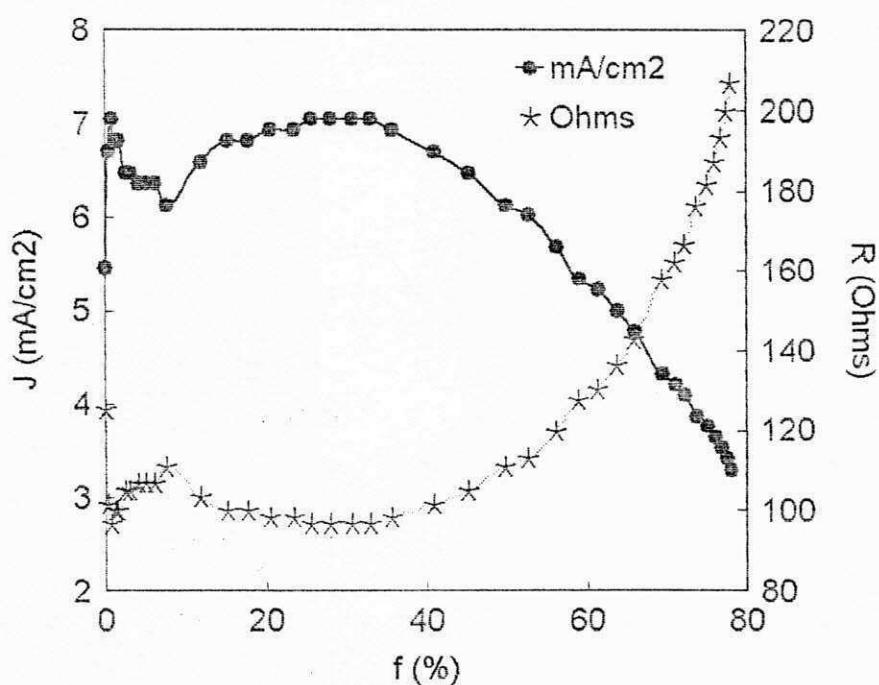


Figura 4.34 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3264 \text{ p.p.m.}$

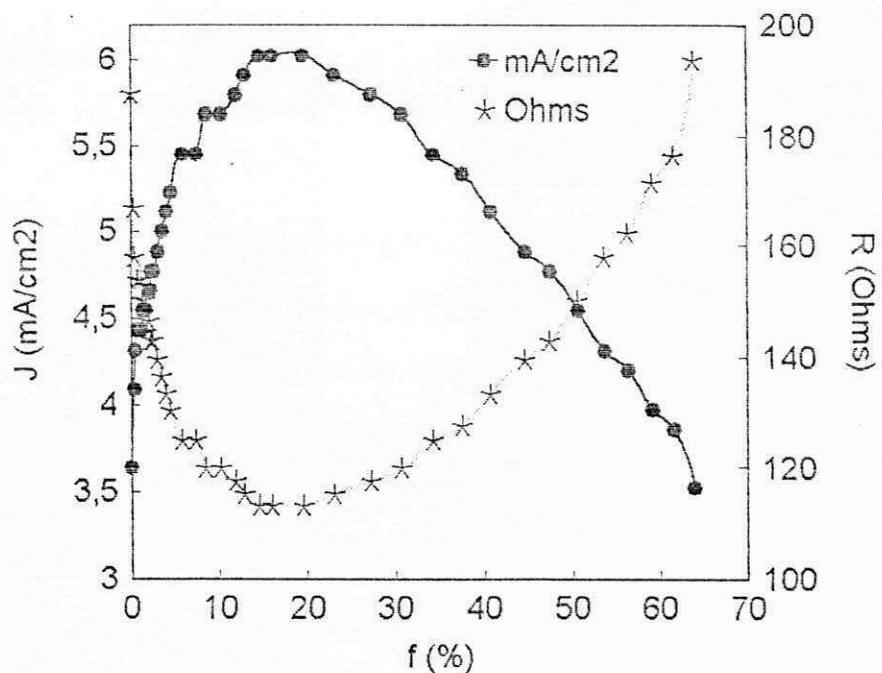


Figura 4.35 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3524 \text{ p.p.m.}$

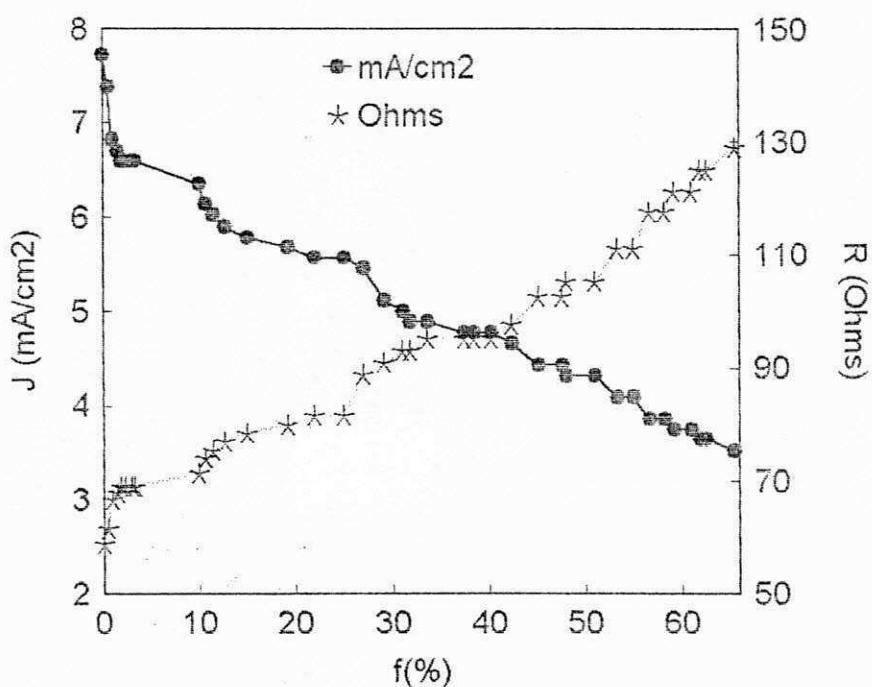


Figura 4.36 - Densidade de corrente e resistência ohmica em função da taxa de extração, sob as seguintes condições: $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 60 \text{ Volts}$ e $\text{Co} = 3607 \text{ p.p.m.}$

4.4 - Estudo comparativo do consumo de energia

O consumo de energia (E -Wh) foi estudado com auxílio da Equação 2.14, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.22 a 4.24 (Apêndice 1) para um potencial elétrico de 40 e 60 volts. O consumo de energia é diretamente proporcional a variação da corrente elétrica, a qual representa a taxa do transporte iônico durante a eletrodiálise. O consumo de energia também depende da vazão e do potencial elétrico (STRATHMANN, 1992).

As Figuras 4.37 a 4.39 representam o consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 volts e as Figuras 4.40 a 4.41 são referentes ao potencial elétrico de 60 volts, os dados estão representados pelas Tabelas 4.22 a 4.24 (Apêndice 1).

Analizando o consumo de energia para os dois potenciais elétricos, nota-se que os perfis das curvas são semelhantes. Para a maioria dos casos o consumo de energia aumentou em função da concentração inicial de sais no soro do leite. Este comportamento depende de vários parâmetros do tipo concentração iônica, teor de sólidos dissolvidos no soro, potencial elétrico, fluxo hidrodinâmico no interior do reator. A temperatura do meio apresenta-se como um parâmetro importante durante a eletrodiálise, e que uma vez não estabilizada pode influenciar nas propriedades físico-químicas do soro do leite. Tomando como base este raciocínio, pode-se explicar porque em alguns casos o consumo de energia para concentrações baixas de sais dissolvidos apresentaram valores superiores aquelas de concentrações altas. A Tabela 4.25 (Apêndice 1) apresenta a variação da temperatura e o consumo de energia final para os potenciais elétricos de 40 e 60 volts, obtidos através da Equação 2.14. Analisando a variação de temperatura desde o estado inicial e final de cada batelada e o efeito desta variação com respeito ao consumo de energia para os dois potenciais estudados, observa-se o seguinte; não existe uma forma definida para todos os casos, em alguns o consumo de energia aumenta para baixa concentrações de sais quando comparado com o consumo de energia para concentrações mais elevadas. Mas foi observado que entre

uma concentração e outra o efeito de temperatura e o potencial elétrico foram fatores predominantes para o aumento e/ou decréscimo do consumo de energia. Obviamente existem outros que devem contribuir para esta variação que são os tipos de incrustações nas superfícies da membranas, como por exemplo, a formação de "scaling e fouling" que são os precipitados de cálcio e magnésio e substâncias orgânicas que podem ocorrer durante a eletrodiálise.

Observou-se que o comportamento das curvas de consumo de energia para os dois potenciais estudados, tendem a permanecer constante após um certo intervalo de tempo. Isso significa que durante a eletrodiálise o transporte iônico através dos compartimentos é baixo sob o efeito de uma alta resistência ohmica. Este fato apresenta um gradiente de concentração entre os compartimentos concentrado e diluído praticamente constante, ou seja a partir deste instante a densidade de corrente tende a diminuir (FRANÇA, 1996).

O consumo de energia (E -kWh/m³) também foi estudado através das Equação 2.16, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.26 (Apêndice 1) objetivo de obter um consumo de energia operacional mais real, achou-se por bem determinar a média logarítmica da corrente lida durante o processo. O consumo médio de energia para um potencial de 60 volts foi de 0,21 kWh/m³, apresentando uma taxa média de sais extraídos na ordem de 66%, e para o potencial elétrico de 40 volts a taxa de extração foi de 68%, apresentando um consumo médio de energia de 0,09 kWh/m³. Observa-se que o consumo de energia para o potencial elétrico de 40 volts foi 2,3 vezes inferior ao de 60 volts. Isso demonstra que o potencial de 40 volts se mostrou mais adequado para a dessalinização do soro do leite sob as condições expostas no sistema. Esses dados de consumo de energia obtidos, demonstram que a concentração inicial de sais no soro do leite apresenta-se como uma variável que depende do tipo de leite processado no dia da coleta. A concentração protéica do leite depente de vários fatores como: alimentação do gado, transporte do leite, idade média do animal, tipo de solo, condições climáticas, etc.

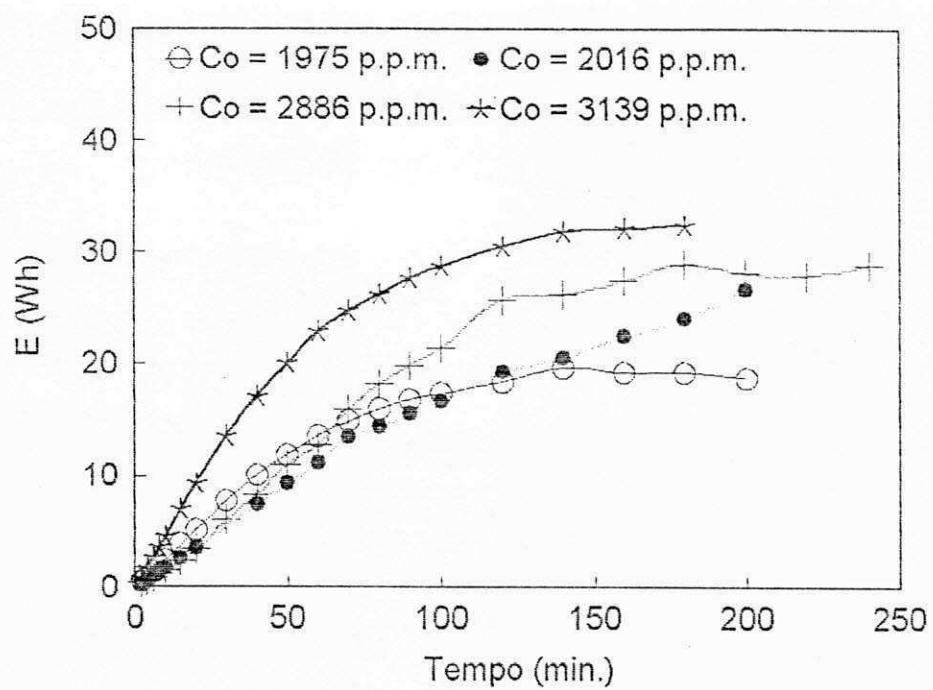


Figura 4.37 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e $Q = 100 \text{ l/h}$.

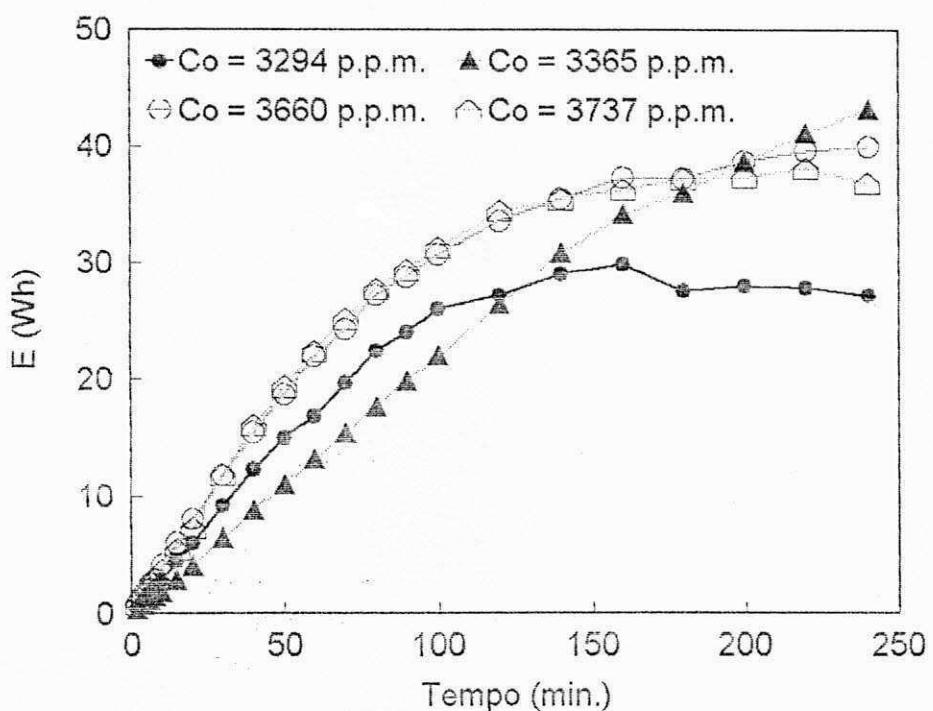


Figura 4.38 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e $Q = 100 \text{ l/h}$.

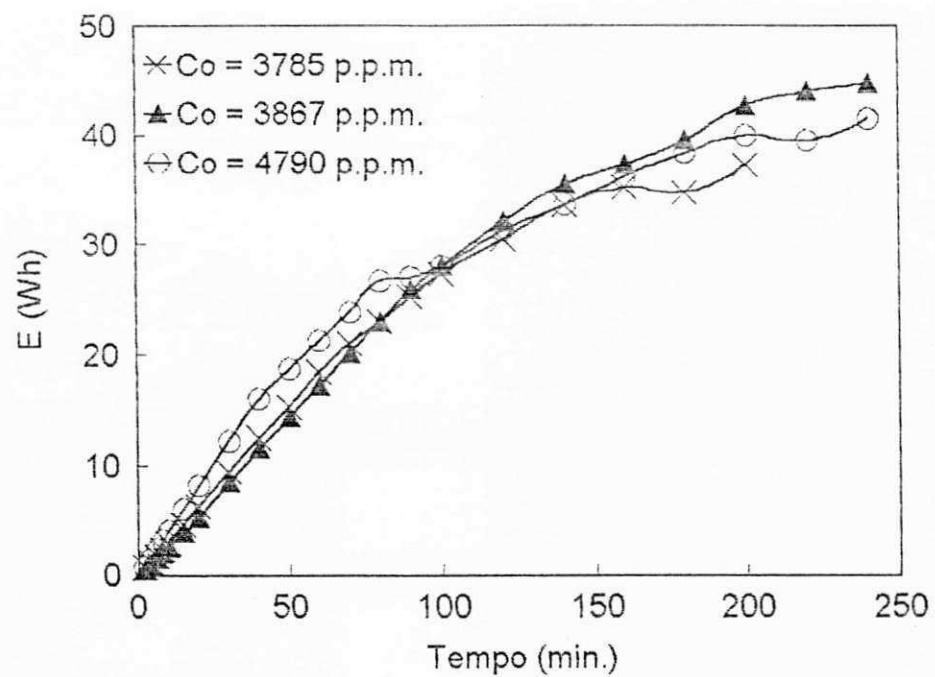


Figura 4.39 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 40 Volts e $Q = 100$ l/h.

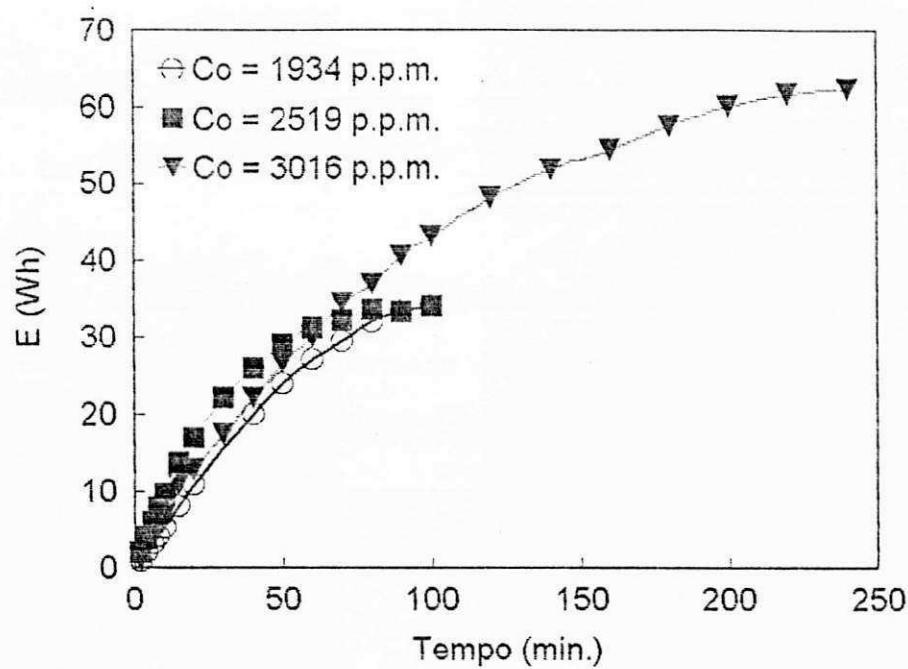


Figura 4.40 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 60 Volts e $Q = 100 \text{ l/h}$.

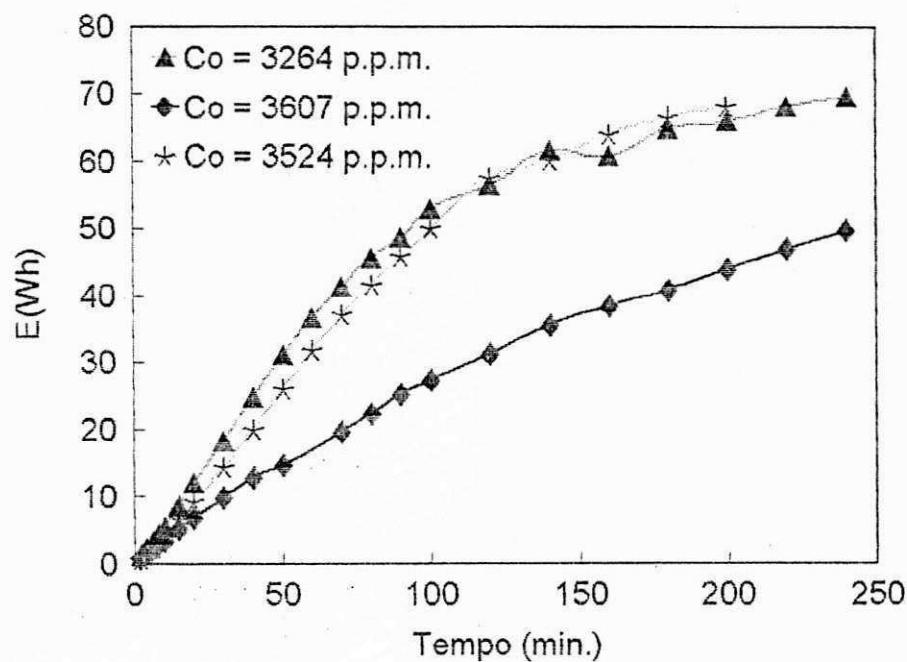


Figura 4.41 - Consumo de energia em função do tempo para um potencial elétrico de 60 Volts e $Q = 100 \text{ l/h}$.

4.5 - Análise das propriedades físico-químicas

4.5.1 - Densidade e viscosidade

As propriedades físicas determinadas antes e após cada batelada foram as seguintes: densidade e viscosidade. Os métodos de determinação destes parâmetros físicos se encontram no Apêndice 2. A Figura 4.42 representada pela Tabela 4.27 (Apêndice 1), apresenta o comportamento da variação da densidade em função da concentração inicial de sais no soro do leite. Sabe-se que a constituição do soro do leite é formada por vários elementos de pesos moleculares distintos dispersos em um meio aquoso, onde o maior volume é constituído pela a água, formando assim um tipo de emulsão por aglomerados protéicos e gordura. Em função desta característica os valores obtidos para densidade dentro da faixa de concentração expostas na Tabela 4.27 foram muito próximas um do outro, aproximando-se da densidade da água a 25 °C.

A Figura 4.43 representada pela Tabela 4.28 (Apêndice 1), mostra o comportamento da viscosidade antes e após a eletrodiálise realizadas a um potencial elétrico de 40 e 60 volts, observou-se o mesmo comportamento apresentado para densidade, mostrando que as variações da viscosidade não foram significativas. O potencial elétrico de 60 volts em relação ao de 40 volts após a dessalinização, apresentou-se mais predominante. Esse fato demonstra que a taxa de transferência iônica a 60 volts foi mais rápida. O fato da variação da viscosidade em função da concentração não variar significativamente, deve-se considerar que durante a eletrodiálise ocorre somente em termos de transferência de massa o transporte dos íons presentes no soro do leite, e a concentração das outras espécies presentes como, albumina, lactose e outros, permanecem no meio, as quais regem a viscosidade real da solução.

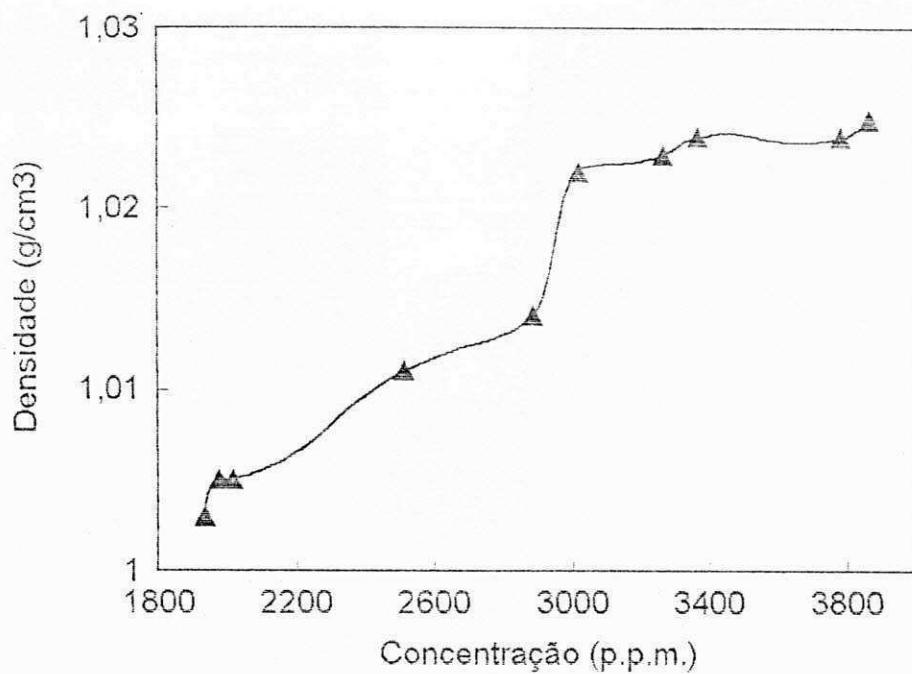


Figura 4.42 - Densidade inicial em função da concentração inicial de sais no soro do leite a 25 °C.

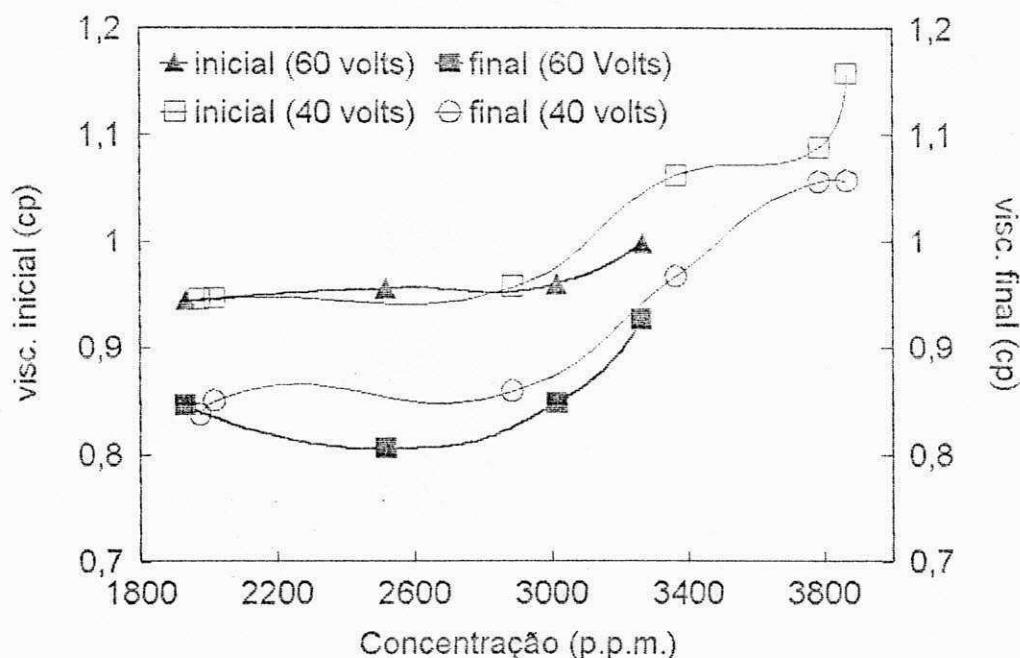


Figura 4.43 - Viscosidade antes e após a eletrodiálise em função da concentração inicial de sais no soro do leite, para 40 e 60 volts.

4.5.2 - Análise físico-química do soro do leite

A Tabela 4.29 (Apêndice 1) apresenta os resultados das análises físico-química antes e após a dessalinização para uma concentração inicial de sais no soro do leite de 3660 (amostra 01) e 3867 (amostra 02) p.p.m., sob um potencial elétrico de 40 volts. As análises estão representadas no Apêndice 3.

Os dados na Tabela 4.29 (Apêndice 1) apresentam a performance do reator eletrodialítico para a dessalinização do soro do leite. Observa-se que a concentração de cálcio em forma de bicarbonato para ambas amostras são superiores as demais. Verifica-se uma redução dos íons Na^+ e Cl^- e ainda um decréscimo significativo na concentração dos demais íons, como Ca^{++} e Mg^{++} , que são elementos responsáveis pela produção de incrustamentos na superfície das membranas (LACEY & LOEB, 1972). A média da taxa de extração para a amostra 01 foi de 78,4% e 74,8% para a amostra 02. Em função do exposto acima a taxa de extração para cada íon presente poderia apresentar valores superiores, uma vez que fosse levado em consideração a concentração iônica que ficou impregnada nas superfícies das membranas após o processo de dessalinização. Para isso seria necessário desmontar o reator e lavar as membranas de forma que os substratos também fossem analisados com o objetivo de adicionar na análise físico-química a taxa das concentrações dos íons que ficaram impregnados nas superfícies das membranas. Esse tipo de estudo leva a determinar o tempo de vida média da membrana (BLEHA, et alii, 1992).

Quando ocorre um acúmulo de concentração na superfície da membrana, a densidade de corrente diminui e a resistência ohmica do meio aumenta e consequentemente o transporte iônico através das membranas diminui. Uma alternativa para minimizar este efeito e proteger as membranas, seria após cada batelada alimentar o reator com água destilada e aplicar um potencial inverso (polaridade reversa) de forma que os co-íons fossem expulsos das superfícies das membranas (LACEY & LOEB, 1972).

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos com o reator eletrodialítico para fins de dessalinização do soro do leite via eletrodiálise, concluiu-se que:

1. O reator constituído de duas membranas aniônicas e duas catiônicas formando um compartimento diluído e dois concentrados, contribuíram para o aumento da densidade de corrente nos primeiros minutos da eletrodiálise e consequentemente reduzindo a concentração iônica no compartimento diluído.
2. Os potenciais elétricos de 40 e 60 volts apresentaram os melhores resultados em termos de taxa de extração, e durante o processo foi observado que as taxas de dessalinização diminuíram para certos intervalos de tempo.
3. O aumento de temperatura durante a eletrodiálise, mostrou-se como um fator que em função do potencial elétrico aplicado, pode ter contribuído na variação da taxa de concentração iônica durante o processo e de certa forma ajudado na mobilidade iônica durante a eletrodiálise.
4. A variação da densidade de corrente e a resistência ohmica estão relacionados com a concentração iônica do soro do leite e o potencial elétrico, que são parâmetros predominantes para formação de regiões de concentrações de íons "estagnados" na camada limite da membrana.
5. A adversidade da composição das amostras do soro do leite, mostrou-se como um parâmetro importante que pode influenciar na variação da densidade de corrente e no fluxo iônico através das membranas.
6. A concentração iônica do soro do leite e a variação de temperatura durante a eletrodiálise, contribuíram para a variação do consumo de energia. Os resultados demonstram que o consumo de energia foi maior para o potencial de 60 volts estudados pelas Equações 2.14 e 2.16.

7. Os dados físico-químicos das análises realizadas no soro do leite antes e após a eletrodiálise foram satisfatórios, apresentando taxas de extração superiores a 74%. Isso significa que a composição remanescente após a dessalinização pode ser utilizada para fins alimentícios.

CAPÍTULO VI

PERSPECTIVAS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, pode-se apresentar as seguintes sugestões:

1. Estudar a dessalinização do soro do leite utilizando um maior número de membranas com temperatura constante a 25°C, para vazões diferentes.
2. Determinar a concentração iônica dos afluentes e efluentes, e seus potenciais hidrogeniônicos durante a eletrodiálise.
3. Através dos resultados obtidos a partir do item 2 e as análise das concentrações protéicas de cada amostra, pode-se obter através de um balanço de massa as perdas durante o processo.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALAIS, C. Ciéncia de la leche: principios de técnica lechera. 4ed. Barcelona: Reverté, 1985. 873 p.
2. AMUNDSON, C. H. , WATANAWANICHAKORN, S. & HILL JR., C. G. production enriched protein fractions of beta - Lactoglobulin and alfa - Lactalbumin from cheese whey. Journal of Food Processing and Preservation, Connecticut, v. 6, p. 55 - 71, 1982.
3. ANON, S. Good silage made with acid whey. Journal Dairy Science. v. 45, n. 11, p. 803, 1983.
4. APPLEGATE, L. Electrodialysis. Chemical Engineering. 21(12), 77 - 88, junho, 1984.
5. AQUARONE, E. Alimentos e Bebidas produzidas por fermentação. V.5, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1983.
6. AQUINO, F.T.M. Produção de queijo de coalho no Estado da Paraíba: Acompanhamento das características físico-químicas do processamento. Dissertação de Mestrado. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba, 1983.
7. ARNDT, E. A. & WHELING, R. L. Development of hydrolyzed and hydrolyzed isomerized syrups from cheese whey ultrafiltration permeate and their utilization in ice cream. Journal of Food Science, Chicago, v. 54, n. 4, p. 880 - 884, 1989.

8. BARALLE, S. B. & BORZANI, W. Preferential utilization of glucose during batch fermentation of whey by *Lactobacillus bulgaricus*. *Revista de Microbiologia*. São Paulo, v. 18, n. 2, p. 151 - 155, 1987.
9. BEHMER, M.L.A. *Tecnologia do leite: leite, queijo, manteiga, caseína, iogurte, sorvetes, e instalações: produção, industrialização, análise*. 13ed. revisada e atualizada. São Paulo: Nobel, p. 19 - 21, 1984.
10. BEHMER, M.L.A. *Almanaque Agrícola Chácara e Quintais*. São Paulo, p. 103 - 104, 1963.
11. BLEHA, M., TISHCHENKO, G., SUMBEROVÁ, V. & KUDELA, V. Characteristic of the Critical State of Membranes in ED-Desalination of Milk Whey. *Desalination*. Elsevier Science Publishers B.V. , Amsterdam, 86(1992) 173 - 186.
12. BOOJI, C. J. Use of lactose in the pharmaceutical and chemical industry. *Journal of the Society of Dairy Technology*, n. 38, p. 105 - 109, 1985.
13. CHANDAN, R. C., UESBESAX, M. A. & SAYLOCK, M. J. Utilization of cheese whey permeate in canned beans and plums. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 47, p. 1649 - 1653, 1982.
- 14 . COCA , J., ALVAREZ, R. & ALVAREZ, J. R. Bioseparations with Membranes. EC- Membrane Workshop Brazil, Rio de Janeiro (1992).
15. COQUIN, M. P. Whey for the milk producer: a silage and liquid feed for animals. *Journal Dairy Science*, v. 45, n. 4, p. 242, 1983.

16. COTON, S.G. Whey resources and utilization .Journal of the Society Dairy Technology, v. 38, n. 4, p. 97 - 100, 1985.
17. COWAN, D.A. & BROWN, J.H. Effect of turbulence on limiting current in electrodialysis cells. Industrial and Eng. Chemistry, 51(12): 1445 - 1448, 1959.
18. FARIAS NETO, S.R. Estudo e avaliação de alguns parâmetros de dessalinização a partir de um reator eletrodialítico via eletrodiálise. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, UFPB, 1992.
19. FRANÇA, Kepler B. Estudo comparativo de dois sistemas de escoamentos, tortuoso e linear, para fins de dessalinização via eletrodiálise. Tese para professor titular área de Engenharia Química e Tecnologia Química, UFPB, 1996.
20. FRIEND, B. A. & SHAHANI, K. M. Whey fermentation. New Zealand Journal of Dairy Science and Technology, n. 14, p. 143 - 151, 1979.
21. GARCIA, S. & MARTINS, J. F. P. Utilização do soro de leite na ensilagem de batata - doce. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 42, n. 249, p. 25 - 27, 1987.
22. GUÈRIVIÈRE, J. F. Les levures lactiques cultivées sur lactosérum déprotéiné. La technique laitéri, v. 952, p. 89 - 92, 1981.
23. GUZMÁN, I. V. Obtenção de lactose do soro de queijo. Dissertação de Mestrado. Campinas, Estadual de Campinas, 1979.

24. HOLSINGER, V.H. , POTASI, L.P. & DeVILBISS, E.D. Whey beverages: a review. *Journal of Dairy Science*. Chicago, v. 57, n. 8, p. 849 - 859, 1974.
25. HOWE, E.D. Fundamentals of water desalination. *Environmental Science and Technology Series*, New York, Marcel Dekker, 1974.
26. HUFFMAN, L.M. Effect of heat treatment on the composition of whey protein concentrates. *New Zealand Journal of Dairy Science and Technology*, n. 23, p. 337 - 344, 1988.
27. JULIANO, A. M. M. , PETRUS, J. C. C. & TORRANO, A. D. M. Recuperação por ultrafiltração das proteínas do soro para produção de queijos. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, Juiz de Fora, v. 42, n. 251, p. 3 - 6, 1987.
28. KOSIKOWSKI, F.V. Nutritional beverages from acid whey powder. *Journal Dairy Science*, v. 51, n. 8, p. 1299 - 1301, 1979.
29. LACERDA, T. H. M. , OLIVEIRA, A. J. & CARUSO, J. G. B. Viabilidade do tratamento do soro de queijo com digestão anaeróbica. In: SEMANA DO LATICINISTA, 1991, Juiz de Fora. Resumos de Trabalhos. Juiz de Fora: EPAMIG, 1991. p. 56.
30. LACEY, R.E. Dialysis and Electrodialysis. *Handbook of separation technics for chemical engineers*. New York: McGraw-Hill Book Company, p 1449 - 1465 (1979).

31. LACEY, R.E. & LOEB, S. Industrial processing with Membranes. Wiley-Interscience, New York, p. 57 - 60, (1972).
32. MADRID, A. V. Tratamiento previo del lactosuero antes de su industrializacion. Revista española de lecheria, v. 113, p. 151 - 160, 1979.
33. MADRID, A. V. Modernas técnicas de aprovechamiento del lactosuero. Madrid: Madrid, p. 14 - 27, 1981.
34. MARWAHA, S. S. & KENNEDY, J. F. Review: Whey - pollution problem and potential utilization: International Journal of Food Science and Technology, V. 23, p . 323 - 336, 1988.
35. McDONDUGH, F. E. Whey Solids Utilization and Salvage Systems. Cultured Dairy in Products Journal, p. 8 - 11, 1977.
36. MANSON, E .A. & KIRKHAM, T. A. Design of electrodialysis equipment. Chemical Eng. Process, Symposium Series, 55(24) : 173 - 189, 1959.
37. MELLO, E .M. Obtenção e caracterização de concentrado protéico de soro de queijo por ultrafiltração. Dissertação de Mestrado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1989.
38. MELLO, E. M. , ROIG, S. M. & MORAES, M. A. C. Uso do soro de queijo por ultrafiltração em pudim de chocolate. Revista do Instituto de Lacticínios Candido Tostes, Juiz de Fora, v. 42, n. 249, p. 42 - 45, 1987.
39. METTLER, A .E. Utilization of whey by-products for infant feeding. Journal of the Society of Dairy Technology, v. 33, n. 2, p. 67 - 72, 1980.

40. PEARCE, R. J. Thermal separation of alfa - lactoglobulin and beta - lactoalbumin in bovine cheddar cheese whey. *The Australian Journal of Dairy Technology*, p. 144 - 148, 1983.
41. PEREIRA, A. J. G. Ácido láctico: Uma alternativa viável para o aproveitamento do soro de queijo. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, Juiz de Fora, v. 45, n. 267 - 272, p. 91 - 95, 1990.
42. PERRY, R. H. & GREEN, D. W. *Chemical Engineer's Handbook*, 6^a ed., sec. 17: 36 - 45, 1984.
43. PRENDERGAST, K. Whey drinks - technology processing and marketing. *Journal of the Society of Dairy Technology*, v. 38, n. 4, p.103 - 105, 1985.
44. RIBEIRO, E. P. , GANDARA, A. & RAPACI, M. Obtenção de concentrado protéico e subproduto de soro de leite e suas aplicações em alimentos. In: *SEMANA DO LATICINISTA*, 1991, Juiz de Fora. Resumos de Trabalhos. Juiz de Fora: EPAMIG, 1991. 63p. p. 10.
45. SHAFFER, L. H. & MINTZ, M. S. Principle of dessalination. New York: Ed. Spiegler, p. 199 - 289, 1966.
46. SHAH, P. M. & SCAMEHORN, J. F. Use of electrodialysis to deionize acidic waste water streams. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26: 269 - 277, 1987.
47. STRATHMANN, H. Membrane Separation process, *Journal of Membrane Science*, v. 9, p. 121 - 189, 1992.

48. TRAVASSOS, A .E. R. Utilização do soro de queijo de coalho na fermentação natural de hortaliças. Dissertação de Mestrado. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba, 1991.
49. TORRES, C. C. , BRANDÃO, S. C. C. & PINHEIRO, A. J. R. Desenvolvimento de bebidas de baixo custo com soro de queijo. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 44, n. 261 - 266, p. 71 - 84, 1989.
50. VIEIRA, S. D. A. & NEVES, B. S. Elaboração de um produto lácteo, enriquecido destinado a alimentação humana. Revista do Instituto de Lacticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 44, n. 261 - 266, p. 65 - 69, 1989.
51. VILAR, E.O. Avaliação de um reator eletrodialítico para dessalinização de águas salobras. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, UFPB, 1989.
52. WALSTRA, P. & JENNES, R. Química y física lactológica. Zaragoza: Acribia, 1987, 423p.
53. WOLFSCHOON, A. F. & FURTADO, M. M. Composição média dos soros de queijo prato e minas. Revista do Instituto de Lacticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 32, n. 194, p. 21 - 23, 1977.
54. ZALL, R. R. Trends in whey fractionation and utilization, a global perspective. Journal Dairy Science, v. 67, p. 2621- 2629, 1984.

APÊNDICE 1

TABELAS

Tabela 4.1 - Representação adimensional da variação de concentração de sais no soro do leite (C/Co) e da temperatura em função do tempo, para diferentes potenciais elétricos e Q = 100 l/h.

Tempo (min.)	V = 20 Volts		V = 40 Volts		V = 60 Volts	
	Concentração inicial (p.p.m.)					
	C/C ₀	T (°C)	C/C ₀	T (°C)	C/C ₀	T (°C)
0	1,000	22	1,000	19	1,000	28
1	1,000	22	1,000	19	0,996	28
2	0,998	22	0,998	19	0,993	28
3	0,998	22	0,998	19	0,987	28
4	0,998	22	0,998	20	0,984	28
5	0,995	22	0,998	20	0,975	28
6	0,993	22	0,998	20	0,969	28
7	0,991	22	0,998	20	0,958	28
8	0,989	22	0,996	20	0,949	29
9	0,987	22	0,996	21	0,938	29
10	0,986	23	0,996	21	0,924	29
12	0,986	23	0,993	21	-	-
15	0,977	23	0,987	22	0,880	30
17	0,973	23	0,984	22	-	-
20	0,969	23	0,977	22	0,848	30
25	0,961	23	0,966	23	0,822	30
30	0,952	24	0,952	23	0,793	31
35	0,941	24	0,934	23	0,764	32
40	0,937	24	0,917	24	0,743	32
45	0,934	25	0,898	24	0,719	32
50	0,928	25	0,878	25	0,692	33
55	0,921	25	0,847	25	0,668	32
60	0,905	25	0,835	25	0,643	33
70	0,891	25	0,795	26	0,590	34
80	0,856	26	0,756	27	0,547	34
90	0,838	26	0,713	27	0,502	34
100	0,819	26	0,668	27	0,473	34
110	0,804	26	0,621	28	0,438	34
120	0,788	26	0,579	28	0,409	34
130	0,777	27	0,544	28	0,386	34
140	0,761	27	0,508	28	0,362	34
150	0,745	27	0,472	29	0,340	34
160	0,729	27	0,438	29	0,306	34
170	0,710	27	0,406	29	0,289	34
180	0,693	27	0,382	29	0,277	34
190	0,675	27	0,355	29	0,263	34
200	0,661	27	0,330	29	0,250	34
210	0,643	28	0,309	29	0,240	34
220	0,628	28	0,287	29	0,232	33
230	0,610	28	0,268	29	0,255	33
240	0,603	28	0,249	29	0,219	33

Tabela 4.3 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 1975 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de 1,005 g/cm³; $\eta = 0,945$ ep a T = 24 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,30	133,33	3,41	0,0	24
1	0,997	0,35	114,29	3,98	0,3	24
2	0,991	0,35	114,29	3,98	0,9	24
3	0,988	0,35	114,29	3,98	1,2	24
4	0,988	0,35	114,29	3,98	1,2	24
5	0,982	0,35	114,29	3,98	1,8	24
6	0,979	0,36	111,11	4,09	2,1	25
7	0,976	0,36	111,11	4,09	2,4	25
8	0,970	0,37	108,11	4,20	3,0	25
9	0,967	0,37	108,11	4,20	3,3	25
10	0,964	0,37	108,11	4,20	3,6	25
12	0,955	0,37	108,11	4,20	4,5	25
15	0,943	0,39	102,56	4,43	5,7	26
17	0,934	0,39	102,56	4,43	6,6	26
20	0,919	0,39	102,56	4,43	8,1	26
25	0,895	0,39	102,56	4,43	10,5	26
30	0,868	0,39	102,56	4,43	13,2	27
35	0,841	0,38	105,26	4,32	15,9	27
40	0,820	0,38	105,26	4,32	18,0	28
45	0,790	0,37	108,11	4,20	21,0	28
50	0,769	0,36	111,11	4,09	23,1	28
55	0,742	0,35	114,29	3,98	25,8	28
60	0,719	0,34	117,65	3,86	28,1	29
70	0,665	0,32	125,00	3,64	33,5	29
80	0,619	0,30	133,33	3,41	38,0	30
90	0,575	0,28	142,86	3,18	42,5	30
100	0,536	0,26	153,85	2,95	46,4	30
110	0,497	0,25	160,00	2,84	50,3	30
120	0,461	0,23	173,91	2,61	53,9	31
130	0,428	0,22	181,82	2,50	57,2	31
140	0,395	0,21	190,48	2,39	60,5	31
150	0,359	0,19	210,53	2,16	64,1	31
160	0,338	0,18	222,22	2,05	66,2	31
170	0,311	0,17	235,29	1,93	68,9	31
180	0,287	0,16	250,00	1,82	71,3	31
190	0,266	0,15	266,67	1,70	73,4	31
200	0,245	0,14	285,71	1,59	75,5	32
210	0,227	0,14	285,71	1,59	77,3	32

Tabela 4.4 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 2016 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,82; Densidade de 1,005 g/cm³; $\eta = 0,946$ cp a T = 24 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,24	166,67	2,74	0,0	24
2	0,997	0,25	160,00	2,84	0,3	24
4	0,997	0,25	160,00	2,84	0,3	24
6	0,995	0,25	160,00	2,84	0,6	25
8	0,988	0,25	160,00	2,84	1,2	25
10	0,988	0,26	153,85	2,96	1,2	25
12	0,977	0,26	153,85	2,96	2,3	25
15	0,962	0,26	153,85	2,96	3,8	25
20	0,944	0,27	148,15	3,07	5,6	25
28	0,912	0,27	148,15	3,07	8,8	26
35	0,903	0,28	142,86	3,18	9,7	26
40	0,891	0,28	142,86	3,18	10,9	26
45	0,879	0,28	142,86	3,18	12,0	27
50	0,865	0,28	142,86	3,18	13,5	27
55	0,850	0,28	142,86	3,18	15,0	27
60	0,812	0,28	142,86	3,18	18,8	28
65	0,803	0,28	142,86	3,18	19,6	28
70	0,789	0,27	148,15	3,07	21,1	28
75	0,774	0,27	148,15	3,07	22,6	28
80	0,756	0,27	148,15	3,07	24,3	28
85	0,745	0,27	148,15	3,07	25,5	28
90	0,739	0,26	153,85	2,96	26,1	29
95	0,724	0,26	160,00	2,96	27,6	29
100	0,709	0,25	160,00	2,84	29,0	29
110	0,686	0,25	166,67	2,84	31,4	29
120	0,663	0,24	173,91	2,73	33,7	30
130	0,630	0,23	181,82	2,61	37,0	30
140	0,613	0,22	181,82	2,50	38,7	30
150	0,589	0,22	190,48	2,50	41,1	30
160	0,572	0,21	190,48	2,39	42,8	30
170	0,548	0,21	200,00	2,39	45,2	31
180	0,513	0,20	200,00	2,27	48,7	31
190	0,496	0,20	200,00	2,27	50,4	31
200	0,478	0,20	200,00	2,27	52,2	31
210	0,466	0,20	200,00	2,27	53,4	31

Tabela 4.5 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 2886 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,32; Densidade de 1,014 g/cm³; $\eta = 0,957$ cp a T = 22 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,18	222,22	2,05	0,0	22
2	0,998	0,20	200,00	2,27	0,2	23
4	0,998	0,20	200,00	2,27	0,2	23
6	0,996	0,21	190,48	2,39	0,5	23
8	0,994	0,22	181,82	2,50	0,7	23
10	0,989	0,22	181,82	2,50	1,0	23
12	0,988	0,23	173,91	2,61	1,2	23
15	0,984	0,24	166,67	2,73	1,6	23
17	0,978	0,25	160,00	2,84	2,3	24
20	0,973	0,26	153,85	2,96	2,7	24
25	0,963	0,29	137,93	3,30	2,7	24
30	0,955	0,30	133,33	3,41	3,7	25
35	0,941	0,30	133,33	3,41	5,9	25
40	0,928	0,31	129,03	3,52	7,2	25
45	0,912	0,32	125,00	3,64	8,8	25
50	0,896	0,33	121,21	3,75	10,5	26
55	0,875	0,33	121,21	3,75	12,5	26
60	0,859	0,32	125,00	3,64	14,1	26
70	0,822	0,34	117,65	3,86	17,8	27
80	0,779	0,34	117,65	3,86	22,1	27
90	0,736	0,33	121,21	3,75	26,4	27
100	0,709	0,32	125,00	3,64	29,1	27
110	0,689	0,32	125,00	3,64	31,2	27
120	0,649	0,32	125,00	3,64	35,0	28
130	0,605	0,30	133,33	3,41	39,6	28
140	0,568	0,28	142,86	3,18	43,2	28
150	0,527	0,27	148,15	3,07	47,3	29
160	0,489	0,26	153,85	2,96	51,0	29
170	0,461	0,25	160,00	2,84	54,0	29
180	0,428	0,24	166,67	2,73	57,2	29
190	0,402	0,22	181,82	2,50	59,8	29
200	0,367	0,21	190,48	2,39	63,3	29
210	0,338	0,20	190,48	2,27	66,2	29
220	0,319	0,19	210,53	2,16	68,0	29
230	0,301	0,18	222,22	2,05	69,9	29
240	0,277	0,18	222,22	2,05	72,3	29

Tabela 4.6 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3139 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de 1,022 g/cm³; η = 0,987 cp a T = 21 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,58	68,97	6,59	0,0	21
1	1,000	0,59	67,80	6,70	0,0	21
2	1,000	0,60	66,67	6,82	0,0	22
3	1,000	0,61	65,57	6,82	0,0	22
4	1,000	0,62	64,52	7,05	0,0	22
5	0,998	0,63	63,49	7,16	0,2	23
6	0,998	0,65	61,54	7,39	0,2	23
7	0,998	0,66	60,61	7,50	0,2	23
8	0,998	0,67	59,70	7,61	0,2	24
9	0,996	0,68	58,82	7,73	0,4	24
10	0,994	0,68	58,82	7,73	0,6	24
12	0,990	0,69	57,97	7,84	0,9	24
15	0,983	0,70	57,14	7,95	1,7	24
17	0,979	0,70	57,14	7,95	2,1	25
20	0,968	0,70	57,14	7,95	3,2	25
25	0,949	0,70	57,14	7,95	5,1	26
30	0,929	0,68	58,82	7,73	7,1	27
35	0,904	0,66	60,61	7,50	9,6	27
40	0,883	0,64	62,50	7,27	11,7	28
45	0,861	0,62	64,52	7,04	13,9	28
50	0,844	0,60	66,67	6,82	15,6	29
55	0,819	0,58	68,97	6,59	18,1	29
60	0,797	0,57	70,18	6,48	20,3	29
70	0,753	0,53	75,47	6,02	24,7	30
80	0,712	0,49	81,63	5,57	28,8	30
90	0,669	0,46	86,96	5,23	33,1	31
100	0,631	0,43	93,02	4,89	36,9	31
110	0,599	0,40	100,00	4,55	40,1	31
120	0,565	0,38	105,26	4,32	43,5	31
130	0,533	0,36	111,11	4,09	46,7	31
140	0,505	0,34	117,65	3,86	49,5	31
150	0,473	0,32	125,00	3,64	52,7	31
160	0,448	0,30	133,33	3,41	55,2	31
170	0,422	0,28	142,86	3,18	57,8	31
180	0,401	0,27	148,15	3,07	59,9	32

Tabela 4.7 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3294 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,32; Densidade de 1,022 g/cm³.

Tempo (min.)	(C/C ₀)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,44	90,91	5,00	0,0	19
1	1,000	0,42	95,24	4,77	0,0	19
2	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	19
3	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	19
4	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	20
5	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	20
6	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	20
7	0,998	0,41	97,56	4,66	0,2	20
8	0,996	0,41	97,56	4,66	0,4	20
9	0,996	0,42	95,24	4,77	0,4	21
10	0,996	0,42	95,24	4,77	0,4	21
12	0,993	0,43	93,02	4,89	0,7	21
15	0,987	0,44	90,91	5,00	1,3	22
17	0,984	0,44	90,91	5,00	1,6	22
20	0,977	0,45	88,89	5,11	2,3	22
25	0,966	0,46	86,96	5,23	3,4	23
30	0,952	0,46	86,96	5,23	4,9	23
35	0,934	0,46	86,96	5,23	6,6	23
40	0,917	0,46	86,96	5,23	8,4	24
45	0,898	0,45	88,89	5,11	10,2	24
50	0,878	0,45	88,89	5,11	12,2	25
55	0,847	0,42	95,24	4,77	15,3	25
60	0,835	0,42	95,24	4,77	16,5	25
70	0,795	0,42	95,24	4,77	20,5	26
80	0,756	0,42	95,24	4,77	24,4	27
90	0,713	0,40	100,00	4,55	28,7	27
100	0,668	0,39	102,56	4,43	33,2	27
110	0,621	0,36	111,11	4,09	37,9	28
120	0,579	0,34	117,65	3,86	42,0	28
130	0,544	0,33	121,21	3,75	45,6	28
140	0,508	0,31	129,03	3,52	49,2	28
150	0,472	0,29	137,93	3,29	52,8	29
160	0,438	0,28	142,86	3,18	56,2	29
170	0,406	0,25	160,00	2,84	59,4	29
180	0,382	0,23	173,91	2,61	61,8	29
190	0,355	0,22	181,82	2,50	64,5	29
200	0,330	0,21	190,48	2,39	67,0	29
210	0,309	0,20	200,00	2,27	69,1	29
220	0,287	0,19	210,53	2,16	71,3	29
230	0,268	0,18	222,22	2,05	73,3	29
240	0,249	0,17	235,29	1,93	75,1	29

Tabela 4.8 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3365 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,12; Densidade de 1,024 g/cm³; η = 1,062 cp a T = 21 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,16	250,00	1,82	0,0	21
1	1,000	0,23	173,91	2,61	0,0	21
2	0,998	0,24	166,67	2,73	0,2	21
3	0,998	0,24	166,67	2,73	0,2	21
4	0,998	0,25	160,00	2,84	0,2	21
5	0,996	0,25	160,00	2,84	0,4	21
6	0,995	0,26	153,85	2,96	0,5	21
7	0,995	0,26	153,85	2,96	0,5	21
8	0,992	0,26	153,85	2,96	0,7	21
9	0,991	0,27	148,15	3,07	0,9	21
10	0,989	0,27	148,15	3,07	1,1	21
12	0,988	0,28	142,86	3,18	1,2	21
15	0,981	0,28	142,86	3,18	1,9	22
17	0,972	0,29	137,93	3,29	2,8	22
20	0,967	0,30	133,33	3,41	3,3	22
25	0,956	0,31	129,03	3,52	4,4	22
30	0,947	0,32	125,00	3,64	5,3	22
35	0,937	0,33	121,21	3,75	6,3	22
40	0,914	0,33	121,21	3,75	8,6	23
45	0,895	0,33	121,21	3,75	10,5	23
50	0,877	0,33	121,21	3,75	12,3	23
55	0,863	0,33	121,21	3,75	13,7	23
60	0,850	0,33	121,21	3,75	14,9	23
70	0,824	0,33	121,21	3,75	17,6	23
80	0,801	0,33	121,21	3,75	19,9	24
90	0,782	0,33	121,21	3,75	21,8	24
100	0,757	0,33	121,21	3,75	24,3	24
110	0,731	0,33	121,21	3,75	26,9	25
120	0,703	0,33	121,21	3,75	29,7	25
130	0,675	0,33	121,21	3,75	32,5	25
140	0,654	0,33	121,21	3,75	34,6	25
150	0,626	0,32	125,00	3,64	37,4	26
160	0,599	0,32	125,00	3,64	40,1	26
170	0,583	0,30	133,33	3,41	41,7	26
180	0,562	0,30	133,33	3,41	43,8	26
190	0,539	0,30	133,33	3,41	46,0	26
200	0,524	0,29	137,93	3,29	47,6	26
210	0,508	0,29	137,93	3,29	49,2	26
220	0,496	0,28	142,86	3,18	50,4	26
230	0,474	0,28	142,86	3,18	52,6	26
240	0,455	0,27	148,15	3,07	54,5	27

Tabela 4.9 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3660 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,02.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,73	54,79	8,30	0,00	25
1	0,995	0,67	59,70	7,61	0,48	25
2	0,984	0,64	62,50	7,27	1,62	25
3	0,980	0,63	63,49	7,16	1,94	25
4	0,974	0,63	63,49	7,16	2,58	25
5	0,969	0,62	64,52	7,05	3,07	25
6	0,964	0,62	64,52	7,05	3,55	25
7	0,959	0,62	64,52	7,05	4,04	25
8	0,953	0,62	64,52	7,05	4,68	25
9	0,952	0,62	64,52	7,05	4,85	26
10	0,945	0,61	65,57	6,93	5,50	26
15	0,913	0,60	66,67	6,82	8,72	26
20	0,867	0,60	66,67	6,82	13,25	27
25	0,845	0,60	66,67	6,82	15,50	27
30	0,817	0,59	67,79	6,71	18,26	27
35	0,787	0,58	68,97	6,59	21,33	28
40	0,759	0,58	68,97	6,59	24,07	28
45	0,738	0,57	70,17	6,48	26,17	28
50	0,704	0,56	71,43	6,36	29,56	28
55	0,677	0,55	72,73	6,25	32,31	28
60	0,656	0,55	72,73	6,25	34,41	29
70	0,609	0,52	76,92	5,91	39,10	29
80	0,565	0,51	78,43	5,79	43,46	30
90	0,523	0,48	83,33	5,46	47,66	30
100	0,491	0,46	86,96	5,23	51,00	30
110	0,457	0,44	90,90	5,00	54,28	30
120	0,423	0,42	95,24	4,77	57,68	30
130	0,396	0,40	100,00	4,55	60,42	31
140	0,370	0,38	105,26	4,32	63,00	31
150	0,350	0,36	111,11	4,09	65,00	31
160	0,331	0,35	114,28	3,98	67,00	31
170	0,318	0,32	125,00	3,64	68,17	31
180	0,305	0,31	129,03	3,52	69,47	31
190	0,290	0,30	133,33	3,41	71,00	31
200	0,269	0,29	137,93	3,30	73,00	31
210	0,255	0,28	142,86	3,18	74,50	31
220	0,244	0,27	148,15	3,07	75,61	31
230	0,230	0,26	153,85	2,96	77,00	32
240	0,215	0,25	160,00	2,84	78,52	32

Tabela 4.10 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3737 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,11; Densidade de 1,024 g/cm³.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,72	55,56	8,18	0,0	22
2	0,997	0,62	64,62	7,05	0,4	22
4	0,994	0,61	65,57	6,93	0,6	22
6	0,986	0,55	72,73	6,25	1,4	22
8	0,979	0,54	74,07	6,14	2,1	23
10	0,972	0,54	74,07	6,14	2,9	23
12	0,943	0,54	74,07	6,14	5,7	23
15	0,939	0,54	74,07	6,14	6,0	23
17	0,932	0,54	74,07	6,14	6,8	23
20	0,929	0,54	74,07	6,14	7,1	23
25	0,923	0,60	66,67	6,82	7,8	24
30	0,894	0,59	67,79	6,70	10,6	24
35	0,879	0,62	64,52	7,05	12,0	24
40	0,861	0,60	66,67	6,82	13,9	24
45	0,835	0,58	68,97	6,59	16,5	25
50	0,809	0,58	68,97	6,59	19,2	25
55	0,783	0,57	70,18	6,48	21,7	26
60	0,763	0,56	71,43	6,36	23,7	26
70	0,709	0,54	74,07	6,14	29,1	27
80	0,665	0,52	76,92	5,91	33,5	27
90	0,628	0,49	81,63	5,57	37,2	27
100	0,592	0,47	85,11	5,34	40,8	28
110	0,551	0,45	88,89	5,11	44,9	28
120	0,514	0,43	93,02	4,89	48,6	28
130	0,478	0,40	100,00	4,54	52,2	28
140	0,443	0,38	105,26	4,32	55,7	29
150	0,416	0,36	111,11	4,09	58,4	29
160	0,387	0,34	117,65	3,86	61,2	29
170	0,354	0,32	125,00	3,63	64,6	29
180	0,337	0,31	129,00	3,50	66,3	29
190	0,310	0,29	137,93	3,29	68,9	29
200	0,294	0,28	142,86	3,18	70,6	29
210	0,274	0,27	148,15	3,07	72,6	29
220	0,255	0,26	153,85	2,95	74,5	29
230	0,237	0,24	166,67	2,73	76,3	29
240	0,221	0,23	173,91	2,61	77,9	29

Tabela 4.11 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3785 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; Densidade de 1,024 g/cm³; $\eta = 1,088$ cp a T = 27 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,47	85,11	5,34	0,0	27
1	0,998	0,54	74,07	6,14	0,2	27
2	0,998	0,53	75,47	6,02	0,2	27
3	0,997	0,48	83,33	5,46	0,3	27
4	0,983	0,47	85,11	5,34	1,7	27
5	0,970	0,46	86,96	5,23	3,0	27
6	0,962	0,44	90,91	5,00	3,8	27
7	0,956	0,44	90,91	5,00	4,4	27
8	0,952	0,44	90,91	5,00	4,8	27
9	0,950	0,44	90,91	5,00	5,0	27
10	0,948	0,44	90,91	5,00	5,2	27
12	0,942	0,44	90,91	5,00	5,8	27
15	0,933	0,46	86,96	5,23	6,7	28
17	0,925	0,47	85,11	5,34	7,5	28
20	0,919	0,47	85,11	5,34	8,1	28
25	0,909	0,47	85,11	5,34	9,1	28
30	0,894	0,47	85,11	5,34	10,6	28
35	0,875	0,47	85,11	5,34	12,5	28
40	0,848	0,47	85,11	5,34	15,2	29
45	0,836	0,47	85,11	5,34	16,4	29
50	0,817	0,46	86,96	5,23	18,3	29
55	0,797	0,46	86,96	5,23	20,3	29
60	0,778	0,46	86,96	5,23	22,2	29
70	0,734	0,45	88,89	5,11	26,6	29
80	0,706	0,43	93,02	4,89	29,4	29
90	0,672	0,42	95,24	4,77	32,8	29
100	0,639	0,41	97,56	4,66	36,1	29
110	0,605	0,39	102,56	4,43	39,5	29
120	0,577	0,38	105,26	4,32	42,4	29
130	0,555	0,37	108,11	4,21	44,5	29
140	0,528	0,36	111,11	4,09	47,2	29
150	0,502	0,34	117,65	3,86	50,0	29
160	0,478	0,33	121,21	3,75	52,2	29
170	0,458	0,31	129,03	3,52	54,2	29
180	0,433	0,29	137,93	3,30	56,7	29
190	0,417	0,29	137,93	3,30	58,3	29
200	0,398	0,28	142,86	3,18	60,2	29
210	0,381	0,26	153,85	2,96	62,0	29

Tabela 4.12 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3867 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,20; Densidade de 1,025 g/cm³; $\eta = 1,157$ cp a T = 27 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,34	117,65	3,86	0,00	27
1	0,995	0,36	111,11	4,09	0,40	27
2	0,992	0,37	108,10	4,20	0,70	27
3	0,989	0,37	108,10	4,20	1,00	27
4	0,988	0,37	108,10	4,20	1,22	27
5	0,986	0,37	108,10	4,20	1,43	27
6	0,983	0,37	108,10	4,20	1,74	27
7	0,978	0,37	108,10	4,20	2,16	27
8	0,976	0,37	108,10	4,20	2,45	27
9	0,972	0,37	108,10	4,20	2,75	27
10	0,969	0,37	108,10	4,20	3,06	27
15	0,948	0,38	105,26	4,32	5,20	28
20	0,927	0,39	102,56	4,43	7,34	28
25	0,905	0,40	100,00	4,55	9,48	28
30	0,881	0,42	95,24	4,77	12,00	28
35	0,859	0,42	95,24	4,77	14,07	29
40	0,832	0,43	93,02	4,89	16,82	29
45	0,817	0,43	93,02	4,89	18,35	30
50	0,766	0,43	93,02	4,89	23,40	30
55	0,752	0,43	93,02	4,89	24,77	30
60	0,737	0,43	93,02	4,89	26,30	30
70	0,700	0,43	93,02	4,89	30,00	31
80	0,657	0,43	93,02	4,89	34,25	31
90	0,612	0,43	93,02	4,89	38,84	31
100	0,568	0,42	95,24	4,77	43,12	32
110	0,535	0,42	95,24	4,77	46,48	32
120	0,498	0,40	100,00	4,55	50,16	32
130	0,466	0,39	102,60	4,43	53,40	32
140	0,437	0,38	105,26	4,32	56,30	32
150	0,408	0,37	108,10	4,20	59,20	32
160	0,384	0,35	114,28	3,98	61,60	33
170	0,364	0,35	114,28	3,98	63,60	33
180	0,346	0,33	121,21	3,75	65,40	33
190	0,327	0,32	125,00	3,64	67,30	33
200	0,310	0,32	125,00	3,64	69,00	33
210	0,295	0,31	129,00	3,52	70,50	33
220	0,279	0,30	133,33	3,41	72,00	33
230	0,266	0,29	137,93	3,29	73,40	33
240	0,252	0,28	142,86	3,18	74,80	33

Tabela 4.13 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 4790 p.p.m.; Diferença de potencial de 40 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,86; Densidade de 1,026 g/cm³.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,55	72,73	6,25	0,0	24
1	1,000	0,54	74,07	6,14	0,0	24
2	1,000	0,54	74,07	6,14	0,0	25
3	0,999	0,54	74,07	6,14	0,1	25
4	0,998	0,55	72,73	6,25	0,2	25
5	0,996	0,56	71,43	6,36	0,4	25
6	0,995	0,58	68,97	6,59	0,5	25
7	0,995	0,59	67,79	6,71	0,5	25
8	0,993	0,59	67,79	6,71	0,7	25
9	0,990	0,59	67,79	6,71	1,0	25
10	0,988	0,60	66,67	6,82	1,2	25
12	0,984	0,61	65,57	6,93	1,6	26
15	0,974	0,60	66,67	6,82	2,6	26
17	0,968	0,59	67,79	6,71	3,2	26
20	0,957	0,61	65,57	6,93	4,3	26
25	0,919	0,58	68,97	6,59	8,1	27
30	0,905	0,61	65,57	6,93	9,5	27
35	0,881	0,61	65,57	6,93	11,9	27
40	0,860	0,60	66,67	6,82	13,9	28
45	0,842	0,60	66,67	6,82	15,8	28
50	0,805	0,56	71,43	6,36	19,5	28
55	0,780	0,55	72,73	6,25	22,0	29
60	0,759	0,53	75,47	6,02	24,1	29
70	0,721	0,51	78,43	5,79	27,9	29
80	0,691	0,50	80,00	5,68	30,9	29
90	0,659	0,45	88,89	5,11	34,1	29
100	0,638	0,42	95,24	4,77	36,2	30
110	0,618	0,41	97,56	4,66	38,2	30
120	0,599	0,39	102,56	4,43	40,0	30
130	0,584	0,38	105,26	4,32	41,6	30
140	0,568	0,36	111,11	4,09	43,2	30
150	0,556	0,35	114,20	3,98	44,4	30
160	0,543	0,34	117,65	3,86	45,7	30
170	0,529	0,33	121,21	3,75	47,0	30
180	0,518	0,32	125,00	3,64	48,2	30
190	0,504	0,31	129,03	3,52	49,6	30
200	0,484	0,30	133,33	3,41	51,6	30
210	0,480	0,29	137,93	3,29	52,0	30
220	0,473	0,27	148,15	3,07	52,7	30
230	0,469	0,26	153,85	2,96	53,1	30
240	0,463	0,26	153,85	2,96	53,1	30

Tabela 4.15 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 1934 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 3,57; Densidade de 1,004 g/cm³; $\eta = 0,944$ cp a T = 22 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,57	105,26	6,48	0,0	22
2	0,997	0,50	120,00	5,68	0,3	23
4	0,991	0,50	120,00	5,68	0,9	23
6	0,985	0,51	117,65	5,80	1,5	24
8	0,975	0,52	115,39	5,91	2,5	24
10	0,969	0,52	115,39	5,99	3,1	24
12	0,960	0,53	113,21	6,02	4,0	24
15	0,942	0,54	111,11	6,14	5,8	25
20	0,917	0,54	111,11	6,14	8,3	25
28	0,878	0,53	113,21	6,02	12,2	25
35	0,832	0,52	115,39	5,91	16,8	26
40	0,801	0,50	120,00	5,68	19,9	27
45	0,774	0,49	122,45	5,57	22,6	27
50	0,749	0,48	125,00	5,46	25,1	28
55	0,719	0,47	127,66	5,34	28,1	28
60	0,688	0,45	133,33	5,11	31,2	28
70	0,624	0,42	142,86	4,77	37,6	28
80	0,590	0,40	150,00	4,55	41,0	29
90	0,544	0,37	162,16	4,21	45,6	29
100	0,492	0,34	176,47	3,86	50,8	29
110	0,453	0,31	193,55	3,52	54,7	29

Tabela 4.16 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 2519 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,05; Densidade de 1,011 g/cm³; $\mu = 0,956$ cp a T = 20 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,82	48,78	9,32	0,0	20
1	0,997	0,86	46,51	9,77	0,2	21
2	0,995	0,97	41,24	11,03	0,5	21
3	0,995	1,00	40,00	11,36	0,9	22
4	0,991	1,00	40,00	11,36	1,4	22
5	0,986	1,00	40,00	11,36	1,9	23
6	0,976	1,00	40,00	11,36	2,3	24
7	0,976	0,99	40,40	11,25	3,3	25
8	0,962	0,98	40,82	11,15	3,8	25
9	0,958	0,97	41,24	11,02	4,2	26
10	0,951	0,96	41,67	10,91	4,9	26
12	0,934	0,94	42,55	10,68	6,6	26
15	0,913	0,91	43,96	10,34	8,7	27
17	0,896	0,88	45,56	10,00	10,3	27
20	0,868	0,85	47,06	9,66	13,1	27
25	0,831	0,79	50,63	8,98	16,9	27
30	0,791	0,74	54,05	8,41	20,9	29
35	0,744	0,69	57,97	7,84	25,6	30
40	0,716	0,65	61,54	7,39	28,4	30
45	0,681	0,62	64,52	7,05	31,9	30
50	0,660	0,58	68,97	6,59	35,4	30
55	0,615	0,55	72,73	6,25	38,5	31
60	0,582	0,52	76,92	5,90	41,8	31
65	0,554	0,49	81,63	5,57	44,6	31
70	0,526	0,46	86,96	5,23	47,4	31
75	0,500	0,44	90,91	5,00	50,0	31
80	0,476	0,42	95,24	4,77	52,4	31
85	0,453	0,40	100,00	4,55	54,7	31
90	0,429	0,37	108,11	4,21	57,0	31
95	0,411	0,36	111,11	4,09	58,9	31
100	0,392	0,34	117,65	3,86	60,8	31

Tabela 4.17 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3016 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 6,10; Densidade de 1,022 g/cm³; $\eta = 0,960$ cp a T = 21 °C.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,47	127,66	5,30	0,0	21
1	1,000	0,48	125,00	5,46	0,0	21
2	1,000	0,53	113,21	6,02	0,0	21
3	0,998	0,58	103,45	6,59	0,2	21
4	0,992	0,59	101,69	6,71	0,8	21
5	0,992	0,61	98,36	6,93	0,8	21
6	0,998	0,63	95,24	7,16	1,2	21
7	0,986	0,64	93,75	7,27	1,4	22
8	0,984	0,65	92,31	7,39	1,6	22
9	0,980	0,67	89,55	7,61	2,0	22
10	0,980	0,69	86,96	7,84	2,0	22
12	0,971	0,71	84,51	8,07	2,9	23
15	0,960	0,72	83,33	8,18	3,9	23
17	0,943	0,66	90,91	7,50	5,7	23
20	0,922	0,64	93,75	7,27	7,8	24
25	0,898	0,59	101,69	6,71	10,2	24
30	0,882	0,58	103,45	6,59	11,8	24
35	0,863	0,57	105,26	6,48	13,7	25
40	0,839	0,55	109,09	6,25	16,1	25
45	0,824	0,54	111,11	6,14	17,6	25
50	0,804	0,53	113,21	6,02	19,6	26
55	0,788	0,52	115,38	5,91	21,2	26
60	0,771	0,50	120,00	5,68	22,9	26
70	0,737	0,49	122,45	5,57	26,3	26
80	0,706	0,46	130,44	5,23	29,4	27
90	0,670	0,45	133,33	5,11	32,9	27
100	0,645	0,43	139,54	4,89	35,5	28
110	0,612	0,41	146,34	4,66	38,8	28
120	0,590	0,40	150,00	4,54	41,0	28
130	0,561	0,38	157,89	4,32	43,9	28
140	0,541	0,37	162,16	4,21	45,9	29
150	0,525	0,36	166,67	4,09	47,4	29
160	0,499	0,34	176,47	3,86	50,0	29
170	0,476	0,33	181,89	3,75	52,4	29
180	0,460	0,32	187,50	3,64	53,9	29
190	0,439	0,31	193,55	3,52	56,1	29
200	0,422	0,30	200,00	3,41	57,8	29
210	0,409	0,29	206,90	3,30	59,0	29
220	0,392	0,28	214,28	3,18	60,8	29
230	0,378	0,26	230,77	2,96	62,2	29
240	0,368	0,26	230,77	2,96	63,1	29

Tabela 4.18 - Concentração inicial de sais no soro do leite (C_0) de 3264 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,0; Densidade de 1,024 g/cm³; $\eta = 0,998$ cp a T = 28 °C.

Tempo (min.)	(C/C ₀)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,48	125,00	5,46	0,00	28
1	0,996	0,59	101,69	6,07	0,36	28
2	0,993	0,62	96,77	7,05	0,72	28
3	0,987	0,60	100,00	6,82	1,26	28
4	0,984	0,60	100,00	6,82	1,62	28
5	0,975	0,57	105,26	6,48	2,53	28
6	0,969	0,57	105,26	6,48	3,08	28
7	0,958	0,56	107,14	6,36	4,16	28
8	0,949	0,56	107,14	6,36	5,07	29
9	0,938	0,56	107,14	6,36	6,15	29
10	0,924	0,54	111,11	6,14	7,60	29
15	0,880	0,58	103,45	6,59	11,95	30
20	0,848	0,60	100,00	6,82	15,22	30
25	0,822	0,60	100,00	6,82	17,75	30
30	0,793	0,61	98,36	6,93	20,65	31
35	0,764	0,61	98,36	6,93	23,55	31
40	0,743	0,62	96,77	7,05	25,72	31
45	0,719	0,62	96,77	7,05	28,08	32
50	0,692	0,62	96,77	7,05	30,79	32
55	0,668	0,62	96,77	7,05	33,15	32
60	0,643	0,61	98,36	6,93	35,70	33
70	0,590	0,59	101,69	6,70	40,94	33
80	0,547	0,57	105,26	6,48	45,30	34
90	0,502	0,54	111,11	6,14	49,82	34
100	0,473	0,53	113,20	6,02	52,72	34
110	0,438	0,50	120,00	5,68	56,16	34
120	0,409	0,47	127,66	5,34	59,00	34
130	0,386	0,46	130,43	5,23	61,41	34
140	0,362	0,44	136,36	5,00	63,77	34
150	0,340	0,42	142,86	4,77	66,00	34
160	0,306	0,38	157,89	4,32	69,40	34
170	0,289	0,37	162,16	4,20	71,00	34
180	0,277	0,36	166,67	4,09	72,28	34
190	0,263	0,34	176,47	3,86	73,74	34
200	0,250	0,33	181,82	3,75	75,00	34
210	0,240	0,32	187,50	3,64	76,00	34
220	0,232	0,31	193,55	3,52	76,82	33
230	0,225	0,30	200,00	3,41	77,54	33
240	0,219	0,29	206,89	3,30	78,00	33

Tabela 4.19 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3524 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 4,76; Densidade de 1,024 g/cm³.

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,32	187,50	3,64	0,0	23
1	0,997	0,36	166,67	4,09	0,3	23
2	0,995	0,38	157,89	4,32	0,5	23
3	0,992	0,39	153,85	4,43	0,8	23
4	0,988	0,39	153,85	4,43	1,2	23
5	0,987	0,40	150,00	4,55	1,3	23
6	0,983	0,40	150,00	4,55	1,7	23
7	0,980	0,41	146,34	4,66	2,0	23
8	0,978	0,41	146,34	4,66	2,2	23
9	0,977	0,42	142,86	4,77	2,4	23
10	0,975	0,42	142,86	4,77	2,5	23
12	0,970	0,43	139,53	4,89	3,0	24
15	0,965	0,44	136,36	5,00	3,5	24
17	0,960	0,45	133,33	5,11	4,0	24
20	0,955	0,46	130,43	5,23	4,5	24
25	0,941	0,48	125,00	5,45	6,0	25
30	0,926	0,48	125,00	5,45	7,4	25
35	0,914	0,50	120,00	5,68	8,6	26
40	0,898	0,50	120,00	5,68	10,2	26
45	0,881	0,51	117,65	5,80	11,9	26
50	0,871	0,52	115,38	5,91	12,9	27
55	0,854	0,53	113,21	6,02	14,6	27
60	0,839	0,53	113,21	6,02	16,1	27
70	0,804	0,53	113,21	6,02	19,6	28
80	0,768	0,52	115,38	5,91	23,2	28
90	0,726	0,51	117,65	5,80	27,4	29
100	0,693	0,50	120,00	5,68	30,7	29
110	0,658	0,48	125,00	5,46	34,2	30
120	0,624	0,47	127,66	5,30	37,6	30
130	0,592	0,45	133,33	5,11	40,8	30
140	0,554	0,43	139,53	4,89	44,6	31
150	0,525	0,42	142,86	4,77	47,5	31
160	0,493	0,40	150,00	4,55	50,7	31
170	0,463	0,38	157,89	4,32	53,7	31
180	0,436	0,37	162,16	4,21	56,4	31
190	0,408	0,35	171,43	3,98	59,2	31
200	0,384	0,34	176,47	3,86	61,6	31
210	0,361	0,31	193,55	3,52	63,9	31

Tabela 4.20 - Concentração inicial de sais no soro do leite (Co) de 3607 p.p.m.; Diferença de potencial de 60 Volts; Vazão de 100 l/h; pH inicial de 5,02;

Tempo (min.)	(C/Co)	I (A)	R (Ω)	J (mA/cm ²)	f (%)	T (°C)
0	1,000	0,68	58,80	7,73	0,0	24
1	0,995	0,65	61,54	7,38	0,5	24
2	0,990	0,60	66,67	6,82	0,9	24
3	0,985	0,59	67,79	6,70	1,5	24
4	0,982	0,58	68,97	6,59	1,8	24
5	0,977	0,58	68,97	6,59	2,3	24
6	0,971	0,58	68,97	6,59	2,9	24
7	0,967	0,58	68,97	6,59	3,3	24
8	0,900	0,56	71,43	6,36	10,0	24
9	0,893	0,54	74,07	6,14	10,7	24
10	0,885	0,53	75,47	6,02	11,5	25
15	0,874	0,52	76,92	5,90	12,6	25
20	0,850	0,51	78,43	5,79	15,0	25
25	0,808	0,50	80,00	5,68	19,2	25
30	0,780	0,49	81,63	5,57	22,0	26
35	0,751	0,49	81,63	5,57	25,0	26
40	0,729	0,48	83,33	5,45	27,0	26
45	0,708	0,45	88,88	5,11	29,2	26
50	0,688	0,44	90,90	5,00	31,1	27
55	0,682	0,43	93,02	4,88	31,8	27
60	0,664	0,43	93,02	4,88	33,6	27
70	0,626	0,42	95,24	4,77	37,4	27
80	0,616	0,42	95,24	4,77	38,4	27
90	0,598	0,42	95,24	4,77	40,2	27
100	0,577	0,41	97,56	4,66	42,3	27
110	0,549	0,39	102,56	4,43	45,1	27
120	0,525	0,39	102,56	4,43	47,5	28
130	0,519	0,38	105,26	4,32	48,0	28
140	0,490	0,38	105,26	4,32	51,0	28
150	0,466	0,36	111,11	4,09	53,4	28
160	0,449	0,36	111,11	4,09	55,0	29
170	0,433	0,34	117,65	3,86	56,7	29
180	0,418	0,34	117,65	3,86	58,2	29
190	0,408	0,33	121,21	3,75	59,2	29
200	0,390	0,33	121,21	3,75	61,0	29
210	0,380	0,32	125,00	3,64	62,0	29
220	0,374	0,32	125,00	3,64	62,6	29
230	0,344	0,31	129,03	3,52	65,6	29

Tabela 4.22 - Consumo de energia (E -Wh) em função do tempo para diferentes concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co), sob as seguintes condições:
 $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

Tempo (min.)	Concentração inicial (p.p.m.)						
	1975	2016	2886	3139	3294	3365	3660
2	0,47	0,33	0,27	0,80	0,55	0,32	0,85
4	0,93	0,67	0,53	1,65	1,09	0,67	1,68
6	1,44	1,00	0,84	2,60	1,64	1,04	2,48
8	1,97	1,33	1,17	3,57	2,18	1,38	2,89
10	2,47	1,73	1,46	4,53	2,80	1,80	4,07
15	3,90	2,60	2,40	7,00	4,40	2,80	6,00
20	5,20	3,60	3,46	9,33	6,00	4,00	8,00
30	7,80	-	6,00	13,60	9,20	6,40	11,80
40	10,13	7,47	8,27	17,07	12,27	8,80	15,47
50	12,00	9,33	11,00	20,00	15,00	11,00	18,67
60	13,60	11,20	12,80	22,80	16,80	13,20	22,00
70	14,93	13,50	15,87	24,73	19,60	15,40	24,27
80	16,00	14,40	18,13	26,13	22,40	17,60	27,20
90	16,80	15,60	19,80	27,60	24,00	19,80	28,80
100	17,33	16,67	21,33	28,67	26,00	22,00	30,67
120	18,40	19,20	25,60	30,40	27,20	26,40	33,60
140	19,60	20,53	26,13	31,73	29,00	30,80	35,47
160	19,20	22,40	27,33	32,00	29,87	34,10	37,33
180	19,20	24,00	28,80	32,40	27,60	36,00	37,20
200	18,67	26,67	28,00	-	28,00	38,67	38,67
220	-	-	27,87	-	27,87	41,07	39,60
240	-	-	28,80	-	27,20	43,20	40,00

Tabela 4.23 - Consumo de energia (E -Wh) em função do tempo para diferentes concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co), sob as seguintes condições:
 $Q = 100 \text{ l/h}$, $V = 40 \text{ Volts}$.

Tempo (min.)	Concentração inicial (p.p.m.)			
	3737	3785	3867	4790
2	0,83	0,70	0,49	0,72
4	1,63	1,25	0,98	1,47
6	2,20	1,76	1,48	2,32
8	2,88	2,37	1,97	3,15
10	3,60	2,93	2,47	4,00
15	5,40	4,60	3,80	6,00
20	7,20	6,27	5,20	8,13
30	11,80	9,40	8,40	12,22
40	16,00	12,53	11,47	16,00
50	19,33	15,33	14,30	18,67
60	22,40	18,40	17,20	21,20
70	25,20	21,00	20,07	23,80
80	27,73	23,00	22,93	26,67
90	29,40	25,20	25,80	27,00
100	31,33	27,33	28,00	28,00
120	34,40	30,40	32,00	31,20
140	35,47	33,60	35,47	33,60
160	36,27	35,20	37,33	36,20
180	37,20	34,80	39,60	38,40
200	37,33	37,30	42,67	40,00
220	38,13	-	44,00	39,60
240	36,80	-	44,80	41,60

Tabela 4.25 - Variação da temperatura $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ e o consumo de energia final de cada batelada.

V = 40 Volts			V = 60 Volts		
Co (p.p.m.)	$\Delta T = (T_f - T_i)$	$E_f (\text{Wh})$	Co (p.p.m.)	$\Delta T = (T_f - T_i)$	$E_f (\text{Wh})$
1975	8,0	18,67	1934	7,0	34,00
2016	7,0	26,67	2519	11,0	34,00
2886	7,0	28,80	3016	8,0	62,40
3139	11,0	32,40	3264	6,0	69,60
3294	10,0	27,20	3524	8,0	68,00
3365	6,0	43,20	3607	5,0	49,60
3660	8,0	40,00	-	-	-
3737	7,0	36,80	-	-	-
3785	2,0	37,30	-	-	-
3867	6,0	44,80	-	-	-
4790	6,0	41,60	-	-	-

Tabela 4.26 - Valores do consumo de energia ($E\text{-kWh/m}^3$) em função das concentrações iniciais de sais no soro do leite (C_o) e do potencial elétrico.

Concentração Inicial (p.p.m.)	Potencial Elétrico (Volts)	Consumo de Energia (kWh/m^3)	Taxa de Extração f(%)
1934	60	0,20	54,7
3264	60	0,24	78,0
3524	60	0,22	63,9
1975	40	0,07	77,0
2016	40	0,04	53,0
2886	40	0,08	73,0
3294	40	0,08	76,0
3365	40	0,08	56,0
3660	40	0,14	78,5
3737	40	0,15	77,9
4790	40	0,15	54,0

Tabela 4.27 - Concentrações iniciais de sais no soro do leite (C_o) e suas densidades a 25°C.

C_o (p.p.m.)	1934	1975	2016	2519	2886	3016	3139	3264	3365	3785	3867
ρ (g/cm ³)	1,003	1,004	1,005	1,011	1,014	1,022	1,022	1,023	1,024	1,024	1,025

Tabela 4.28 - Concentrações iniciais de sais no soro do leite (Co) e suas viscosidades antes e após a eletrodiálise, para diferentes potenciais elétricos.

Concentração (p.p.m.)	Viscosidade inicial (cp)	Viscosidade final (cp)	Potencial Elétrico (V)
1934	0,944	0,847	60
2519	0,956	0,806	60
3016	0,960	0,848	60
3264	0,998	0,926	60
1975	0,945	0,837	40
2016	0,946	0,850	40
2886	0,957	0,859	40
3365	1,062	0,967	40
3785	1,088	1,056	40
3867	1,157	1,057	40

Tabela 4.29 - Análise físico-química do soro do leite antes e após a eletrodiálise a 25°C, realizada a um potencial elétrico de 40 volts.

Componentes	Amostra (01) Antes	Amostra (01) Após	f (%) Taxa de extração	Amostra (02) Antes	Amostra (02) Após	f (%) Taxa de extração
Ca ⁺⁺	35,0	12,0	65,7	45,1	21,2	53,0
Mg ⁺⁺	29,2	4,80	83,6	32,0	5,1	84,0
CaCO ₃	210,0	60,0	71,4	240,0	87,0	63,4
Cl ⁻	124,2	17,7	85,7	124,2	17,2	86,2
Na ⁺	69,0	16,4	76,2	59,0	12,4	78,9
K ⁺	9,1	1,1	87,9	9,5	1,6	83,2
pH	4,2	3,6	-	5,0	4,2	-
Acidez em ácido láctico (g/l)	9,4	2,8	-	8,9	2,7	-
Obs: (As concentrações estão em mg/100ml)						

APÊNDICE 2

**DETERMINAÇÕES DA DENSIDADE E VISCOSIDADE
DO SORO DO LEITE**

Procedimentos para a determinação da densidade e viscosidade do soro do leite.

O método empregado para a determinação da densidade do soro do leite, foi realizada através de um picnômetro, utilizando posteriormente a relação:

$$\rho = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \cdot \rho_{H_2O}$$

onde, ρ é a densidade do soro do leite, m_0 corresponde ao peso do picnômetro vazio, m_1 o peso do picnômetro cheio com água destilada, m_2 o peso do picnômetro cheio com o soro do leite e ρ_{H_2O} a densidade da água destilada na temperatura da experiência.

O método empregado para a determinação da viscosidade, foi o de Poiseville, empregando o viscosímetro de Ostwald.

Método de Poiseville:

A partir da determinação do tempo de escoamento do fluido, no capilar do viscosímetro de Ostwald, pode-se determinar a viscosidade desconhecida do soro do leite, através da seguinte relação:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 \cdot t_1}{\rho_2 \cdot t_2}$$

onde, η_1 corresponde a viscosidade do soro do leite, η_2 é a viscosidade da água destilada, ρ_1 é a densidade do soro do leite, ρ_2 é a densidade da água destilada,

t_1 e t_2 os tempos de escoamento no viscosímetro para o soro do leite e a água destilada, respectivamente.

A viscosidade da água destilada, é determinada através da seguinte correlação empírica:

$$\eta_{H_2O} = \frac{5,985}{(43,25 + T)^{1,542}}$$

onde, η_{H_2O} corresponde a viscosidade da água destilada na temperatura da experiência, e T a temperatura em °C.

APÊNDICE 3

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SORO DO LEITE

Universidade Federal da Paraíba
 Centro de Ciências e Tecnologia
 Departamento de Engenharia Química
 Laboratório de Produção Industrial
 (LAPI)
 Campina Grande - Paraíba

Tipo: Soro antes da eletrodiálise
 Procedência: ILCASA -S.A.
 N° da amostra: 01
 Data: 08/05/96

Análise Química e Físico-Química do Soro do Leite

Potencial Hidrogeniônico (pH)	4,2
Condutividade Elétrica $\mu\text{mho} / \text{cm}$ (25°C)	3660,0

Componentes	mg/100ml
Sódio (Na^+)	69,0
Potássio (K^+)	9,1
Cálcio (Ca^{++})	35,0
Magnésio (Mg^{++})	29,2
Cloreto (Cl^-)	124,2
Carbonatos (CaCO_3)	210,0
Oxigênio dissolvido	-
Totais de sais dissolvidos	-

Acidez em ácido láctico (g/l)	9,4
-------------------------------	-----

Interpretação:



Vicente Fernandes Monteiro
CRQ 01200/34

Universidade Federal da Paraíba Centro de Ciências e Tecnologia Departamento de Engenharia Química Laboratório de Produção Industrial (LAPI) Campina Grande - Paraíba	Tipo: Soro dessalinizado Procedência: ILCASA -S.A. Nº da amostra: 01 Data: 08/05/96
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

Análise Química e Físico-Química do Soro do Leite

Potencial Hidrogeniônico (pH)	3,6
Condutividade Elétrica $\mu\text{mho} / \text{cm}$ (25°C)	3660,0

Componentes	mg/100ml
Sódio (Na^+)	16,4
Potássio (K^+)	1,1
Cálcio (Ca^{++})	12,0
Magnésio (Mg^{++})	4,8
Cloreto (Cl^-)	17,7
Carbonatos (CaCO_3)	60,0
Oxigênio dissolvido	-
Totais de sais dissolvidos	-

Acidez em ácido láctico (g/l)	2,8
-------------------------------	-----

Interpretação:



Vicente Fernandes Monteiro
CRQ 01200/34

Universidade Federal da Paraíba Centro de Ciências e Tecnologia Departamento de Engenharia Química Laboratório de Produção Industrial (LAPI) Campina Grande - Paraíba	Tipo: Soro antes da eletrodiálise Procedência: ILCASA -S.A. Nº da amostra: 02 Data: 06/05/96
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

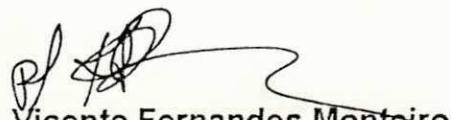
Análise Química e Físico-Química do Soro do Leite

Potencial Hidrogeniônico (pH)	5,0
Condutividade Elétrica $\mu\text{mho} / \text{cm}$ (25°C)	3867,0

Componentes	mg/100ml
Sódio (Na^+)	59,0
Potássio (K^+)	9,5
Cálcio (Ca^{++})	45,1
Magnésio (Mg^{++})	32,0
Cloreto (Cl^-)	124,2
Carbonatos (CaCO_3)	240,0
Oxigênio dissolvido	-
Totais de sais dissolvidos	-

Acidez em ácido láctico (g/l)	8,9
-------------------------------	-----

Interpretação:



Vicente Fernandes Monteiro
CRQ 01200/34

Universidade Federal da Paraíba
 Centro de Ciências e Tecnologia
 Departamento de Engenharia Química
 Laboratório de Produção Industrial
 (LAPI)
 Campina Grande - Paraíba

Tipo: Soro dessalinizado
 Procedência: ILCASA -S.A.
 Nº da amostra: 02

Data: 06/05/96

Análise Química e Físico-Química do Soro do Leite

Potencial Hidrogeniônico (pH)	4,2
Condutividade Elétrica $\mu\text{mho} / \text{cm}$ (25°C)	3867,0

Componentes	mg/100ml
Sódio (Na^+)	12,4
Potássio (K^+)	1,6
Cálcio (Ca^{++})	21,2
Magnésio (Mg^{++})	5,1
Cloreto (Cl^-)	17,2
Carbonatos (CaCO_3)	87,0
Oxigênio dissolvido	-
Totais de sais dissolvidos	-

Acidez em ácido láctico (g/l)	2,7
-------------------------------	-----

Interpretação:



Vicente Fernandes Monteiro
 CRQ 01200/34