

USO DE ELETRODIÁLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU DESSANILIZAÇÃO

Guilherme Arruda Alves

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Heloisa Teixeira Firmo

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2017

USO DE ELETRODIÁLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU DESSANILIZAÇÃO

Guilherme Arruda Alves

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:	
	Prof ^a . Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.,
	Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.,
	 Prof. Paulo Renato Diniz Junqueira Barbosa, M.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil Fevereiro de 2017

Alves, Guilherme Arruda

Uso de eletrodiálise para geração de energia elétrica e/ou dessalinização/ Guilherme Arruda Alves – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2017

X, 101p.: il. 26; 29.7cm

Orientadora: Heloisa Teixeira Firmo

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Ambiental, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 92-99.

1. Eletrodiálise; 2. Dessalinização; 3. Geração de Energia; I. Teixeira Firmo, Heloisa II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Uso de eletrodiálise para geração de energia e/ou dessalinização.

"Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente".

Roger Von Oech

Gostaria de agradecer pela oportunidade de ter estudado na UFRJ, principalmente a todos os professores que contribuíram tanto para minha formação intelectual ao longo destes anos. Gostaria de agradecer aos meus amigos Mateus, Victor, André e Jun, que tanto me apoiaram e foram cruciais em toda essa jornada. Agradeço em especial a minha professora e orientadora Heloisa, que foi sempre muito atenciosa comigo e com todos os alunos, sendo até hoje figura principal no curso. Aos meus pais eu dedico não só minha formatura mas também tudo que sou, mais que exemplos são pessoas que lutaram a vida toda para que eu pudesse chegar aqui. Muito obrigado!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

USO DE ELETRODIÁLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU DESSALINIZAÇÃO

Guilherme Arruda Alves

2017

Orientador: Heloisa Teixeira Firmo

Curso: Engenharia Ambiental

Em todas as épocas e em inúmeras culturas a água é definida como um elemento vital e purificador, um recurso natural renovável, como a própria razão da existência da vida. A água, que permite a vida e dessedenta os organismos também guarda em si um enorme potencial energético. Com 97,5% das águas mundiais consideradas salinas, o desenvolvimento tecnológico nos trouxe, na metade do século XX, uma nova maneira de aproveitarmos esse recurso. O processo eletroquímico chamado eletrodiálise nos permite extrair da água salgada o recurso mais importante para a manutenção da vida humana, a água potável. Além disso, esse mesmo processo também nos fornece uma poderosa fonte de energia, que está contida na própria composição iônica da água. No atual cenário de crise hídrica brasileira e crescente demanda energética mundial, a proposta de utilização da eletrodiálise como meio ecologicamente correto de se obter energia elétrica e água potável se mostra promissora. O presente trabalho consiste no estudo da utilização desse processo eletroquímico, assim como no detalhamento de sua viabilidade explorando os próprios caminhos para o aprimoramento dessa tecnologia. Assim, observando a importância do avanço tecnológico para o combate à escassez hídrica e ao aquecimento global, este projeto visa analisar e organizar os conhecimentos já obtidos por uma vasta revisão de teses, publicações e projetos técnicos, propondo uma análise crítica e identificando possíveis progressos e desenvolvimentos futuros. Como um dos produtos do presente trabalho, foi realizado um projeto teórico de dessalinizador com aplicação em uma cidade brasileira de pequeno porte. Dentre as principais conclusões, tem-se que a tecnologia de eletrodiálise para dessalinização prova ser mais custo-eficiente que sua principal concorrente, a osmose reversa, em determinados níveis de salinidades. Atualmente encontramos terreno fértil para investir em tecnologias de dessalinização, principalmente as com eficiência já comprovada e com demanda de mercado. Esses indicativos apontam para que o mercado de usinas de dessalinização de pequeno e médio porte, que atualmente estão especializadas na tecnologia de osmose reversa, possam englobar também as plantas com a tecnologia da eletrodiálise.

Palavras Chave: Eletrodiálise, Dessalinização, Geração de Energia.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

USE OF ELECTRODIALYSIS FOR GENERATING ELECTRICITY AND/OR DESSALINIZATION

Guilherme Arruda Alves

2017

Advisor: Heloisa Teixeira Firmo

Course: Environmental Engineering

In every age and in many cultures water is defined as a vital and purifying element, a natural renewable resource, as the very reason for the existence of life. Water, which allows the life and watering of the organisms also holds in itself an enormous energetic potential. With 97.5% of the world's waters considered to be salty, technological development brought us, in the mid-twentieth century, a new way to take advantage of this resource. The electrochemical process called electrodialysis allows us to extract from salt water the most important resource for the maintenance of human life, drinking water. In addition, this same process also provides us with a powerful source of energy, which is contained in the ionic composition of water itself. In the current scenario of Brazilian water crisis and growing world energy demand, the proposal to use electrodialysis as an ecologically correct means of obtaining electricity and drinking water is promising. The present work has studied the use of this electrochemical process, as well as detailed its feasibility exploring the proper pathways for the improvement of this technology. Thus, observing the importance of the technological advance to combat water scarcity and global warming, this project aims to analyze and organize the knowledge already obtained by a vast review of theses, publications and technical projects, proposing a critical analysis and identifying possible future developments. As one of the products of the present work, a theoretical project of a desalting plant was carried out with application in a small Brazilian city. Among the main conclusions, it has been shown that the electrodialysis technology for desalination proves to be more cost-efficient than its main competitor, reverse osmosis, at certain levels of salinity. Currently we find fertile ground to invest in desalination technologies, especially those with proven efficiency and market demand. These informations indicate that the market for small and medium-sized desalination plants, which are currently specialized in reverse osmosis technology, may also include plants with electrodialysis technology.

Keywords: Electrodialysis, Dessalinization Electricity Generation.

Sumário

1.	Introd	lução)	1
2.	Conc	eito I	Básico do Processo de Eletrodiálise	5
3.	Uso d	la El	etrodiálise para Dessalinização	7
	3.1.	Brev	ve Histórico dos Processos de Dessalinização	8
	3.2. métod		nparação entre Eletrodiálise, outros processos com membranas e iversos de dessalinização	9
	3.3.	O N	ordeste Brasileiro e Demais Áreas Aplicáveis	12
	3.4.	Fun	damentos do Processo	16
	3.4.	1.	Membranas	18
	3.4.	2.	Espaçadores	20
	3.4.	3.	Eletrodos	21
	3.4.	4.	Consumo Energético Médio	22
	3.5.	Pré-	-Tratamento	24
	3.6.	Pós	-Tratamento	29
	3.7.	Pote	encial de Alimentação por Energia Solar	32
	3.8.	Aná	lise de Projetos Existentes	39
	3.8. área		Estudo de Viabilidade de um Sistema de Eletrodiálise para Domicílios ı ana da índia	
			Design de Sistema de Eletrodiálise Reversa movido por energia Solar Vilarejo na Índia	44
	3.8. por		Avaliação Técnica e Econômica dos Sistemas de Eletrodiálise Movidos gia Fotovoltaica	
4.		•	o de Energia pela Reversão do Processo de Eletrodiálise (Eletrodiálise	53
	4.1.	Con	npreendendo o Processo	53
	4.1.	1.	Célula Galvânica, Pilha e Geração de Energia	55
	4.1.	2.	Potencial Elétrico	56
	4.1.	3.	Potencial Químico e Energia Livre de Gibbs	56
	4.2.	Fun	cionamento das Membranas	60
	4.2.	1.	Potencial entre membranas	62
	4.3.	Brev	ve Histórico e Modelo Matemático Básico	66
	4.4.	Con	nponentes necessários para um protótipo	68
	4.5.	Des	afios para o Desenvolvimento e Alguns Resultados	69
5.	Proje	to Te	eórico de Dessalinizador alimentado por Energia Solar	72
	5.1.	Esc	olha do Local: Critérios, Estratégia e Definição	72
	5.1.	1.	Parazinho-Rio Grande do Norte e a salinidade de suas águas	73

5.2.	Definição da População de Projeto	76
5.3.	Localização da planta e logística de distribuição em Parazinho	77
5.4.	Parâmetros técnicos e Sistema Fotovoltaico	79
5.4	.1. Quantidade de Água Necessária	79
5.4	2. Pré-Tratamento	80
5.4	.3. Componentes Internos e Bomba	80
5.4	.4. Pós-Tratamento	82
5.4	.5. Destinação do Rejeito	83
5.4	.6. Sistema Fotovoltaico para Alimentação do Sistema	83
5.4	.7. Levantamento de Custos	85
5.4	.8. Fluxograma e Recomendações	86
6. Cond	lusão e Recomendações	88
7. Refe	rencias	92
ANEXO	I	100
Lista	de Figuras	
	Ilustração Básica da Eletrodiálise	
Figura 2	2 – Esquema Eletrodiálise	7
Figura 2 Figura 3	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas	7 13
Figura 2 Figura 3 Figura 4	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED	13 16
Figura 2 Figura 3 Figura 4	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas	13 16
Figura 2 Figura 3 Figura 4 Figura 5	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED	13 16
Figura 2 Figura 3 Figura 4 Figura 5 Figura 6	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica	
Figura 2 Figura 3 Figura 4 Figura 5 Figura 6 Figura 7	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores	7 13 16 19 20
Figura 2 Figura 2 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual	713162033
Figura 2 Figura 2 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar	71316203334
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 9	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte	7131620333437
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 9 Figura 1	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte 0 - Conceptualização do Projeto	713162033343742
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 1 Figura 1 Figura 1	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte 1 - Produto Final	71316203334374243
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 9 Figura 1 Figura 1 Figura 1	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte 0 - Conceptualização do Projeto 1 - Produto Final 2 - Modelo esquemático do Stack escolhido	71316203334374243
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 1 Figura 1 Figura 1 Figura 1 Figura 1	2 – Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte 0 - Conceptualização do Projeto 1 - Produto Final 2 - Modelo esquemático do Stack escolhido 3 - Conceptualização do Sistema Completo	713162033343742434647
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 1 Figura 1 Figura 1 Figura 1 Figura 1 Figura 1	2 - Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica 6 - Esquema Simples de Espaçadores 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual 8 - Mapa de Radiação Solar 9 - Ilustração de Painéis e Suporte 1 - Produto Final 2 - Modelo esquemático do Stack escolhido 3 - Conceptualização do Sistema Completo 4 - Módulo UV - Sterilight S12Q-PA	713162033343742434647 gia Solar 50
Figura 2 Figura 3 Figura 5 Figura 6 Figura 7 Figura 8 Figura 1	2 - Esquema Eletrodiálise 3 - O Polígono das Secas 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica	71316

O aquífero Jandaíra......75

5.1.2.

Figura 19 - Modelo Matemático para Eletrodiálise Inversa
Figura 20- Esquema Protótipo de Elétrodialise Inversa
Figura 21 - Localização Geográfica de Parazinho74
Figura 22 - Localização do Aquífero Jandaíra75
Figura 23- Equações para projeção populacional
Figura 24 - Principais adensamentos urbanos de Parazinho
Figura 25 - Fluxograma do Projeto para Parazinho86
Figura 26 – Esquema simples de uma Célula Galvânica
Lista de Tabelas
Lista de Tabelas Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12 Tabela 2 - Membranas Comerciais
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12 Tabela 2 - Membranas Comerciais
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12 Tabela 2 - Membranas Comerciais
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12 Tabela 2 - Membranas Comerciais
Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa12 Tabela 2 - Membranas Comerciais

Figura 18 – Gráficos de Operação do Sistema65

1. Introdução

A água é certamente o único recurso natural presente em todos os aspectos da civilização humana, desde os valores culturais e religiosos arraigados em nossa sociedade até o nosso desenvolvimento agrícola, tecnológico e industrial. É um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies de nossa fauna e flora, como elemento representativo de valores sociais e culturais ou como fator de produção de vários bens de consumo.

A importância da água como insumo básico para vida é corroborada nos mais avançados centros de informação e tecnologia. A Administração Nacional de Aeronáutica e do Espaço (NASA), por exemplo, em sua incessante e admirável busca pelo conhecimento do espaço e por vida em outros planetas, procura por planetas que tenham condições de ter água líquida antes de supor qualquer possibilidade de vida inteligente.

No atual cenário de crise hídrica brasileira e crescente demanda energética mundial, a proposta de utilização da eletrodiálise como meio ecologicamente correto de se obter energia elétrica e água potável se mostra promissora. O presente trabalho apresenta análise e estudo da utilização desse processo eletroquímico, assim como um detalhamento de sua viabilidade técnica explorando o aprimoramento dessa tecnologia.

A motivação para a escolha deste tema é o fato de que com um único processo eletroquímico é possível obter dois produtos essenciais. Com o estudo do processo, o entendimento e aprimoramento de suas etapas, podemos gerar melhores rendimentos e tornar cada vez mais viável a aplicação prática dessas tecnologias. Outro fator motivador da escolha deste tema, é o fato de que comparativamente a eletrodiálise está entre as melhores relações custo-benefício para dessalinização. Inclusive, a eletrodiálise, diferente de sua principal tecnologia concorrente, a osmose reversa, possibilita a adequação de sistemas fotovoltaicos por ser energicamente menos dispendiosa (KARAGHOULI, 2010).

Assim, escolheu-se abranger as duas utilizações da eletrodiálise, tendo em mente tanto a importância de ambos os produtos, quanto o aproveitamento duplo que temos para quaisquer avanços nas etapas dos processos de ambas utilizações.

No entanto, vale observar que a dessalinização de água potável é uma necessidade um tanto mais urgente que a geração de energia. Isso se deve ao fato de que a falta de acesso à água potável pode matar, e que em muitas regiões em nosso globo, assim

como no nordeste de nosso país, a escassez pode estar relacionada à dificuldade de aproveitamento da água salobra, ocasionada pelo difícil e oneroso acesso às atuais tecnologias de dessalinização.

Segundo à OMS, em 2009, anualmente 2,2 milhões de pessoas falecem ou adoecem pelo consumo de água imprópria. Além disso, em 2005, a ONU pelo seu programa de desenvolvimento definiu em seu sétimo objetivo para o desenvolvimento do milênio que devemos reduzir pela metade a porcentagem de pessoas que não tem acesso a água potável (PNUD, 2005).

A primeira parte desse trabalho trata do produto mais comum da eletrodiálise, a dessalinização de águas para fins de consumo humano. De acordo com REBOUÇAS, (1997) (um dos fundadores da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas) em todas as épocas e em inúmeras culturas, a água é definida como um elemento vital e purificador, um recurso natural renovável, como a própria razão da existência da vida em si.

Vista do espaço a terra se mostra um planeta azul, seus vastos oceanos e mares dão a sensação de abundância hídrica. Porém, os dados sobre a disponibilidade de água indicam uma realidade muito diferente, somente 2,5% do volume total de água no planeta é doce, e cerca de 70% da água doce mundial se encontra em geleiras (PNUD, 2005). Diante desses números e dos incessantes efeitos antrópicos sobre o meio natural, a disponibilidade de água encontra-se cada vez mais reduzida em várias partes do mundo, o que faz com que áreas inteiras enfrentem a escassez total ou parcial desses recursos.

Outro dado alarmante é que seguindo nosso padrão atual de consumo e manejo, até 2050 dois terços da população mundial será afetada com a escassez desse recurso. A principal fonte de consumo é a agricultura, o que necessariamente levará os agricultores a procurarem novos caminhos por meio de tecnologias e práticas a fim de aumentar a produção para suprir as crescentes demandas de alimentos, se adequando a diminuição dos recursos hídricos (PNUD, 2005).

A segunda parte deste trabalho versa sobre a produção de energia de uma maneira sustentável, uma necessidade urgente para nosso planeta que atualmente baseia sua produção em fontes não renováveis e poluentes gerando severos danos ao meio ambiente. Por essa razão várias fontes alternativas estão sendo estudadas, como por exemplo a energia solar, a eólica, a energia das marés e a eletrodiálise inversa.

Em 2006, o consumo de energia percentual era: fontes baseadas em petróleo líquido (35,8%), carvão (26,7%), gás natural (23,5%), hidroelétricas (6,5%) e energias renováveis (1%). Apesar desses índices negativos, hoje já pode ser visto um movimento maior para a utilização de fontes renováveis. Nesse sentido, o governo da Alemanha implementou políticas para abolir veículos a combustão até 2030 (FAY, 2012).

Diferente do uso do processo de eletrodiálise para dessalinização, que já é amplamente utilizado e estudado, o conceito de geração de energia pela eletrodiálise data da segunda metade do século XX e até hoje não tem aplicações práticas, apenas protótipos laboratoriais. Essa é uma tecnologia pouco pesquisada no Brasil, sendo seus principais focos de estudos em universidades dos Estados Unidos e Holanda (GILSTRAP, 2013).

Pattle *et al* (1954) foram os primeiros a escrever sobre a imensa perda energética que ocorre quando a água dos rios encontra o oceano. A pressão osmótica da água salina gira em torno de 20 atmosferas. Este "poder salino" é a princípio uma fonte limpa que não polui termicamente e nem emite CO_2 . Estima-se que possam ser extraídos 2.6 TW, o que corresponde a 15% da energia consumida mundialmente.

Assim, observando a importância do avanço tecnológico para o combate à escassez hídrica e ao aquecimento global, neste projeto procurou-se analisar e organizar os conhecimentos obtidos em uma revisão de teses, publicações e projetos técnicos. Durante o período de construção deste trabalho não foi encontrado nenhum estudo que tratasse simultaneamente dos dois usos da eletrodiálise. A partir de trabalhos extremamente técnicos, foi feita uma revisão com cada etapa do processo para assim promover uma melhor compreensão da tecnologia e incentivar futuros investimentos econômicos e acadêmicos na mesma. Como um dos produtos do presente estudo também foi realizado um pequeno projeto teórico de dessalinizador movido com energia solar para ser aplicado em uma cidade brasileira.

Enquanto hoje já temos diversas usinas de dessalinização funcionando com a tecnologia da eletrodiálise, existiam, até 2006, apenas 8 trabalhos publicados e poucos protótipos laboratoriais com o objetivo de utilizar a tecnologia para gerar energia citar a fonte corretamente. Deste modo, a parte do trabalho concernente à dessalinização foi tratada de maneira mais prática, com exemplos de componentes mais utilizados, revisões de projetos executados e a proposição de uma planta para uma pequena cidade brasileira.

A inexistência de projetos completos e a pequena gama de estudos a respeito da geração de energia levou a uma abordagem mais teórica na segunda parte do trabalho.

O objetivo é apresentar as origens das formulações que levaram aos modelos matemáticos, trazendo assim um arcabouço básico de conhecimento científico que possibilita a compreensão das discussões teóricas atuais.

De maneira mais direta, os objetivos do trabalho podem ser enumerados da seguinte forma: Abordar ambas utilizações da eletrodiálise, relacionando-as. Explorar caminhos e identificar desafios para o aprimoramento dessa tecnologia, como por exemplo, aferir a viabilidade da aplicação de sistemas fotovoltaicos. Realizar uma análise crítica de projetos já existentes. Detalhar a viabilidade técnica e econômica para implantação da tecnologia em solo nacional por meio da realização de um projeto teórico. E por último, divulgar a eletrodiálise como maneira de produção de energia.

O texto está organizado da seguinte forma: após esta introdução, o próximo capítulo trata uma conceituação básica do processo. O terceiro capítulo tratará da utilização da tecnologia para dessalinizar a água. Neste capítulo cada etapa do processo é explicada individualmente e no final dele serão revisados alguns exemplos práticos da utilização desta tecnologia. O quarto capítulo consiste na utilização da tecnologia para gerar energia, trazendo desta vez uma visão mais técnica das etapas do processo e discorrendo sobre a origem cientifica das formulações que levaram aos modelos matemáticos atuais. O quinto capítulo propõe um projeto teórico de dessalinizador alimentado por energia solar, este projeto é direcionado para a cidade de Parazinho, que se situa no estado do Rio Grande do Norte. Então, o sexto capitulo trará finalmente a conclusão deste trabalho.

2. Conceito Básico do Processo de Eletrodiálise

O processo eletroquímico de eletrodiálise é utilizado para transportar íons de sal de uma solução para outra usando membranas de transferência de íons sobre uma diferença de potencial elétrico. Uma unidade comercial de eletrodiálise contém entre 200 e 1000 membranas separadoras de elétrons empilhadas alternadamente e em arranjo paralelo (JUCÁ, 2004). Entre essas membranas existe um separador, que é por onde a água irá correr. Ao final desse empilhamento de membranas temos placas catódicas e anódinas.

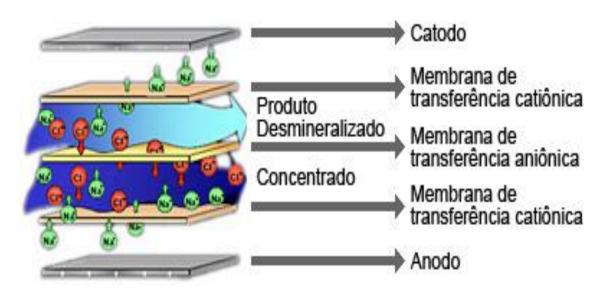


Figura 1 – Ilustração Básica da Eletrodiálise Fonte: (SIQUEIRA, 2012)

Na eletrodiálise, um potencial elétrico é estabelecido entre a placa catódica e anódica, esse potencial provoca a separação dos sais contidos nas soluções entre catodos e anodos. Quando soluções com eletrólitos são bombeadas por entre as membranas, íons positivos são forçados a migrar na direção do catodo e íons negativos são forçados a migrar na direção do anodo. O transporte entre compartimentos se dá pelo movimento dos cátions migrando em direção ao cátodo, atravessando a membrana catiônica e em seguida sendo retidos pela membrana aniônica. Da mesma forma ocorre com os ânions, que se movimentam em direção ao ânodo, transpassando a membrana aniônica e sendo retidos em seguida pela membrana catiônica adjacente (LIEB, 1986).

As membranas de separação são produzidas com tratamentos químicos em materiais poliméricos como o polietileno, sendo que o principal motivo que leva ao uso

cada vez maior da eletrodiálise, em nível mundial, é o desenvolvimento alcançado na fabricação das mesmas, buscando o compromisso entre vida útil, capacidade de separação e consumo de corrente elétrica (JUCÁ, 2004).

O resultado final deste processo é o surgimento de fluxos com alto grau de salinidade que se alternam a fluxos dessalinizados. Os fluxos dessalinizados podem ser utilizados para consumo humano e a solução mais concentrada de sais pode ser utilizada de diversas formas, como irrigação de plantas, criação de peixes, extração do sal para alimentação, entre outros.

3. Uso da Eletrodiálise para Dessalinização

O processo da eletrodiálise é um processo eletroquímico que se baseia na separação dos íons de soluções com salinidades diferentes. Tanto o processo pode ser iniciado por uma fonte de energia externa que gera um potencial para induzir o movimento e consequente separação dos íons através de suas membranas, quanto a eletrodiálise pode ser utilizada para extrairmos o potencial que está contido na diferença de potenciais químicos e elétricos entre soluções de diferentes grados salinos. A primeira forma de utilização citada tem como produto água dessalinizada, a segunda tem como produto a energia.

Para ilustrarmos esquematicamente o uso da eletrodiálise para dessalinização podemos observar a Figura 2 abaixo.

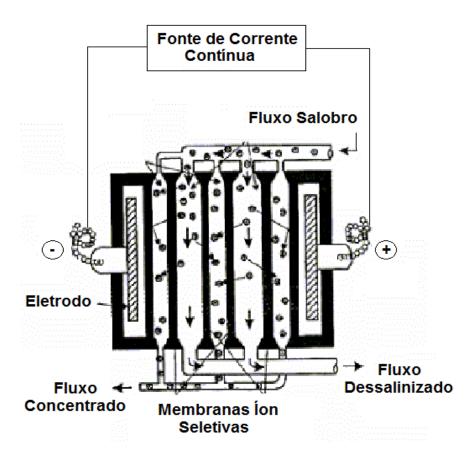


Figura 2 – Esquema Eletrodiálise Fonte: (UNEP, 1998)

Neste processo, a quantidade utilizada de energia é proporcional à quantidade de sal removido. Logo, percebe-se que existe um limite economicamente viável para a utilização da técnica. Como esse limite varia de acordo com o *design* da planta, com a composição de sais na água afluente e com a própria eficiência das membranas e equipamentos, temos que o método é ideal para ser utilizado entre 2000 – 10000 mg/l de Sólidos Totais Dissolvidos (MEDEIROS,2004).

Antes de discorrer sobre as partes técnicas do processo em si, apresenta-se a seguir um pouco do histórico e da aplicabilidade do processo.

3.1. Breve Histórico dos Processos de Dessalinização

Uma grande parte de nossas técnicas e avanços tecnológicos advém da observância de nossa realidade. Desde a descoberta da gravidade até o postulado de complexos teoremas matemáticos, o que representamos ali é a descrição de nossa realidade, da natureza.

A dessalinização é um ato natural que faz parte do ciclo hidrológico, uma vez que a maior parte da água doce de nosso planeta é originada da evaporação da água dos mares e oceanos. Essa água é depois precipitada sobre a terra em diversas formas, reabastecendo nossos rios, lagos e aquíferos.

Existem relatos históricos de que na Antiguidade os gregos, persas e egípcios já se utilizavam de método simples para a obtenção de água potável. Pela observação do ciclo hidrológico, perceberam que era possível destilar a água salgada fervendo-a. Em sua essência, o processo de destilação é uma filtragem. Ficam para trás a maior parte das impurezas, inclusive os sais.

Segundo (FWR, 2011), o Kuwait encomendou no ano de 1914 a primeira planta de dessalinização. O país, apesar de ser um dos mais pobres em recursos hídricos, tem energia abundante devido às suas grandes reservas de petróleo.

Durante a Segunda Guerra Mundial, usinas de destilação foram amplamente utilizadas. Em 1945, por exemplo, foi instalada uma usina de destilação no navio de guerra norte-americano HMS Vanguard. Assim, o navio tinha garantia que não faltaria água potável mesmo em missões em ilhas remotas.

A eletrodiálise como técnica de dessalinização foi primeiramente utilizada na Arábia Saudita em 1954, quando foi construída sua primeira planta comercial. Na época, o

potencial da eletrodiálise começava a ser reconhecido, porém passaram-se muito anos até que a tecnologia de membranas tivesse uma eficiência capaz de se sobressair em comparação com os métodos térmicos de destilação. Apenas na década de 80 os processos por membranas começaram a se tornar realmente competitivos e tomar lugar no mercado (FWR, 2011).

No Brasil, as primeiras experiências com dessalinização datam de 1970, quando o Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA fez a primeira planta baseada em destilação solar. Em 1987 a Petrobrás iniciou um programa de dessalinização de água do mar para abastecer suas plataformas marítimas. Tal projeto foi utilizado pioneiramente na Bahia para atender aos povoados de Olho d`Água das Moças.

Também no Brasil, em 1999, na ilha Fernando de Noronha, foi instalada uma usina de dessalinização utilizando o processo de Osmose Reversa. A partir daí, mais de 3 mil usinas de pequeno porte estão sendo utilizadas para suprir o déficit hídrico de vilarejos na região Nordeste (AGB, 2006).

Atualmente temos um panorama diferenciado. Em 2010, Israel inaugurou sua terceira usina de dessalinização com capacidade de 348,000 m³/dia, o que é suficiente para abastecer 1,4 milhões de pessoas (Israel, 2010). Em abril de 2013, a Dubai Electricity and Water Authority concluiu a construção do complexo Jebel Ali, que é capaz de suprir água potável para 11 milhões de habitantes (Dewa, 2013).

3.2. Comparação entre Eletrodiálise, outros processos com membranas e métodos diversos de dessalinização

Antes de adentrar-se na comparação técnica dos processos de dessalinização, vale uma breve análise dos outros métodos. Em muitos casos as comunidades residentes nas áreas de déficit hídrico não têm acesso à informação básica, e aliado ao baixo nível cultural de alguns governantes ou a falta de interesse político, podem ser observadas muitas situações com métodos ineficientes e degradadores do ambiente.

Uma solução comum para a dessedentação é a distribuição de água, tanto em garrafas para consumo direto ou em caminhões pipa, que geralmente abastecem poços ou caixas d'água locais. Esse método é comparativamente o mais caro, pois envolve o transporte de uma carga pesada, custos de gasolina e o alto preço que se paga às cooperativas de distribuição. Isso sem falar na emissão de CO₂ decorrente do transporte e a incerteza quanto ao abastecimento, visto que as próprias cooperativas dependem

de uma fonte considerável, que pode por sua vez ser ameaçada em caso de secas extremas.

Atualmente cerca de 300 milhões de pessoas fervem água para purificá-la, levando à emissão de milhões de toneladas de CO₂ todos os anos. Esses métodos por mais que por vezes resolvam o problema de imediato, são comprometedores com o ambiente e certamente não são os métodos mais eficazes, uma vez que ocorrem muitas perdas no processo e a quantidade obtida em fervuras de pequenas escalas, que são as mais usuais, é muito pequena (KOPSCH,2015).

Um método interessante e ambientalmente positivo é a cópia em pequena escala do ciclo hidrológico. Nesse método simplesmente se retém em filmes a água evaporada, e pelo formato do mesmo a água que condensa é direcionada a um recipiente. Assim, pela diferença na temperatura de ebulição, os sais ficam retidos e obtemos água dessalinizada. Como pontos positivos desse projeto temos a simplicidade e o baixo custo, como pontos negativos temos a dependência da forte incidência solar, a grande área requerida para produções expressivas a nível de vilas e a sua baixa eficiência por m². Uma curiosidade é que esse método é o utilizado em casos de sobrevivência a naufrágios.

Também observando a natureza foi desenvolvido o método de dessalinização por Crioscopia. A água do mar quando congela dá origem a blocos de água doce, que formam as calotas polares e os icebergs. Esse fenômeno se deve à diferença do ponto de congelamento da água doce e a água salgada. Assim, muitas plantas de dessalinização se utilizam desse método que consiste na passagem de hidrocarbonetos liquefeitos não solúveis como o Butano pela água salgada, absorvendo assim o calor dessa água e se vaporizando. Essa troca resulta no congelamento da água e na vaporização do hidrocarboneto, o sal fica separado do bloco de gelo e é depois removido. Esse processo por mais interessante que seja não é comercialmente viável pois ainda é extremamente dispendioso (VARGAS, 2010).

Entrando agora no nicho específico de procedimentos de dessalinização por membrana, serão compararados os dois processos mais utilizados e comercialmente concorrentes na atualidade: A Osmose Reversa e a Eletrodiálise.

O princípio básico da Osmose Reversa é o bombeamento sob pressão da água salobra ou salina para que, ao atravessar as membranas, os sais sejam retidos. Compreende-se o processo da seguinte forma: primeiramente ocorre o bombeamento da fonte, seja ela o mar ou um poço profundo, depois essa água passa por filtros de areia e de carvão para que sejam retirados sólidos suspensos e componentes químicos.

Em segundo lugar a água é bombeada sob pressão pelas membranas retendo a nível molecular os sais; essas membranas geralmente são da ordem de 0,0001 microns de espessura. O rejeito é uma solução extremamente salina que não pode ser lançada ao mar sem atrapalhar o ecossistema (KOPSCH,2015).

A eletrodiálise se baseia na separação iônica sob o potencial de dois eletrodos com cargas opostas. O resultado também é, como no caso da Osmose Reversa, uma solução altamente concentrada e um fluxo de água dessalinizada.

Como o resultado obtido é o mesmo, as vantagens de cada sistema estão nos seus detalhes funcionais. De início temos que a Eletrodiálise, por não operar sob alta pressão como a Osmose Reversa, sofre muito menos desgaste, tendo a vida útil das membranas muito superior. A vida útil é também prolongada pelo fato de que a limpeza das membranas no processo de eletrodiálise é bem simples, basta que se reverta a direção do fluxo original, removendo assim o sal e limpando a superfície das membranas. O que não ocorre no processo concorrente, dificultando a limpeza e ocasionando trocas mais recorrentes nas membranas (KOPSCH,2015).

Outro ponto comparativo importante desses processos é a recuperação da água. Enquanto no Processo de Osmose Reversa tem-se uma recuperação de 35 a 65%, no processo alvo de nossos estudos consegue-se uma recuperação de mais de 90%. Esse valor apresentado se refere a quantidade de água que não é perdida durante o processo. Porém, a eletrodiálise está limitada a certo nível de concentração salina, cerca de 10000 mg/L, enquanto o processo concorrente consegue dessalinizar água de mar, no patamar de 35000 mg/L. Pelo fato da eletrodiálise não se processar sob alta pressão e sim sob ação de potenciais, seu limite de salinidade é menor, porém, justamente devido a ser um processo menos dispendioso energeticamente, para um mesmo nível de salinidade a eletrodiálise se mostra muito superior a nível de custo-eficiência. Estimase que para salinidades de até 5000 mg/l de sólidos dissolvidos totais, a eletrodiálise seja superior com relação ao custo energético e eficiência. (KOPSCH,2015).

Conclui-se que os dois processos são importantes e cada um pode ter seu nicho próprio. Enquanto a Osmose Reversa pode ser aplicada para extrair água potável da maior fonte do planeta: os mares, e oceanos a Eletrodiálise se insere em um contexto especifico de salinidades e podendo se constituir em alternativa mais eficiente aplicada a águas salobras. A Osmose Reversa é uma tecnologia amplamente utilizada há mais de 20 anos, enquanto a proposta de estudo deste trabalho é mais atual, o que apesar de não ter a segurança de algo já concretizado no mercado, abre oportunidades e espaço para significativos avanços.

A seguir temos uma tabela comparativa que resume as vantagens e desvantagens do processo de eletrodiálise sobre a osmose reversa, de forma a facilitar a visualização para o leitor:

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da eletrodiálise sobre a osmose reversa Fonte: Autoria Própria

Vantagens	Desvantagens				
 Perda de água no processo muito reduzida. 	 Não é economicamente viável para ser aplicada à água do mar ou a outras fontes muito salinas. 				
 Possibilidade de auto-limpeza pela reversão do fluxo. 	 Diferente de sua concorrente, não ocupa grande espaço no 				
 Menor custo energético e maior eficiência para salinidades até cerca de 5000 mg/l. 	mercado, tendo assim sua manutenção e suporte com mais difícil acesso.				
 Maior vida útil de seus componentes por não trabalhar sob alta pressão. 					
 Devido a seu custo energético menor, possibilita adequação de fontes de energia alternativa, como a fotovoltaica. 					

No decorrer da pesquisa, percebeu-se que o mercado atual no setor está focado na comercialização de plantas portáteis. Acredita-se que esse movimento se justifique pelo fato de que plantas portáteis não necessitem de investimentos tão grandes, o que facilitaria a implementação de soluções locais de pequenas vilas. Plantas menores abrem espaço para planejamento de autossuficiência energética, com painéis solares por exemplo. Além dos investimentos mais baixos, temos a possibilidade de portabilidade dessas pequenas plantas, o que pode atender alternadamente a áreas críticas dentro de uma municipalidade.

3.3. O Nordeste Brasileiro e Demais Áreas Aplicáveis

É muito comum vermos imagens referentes à seca no Nordeste, mas mesmo assim essa região semiárida nacional é uma das mais populosas do mundo. Porém, não é todo território nordestino que sofre com a falta d'agua, mas sim a região denominada

polígono das secas. O polígono das secas é formado por mais de mil municípios situados nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco Piauí, Rio grande do Norte e Sergipe. Nessa delimitação de espaço encontramos balanços hídricos acentuadamente negativos e periodicamente secas anômalas que se traduzem em grandes calamidades (MIN, 2005).

A Figura 3 a seguir mostra a localização geográfica da área denominada polígono das secas:



Figura 3 - O Polígono das Secas

Fonte (BRASIL ESCOLA, 2016)

Como não há controle sobre os regimes pluviométricos, e atualmente os efeitos do El Niño e da La Niña estão cada vez mais intensificados devido a mudanças climáticas globais, os investimentos públicos e os esforços acadêmicos podem se voltar de forma intensa para o aproveitamento das águas subterrâneas. Porém, o embasamento rochoso nordestino oferece outro grande desafio para a manutenção da qualidade da água armazenada.

Cerca de 70% da superfície do Nordeste se localiza sobre um embasamento rochoso chamado de escudo cristalino. Sua característica é de um solo raso e de difícil drenagem. Assim, aliado a alta evaporação, não existem depósitos naturais de água de grande extensão, e os pequenos depósitos que se encontram de forma descontínua em fendas ou fraturas do escudo cristalino são impróprias para consumo humano (SUASSUNA, 1994).

O alto índice de salinidade da região é o principal entrave para a potabilidade de suas águas. A eletrodiálise traz justamente uma proposta de solução para tal problema, tendo assim sua utilização altamente recomendada. A existência dessa concentração de sais elevada tem várias teorias, (WALTER, 1986) relacionou algumas delas que remontam à origem dos solos por sedimentação salina e leitos lacustres como as áreas do Great Lake em Utah e do mar Cáspio na Ásia Média.

Para amenizar os problemas da escassez hídrica, vários açudes são construídos no Nordeste. Grandes obras de açudes têm sido realizadas pelo próprio poder público, graças às verbas direcionadas às municipalidades que se encontram inseridas no polígono das secas. Nessa região encontramos atualmente mais de 70 mil açudes, sendo a segunda região no mundo em quantidade, perdendo apenas para Índia (FJN, 2016).

Desenvolvidos para suprir as demandas hídricas nos períodos de seca, os açudes são utilizados não só para uso doméstico, mas também para dessedentação do gado e irrigação. Entretanto, a baixa pluviosidade relacionada ao alto índice de evaporação faz com que se acumulem ainda mais quantidades de sais nessas águas. Assim, quanto mais antigo o açude, mais tendência ele tem de ser impróprio ao consumo. Como exemplo de grande açude temos em Castanhão, no Ceará, 6,7 bilhões de m³ armazenados. (FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO, 2016)

Analisando o resultado de (MEDEIROS,2004) e (BERNARDO,1984), tem-se uma aproximação da média da dureza das águas que encontramos no polígono das secas, que varia entre 2000 à 5000 mg/L, com valor máximo de 31000 mg/L, valor comparável à agua do mar. A portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, que determina os padrões de potabilidade, define um limite de dureza de 500 mg/L para o consumo humano, e sabe-se que a partir de 5000 mg/L até os rebanhos correm risco ao ingerirem essas águas. Percebe-se então a grande utilidade que poderiam ter as—plantas de dessalinização para a região.

Vale também ressaltar que pelo fato do Nordeste brasileiro e outras regiões semiáridas terem grande incidência solar, as pessoas transpiram mais do que a média,

ocasionando a perda de sais pela transpiração. Assim, cuidados devem ser tomados com o balanceamento de sais no organismo dos habitantes locais.

Outro exemplo de área propícia à aplicação desse tipo de tecnologia é a Índia. Com 73% das vilas indianas usando águas subterrâneas como fonte primária de dessedentação, e sendo 60% dessas águas salobras, o mercado de dessalinização na Índia é ainda maior do que o brasileiro. Isso sem contar que a população da Índia chega perto de 1,4 bilhões de pessoas, cerca de sete vezes maior que a população brasileira. (WRIGHT,2005)

Em escala global, as áreas com terras secas cobrem aproximadamente 40% da superfície terrestre. Nessas áreas 90% das pessoas moram em países em desenvolvimento, acarretando uma maior fragilidade ao processo de desertificação pela dificuldade de acesso aos recursos mais básicos, como a água e o saneamento principalmente (LEMOS, 2015).

No mundo existem regiões semiáridas nos continentes Americano, Africano, Asiático e Oceania. Na América do Sul existem três grandes regiões semiáridas: Guarija, que inclui Venezuela e Colômbia, uma área em diagonal cobrindo a Argentina, Chile e Equador, e o Nordeste brasileiro, sendo o mais populoso entre eles. Em todos esses locais existem iniciativas para implementar a dessalinização e aproveitar suas reservas subterrâneas. E vale afirmar que não só apenas em áreas semiáridas o processo é utilizado, em todos os locais onde exista acesso a água salobra ou salgada e que haja demanda hídrica não atendida a tecnologia se vê útil.

Existem quatro principais fontes de aplicação para os processos de dessalinização. Em destaque tem-se as águas salobras subterrâneas, que é o caso da maior parte das águas no Polígono da Seca e demais áreas citadas anteriormente. Ainda utilizando como exemplo o caso nacional, tem-se as águas salobras de superfície. Essas águas se apresentam em açudes ou rios com maior concentração salina. Os efluentes industriais também podem ser uma fonte importante para aplicação do sistema, uma vez que além de torná-los mais adequados a reaproveitamento, pode-se também evitar danos mais agudos aos corpos receptores. Por último há o mar, que é a maior fonte e também um dos maiores desafios para a viabilidade econômica devido a seu grande teor de sal (Wangnick, 2000).

3.4. Fundamentos do Processo

Existem duas normas que regem tal processo, são elas a D5091-95 e a D5131-90, ambas estão registradas na ASTM International, que é uma empresa americana internacional de normas e patentes.

Fundamentalmente o processo é baseado na capacidade de permeação seletiva de íons. O objetivo do processo é separar os sais em solução do fluxo de água. Como exemplo, o Cloreto de Sódio tem dois íons: o Na^+e o Cl^- . Quando aplicamos a corrente na solução gerando o campo magnético entre os eletrodos de diferentes polaridades, as cargas se movem em direção ao eletrodo de carga oposta à sua. As membranas então seletivamente permitem a passagem para os fluxos paralelos. Assim ocorre que teremos fluxos alternados entre concentrado e dessalinizado.

A Figura 4 abaixo demonstra o resultado da dinâmica:

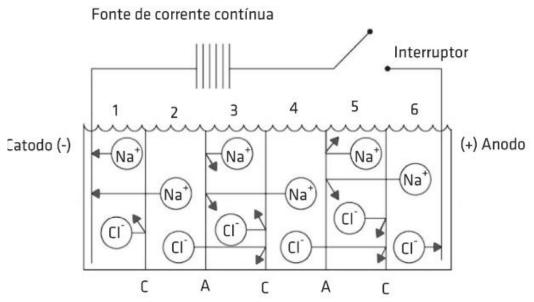


Figura 4 - Arranjo Esquemático do Processo de ED.

Concluímos da figura que teremos os fluxos 1, 3 e 5 concentrados e os fluxos 2, 4 e 6 dessalinizados. As letras 'C' e 'A' representam respectivamente membranas catiônicas e aniônicas. As membranas 'C' permeiam íons positivos como o Na^+ e as membranas 'A' íons negativo como os Cl^- . É importante lembrar que, se a base do processo é a separação iônica, não teremos separação de outros materiais que não tenham tais propriedades, como bactérias e colóides. Um módulo de eletrodiálise consiste em múltiplos pares de membrana, dispostos em série ou paralelo, de acordo

Fonte: (USBR, 2003)

com a intenção do projetista, se é de dessalinizar maior volume com menor eficiência ou menor volume com maior eficiência.

De acordo com (Meller, 1984), a remoção dos sais dissolvidos varia em função da temperatura do efluente, da densidade da corrente elétrica aplicada (A/m²), dos íons presentes e de suas concentrações, da seletividade e capacidade permeativa das membranas, da vazão a ser tratada, da área das membranas e da configuração das mesmas de acordo com os estágios.

Ainda segundo (Meller, 1984), pares de células entre o catodo e anodo compreendem uma *pilha*. Já o menor conjunto de componentes que são repetidos, contendo uma membrana catiônica, um espaçador por onde o fluxo concentrado permeia, uma membrana aniônica e outro espaçador para fluxo dessalinizado, é conhecido como *par de pilhas*. A referência à pilha está de acordo com as semelhanças de estrutura e funcionamento.

A maneira em que as membranas são organizadas é chamado de estágio em série ou stagging. Pela lógica pode-se afirmar que ao se colocar membranas em série, ou seja, de maneira continua, prolonga-se a área exposta e assim aumenta-se a quantidade de sais removida. Dois tipos de estágios em série são utilizados: hidráulico e elétrico. Os estágios elétricos são um par de eletrodo extra, enquanto um estágio hidráulico consiste em adicionar pares de membranas seletivas separadas por um separador de fluxo. O objetivo de existirem esses estágios está ligado tanto à eficiência do projeto quanto à maleabilidade da planta. Por exemplo, se a planta consistir de um único estágio grande seria muito difícil realocar ou reprojetar o percurso dos fluxos caso houvesse necessidade (Meller, 1984).

De maneira prática, os estágios são reproduções compactas do sistema projetados para serem acoplados formando um sistema maior. Ilustrativamente, pode-se pensar os estágios como pilhas comuns AA: uma pilha por si só contém um sistema completo, porém, quando colocadas em série ou paralelo, aumentam a capacidade do sistema como um todo. Por isso, sistemas que são projetados com vários estágios podem ser mais facilmente reorganizados ou modificados, diferentemente de um sistema com um estágio unitário.

Atualmente, as plantas de eletrodiálise são projetadas de maneira que os eletrodos possam ser alternados periodicamente, o que permite uma alternância das câmaras com fluxos concentrados e dessalinizados. Essa alternância minimiza efeitos de incrustação e contaminantes acumulados, aumentando a vida útil e a facilidade de manutenção das membranas. No momento em que ocorre essa inversão de polaridade

acontece a lavagem das membranas, assim devendo-se descartar o produto por um determinado período de tempo.

3.4.1. Membranas

As membranas são certamente a parte mais importante no processo. É sua capacidade e bom funcionamento que determinam a eficiência do projeto. Para compreender melhor o funcionamento e estrutura das mesmas, foram consultadas publicações de (LIEB, 1986), (MALLEVIALLE, 1996), (CHAPMAN, 1998), (AMTA, 2007), (LEE, 2016) e (RODRIGUES, 2016).

O que permite a função principal das membranas são os grupos iônicos fixos em cada membrana. Geralmente as membranas são feitas de materiais poliméricos. A tabela 2 apresenta dados de-propriedades das membranas comerciais.

Tabela 2 - Membranas Comerciais					Fonte: (USBR, 2003)			
Membrana	Tipo	Propriedades estruturais	CTI (meq/g)	Suportes	Espessura (mm)	% de gel na água	Resistência área 0,5 N NaCl (26 °C, Ω cm²)	Permeabilidade seletiva 1,0/0,5 N KCl (%)
Asahi Che	mical Indust	ry Company	/ Ltd. –	Chiyoda-Ku, To	óquio,	Japão		
K 101	Catiônica	Estireno/ DVB	1,4	Sim	0,24	24	2,1	91
A 111	Aniônica	Estireno/ DVB	1,2	Sim	0,21	31	2 a 3	45
Ionics Inc.	Watertown	, MA 02172						
67 HMR	Catiônica	Acrílico	2,1	Acrílico	0,57	46	2,8	91
64 LMP	Catiônica	Acrílico- -DVB	2,4	Polipropileno	0,56	42	6,5	90
204 SZRA	Aniônica	Acrílico	2,4	Acrílico	0,56	46	3,5	93
204 UZRA	Aniônica	Acrílico	2,8	Acrílico	0,57	40	3,7	96
Tokuyama	Tokuyama Soda Company Ltd., NishiShimbashi, Minato-Ku, Tóquio, 105, Japão)	
CL-25T	Catiônica	-	2,0	PVC	0,18	31	2,9	81
ACH-45T	Aniônica	-	1,4	PVC	0,15	24	2,4	90

Na tabela, CTI equivale à capacidade de troca iônica, em mil equivalência por grama.

Por (Rocetto, 2017), temos que os grupos iônicos fixados na matriz excluem outros íons com a mesma carga, repelindo assim íons semelhantes e permitindo o transporte de íons com carga oposta.

Abaixo temos um esquema que demonstra a dinâmica do permeio dos íons pelas respectivas Membranas:

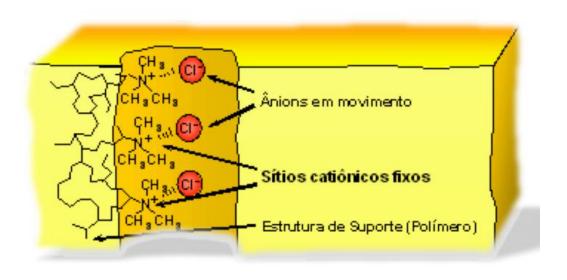


Figura 5 - Íon Transassando Membrana Aniônica Fonte: (Rodrigues, 2016)

O grupo iônico fixo no material polimérico, atrai com seu Na^+ os íons negativos dos sais. O campo elétrico perpendicular garante que o íon não se fixará na sua primeira ligação, mantendo assim o fluxo de íons permeando a membrana. No caso das membranas catiônicas, temos grupos iônicos fixos com, por exemplo, um O^- atraindo os íons positivos e mantendo da mesma forma o fluxo de cátions no sistema.

Como parte central no sistema, a vida útil das membranas interfere significativamente no viés econômico do processo. Substituir as membranas requer uma paralisação completa do sistema, e como temos usualmente centenas de membranas empilhadas e interpostas a espaçadores, se torna extremamente dispendiosa e trabalhosa a manutenção das mesmas.

O tempo médio de uma membrana moderna feita de polímero é de aproximadamente 10 anos. As membranas aniônicas, por sofrerem a ação de oxidantes

fortes como o Cloro, têm sua duração um pouco reduzida. Deve-se lembrar que em casos de águas menos contaminadas vida útil superior à média. (SILVEIRA, 2015).

Devido às circunstâncias de operação e ao pequeno espaçamento entre membranas, dependendo da fonte de água, colônias de bactérias podem surgir dentro do sistema. A necessidade ocasional de desinfetar as membranas e eventuais curtocircuitos no sistema também acabam contribuindo para a queda na vida útil das mesmas. (SILVEIRA, 2015).

3.4.2. Espaçadores

Certamente a parte mais simples do sistema, os espaçadores têm a função de gerar um espaço entre as membranas, a fim de que exista uma câmara para fluxos distintos. Esquematicamente, existem diversas formas de arranjo para o projeto. Os espaçadores podem ser colocados de maneira a gerar um fluxo linear simples, um fluxo paralelo diagonal e fluxos com curvas a fim de torná-lo mais turbulento.

Abaixo temos um esquema simples, mas que demonstra os pontos chave da organização dos espaçadores.

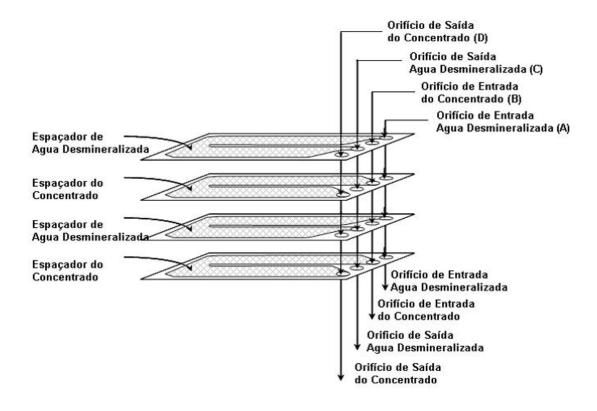


Figura 6 - Esquema Simples de Espaçadores

Analisando o esquema, percebemos que o importante dos espaçadores é intercalar os fluxos. A água ao entrar pelo oficio A terá seus íons salinos afastados durante o percurso, logo, paralelamente a ele, devem ter fluxos concentrados. Assim, após todo o percurso em contato com a membrana, deve-se "pular" um espaçador, mantendo a alternância dos fluxos e continuando o processo de dessalinização. A mesma lógica é aplicada para os fluxos que se tornarão salinos. Deste modo, teremos colunas transversais às membranas canalizando o resultado do processo.

Para espaçadores circulares ou com trajetos internos diferentes, a lógica permanece a mesma. Inclusive, durante minha a presente foram encontrados diversos tipos diferentes de espaçadores e de métodos para organizar o sistema, cabendo então ao projetista decidir de acordo com o espaço disponível.

3.4.3. Eletrodos

Diversos materiais podem ser utilizados para o catodo e anodo, sendo comumente usado Ni/Zn, ou Ni/Fe. Os melhores eletrodos, no entanto, são feitos de platina, porém são muito caros. Como alternativa de menor custo, há o grafite, porém se desintegra muito facilmente.

Em um sistema projetado para que ocorra uma mudança de polaridade e consequente limpeza no sistema, problemas como incrustação são minimizados. Porém, segundo (SILVEIRA, 2005), no anodo pode ocorrer a formação de gases de íons do Hidrogênio, Cloro e Oxigênio. Sendo assim, necessário tomar cuidado e desgaseificar o fluxo no anodo.

Como visto anteriormente, pode-se ter vários estágios elétricos em um mesmo sistema, o que resulta em mais de 1 par de eletrodos. Sendo assim, o custo da peça pode levar a uma elevação exagerada dos custos em um projeto com diversos estágios.

Em um estudo feito por (VEERMAN, 2010), foram medidas comparativamente a eficiência de diversos materiais de eletrodos para projetos de eletrodiálise. Materiais como o Grafite, a Prata, o Cobre, o Titânio e o Carbono foram testados e concluiu-se que, para sistemas com troca de polaridade, a escolha mais custo-efetiva foi a combinação de eletrodos de titânio cobertos com Rutênio (Ru) e Irídio (Ir).

Pelo fato dos eletrodos serem utilizados para diversos processos elétricos e químicos há décadas, seu grande desenvolvimento tem possibilitado uma relação custobenefício cada vez melhor para o processo em estudo. Hoje a vida útil média é de 3

anos, lembrando-se que os eletrodos podem ser recondicionados, gerando menos impacto ao ambiente e aumentando ainda mais seu tempo de vida útil (SILVEIRA, 2015).

Em praticamente todos os projetos observados até aqui constam tanques para circulação da água de limpeza dos eletrodos (*eletrode rinse water*). Como são utilizados de maneira ostensiva durante todo o processo, o desgaste continuo dos eletrodos e o contato com as soluções torna necessária a circulação de um fluxo de limpeza para os mesmos. O fluxo geralmente é de solução especifica para a manutenção, há comercialmente soluções de pepsina, Hidróxido de Sódio, Detergentes entre outros.

3.4.4. Consumo Energético Médio

Na eletrodiálise existem duas fontes de consumo: a bomba para injetar água no sistema e a corrente aplicada para o transporte dos íons. Dependendo do tamanho do sistema, duas ou mais bombas podem ser necessárias. O consumo relativo à corrente entre os eletrodos é proporcional a quantidade de sal removida.

Sabendo-se da diversidade de situações, para chegar a um valor médio para a tecnologia fez-se necessária pesquisa de projetos já existentes chegando-se a uma média de kW/h por m³ tratado. Para tanto, foi consultado o Manual de Dessalinização de Águas Americano (USBR, 2003), o livro Dessalinização de Águas, lançado em 2015 (SILVEIRA, 2015) e o artigo comparativo entre projetos de eletrodiálise de pesquisador do CEFET (JUCÁ, 2005).

Estima-se segundo (SILVEIRA, 2015) e (USBR, 2003) que, para dessalinizar economicamente água salobra, tem-se um consumo de energia elétrica de 2 kWh para reduzir em 1000 mg/l a salinidade para um volume de 3785 L.

Por (JUCÁ, 2005), o processo passa a se tornar econômico para salinidades de até 5000 mg/l, com um consumo de aproximadamente 2.0 kWh/m³. No Vale Spencer, nos Estados Unidos, existe uma usina com uma vazão diária de 2.8 m³ e salinidade afluente de 900 mg/l, que mantém uma relação de energia por volume de 0.82 kWh/m³.

Sabendo que a água se torna própria para consumo humano se os índices de salinidade forem inferiores a 500 mg/l, pode-se aferir quanto seria o preço médio para dessalinização das águas do Polígono das Secas, no Nordeste, que tem valores entre 2000 e 5000 mg/l de concentração de sais.

No caso mais extremo, com 5000 ppm, o custo máximo ficaria de 2.38 kWh/m³, enquanto para águas afluentes de 2000 ppm tem-se um custo de 0.79 kWh/m³, comparável à usina norte americana.

Usando o valor do kWh de 0,70 Reais e o consumo médio diário de água de 170L, que foi a média brasileira de 2013 segundo a ONU, para uma vila de 20000 habitantes custariam 169932 mil reais por mês ou 8.50 reais per capta ao mês, no caso da salinidade de 5000 ppm. E 56406 mil reais por mês ou 2,82 reais per capta ao mês, no caso de salinidade de 2000 ppm. Ressalte-se que esses valores dizem respeito apenas ao custo energético e que o consumo de água calculado envolve todas as atividades humanas, o que não coincide com a realidade de locais em que o sistema seja utilizado primordialmente para dessedentação.

A partir da criação do Programa Água Doce, criado em 2004 pelo Ministério do Meio Ambiente, no Brasil, a solução de usinas de pequeno porte tem se alastrado pela região Nordeste.

O programa água doce, desde que foi criado, implantou até 2012 150 usinas de dessalinização atendendo a 94.340 pessoas residentes em localidades dispersas do semiárido brasileiro. Além disso, é responsável pelo treinamento e capacitação de técnicos especializados em sistemas de dessalinização, para que possam manter as usinas implantadas. O programa teve, até 2014, um investimento de cerca de 168 milhões de reais, com um cenário bom pela frente, vez que o TCU – Tribunal de Contas da União, identifica o programa como prioritário para alocação de verbas. (MMA, 2012).

O programa é extremamente bem vindo no cenário brasileiro, pode-se dizer que é o único investimento do governo federal, em larga escala, focado em sistemas de dessalinização. Esse programa é importantíssimo para validar o tema do presente estudo pois ratifica a ideia da dessalinização como parte da solução para a dessedentação. Infelizmente, o programa não indica a adequação de fontes alternativas de energia, como a solar, dificultando assim a aplicação de usinas em locais distantes da rede elétrica. Além disso, como pode-se perceber pelas diretrizes do programa, a tecnologia da eletrodiálise não está sendo utilizada, a maior parte das usinas utilizam sistemas de osmose reversa ou destilação (MMA, 2012).

Segundo o site do (MMA, 2016), até o meio do ano de 2016 os investimentos foram ampliados para 240 milhões de reais, o número de pessoas atendidas quintuplicou e o número de usinas em implantação passa de 1.200. Além disso, o programa tem metas à serem atingidas para 2019, indicando assim sua existência até um futuro próximo. Tal cenário pode ser aproveitado para que se indique a eletrodiálise como método de

dessalinização mais eficiente, e para que se sugira a utilização de fontes energéticas renováveis, melhorando assim a eficiência do programa.

3.5. Pré-Tratamento

O tratamento preliminar tem um papel crítico na expectativa de vida, performance e custos operacionais gerais desses sistemas. O objetivo principal do pré-tratamento é controlar fenômenos de obstrução por: crescimento de micro-organismos (*biofouling*), óxidos metálicos, incrustações minerais, precipitação de sílica, substâncias coloidais e sólidos particulados (SILVEIRA, 2015).

Mesmo que as características dos sistemas de dessalinização por membrana sejam conhecidas há décadas, os impactos de materiais indesejados advindos de fontes impróprias no sistema ainda precisam ser estudadas. Infelizmente alguns destes problemas são descobertos após usinas inteiras estarem instaladas e em funcionamento. Isso vem principalmente do fato de que para cada fonte de água existe uma composição diferente de substâncias e consequentemente diferentes desafios. Como atualmente se vendem módulos comerciais de dessalinização, muitos dos problemas são causados por falta de análise prévia para implantação do módulo, levando a prejuízos enormes e a falsa sensação de ineficácia do método.

O primeiro passo no planejamento do sistema é uma análise da qualidade da fonte de água. Essa análise não pode ser feita uma única vez, o correto é que seja feito um acompanhamento. Muitas vezes as águas mudam de propriedade de acordo com a utilização da fonte, regimes de chuva, quantidade de infiltração e exposição a materiais geológicos.

O termo *fouling* se refere ao apresamento de partículas como o silte, sólidos suspensos, algas, barro, pequenos flocos de metais ou partículas biológicas na superfície ou no interior da membrana. Dependendo das condições operacionais do sistema alguns metais como ferro e manganês solúveis podem se oxidar dentro do percurso e precipitar em locais onde pode travar fluxos ou danificar a própria membrana. De maneira semelhante, bactérias e microrganismos podem crescer e se espalhar por todo o sistema. O *fouling* biológico é geralmente o mais comum e também o mais difícil de controlar (AMTA, 2007).

Outra nomenclatura comum encontrada ao se estudar os fenômenos a serem combatidos pelo pré-tratamento é o termo scaling. Esse termo se refere ao depósito de

materiais inorgânicos, que são geralmente sais dissolvidos na água. Esse material se cristaliza e precipita na superfície ou dentro dos poros da membrana. O fenômeno ocorre pela concentração elevada de sais perto das membranas, assim o limite de solubilidade é atingido e consequentemente ocorre a precipitação (MMA, 2012).

Sabendo-se que cada fonte de água detém propriedades únicas, fabricantes de membranas e comerciantes de pequenas plantas de eletrodiálise fornecem um guia básico de qualidade de água necessário para prevenir os principais problemas já conhecidos. Deste modo também se mantém um critério para que seja aplicada a garantia dos produtos.

Assim, baseado nos manuais de dessalinização, na tabela 2 são apresentados valores médios e itens principais requeridos. Fatores como pH, presença de ânions e cátions e presença de coloides não foram abordados pois não apresentam valores específicos a serem cumpridos, estes dependem de cálculos relacionados a outros fatores.

Tabela 3 - Qualidade Requerida para ED Fonte: (USBR,2003) (AMTA,2007)

Qualidade Requerida para o Processo		
Turbidez (UNT)	<5	
Índice Densidade do Silte	<15	
Fe +2 (mg/l)	0,1	
Manganês (mg/l)	0,05	
Cloro Residual (mg/l)	Não Detectável	
Temperatura (ºC)	< 43	

A Associação Americana de Tecnologias com Membranas indica que o Índice de Densidade do Silte pode ser aferido pelo teste ASTM D-4189, que é simples e barato. Quanto aos tipos de pré-tratamento, eles podem variar de nulos, em caso de águas subterrâneas bem protegidas, até muito complexo, no caso de efluentes industriais ou água do mar. Os tratamentos podem ser físicos, químicos, mecânicos ou uma combinação de todos eles.

O principal causador de incrustação na operação de sistemas com membrana é o carbonato de cálcio e a sílica. Esse acúmulo e precipitação ocorrem devido a recuperação desses sais solúveis pelo próprio processo. Se, por exemplo, houver uma recuperação de 50%, a concentração de sais do fluxo concentrado será 2 vezes maior do que a do fluxo dessalinizado, ocorrendo mais facilmente o limite de solubilidade e consequente precipitação dos mesmos, causando a incrustação no sistema. Para evitar

a incrustação, este deve estar sempre dissolvido na corrente. Tal tendência é expressa por um índice químico, o ISL (Índice de Estabilidade da Água de Saturação de Languelier), que envolve variáveis como a temperatura do fluxo, o pH, entre outros (MMA, 2012).

Para combater essa tendência de incrustação por carbonato de cálcio, que é natural pelo próprio modo de concentração de sais do sistema, deve-se diminuir o valor do pH durante a operação. Essa queda no pH pode ser feita pela circulação de ácidos, como o clorídrico ou o muriático. Existem ainda incrustações por outros tipos de compostos, como os sulfatos. Antes de surgirem inibidores sintéticos o procedimento era simples, basta manter o nível de saturação abaixo dos 100%. Hoje em dia devido ao uso de inibidores sintéticos, e o surgimento de modernos aparelhos monitores podem-se ter níveis de saturação bem mais elevados, como 200 ou 300%. (SILVEIRA, 2015).

Abaixo são apresentados alguns exemplos de inibidores sintéticos vendidos no mercado:

Tabela 4 - Inibidores de Incrustação Comerciais

Fonte (USBR 2003)

Nome comercial	Nome do produto	Ingrediente ativo		Peso específico		cia	ões	
Nome		Tipo	% em	Peso es	H	Aparência	Aplicações	
e ^{TM3}	MDC 120	Ácido poliacrílico	NA	1,05 a 1,15	3,56	Líquido pálido a âmbar	Geral	
Hypersperse ^{TM 3}	MDC 150	Ácido poliacrílico	NA	1,1 a 1,2	2,56	Líquido pálido a âmbar-escuro	Incrustações inorgânicas	
	MSI 310	Ácido poliacrílico	NA	1,05 a 1,15	4,8 a 5,5	Líquido pálido a âmbar	Sílica	
ProTec RO ^{TM 5}	Pro Tec RO	Mistura	NA	1,03	5,2	Líquido cor de palha	Sílica coloidal e siltes	
	Pro Tec RO-B	Mistura	NA	1,04	7,5	Liquido incolor	Coloides microbianos	
	Pro Tec RO-C	Mistura	NA	1,07	8,0	Líquido amarelo	Orgânicos coloida e enxofre	
	Pro Tec RO-D	Mistura	NA	1,02	6,0	Líquido incolor ou amarelo- -claro	Coloidais mistos	

O crescimento de colônias microbianas (*biofouling*) também está entre as principais preocupações, uma vez que é muito comum e resulta no enfraquecimento do fluxo de permeado e aumento da pressão no sistema. Mesmo em águas oriundas de poços mais

limpos a bioincrustação pode ocorrer. As primeiras membranas tinham material de origem ligado à celulose, o que as tornavam frágeis a uma grande gama de bactérias. A desinfecção com o cloro era utilizada à época em pequenas doses, o que não prejudicava o material. Com o desenvolvimento das membranas de polímeros, não ocorrem mais ataques biológicos na membrana e o cloro se tornou um agente extremamente perigoso, graças ao seu potencial para degradar certas membranas poliméricas. O desafio passou a ser a prevenção da formação de biofilme na superfície da membrana (SILVEIRA, 2015).

A prevenção e controle dos biofilmes são específicos para cada local e dependem sempre de uma investigação da fonte, de um bom projeto mecânico e de uma boa rotina de desinfecção. Os produtos de desinfeção comerciais são indicados para cada tipo de membrana especificamente. Atualmente a maneira mais eficaz é por Irradiação Ultravioleta ou Gama, que praticamente aniquilam o material orgânico existente. Porém, a inexistência de biocida residual da técnica de irradiação permite que micro-organismos sobreviventes possam voltar a repovoar as membranas. Outros agentes desinfetantes como lodo e Peróxido de Hidrogênio são utilizados como aditivos na água de alimentação e apresentam potencial de danos às membranas menor do que o cloro. Dependendo do material da membrana e do orçamento do projeto deve-se consultar fabricantes de desinfetantes e escolher o mais adequado de acordo com o mercado atual (USBR, 2003).

O pré-tratamento é geralmente considerado suficiente quando a manutenção das membranas tem uma recorrência de no máximo 4 vezes ao ano. Como as tecnologias de troca de polaridades e fluxo reverso permitem uma eficiência e durabilidade maior nas membranas, a necessidade de pré-tratamentos complexos, e consequentemente caros, diminui com o passar do tempo e o avanço dessa tecnologia (AMTA, 2007).

Para a maior parte dos sistemas, (USBR, 2003) recomenda que o pré-tratamento mínimo seja uma filtração de 5 microns, mesmo para as fontes mais limpas. A razão para tanto é que mesmo a água estando "livre" de contaminantes do sistema, a própria corrosão da tubulação com o tempo e materiais residuais da perfuração podem danificar o sistema de maneira externa à fonte primária. Então, essa filtração básica serve como uma espécie de garantia de proteção do sistema.

Águas de fontes superficiais ou de origem não subterrânea geralmente vêm com um problema específico: a alta presença de sólidos suspensos. Esse sólidos podem ser de diversas origens, tanto inorgânicas como metais insolúveis, quanto substâncias

orgânicas que causam cor na água. As práticas convencionais de tratamento de água para material suspenso são filtrações, como o peneiramento ou filtros de cartucho, separação gravimétrica, como a sedimentação e clarificação e métodos diversos como a flotação e membranas de filtração.

Em casos onde a turbidez e quantidade de sólidos suspensos da água mudar de acordo com o tempo e clima, aconselha-se que haja uma bacia de sedimentação anterior ao sistema, onde inclusive podem ser aplicadas filtrações como carvão ativado em pó a fim de remover substâncias orgânicas (SILVEIRA, 2015).

Atualmente, a filtração por membranas tem sido aceita como um método eficiente e promissor. Estudos têm sido conduzidos no Arizona e na Califórnia que apontam para uma utilização em larga escala das membranas filtrantes, mesmo para águas com indicadores maiores, como a água do mar. As membranas se diferenciam pelo tamanho dos seus poros, sendo a microfiltração situada entre 0.05 e 0.5mm, enquanto a ultrafiltração entre 0.001 e 0.1 mm. Sistemas de filtração por membrana são fornecidos completos, com sistemas de retro lavagem e monitoramento de integridade (SILVEIRA, 2015).

Em casos com grandes necessidades de pré-tratamento, percebemos que este se torna um sistema à parte e deixa de ser um simples componente paralelo. Tal sistema passa a ser um componente vital, e por vezes impacta severamente a usina. Abaixo, alguns exemplos que (AMTA, 2007) cita a respeito de como um pré-tratamento mal projetado impacta a eletrodiálise:

- O excesso de coagulantes utilizados no pré-tratamento podem causar fouling no sistema quando excessos de flocos são carregados para a usina.
- Qualquer excesso do cloro utilizado para controlar o crescimento microbiológico na fase preliminar é extretamente destrutivo para as membranas de eletrodiálise.
- O controle de cloro e material orgânico pelo carvão ativado pode na verdade levar a um crescimento de micróbios, pois sua composição altamente porosa tende à incuba-los.
- Projetos de pré-tratamento baseados em micro e ultrafiltração também necessitam de atenção para fouling próprio. Quando não se enxergam as

membranas de filtração como um sistema paralelo, simplesmente se transferem os problemas de incrustação para uma etapa anterior à usina de eletrodiálise.

 Quando utilizados ácidos para diminuir o pH da água de alimentação para reduzir o potencial de scaling, gases como CO₂ irão surgir e terão que ser removidos posteriormente no pós-tratamento.

3.6. Pós-Tratamento

A água produzida no processo de dessalinização demanda um tratamento posterior, com a finalidade de prepará-la para sua destinação final, seja ela: usos não potáveis, consumo humano, industriais, etc. Em nosso país temos leis claras que exigem certos indicadores a serem obtidos para cada uso específico, e é baseado nisso que os sistemas de pós-tratamento devem ser projetados.

No Brasil são atualmente adotados os padrões da Portaria nº 2914, do Ministério da Saúde. Essa portaria define, além dos limites padrão, qual a responsabilidade de cada órgão de saúde, seja ele a nível Federal, Estadual ou Municipal. Como os processos de dessalinização em sua maior parte se destinam ao consumo humano, destacam-se abaixo alguns índices definidos no padrão de potabilidade:

- Manutenção obrigatória de 0,2 mg/l de cloro residual livre ou 2 mg/l de cloro residual combinado
- Concentração máxima de 2,4 mg/l para ferro e 0,4 mg/l para manganês
- Turbidez máxima de 0.5 uT para filtração rápida e 1 uT para filtração lenta
- pH entre 6,0 e 9,5
- Teor máximo de cloro residual livre 2,0 mg/l em qualquer ponto do sistema

Geralmente as concentrações de sólidos dissolvidos na água produzida são baixas. Essa baixa concentração de minerais acaba gerando uma agressividade na água, causando a corrosão de materiais que entrem em contato com ela. Portanto, a água produzida deve ser tratada introduzindo-se minerais ou produtos inibidores de corrosão. Existem também outros fatos que tornam a água corrosiva e danosa ao sistema de abastecimento, como altas temperaturas, presença de \mathcal{CO}_2 e oxigênio dissolvido e

baixos teores de sílica que, por meio dos silicatos, previnem de certa maneira a corrosão (WRF,2011).

Para garantia de que a água produzida seja estável deve-se avaliar cada fator individualmente e prever suas ações no resto do sistema, porém, segundo (USBR, 2003), existem metas que geralmente atendem a esse quesito. Sendo elas:

- Dureza total > 40 mg/l
- Alcalinidade total > 40 mg/l
- pH final entre 8 e 9

A água será considerada estabilizada quando o carbonato de cálcio não se precipita, causando incrustações, nem se dissolve, causando a corrosão. Como dito anteriormente, a introdução de mineiras ajuda nesse processo de estabilização. São utilizados comumente produtos químicos como a soda cáustica, a cal virgem ou hidratada e o carbonato e bicarbonato de sódio. Esses produtos são geralmente dissolvidos anteriormente antes de serem colocados na água produzida pelo sistema. Uma saída utilizada no Oriente Médio é o represamento ou passagem da água por reservatórios de mármore, que contém o carbonato de cálcio em sua composição. Assim, à medida que a água vai reagindo com o material, ela vai ganhando alcalinidade e dureza (WRF, 2011).

Vale ressaltar que, como tem-se que remover ${\it CO}_2$ e elevar sua alcalinidade e dureza, geralmente mais de um produto será utilizado. A soda cáustica por exemplo, ajuda no decréscimo do gás carbônico e no incremento da alcalinidade, porém não age na dureza. Já o bicarbonato de sódio só age no aumento da alcalinidade. A cal é o único dentre os citados que consegue agir nos 3 aspectos, porém se a dureza da água já for adequada, não se deve utilizar esse composto. A conclusão a que se chega é que geralmente serão usados mais de um produto e que sua quantidade deve ser avaliada de acordo com a situação do produto do processo (WRF, 2011).

O fenômeno de corrosão é muito complexo, índices simples como os discutidos até agora podem servir como uma base para compreensão e aproximação de uma solução, porém, para resolver de maneira completa e mais definitiva outros índices mais complexos são adotados. O ISL – Índice de saturação de Langelier, o IER – Índice de estabilização de Ryznar e o IAA – Índice de agressividade da água, demandam cálculos e cada um deles apresenta limites e indicadores próprios. De uma maneira mais prática,

existem estudos que sugerem a introdução de placas de material em pontos específico do sistema. Essas placas são do mesmo material que tubulações e demais componentes, sendo utilizados assim como testes práticos da corrosão. Periodicamente essas placas são removidas e pela diferença do peso pode-se aferir a quantidade do material que foi corroída por certo período tempo. Como esse tipo de teste não prevê, ele simplesmente afere o quanto foi corroído, é necessária a utilização de inibidores químicos que criam uma fina camada nos tubos e reservatórios de forma a impedir que ocorra a corrosão do sistema (SILVEIRA, 2015).

Mesmo parecendo controverso, a própria mistura da água concentrada pode ser extremamente eficaz para o equilíbrio final do processo. Uma taxa de mistura, no entanto, deve ser calculada e controlada rigorosamente, levando em conta não só os níveis de minerais a serem repostos mas também os sólidos totais e compostos orgânicos na água bruta. Medidas complementares são necessárias nestes casos como o ajude de pH, e nem sempre a mistura será a solução única. Um balanço de massa deve ser realizado para que se determine a quantidade da mistura que pode ser feita sem que sejam extrapolados os níveis desejados (WRF, 2011).

Como determinado pela Portaria 2914, toda água destinada ao consumo humano deve ser desinfetada. Então, se o sistema utilizará a reinserção de fluxo salobro não tratado, deve-se nos atentar para os possíveis altos índices infecciosos da mesma e planejar uma nova desinfecção.

Atualmente existem 3 formas de desinfecção que são consideradas mais eficientes: A desinfecção com luz ultravioleta, com ozônio ou as diferentes formas de cloro (gasoso, hipocloritos, dióxido ou monocloramina). Para cada tipo de contaminante presente na água existe um determinado tempo necessário de exposição a uma determinada quantidade de agente desinfetante específico (USBR, 2003).

Sabendo-se que a norma brasileira determina que haja cloro residual, as opções de luz ultravioleta e ozônio não são as escolhas mais práticas. Se a opção for utilizar essas duas, faz-se necessário prever também a adição de cloro para atender ao limite mínimo da norma. Essas duas formas entretanto são muito eficazes e podem ser preferência em outros casos. Segundo (WRF, 2011), para locais com normas atreladas a cloro residual, como o Brasil e os Estados Unidos, a cloramina, o hipoclorito e o cloro gasoso são as escolhas mais adequadas.

3.7. Potencial de Alimentação por Energia Solar

O Brasil é país de clima tropical, e essa realidade chama atenção para um tema de suma importância: o grande potencial de energia solar no país.

Atualmente esse potencial está se tornando cada vez mais relevante. Em 2012 a resolução 482 da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, regulamentou o uso domiciliar de painéis voltaicos. A partir de então é permitida a geração de energia elétrica própria e inclusive o desconto na conta de luz. Em 2014, o governo federal realizou um leilão em que investiu cerca de 5 Bilhões de reais em projetos de energia solar, contratando a geração de uma potência energética de cerca de 1000 MW a um custo de 215,12 reais o megawatt-hora. Para ter-se uma ideia, essa potência contratada equivale a um oitavo da potência gerada pela usina hidrelétrica de Tucuruí.

Uma pesquisa realizada por (GREENPEACE, 2015) indica que se fosse utilizado todo o potencial teórico de produção de energia solar domiciliar, seria produzida energia suficiente para abastecer duas vezes a demanda atual das residências. O que também possibilitaria a abertura de seis milhões de postos de trabalho diretos e indiretos. A utilização da fonte fotovoltaica também traria uma economia de 95 bilhões de reais por ano. Tal estimativa foi aferida por um simulador de potencial solar desenvolvida pela própria organização chamado Solariza.

O (SOLARIZA, 2015) funciona da seguinte forma: o usuário escolhe um telhado em qualquer lugar no país e faz a marcação dele. A partir desta, é possível calcular qual é o potencial que aquela residência tem para a geração de energia. O simulador conta com várias missões para incentivar a interação dos usuários. Em um primeiro momento, o participante passa um tempo treinando a instalação solar e, em seguida, passa a experiência à frente para mais pessoas e faz cálculos de quanto dinheiro pode economizar utilizando a energia solar. Sem grandes incentivos governamentais, o uso dessa energia é considerado um investimento. O valor investido para se instalar o sistema e comprar os painéis tem seu retorno total depois de alguns anos.

No Brasil, a aplicação dos sistemas está destinada à área de maior escassez hídrica, o Polígono das Secas no Nordeste, a energia solar se torna por vezes uma necessidade e não uma escolha. Em vários vilarejos locais o sistema elétrico é extremamente precário, e por vezes inexistente. Os sistemas têm seu bom funcionamento ligado à corrente que é destinada a seus eletrodos e as bombas que pressurizam a água no sistema. Assim, os sistema fotovoltaicos atuais trazem também uma certeza de maior de consistência na alimentação. Essa maior certeza se deve ao

fato de na região termos uma média de insolação diária entre 7 e 8 horas, o que é uma média mais que suficiente para abastecer os sistemas e armazenar energia em baterias, para serem utilizadas em dias com menos insolação ou chuvosos (ANEEL, 2010).

Na Figura 7 pode-se observar a média de insolação diária anual brasileira. A região nordeste destaca-se pela melhor incidência de raios solares, e por conseguinte, é o melhor local para aplicação da tecnologia fotovoltaica.

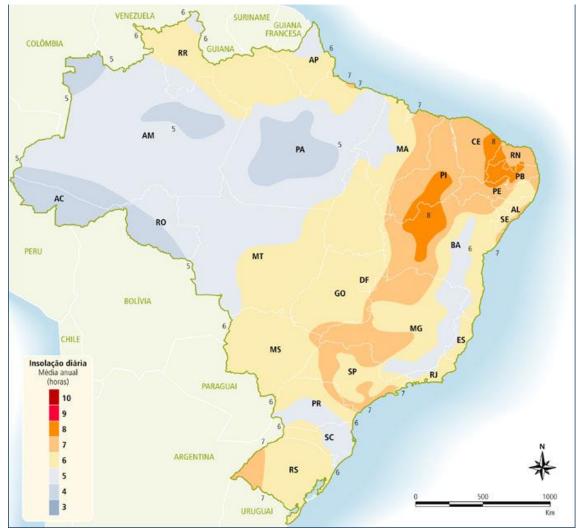


Figura 7 - Mapa de Insolação Diária, Média Anual

Fonte: (ANEEL, 2010)

O índice de radiação solar no Brasil está entre os mais altos do mundo. Grande parte do território está localizado perto da linha do equador. A radiação solar nesta geração apresenta menor variação durante o dia, corroborando para uma produção consistente de energia.

Segundo o CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica ligado à Eletrobrás a região nordeste possui a maior e mais eficaz área de radiação solar do país. Os índices variam entre 5.700 e 6.100 Wh/m2 dia.

A Figura 8 apresenta o mapa de Radiação solar onde se pode verificar o elevado potencial solar no Brasil e, por conseguinte, uma boa vocação como fonte de alimentação para o sistema:

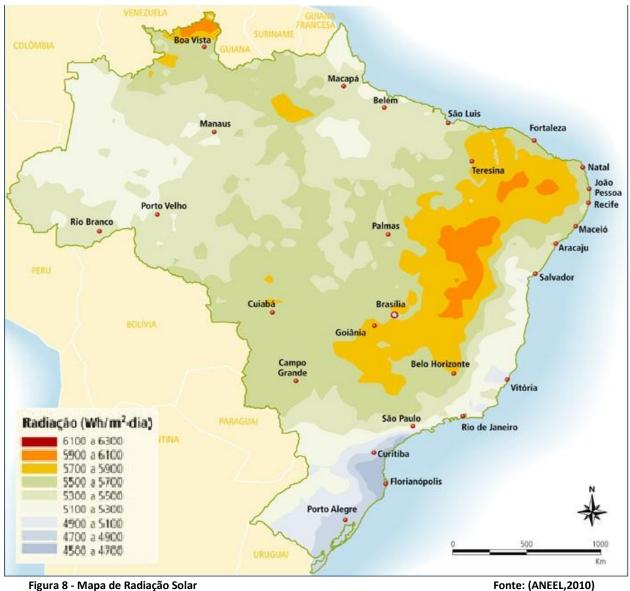


Figura 8 - Mapa de Radiação Solar

Um exemplo similar ao caso do nordeste brasileiro que merece devida atenção é a Índia que, como mencionado anteriormente, tem grande parte de suas reservas hídricas salobras e situadas no subsolo. E lá também, assim como, existem ainda numerosos locais onde não existe acesso a rede elétrica de qualidade. Lá são utilizados atualmente sistema com tecnologia de dessalinização baseada na Osmose Reversa,

que depende de muito mais energia e traz dificuldades nesse sentido para sua manutenção.

Atualmente o mercado de painéis solares já disponibiliza uma variedade de escolhas. Inclusive, é mais comum encontrar kits já montados com os painéis, controladores, inversores e baterias do que painéis sendo vendidos avulsamente. Em (NEOSOLAR, 2016) e (PORTAL SOLAR, 2017) encontramos kits já adequados para sistemas de bombeamento de água, para conexão com a rede elétrica e para diversos outros usos específicos.

Hoje os painéis solares são divididos em 3 principais tipos, o Monocristalino, o Policristalino e o de Filme Fino. O primeiro é o tipo mais antigo e sua composição é principalmente de silíco. O sílico é um material de elevada pureza e demanda técnicas caras para seu manuseio. Por outro lado, é o que ainda hoje apresenta melhor eficiência de captação de radiação. O material policristalino é simplesmente uma mistura de vários tipos de cristais, barateando o custo e reduzindo um pouco sua eficiência. Para esses dois primeiros materiais a vida útil é de 30 anos. Por último, o painel solar tipo filme é uma opção mais prática. Podendo ser colocados diretamente sobre uma superfície, funcionam basicamente como uma película. Sua eficiência reduzida requer áreas maiores e sua durabilidade é em média a metade de um painel solar feito de cristais (SOLARVOLT, 2017).

Os sistemas de dessalinização necessitam de uma corrente contínua, o que combina perfeitamente com a geração de energia com painéis fotovoltaicos. Assim, não é necessário converter a corrente, o que é feito geralmente por meio de inversores, barateando um pouco o projeto.

O sistema só deve funcionar se houver energia suficiente para todos seus componentes, fazendo-se necessário o emprego de baterias, que além de garantir o funcionamento por algumas horas, em caso de falta de radiação, garantem uma constância na corrente recebida pelo aparelho.

Uma rápida pesquisa na internet mostra que em sites de grandes marcas conhecidas, como Americanas, Submarino e Shoptime podem-se encontrar kits para diversas necessidades de geração. Os valores variam de acordo com a potência e qualidade das placas e componentes. Isso mostra que não é complexa a obtenção dessa tecnologia, corroborando com a ideia da utilização da mesma para projetos de dessalinização por eletrodiálise.

Utilizando o exemplo anterior de cálculo de custos, para uma vila com 20.000 habitantes, água com 5000 ppm de salidade e consumo médio de 170L dia por pessoa, seriam necessários aproximadamente 8,000 kWh/dia. Essa demanda energética é muito alta se comparada à realidade da aplicação atual dos kits comerciais de energia solar. Deste modo se faria necessária uma grande área de painéis solares e o investimento inicial para tal tecnologia seria enorme. Percebe-se assim que a aplicação da energia solar se volta mais a pequenas usinas, que atendam a menores produções diárias.

Considerando que em um lugar com grave crise hídrica as pessoas passarão a utilizar a água do sistema apenas para beber, utilizando a água bruta para as demais atividades, a média de consumo diário a ser suprida pelo sistema cai vertiginosamente. Assim, podemos chegar em valores de produção mais razoáveis para a utilização da tecnologia atendendo a uma boa quantidade de pessoas.

Para um consumo diário de 5L por pessoa, um sistema projetado para produzir 10 m³ dia necessitaria de 23,8 kWh por dia e atenderia a 2 mil pessoas. Em um mês a utilização de energia seria por volta de 714 kWh, e desta forma pode-se facilmente achar sistemas compactos de energia solar. A empresa NeoSolar por exemplo, oferece o kits para geração de 365 kWh/mês por 17 mil reais; nesse caso, dois deles seriam suficientes. Existem muitas outras empresas que também oferecem o mesmo tipo de produto, o exemplo dado foi apenas para exemplificar de maneira simples uma aproximação do valor requisitado.

Para ter mais certeza da validade do valor aferido, foi feita uma simulação de custos pelo site da empresa PortalSolar e o resultado foram os seguintes números:

- Preço Médio do Sistema: de 38.849,00 até 50.577,00 reais
- Área ocupada pelo sistema 58,6 m² aproximados
- Geração mensal: 750 kWh/mês
- Necessários 27 painéis de 260w

Tem-se então que o valor inicial calculado está dentro da realidade para o sistema. Além disso, será necessária uma área de quase 60 m² para que sejam instalados os painéis. Se houver a intenção de ter certa mobilidade para que seja aplicado em locais diferentes dependendo da situação atual de cada região, sugeriria a fixação destes painéis em estruturas de áreas menores, compartimentando assim sua distribuição de área e permitindo a mobilidade do sistema em caminhões.

A Figura 9 demonstra um exemplo de como poderiam ser organizados os painéis e suportes a fim de caberem em caminhões convencionais:

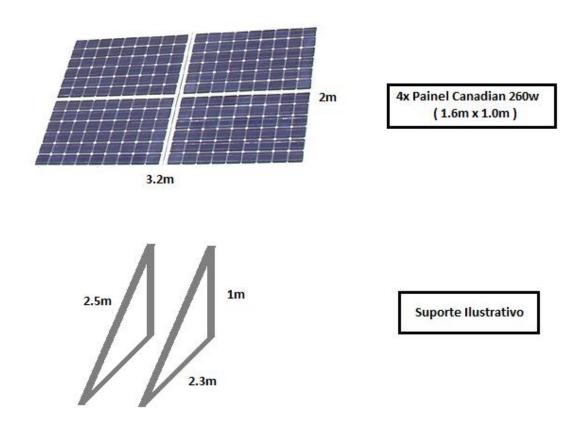


Figura 9 - Ilustração de Painéis e Suporte Fonte: Autoria Própria

Como no sistema precisaríamos de 27 painéis, poderíamos ter 7 estruturas formadas por esse conjunto de 4 painéis Canadian de 260w. O suporte para esses painéis poderia ser feito em barras de alumínio para serem mais leves, e com encaixe nos vértices para que possam ser facilmente desmontados para transporte.

A mobilidade do sistema está atrelado a capacidade de transporte do conjunto de placas de 3.2m de largura por 2m de altura, portanto, a Tabela 5 traz as dimensões internas de uma vasta gama de containers internos, demonstrando que as placas caberiam facilmente em quaisquer um destes.

MEDIDAS INTERNAS DE CONTÊINERS (em mm)

Fonte: (GUIALOG, 2017)

Pés	Tipo	Compr.	Larg.	Altura	Compr.
20	Dry van	5.890	2.345	2.400	6.058
20	Bulk	5.890	2.345	2.400	6.058
20	Ventilated	5.890	2.345	2.400	6.058
20	Open top	5.889	2.345	2.312	6.058
20	Reefer *	5.450	2.260	2.247	6.058
20	Platform	-	-	-	6.060
40	Dry van	12.015	2.345	2.362	12.192
40	Bulk	12.015	2.345	2.362	12.192
40	Dry high cube	12.015	2.345	2.690	12.192
40	Open top	12.302	2.332	2.279	12.192
40	Reefer *	11.550	2.270	2.200	12.192
40	Port Hole *	11.550	2.270	2.200	12.192
40	Platform	-	-	-	12.190
40	Flat track	12.066	2.263	2.134	12.192

Para fins de cálculo de uma aproximação de quanto tempo demoraria para que houvesse o retorno financeiro do investimento, foi considerado o kWh 0,7 reais, o que está de acordo com uma média das tarifas da Light atualmente (LIGHT, 2016). Mensamente o custo de manter o sistema ligado à rede seria de 499,80 reais, o que em um ano oneraria em 5997,60 reais os entes que financiarem a manutenção do projeto. Fazendo uma média de 40.000 reais para o sistema, o retorno financeiro viria em aproximados 7 anos, o que ao meu ver é algo extremamente positivo, principalmente se compararmos com a durabilidade das membranas e outros componentes do sistema.

O cálculo do parágrafo acima foi feito da seguinte forma: com um consumo de 714 kWh e o custo do mesmo a 0,7 reais, pagaríamos o valor de 499,80 reais mensais para que o sistema seja alimentado pela rede comum de energia. Assim, para fins de aproximação, consideramos o custo do sistema de painéis solares apenas o investimento inicial. Deste modo, ocorrerá uma equiparação de custos quando o valor investido no sistema solar se equiparar ao montante pago à concessionária de distribuição de energia. Assim, dividindo o custo total do sistema fotovoltáico pelo montante pago mensalmente a distribuidora teremos a quantidade de meses necessários para cobrir o valor do investimento em energia solar.

Outro ponto importante é que o sistema fotovoltaico solar é considerado limpo, um contraponto a tecnologias poluidoras como as oriundas do petróleo e carvão. A combinação da tecnologia com o processo de eletrodiálise contribui para o aspecto ambiental. Ademais, se nos locais propícios a implantação não se costuma ter acesso satisfatório a rede elétrica cabeada, restam pouquíssimas alternativas como geradores a diesel. A conclusão que este raciocínio nos leva é que a alimentação do sistema por energia solar compensa não só economicamente, mas também é uma das únicas alternativas coerentes com a ideia do sistema.

3.8. Análise de Projetos Existentes

Com o objetivo de se ter uma melhor ideia do avanço dos estudos e dos projetos hoje em dia, inúmeros artigos e teses foram estudadas e analisadas. Muitos projetos estudados inclusive utilizavam outra forma muito conhecida de dessalinização por membrana, que é a Osmose Reversa, já citada anteriormente. Pelo fato de também utilizar membranas, muitos dos conhecimentos puderam ser adaptados, principalmente para o pré e pós-tratamento.

Pelo fato da tecnologia da eletrodiálise ainda estar em desenvolvimento e tentando se provar melhor custo-eficiente frente à sua concorrência, ainda não são numerosos os estudos a respeito. Acredita-se que a tendência é um aumento, uma vez que os indicadores demonstram que para águas com salinidade até 5000 ppm a eletrodiálise vem se consolidando como a melhor escolha.

Acredita-se que o mercado de plantas de pequeno e médio porte que existe atualmente para a dessalinização pela Osmose Reversa tenderá a englobar também as plantas de eletrodiálise.

Grande parte das fontes para esse trabalho apresentavam uma profundidade e complexidade que necessitariam de estudos mais prolongados e que certamente podem servir de base para futuros projetos acadêmicos que não um trabalho de conclusão de curso. Apesar disso, praticamente todos os estudos de alguma maneira foram aproveitados para o presente trabalho.

Desta forma, essa secção objetiva demonstrar alguns destes trabalhos e suas conclusões sobre o assunto.

3.8.1. Estudo de Viabilidade de um Sistema de Eletrodiálise para Domicílios na área urbana da índia

Esse primeiro estudo, de Kishor G. Nayar e colaboradores, foi publicado dia 18 de Dezembro de 2016 no portal ScienceDirect e objetiva estudar se um projeto domiciliar de eletrodiálise teria viabilidade econômica e se sua eficiência seria superior aos sistemas usuais que utilizam a técnica da Osmose Reversa. Esse trabalho corrobora a ideia de que a tecnologia é promissora e que demais estudos a investimentos nesse sentido deverão vir com o tempo.

Este projeto, pelo fato de ser voltado a uso domiciliar, não considerou o uso de energia solar. Sendo o baixo custo um item importante, painéis solares infelizmente trariam um custo inicial grande e o produto perderia a competitividade. Posteriormente, será dado exemplo com o uso da energia solar.

Nayar et al. (2016), percebendo a tendência de purificação caseira com métodos ineficazes, e sabendo da baixa recuperação de água dos sistemas vendidos no mercado, entrou em contato com empresas locais que reportaram uma alta demanda não satisfeita para projetos mais eficazes.

A primeira parte do trabalho foi um estudo comparativo entre as tecnologias existentes. Pode-se perceber que para os níveis salinos encontrados nos locais, entre 500 e 3000 ppm, a única tecnologia competidora era unicamente a osmose reversa, porém sua baixa eficiência de recuperação da água (aproximados 50%) e alto custo energético deixavam um vácuo no mercado para a introdução da eletrodiálise. Vez que em nosso país, nas áreas de déficit hídrico também encontramos níveis semelhantes de salinidade, o estudo e exemplo são adequados à aplicação nacional.

Baseado na avaliação de mercado foram decididas metas para que o *design* do aparelho fosse viabilizado:

- Recuperação de no mínimo 80% da água de alimentação
- Taxa mínima de tratamento de 12 L/h, com tratamento de 1 L a cada 5 minutos.
- Capacidade de armazenamento de 10L, para o caso de falta de energia ou de água
- Preço máximo de 270,00 dólares, ou aproximadamente 870,00 reais, para ser competitivo no mercado indiano. No caso brasileiro, o mercado de pequenas usinas ainda se encontra muito escasso. Uma solução como essa

poderia encontrar demanda, principalmente com projetos como o Água Doce do MMA estando em vigor.

- Tratamento de salinidades até 3000 ppm e com saída menor que 350 ppm
- Funcionamento em 220V 50 Hz. No Brasil temos rede similar, 60 Hz. Isso demandaria uma pequena modificação no projeto ou o uso de conversores de frequência, que existem em abundância no mercado.
- Consumo de potência de no máximo 200W, o que é normalmente comparável a uma geladeira, segundo tabela de consumo de aparelhos de (EFLUL, 2016)

A segunda parte do estudo consistiu em 3 etapas: Decisão da arquitetura do sistema, modelo e validação matemática, e conceptualização do produto.

Geralmente um sistema de eletrodiálise pode ser implementado de duas maneiras: fluxo único ou recirculação. A diferença entre eles é que no caso da recirculação o sistema utiliza uma voltagem fixa e os fluxos de água são circulados a quantidade de vezes necessária para se alcançar o nível de salinidade desejado. Desta maneira o sistema passa a necessitar de dois tanques para armazenar os fluxos de salinidades diferentes e de controladores de salinidade para permitir a saída dos tanques quando se atingir a concentração de sal desejada. Os fluxos saem sempre dos tanques para o sistema, ou para a saída do processo, e os controladores funcionam como válvulas ligadas aos tanques. No caso do fluxo único, apesar de se precisar de menos componentes no sistema, o fluxo e a voltagem teriam que ser modeladas para cada salinidade específica, o que demanda uma complexidade muito maior do sistema. Assim, o modo escolhido foi o de recirculação.

Sempre há também etapas de pré e pós tratamento, independente da concepção de sistema que tivermos e da tecnologia que estiver sendo usada. Um sistema sem os cuidados pré-uso e sem garantia de potabilidade posterior ao processo se tornam frágeis, não apresentando garantia de durabilidade e apresentando risco à saúde do usuário.

O modelo matemático analítico utilizado para aferir a performance do processo de eletrodiálise utilizando a recirculação foi desenvolvido por Ortiz et al., 2005. Por este modelo foi apontado que para um sistema com 18 pares de membranas, seriam necessários 158 W de potência para o resultado esperado, o que está dentro dos limites propostos. Essa potência inclui 40W para os 18 pares de células e 118W para as bombas.

Esse modelo teve sua validação em um experimento posterior, em que 2,96 L de água com 3000 ppm foram criados. Desses, 2,41 L foram tratados, o que representa 80% do total. O tratamento demorou cerca de 13 minutos, e o pico energético foi de 88 W. Assim, o experimento indicou que o projeto do sistema teria sucesso nas metas anteriores, tanto na meta de tempo, quando de percentagem recuperada e consumo de energia.

A conceptualização do produto foi subdividida em 3 etapas, um esquema de fluxos com todos os componentes, um dimensionamento do tamanho do sistema e o custo final.

A eletrodiálise remove as partículas com carga mas não desinfeta e nem corrige outros aspectos da água. Então na conceptualização foram previstos todos esses aspectos. Segue abaixo o esquema:

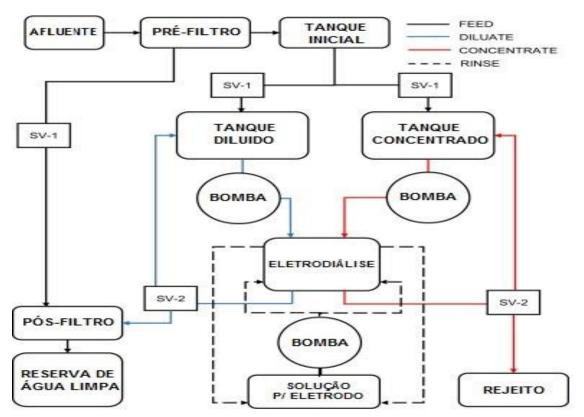


Figura 10 - Conceptualização do Projeto

Fonte: Tradução livre a partir de figura em (Nayar et al, 2016)

Um aspecto importante para a aplicabilidade do sistema em um ambiente doméstico é seu tamanho final. É necessário que o equipamento caiba dentro de um domicílio e que seja funcional para pessoas leigas.

Abaixo está a simulação do sistema com as devidas medidas e todas as partes do mesmo:





Figura 11 - Produto Final

Fonte: Tradução livre a partir de figura em (Nayar et al, 2016)

Como se pode observar, o sistema acabou por se mostrar compacto com menos de um metro de altura e menos de meio metro de largura. Assim, pode facilmente ser adaptado para casas e acaba ocupando quase o mesmo espaço que um filtro com galão.

A capacidade de competição no mercado pelo baixo custo do projeto foi um dos principais objetivos desse estudo. Assim, com todas as peças definidas, Nayar et al fez uma pesquisa de mercado e o preço final do produto ficou em 206 dólares. Considerando uma margem de lucro de 30%, o preço final ficou em 268 dólares, exatamente o valor planejado para atender à demanda de mercado. No sistema, os maiores custos estão concentrados nos eletrodos de titânio cobertos com platina e nas bombas. Os custos foram aferidos diretamente às seguintes empresas: General Electric -GE, Membranes international e lon Tech. Custos de manutenção e reposição de peças não foram considerados.

O estudo conclui que é viável o projeto em pequena escala de sistemas de dessalinização pela eletrodiálise para salinidades até 3000 ppm. O projeto se mostrou economicamente mais vantajoso que a osmose reversa e com eficiência superior no espectro de salinidade apresentado. A parte mais importante disso é percebermos que esse projeto pode ser aplicado em território brasileiro, que até hoje vem utilizando majoritariamente a tecnologia concorrente.

3.8.2. Design de Sistema de Eletrodiálise Reversa movido por energia Solar para um Vilarejo na Índia

Este estudo, da Natasha C. Wright e colaboradores, foi apresentado em 2015 no Congresso Internacional de Dessalinização de Águas, que ocorreu em San Diego, Califórnia. Apesar da aparente semelhança com o anterior, nesse trabalho é proposto um *design* já voltado para o uso da energia solar, podendo assim ser utilizado em locais sem acesso à rede elétrica. O projeto também não visa atender domicílios, mas busca atender a todo um vilarejo. O estudo propõe um projeto de sistema com destinação e modo de alimentação diferente do anterior.

A terminologia *Eletrodiálise Reversa* se remete à possibilidade de inversão dos polos no sistema. Quando a polaridade é invertida, os íons são direcionados para direções opostas e isso permite que haja uma troca de fluxos nos espaçadores do sistema. Geralmente essas inversões de polaridade ocorrem de 20 em 20 minutos. A troca de fluxos serve como uma limpeza, aumentando a vida útil dos componentes e evitando *fouling* no sistema. Basicamente, quando nos referimos à eletrodiálise reversa para dessalinização estamos nos referindo a sistemas projetados com possibilidade de auto-limpeza interna. A eletrodiálise reversa é um mecanismo que necessita válvulas e controladores automáticos e, portanto, tem um custo mais elevado.

Wright et al. (2015) objetivaram rever os méritos da utilização da elétrodiálise alimentada pela energia solar para utilização em vilarejos. Além disso, o trabalho traz um possível design e análise de tal sistema por meio de um protótipo, que será testado futuramente nos Estados Unidos. Não foi encontrado pelo autor do presente projeto de graduação nenhum estudo que tenha testado em campo um protótipo com produção capaz de simular o abastecimento de uma vila.

Segundo a autora, os requerimentos para que o projeto final seja viável, incluem uma produção de 6-15 m³/dia, remoção de sais dissolvidos e de contaminantes biológicos, uma fonte fotovoltaica adequada, recuperação de água em torno de 85% e custo total inferior aos sistemas disponíveis atualmente, que são em sua maioria, sistemas de Osmose Reversa ligados a redes elétricas locais.

Segundo (WRIGHT, 2015), a eletrodiálise reversa tem o potencial de ter melhor custo-benefício do que os projetos atualmente instalados nas vilas. Devido a capacidade de seu projeto funcionar off-grid, sua proposta avança do sentido de provar que a

eletrodiálise, por ser menos custosa energeticamente, pode ser alimentada por sistemas fotovoltaicos e assim ser aplicada em locais mais ermos.

Uma das motivações de (WRIGHT, 2015) para o presente design proposto é que as ONGs que se encarregavam de adquirir plantas de dessalinização, consideram custo-proibitivo os sistemas fotovoltaicos destinados a suprir a grandes demandas energéticas das usinas de osmose reversa. Assim, locais afastados da rede ainda não tinham sido beneficiados com sistemas eficientes de dessalinização.

Este artigo descreve um protótipo que foi desenhado para dessalinizar água bruta com 3600 mg/l a uma taxa de 1,6 m³/hora e ter um índice de recuperação de 92%. O objetivo de projetar e testar este protótipo é primeiramente validar o modelo matemático proposto, e observar os possíveis entraves para produção em escala comercial.

O trabalho foi subdividido em 3 etapas: Seleção do *stack* de eletrodiálise, previsão de performance pelo modelo matemático e diagrama de fluxo com cálculo de demanda energética.

Stack é um termo que utilizado para fazer referência ao conjunto dos estágios que serão a base do processo. Como visto anteriormente neste trabalho, existe uma subdivisão entre estágios hidráulicos e elétricos. Calculamos a quantidade de estágios hidráulicos observando quantas vezes o fluxo passa pelas membranas durante todo o processo. O número de estágios elétricos se refere à quantidade de pares de eletrodos que existem no sistema.

Como segundo (WRIGHT, 2015) cada estágio hidráulico remove entre 50 e 67% de sais, para reduzirmos um concentrado de 3600 mg/l a valores menores que 500 mg/l, foram calculados 3 estágios hidráulicos para o projeto. O primeiro reduziria de 3600 a 1800 mg/l, o segundo de 1800 a 900 mg/l e o terceiro de 900 a 450 mg/l.

Pelo fato do protótipo ser destinado a desenvolver um produto para o mercado, a autora escolheu o menor *stack* disponível da empresa GE Water. O modelo (Model Number AQ3-1-2-50/35 que tem seu esquema demonstrado na Figura 12 a seguir:

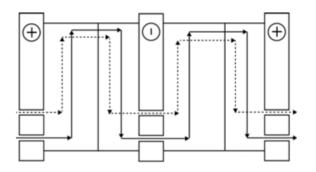


Figura 12 - Modelo esquemático do Stack escolhido

Fonte: (WRIGHT, 2015)

Observa-se que o *stack* contém 2 estágios elétricos e 4 estágios hidráulicos. O modelo têm 1 estágio hidráulico a mais, porém, como comercialmente não existem modelos menores, este foi a melhor opção.

O modelo matemático utilizado foi criado pela própria autora e publicado em trabalhos anteriores. Para a simulação foram admitidas concentrações especificas para íons normalmente encontrados nas águas subterrâneas. O modelo foi rodado na plataforma Matlab e foram calculadas em etapas as eficiências de cada estágio hidráulico, chegando a valores de consumo energético e redução da concentração de sais no fluxo. O resultado do modelo encontras-se na Tabela 6:

Tabela 6 - Resultado do Modelo Matemático

Fonte: (WRIGHT, 2015)

Número do Estágio Hidráulico	1	2	3	4
Concentração de Sal Entrando	60.8	35.4	17.7	10.8
Concentração de Sal Saindo	35.4	17.7	10.8	6.0
Potência (W)	508.6	528.0	122.2	136.5

Para a conceptualização do sistema completo foram necessários, além do *stack*, outros componentes que irão cuidar do armazenamento, monitoramento, pressurização, pré e pós-tratamento.

A Figura 13 representa o diagrama de fluxo e a conceptualização do sistema completo:

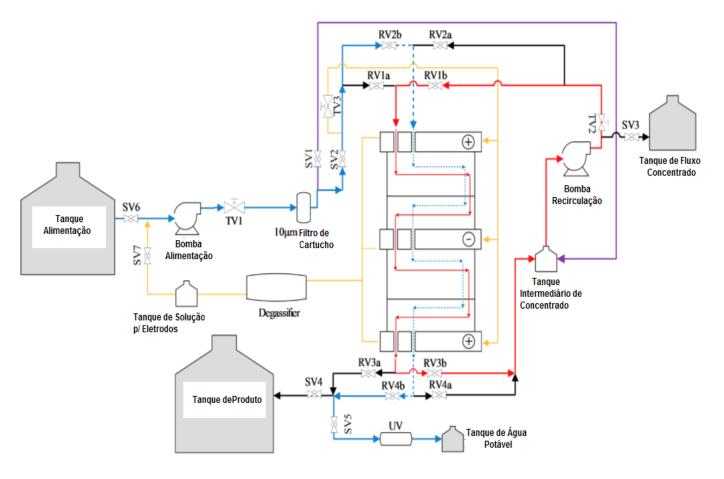


Figura 13 - Conceptualização do Sistema Completo

Fonte: Tradução livre a partir de figura em (WRIGHT, 2015)

Observa-se que filtro de cartucho serve como pré-tratamento para assegurar que o nível de turbidez entrando no sistema será menor que 5 UNT, limite este visto em seção anterior do trabalho. O degasificador tem o papel de remover o hidrogênio e o gás de cloro produzidos no eletrodo. Como pós-tratamento observamos o módulo de UV, que serve para conter os contaminantes biológicos, o modelo adotado foi o Sterilight S12Q-PA. Para fins de exemplificação segue a imagem do modelo:



Figura 14 - Módulo UV - Sterilight S12Q-PA

Fonte: FreshWaterSystems.com

O planejamento de fluxos neste sistema é completamente diferente do trabalho descrito no item anterior. Neste observamos que existe uma combinação de fluxo único e recirculação. O fluxo concentrado recircula enquanto o fluxo a dessalinizar passa apenas uma vez no sistema. A cada 30 minutos, segundo (WRIGHT, 2015), um sistema de programação lógico do sistema troca as válvulas e verifica a necessidade de troca do fluxo concentrado que fica recirculando. Acredita-se que, como o sistema é projetado para volumes maiores de água, a escolha por sistema de recirculação e, por consequência, com manutenção mais complexa, passa a ser viável, pois também permite manutenções especificas de amperagem e mais controle sobre o sistema como um todo.

Por último, para que se escolha o sistema fotovoltaico de alimentação, foram calculados ou colhidos dos manuais de cada componente do sistema seu consumo em Watts. Abaixo está a tabela com o consumo de cada componente:

Fonte: (WRIGHT, 2015)

Tabela 7 - Consumo Energético

Componente	Power (W)
Stack	1295.3
Bomba Alimentação	370
Bomba Recirculação	250
Válvulas e Sist. Controle	200
UV	42
Degassifier	24
Total	2181.3

O sistema de alimentação solar seria projetado para funcionamento por 7 horas, chegando a uma produção diária de 11,2 m³ por dia ou 1,6 m³/hora. O sistema precisará necessariamente de baterias, pois elas linearizam a quantidade de ampères que chega ao sistema, e além disso as baterias funcionariam como garantia de produção para eventuais dias sem sol. O sistema propriamente dito ainda não tinha sido projetado, pois seria responsabilidade de uma empresa que coopera com o projeto.

Como exercício, efetuou-se o cálculo de quanto sairia um projeto para a produção de 2181.3 kWh/mês no Rio de Janeiro. Essa simulação foi feita pelo site da empresa PortalSolar. Utilizando componentes do mercado brasileiro, necessitaríamos de 82 placas fotovoltaicas com capacidade de 260 Watts. A área ocupada pelo sistema seria de aproximadamente 170 m², e o preço médio seria em torno de 120 mil reais. Essa simulação demonstra que para a realidade brasileira, um projeto maior como este,

demandaria um investimento financeiro que pode impossibilitar sua realização. Este alto valor está ligado a enorme carga tributária brasileira, principalmente aos custos de importação. Atualmente está em trâmite no Senado Federal Brasileiro um projeto de lei suplementar, PLS 167/2013, que pretende reduzir drasticamente os impostos incidentes sobre painéis fotovoltaicos. O projeto de lei também prevê que sejam isentos impostos de importação para painéis solares até que estes sejam produzidos nacionalmente com tecnologia similar. Este PLS, que ainda precisa ser aprovado em plenário, pode significar a viabilidade econômica de projetos como este. Reitero que esta simulação representa apenas o cenário brasileiro, o autor do projeto não indicou nenhum custo.

O trabalho concluiu que os diversos benefícios da Eletrodiálise sobre a Osmose Reversa demonstram que ela é de fato a melhor escolha neste nicho especifico, de locais sem acesso a rede elétrica e com salinidades de até 4000 ppm. Os benefícios incluem menor consumo energético, maior recuperação da água e menor sensibilidade aos índices de cloro e mudanças na fonte de água, isso também graças ao sistema de reversão dos fluxos (*eletrodiálise reversa*).

3.8.3. Avaliação Técnica e Econômica dos Sistemas de Eletrodiálise Movidos por Energia Fotovoltaica

Nesse estudo, de (KARAGHOULI, 2010), que foi publicado no periódico ElSevier, é feita uma discussão mais ampla a respeito da aplicação da energia solar nos sistemas de eletrodiálise. Diferentemente dos trabalhos revisados anteriormente, este não projeta um sistema específico. Focado em analisar o estado das tecnologias, traz uma visão mais administrativa destes sistemas, além de recomendações para os futuros projetos. Deste modo, um trabalho menos técnico e mais conclusivo, complementa e encerra de forma satisfatória o item 3.8.

Al-Karaghouli *et al* (2010) começa descrevendo a tecnologia e citando locais que já é aplicada como fonte oficial de água limpa. Posteriormente, o autor faz um breve comentário sobre a questão econômica e fecha o artigo dando recomendações para os futuros projetos e estudos.

Segundo (KARAGHOULI, 2010), a eletrodiálise é considerada um modo de baixo custo de obtenção água dessalinizada. Porém, uma vez que seu consumo energético é proporcional à quantidade de sais na fonte, a tecnologia não é atrativa economicamente para tratar água do mar. O projeto de uma unidade tem necessariamente os seguintes

componentes: tratamento preliminar, *stack* de membranas, bomba para pressurizar o sistema, fonte de energia e sistema de pós tratamento.

Percebe-se que existem inúmeras variáveis que diferem cada sistema. Por exemplo, se o sistema adotar a tecnologia de fluxo reverso (*eletrodiálise reversa*), se a alimentação será pela rede elétrica ou por energias diversas, se o fluxo da água no sistema será único ou recirculado, entre outros. Como a energia solar é uma fonte limpa de energia e pode ser aplicada para usinas de até médio porte, a tendência de seu crescimento neste mercado é significativa.

A figura abaixo mostra um croqui básico de um sistema de elétrodiálise alimentado por energia solar:

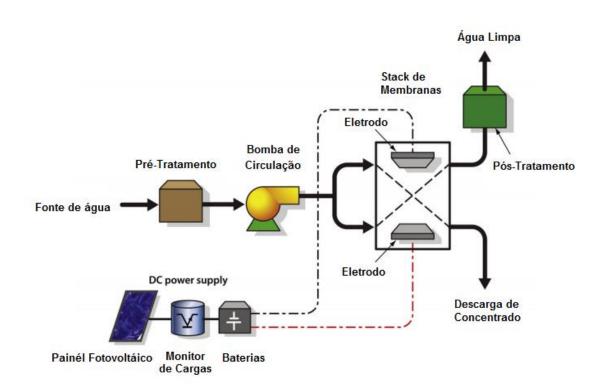


Figura 15 - Croqui Básico para Sistemas de Eletrodiálise movidos por Energia Solar Fonte: Tradução livre a partir de figura em (Al-Karaghoul, 2010)

Mesmo sabendo da variedade de sistemas que podem ser concebidos, o esquema apresentado na Figura 15 resume os principais componentes que deverão estar necessariamente inclusos nos projetos. O pós e pré tratamentos, por exemplo, podem ser compartimentados em diversas sub-etapas. A parte hidráulica pode conter mais de uma bomba e sistemas extras de recirculação. No entanto, todas essas diferenciações de cada projeto não excluem a necessidade de cada etapa individual no sistema.

Atualmente existem diversas utilizações de plantas movidas com energia solar pelo mundo. Na cidade de Tanote, na Índia, há uma usina capaz de produzir 1 m³/dia a um custo energético de 1 kWh/kg. O fato da usina não demonstrar os melhores índices de eficiência se deve ao fato dela existir desde 1986, quando as tecnologias de membranas e de painéis fotovoltaicos eram pouco adiantadas. Um segundo projeto é uma pequena usina experimental que está localizada em New Mexico, nos Estados Unidos. Neste existem dois sistemas separados de energia solar: um para atender as bombas de recalque e pressurização do sistema, necessitando de conversores de corrente, outro utilizado unicamente para alimentar o *stack* de membranas. Neste projeto o consumo de energia para dessalinização é 0,82 kWh/m³ com um custo monetário de 16 dólares por metro cúbico tratado. O terceiro projeto é uma aplicação incomum, onde se utiliza a eletrodiálise para tratar água do mar. Esta usina está localizada no Japão, em Nagasaki e necessita da elevada quantia de 390 painéis solares para funcionar. Tendo seu funcionamento inciado também em 1986, ela é capaz de produzir 10 m³/dia e contém em seu *stack* 250 pares de membranas (Al-KARAGHOULI,2010).

Economicamente, a eletrodiálise hoje é a melhor solução para dessalinização de águas salobras. Mesmo em projetos que prevejam a reversão das polaridades, demandando equipamentos extras como controles de *timing* e válvulas automáticas, existe uma compensação pela diminuição da necessidade de manutenção e incremento na vida útil dos componentes internos. Segundo (Al-KARAGHOULI,2010), o custo energético médio da energia está entre 1,5 e 4,0 kWh/m³ para salinidades entre 500 e 3500 ppm respectivamente. A eletrodiálise ainda tem o diferencial de possibilitar projetos de pequena escala, como no primeiro estudo revisado aqui, e poder ser alimentada por sistemas voltaicos devido ao seu baixo custo energético.

Os sistemas de dessalinização que incorporam energia renovável estão longe de seu potencial final. O custo dos painéis fotovoltaicos é hoje o principal entrave para a adoção dessa tecnologia, e sua redução depende da adoção de certos métodos e recomendações como:

- Investimentos para expandir o mercado de painéis fotovoltaicos a fim de diminuir o custo dos sistemas. O grande custo inicial desses sistemas deve ser amenizado uma vez que a tecnologia está perto de sua maturidade.
- Estudar sistemas de recuperação de energia para as bombas hidráulicas.
- Utilizar sistema de fluidos para resfriamento dos painéis e aquecimento da água afluente, assim reduzindo a demanda energética e barateando os custos do sistema fotovoltáico.

- Utilizar sistemas de booster de corrente para sistemas fotovoltaicos.
 Atualmente há no mercado mecanismos que aumentam até 20% da produção energética em dias de radiação solar amena.
- Intensificar a divulgação e expertise das áreas acadêmicas ligadas a essa tecnologia assim como as técnicas, como a instalação, operação e manutenção através da educação e de atividades de treinamento

Avanços tecnológicos irão continuar a quebrar as barreiras da utilização dessa tecnologia em larga escala. A alta radiação solar nos locais que mais sofrem por *déficit* hídrico é o principal indício de que o futuro dessa tecnologia está ligado a essa fonte energética. Mesmo existindo experiências positivas e provas de que a tecnologia é de fato indicada, ainda existe muito espaço para melhorias no sentido técnico e econômico. Cada avanço nas tecnologias de pré ou pós tratamento, na fabricação de membranas ou eletrodos, na eficiência de painéis solares e até mesmo nas bombas hidráulicas trazem a tecnologia mais perto do sucesso de mercado. Assim, é possível que nos próximos anos possamos testemunhar um maior florescer dessa ideia no mercado e consequentemente a aplicação da tecnologia como uma das soluções para o déficit hídrico de diversas regiões.

A Geração de Energia pela Reversão do Processo de Eletrodiálise (Eletrodiálise Inversa)

Em um primeiro momento faz-se necessário o esclarecimento dessas nomenclaturas. Como são oriundas da língua inglesa, uma tradução literal não permite a diferenciação clara entre *Electrodialysis Reversal (EDR)* e *Reversal Electrodialysis (RED)*. Esses termos, que se referem à eletrodiálise reversa e à reversão do processo da eletrodiálise, respectivamente, se confundem muito quando traduzidos literalmente, causando estranheza e até incompreensão de textos. Portanto, a eletrodiálise reversa, como já visto anteriormente, se refere ao sistema de limpeza interna permitida pela inversão da polaridade. Este mecanismo é utilizado geralmente para a dessalinização. E por fim, foi adotado como tradução livre para a *Reversal Electrodialysis (RED)*, o termo "Eletrodiálise Inversa". Assim, a própria nomenclatura deixa claro que se trata do inverso do processo da eletrodiálise.

4.1. Compreendendo o Processo

Tendo compreendido o sistema de eletrodiálise convencional, no qual é alcançada a separação dos sais da solução, pode-se facilmente compreender como funciona a geração de energia pelo processo reverso de eletrodiálise (*eletrodiálise inversa*).

Para se ter uma imagem inicial do funcionamento do processo, basta se imaginar o processo eletroquímico como um sistema simples que tem uma entrada e uma saída. Na entrada há um único fluxo de solução de água com sais, na saída, temos dois fluxos distintos, um concentrado, outro dessalinizado. A energia elétrica é aplicada no processo para que se possa criar uma diferença de potencial, que é responsável pela indução do movimento dos íons, separando-os e possibilitando o resultado conhecido.

A grosso modo, é possível compreender o sistema de geração de energia simplesmente invertendo a ordem do processo de eletrodiálise. Ou seja, colocando dois fluxos com salinidades distintas como entrada do processo e tendo como produto o fluxo de água salobra, pode-se extrair a energia gerada pela movimentação dos íons, que ocorre pela existência de potencial elétrico gerado pela diferença de salinidade entre os fluxos. Essa diferença de potencial entre os fluxos é conhecida como potencial de membrana (LIEB, 1986).

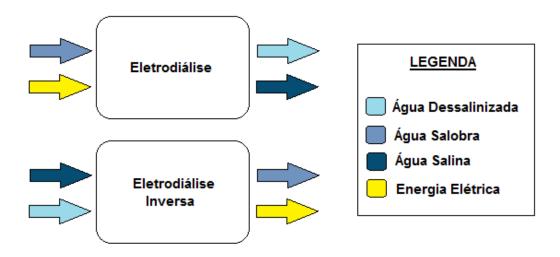


Figura 16 – Esquema de diferenciação dos processos de Eletrodiálise Fonte: Autoria Própria

O gradiente salino, que deve ser entendido como a diferença na salinidade entre os fluxos, resulta em uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial pode ser subdividida entre o potencial elétrico e o potencial químico. Quando combinados, esses potencias têm a nomenclatura de potencial eletroquímico. (BOUNDLESS, 2016).

As membranas e os eletrodos continuam com a mesma função, o que permite a aplicação dos mesmos conceitos matemáticos. Esse fator foi fundamental para a escolha de tratar, no presente trabalho, de ambos produtos do processo.

Na Figura 17 é proposta uma adaptação a um esquema originalmente apresentado em (UNEP, 1998), que ao ser comparado com a Figura 2 deste trabalho permite uma diferenciação e compreensão melhor dessa nova utilização para a eletrodiálise:

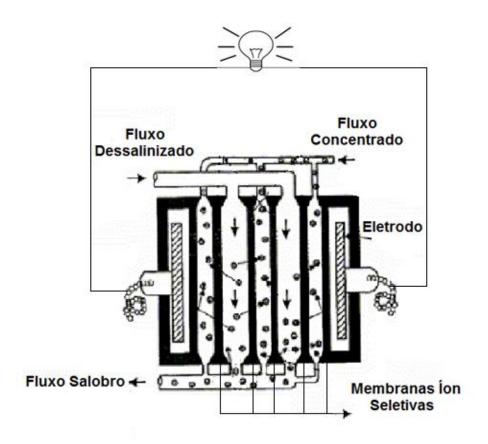


Figura 17 - Esquema da Eletrodiálise Inversa

Fonte: Adaptação de Figura em (UNEP, 1998)

4.1.1. Célula Galvânica, Pilha e Geração de Energia

Uma das partes mais importantes e cruciais para o entendimento do processo é a compreensão de como é extraída energia elétrica através de uma reação química. No nosso caso a reação de águas com concentrações diferentes de sal.

Um par de eletrodos quando imersos em uma solução eletrolítica e ligados por um condutor metálico externo constitui uma célula eletroquímica típica. Uma célula na qual um suprimento externo de energia elétrica é usado para realizar uma transformação física ou química, é denominada célula eletrolítica. Quando a célula é usada para fornecer energia elétrica, isto é, quando converte a energia livre de uma transformação física ou química em energia elétrica, é chamada célula galvânica ou pilha (MACHADO, 2016).

Por essa definição percebe-se que a eletrodiálise inversa se trata de uma célula galvânica. É claro que o processo envolve muito mais do que simples reações e sua complexidade não se compara a uma Pilha de Daniell.

O Anexo I traz uma revisão do funcionamento básico de alguns dos processos químicos e componentes envolvidos na geração de energia.

4.1.2. Potencial Elétrico

O potencial elétrico do sistema é na verdade a soma dos potenciais elétricos que existem em cada membrana, que é limítrofe dos dois fluxos. Para um sistema prático de eletrodiálise por exemplo existem cerca de centenas de membranas em paralelo.

O Potencial Elétrico é a capacidade que um corpo com energia tem de atrair ou repelir cargas elétricas, que é o mesmo que realizar trabalho (GUALTER, 1997). De maneira mais objetiva podemos entender o Potencial Elétrico da seguinte maneira

Dado que uma carga 'Q' gere um campo elétrico. Quando se coloca outra carga 'q' dentro do alcance do campo de 'Q', é gerada uma reação entre as linhas de campo dessas duas cargas. Essas cargas serão atraídas ou repelidas, adquirindo energia cinética, que resultará no movimento (JAIME, 2013).

Sabe-se que deve existir uma energia potencial para que o corpo adquira o movimento cinético. Então, quando essa energia é oriunda da influência de um campo elétrico ela é chamada de Energia Potencial Elétrica (GUALTER, 1997).

4.1.3. Potencial Químico e Energia Livre de Gibbs

Há outro fator de muita importância no processo, o chamado potencial químico. Na termodinâmica, o potencial químico é representado pela letra grega "μ", e é também conhecido como a "energia livre parcial molecular", pois é matematicamente uma derivada parcial da energia livre. Na prática é uma forma de energia potencial que pode ser libertada ou absorvida quando ocorrem reações químicas (ATKNIS, 1999).

O conceito de Potencial Químico está muito atrelado ao conceito da Energia de Gibbs (G), na verdade o Potencial Químico é a grandeza que relaciona a energia de Gibbs e a variação da quantidade de matéria em um sistema à pressão e temperatura constantes (THOMSON, 2005).

A energia livre de Gibbs é uma grandeza termodinâmica que relaciona a quantidade de energia disponível para realizar trabalho útil em um sistema termodinâmico. Então, a variação dessa grandeza representa o máximo de trabalho útil que pode ser realizado nas condições de temperatura e pressão constantes. Essas condições são conferidas na maior parte dos experimentos que ocorrem dentro de um laboratório (MACEDO, 1981).

Quando se pensa na energia total de um sistema, não se pode considerar apenas a energia que está vinculada a agentes internos, é necessário considerar também a energia que está vinculada a relação entre o conjunto do sistema com o seu redor (vizinhança). A entalpia (H) é a representação dessa energia total do sistema que é capaz de ser trocada com o ambiente em forma de trabalho (NORMAN, 1974).

Porém, dada a segunda lei da termodinâmica, existe uma parcela da energia armazenada no sistema que nunca se transforma em trabalho, energia esta que está ligada à entropia. Tal parcela fisicamente é obtida ao se multiplicar a entropia (S) pela a temperatura (T). Para relembrar, a entropia é a mensuração do grau de irreversibilidade de um dado sistema (SMITHS 1990).

Assim, a energia de Gibbs é representada pela diferença entre a Entalpia do sistema e essa parcela não aproveitável para o trabalho. Matematicamente tem-se:

$$G = H - TS$$
 [1]

Pode-se também entender que se um sistema sofre transformações a temperatura e pressões constantes, ou seja, a entropia não varia, a variação da energia de Gibbs representa a totalidade do trabalho que o sistema pode realizar, matematicamente temos (SMITHS, 1990):

$$\Delta G = G_f - G_i \tag{2}$$

Assim, voltando para o processo de eletrodiálise, há dois fluxos separados com diferentes salinidades. A energia extraída desses fluxos é a energia teórica da mistura.

Assim, considerando uma solução ideal ($\Delta H_{mistura} = 0$), temos que a energia livre de Gibbs da mistura será (WEINSTEIN, 1978):

$$\Delta G_{mist.} = \Delta G_{salobra} - (\Delta G_{salgada} + \Delta G_{dessalinizada})$$
 [3]

Ou seja, a Energia de Gibbs para o sistema inverso de eletrodiálise será a diferença de energia que haverá na mistura. Observando a Figura 2 pode-se perceber que a saída de nosso processo é o fluxo de água salobra, resultado da mistura entre água salgada e dessalinizada.

Diferente de sistemas com um único componente, uma solução tem suas propriedades extensivas relacionadas à sua composição, além é claro, da temperatura e pressão. Assim, deve-se descrever uma mistura pelas suas quantidades molares parciais de seus componentes. A energia livre de Gibbs para mistura de componentes é dado pela seguinte expressão (SMITHS, 1990):

$$G = n_1 \overline{G}_1 + n_2 \overline{G}_2 \tag{4}$$

Onde:

- n_x é o número de mols do componente x
- \overline{G}_x é a energia parcial molar de Gibbs relacionada ao componente x

Expandindo a equação [3] resulta a seguinte equação, aplicando ao conceito de elétrodiálise reversa (POST, 2009):

$$\Delta G_m = -[(n_s + n_d)T_m S_{sb} - (n_s T_m S_s + n_d T_m S_d)]$$
 [5]

Onde:

- n se refere quantidades molares dos fluxos
- Os subscritos 's', 'd' e 'sb' são referentes à composição de fluxo salgado, doce e salobro respectivamente

T e S s\(\tilde{a}\) o referentes a temperatura e a entropia respectivamente

Compreende-se essa equação pelo mesmo princípio da equação [3], porém agora tem-se explicitado as quantidades molares dos fluxos dessalinizados e salgados que se transformam no fluxo final salobro. Como se considera que ($\Delta H_{mistura}=0$), a equação fica só com o termo relacionado à entropia que leva o sinal negativo à frente. Esse sinal negativo também pode ser compreendido ao se analisar o fato de que a energia gasta para a reação de mistura não é aproveitada como energia livre.

Para uma mistura de soluções ideais, na presença de eletrólitos, a fórmula de Gibbs é aplicada como se fosse para a mistura de gases ideias, sendo (ΔS) a contribuição da entropia molar da mistura, onde: (CHANG, 2005)

$$\Delta S_{mistura} = -nR(x_a \ln(x_a) + x_b \ln(x_b))$$
 [6]

Onde:

- R é a constante universal dos gases (8,314 J/mol.K)
- n é o total de mols
- $x_a e x_b$ são as frações molares de cada componente

Tendo entendido a relação derivativa entre a Energia Livre de Gibbs e o Potencial Químico, e para fim de percepção matemática e sequência lógica, a formulação do Potencial Químico é (BALL, 2005):

$$\mu = \mu^o + RT \ln x \tag{7}$$

4.2. Funcionamento das Membranas

As técnicas que utilizam membranas foram desenvolvidas primeiramente para dessalinização de águas salobras. Com o passar do tempo, tal processo foi sendo modificado e aprimorado permitindo outros usos, tais como a recuperação de substâncias, tratamento de efluentes indústriais e a eletrodiálise inversa para produção de energia.

Como visto anteriormente, sob a influência de um potencial elétrico os íons são direcionados e separados pela permeabilidade seletiva das membranas de troca-iônica, membranas estas que são postas em arranjo alternado permitindo a dessalinização da água no caso da eletrodiálise comum. Para o caso da eletrodiálise inversa, essa permeabilidade seletiva das membranas entre fluxos alternados corrobora na criação do gradiente salino, que é aproveitado para geração de energia utilizando o potencial eletroquímico do sistema (COSTA, 1996).

O princípio chamado de Exclusão de Donnan é definido como a redução da mobilidade de íons nas membranas de troca iônica. Isso se deve à presença de íons fixos nas membranas da mesma espécie elétrica que os íons móveis na solução (IUPAC, 1997). Membranas carregadas negativamente impede a passagem de ânions, assim como membranas carregadas positivamente impedem a passagem de cátions. O princípio de Exclusão de Donnan é a chave do funcionamento do nosso sistema.

Outro princípio importante quando estudamos o funcionamento das membranas aplicadas ao processo de eletrodialise é o do Potencial de Donnan. Esse princípio é referente à distribuição de uma espécie iônica entre duas soluções eletrolíticas separadas por uma barreira semipermeável. Tal barreira mantém uma distribuição heterogênea da concentração iônica atuando como uma barreira seletiva à difusão dos íons, como é o caso exato dos estudos nesse item. Esse conceito serve para soluções que sejam géis ou coloides assim como líquidos iônicos, como água mineralizada. O potencial elétrico que surge entre as soluções é também conhecido como Potencial de Donnan (IUPAC, 1997).

Seguindo a ordem lógica de conceitos, chega-se ao Gradiente Eletroquímico, que é um gradiente do Potencial Eletroquímico relacionado ao íon que passa por uma membrana (NELSON, 2013). Como dito anteriormente no trabalho, esse gradiente consiste na parte química, relativa à diferença de concentração de soluto entre a membrana, e na parte elétrica, relacionada à diferença de carga ao longo da membrana.

Os íons no nosso sistema, que são mais concentrados na parte salina, se movem em direção ao fluxo dessalinizado por difusão. A diferença de carga também tenderá a ser equilibrada pela difusão até que as cargas se balanceiem nos 2 lados da membrana.

Um ponto interessante que vale ressaltar é que a ideia de membranas de troca iônica para processos surgiu da nossa própria estrutura física. Em nossas mitocôndrias por exemplo, assim como nos cloroplastos, a energia potencial gerada pela existência das membranas celulares é utilizada para síntese de ATP (NELSON, 2013).

Um potencial eletroquímico é análogo à pressão de água em uma usina hidrelétrica. A cadeia das membranas de transporte que impulsionam a passagem dos íons é equivalente às turbinas que convertem a energia potencial da água em outras formas de energia física ou química, e os íons que passam pela membrana são equivalentes à água que acaba perdendo sua energia após sua queda (SHATTOCK,2015).

Para mensurar a força motriz do transporte de um íon, levamos em consideração tanto a porção de potencial químico quanto elétrico. Utilizamos a seguinte equação (AUDINOS, 1992):

$$\Delta G = RT \ln \left(\frac{x_1}{x_2}\right) + ZFV$$
 [8]

Onde:

- Z é a carga iônica
- F é a constante de faraday
- V é o potencial elétrico
- X é a concentração do íon nas 2 faces da membrana

A primeira parte da equação é referente ao potencial químico, visto anteriormente, e a segunda é referente a parte do potencial elétrico.

4.2.1. Potencial entre membranas

Como exposto anteriormente, a diferença de potencial total entre cada membrana é a soma da contribuição do potencial químico e do potencial elétrico. Tais potenciais combinados geram o chamado potencial eletroquímico.

Em uma situação teórica desconsideram-se as perdas do sistema que não são reversíveis, mantendo assim seu potencial constante. A fórmula para potencial de celular é dada pela Equação de Nenrst abaixo (RUSSEL, 1994). A equação é multiplicada por 2 pois na eletrodialise reversa calculamos o potencial por par de celulas, uma vez que necessitamos de no mínimo uma membrana seletiva aniônica e uma catiônica (RUSSEL, 1994).

$$\Delta \emptyset = \frac{{}^{2}RT}{{}^{2}F} \ln \left(\frac{{}^{x_1}}{{}^{x_2}}\right)$$
 [9]

Onde:

- z é o potencial de uma carga iônica ao longo da membrana
- x_{1,2} são as concentrações de íon nos 2 lados da célula
- F é a constante de Faraday

Esta formulação é utilizada para ocasiões onde há um equilíbrio termodinâmico. Quando a membrana estiver em equilíbrio termodinâmico o potencial de membrana é igual ao Potencial de Nenrst (RUSSEL, 1994).

O potencial da membrana que se opõe à difusão de um íon particular através da mesma é chamado de Potencial de Nernst. Como pode ser visto na fórmula acima, a amplitude do potencial de Nernst é determinada pela relação das concentrações dos íons nos dois lados da membrana. Quanto maior for esta proporção maior será a tendência para o íon se difundir em uma certa direção, e, portanto, maior será o potencial de Nernst necessário para impedir a difusão (WAHL, 2005).

Como se sabe, um sistema prático que trabalha com a eletrodiálise contém centenas de células. Assim, como se representa um par de células (catódica e anódina) como uma fonte de potencial, o potencial total do sistema pode ser representado por (VEERMAN,2008):

 $E = Nx\Delta \emptyset$ [10]

Onde:

- N é a quantidade de células-par do nosso sistema
- E é o potencial total do sistema obtido pela formulação de Nernst mostrada anteriormente

Para uma formação dos conceitos teóricos iniciais considera-se que a perda de carga nas membranas não é considerável, que o potencial elétrico possa ser aferido utilizando condições de circuito aberto, e que o sistema com todas as membranas implica em uma resistência interna R. Essa resistência diminui a voltagem V que nosso sistema consegue gerar (POST, 2009):.

A voltagem que o sistema gera funciona para o transporte de cargas por meio dos cátions e ânions, e é também usada para gerar uma corrente elétrica no nosso circuito elétrico adotado.

Como sabemos dos conceitos fundamentais de física, temos que:

$$V = RI ag{11}$$

Onde:

- I é corrente elétrica
- V é a voltagem do sistema

Na formula para cálculo do potencial total do sistema (E), quando removida a perda de potencial pela resistência interna, tem-se um novo potencial que seria utilizável (POST, 2009):

$$V = E - RI ag{12}$$

Sabe-se da física que a potência (P) de um sistema é:

$$P = IxV ag{13}$$

Assim, ao se combinar as equações [11] e [12] obtem-se a relação:

$$P = IE - I^2R ag{14}$$

Para analisar a eficiência do sistema, é importante relembrar que (HOWELL, 1987):

$$n = \frac{V}{E} \tag{15}$$

Onde:

- n é a eficiência termodinâmica
- V é o potencial elétrico
- E é o potencial eletroquímico

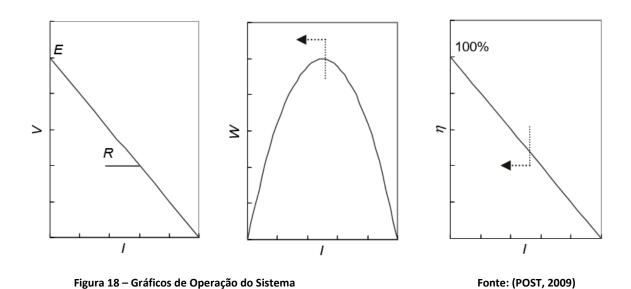
Ou seja, o sistema vai ter maior desempenho para geração de energia elétrica à medida que sua eficiência termodinâmica for maior. Para analisar possíveis cenários a fim de buscar melhor eficiência no processo, pode-se expandir a equação [14] (POST, 2009):

$$n = \frac{E - IR}{E} = 1 - \frac{IR}{E} \tag{16}$$

A eletrodiálise inversa pode ser operada entre dois extremos (Figura 18). O primeiro extremo é uma operação que ocorre quase em curto-circuito, onde $V \downarrow 0$ e $I \uparrow E/R$.

Essa aferição é confirmada ao substituir (V = 0) na equação [12]. Nesse extremo tanto a potência quanto a eficiência termodinâmica são zero, segundo substituição nas fórmulas [13] e [15].

O último extremo é uma operação em quase circuito-aberto, onde $I \downarrow 0$ e V = E, segundo [12]. Nesse caso a eficiência termodinâmica seria quase 100%, porém sem produzir potência para utilizar no circuito elétrico, segundo [13] e [14] (POST ,2009).



As figuras acima representam a dinâmica das variáveis V, E, R, I, (W = P) e n com as equações [12], [13], [14] e [15]. O propósito dessa representação é facilitar o entendimento da relação que as variáveis tem entre si, buscando um equilíbrio entre elas que proporcione uma maior potência e eficiência do sistema. Ou seja, ao manipular as equações mencionadas acima, busca-se um ponto ótimo de operação no sistema.

Para simplificar, busca-se uma maior eficiência termodinâmica, logo, ao observamos as relações trabalhadas anteriormente, a primeira ideia é minimizar a corrente, para assim aumentar o valor de V, isso pode ser aferido olhando a última imagem da Figura 18 e observando as equações [12] e [15]. Porém, quando se diminui muito a corrente, a potência do sistema, que é diretamente relacionada a ela, torna-se mínima, isso pode ser observado pela fórmula [13] e observando a segunda imagem da Figura XX. Finalmente se chega à conclusão que existe um ponto ótimo para a corrente, onde se ocorre o máximo da potência e se mantém uma eficiência termodinâmica teórica razoável.

Como primeira estimativa de operação prática maximiza-se a potência, com $I = \frac{E}{2R}$ e V = E/2 e consequentemente uma eficiência termodinâmica de 50%. Para uma primeira estimativa esse cenário pode ser justificado: a potência obtida por m² de membrana (densidade de potência) está então maximizada. (POST, 2009).

Analisando-se esse resultado criticamente, percebe-se que muitos aspectos não estão sendo levados em conta, servindo apenas como uma indicação matemática inicial. Nota-se que a discussão se torna mais complicada à medida que as dinâmicas do processo são levadas em conta, e são muitas, o que resultaria em um ponto de operação consideravelmente diferente do que aferimos pelas fórmulas.

A voltagem do sistema, que é diretamente relacionada com o potencial que se podemos extrair para nosso circuito, se modificará com a mudança na densidade salina de cada fluxo. Como o sistema tem a tendência de equilibrar o gradiente salino com o transporte dos íons, a voltagem decresce com o incremento da quantidade de cargas *Q* transportadas.

Por outro ângulo, à medida em que a resistência do sistema é largamente determinada pela baixa condutividade do fluxo dessalinizado, quando há o incremento das cargas transportadas na solução, ocorre uma redução na resistência, pois a condutividade da solução diluída cresce junto com a maior quantidade de sal na mesma.

4.3. Breve Histórico e Modelo Matemático Básico

Pattle, em 1954 iniciou a pesquisa sobre a extração da energia do gradiente salino. Durante os anos seguintes, a maior parte dos esforços acadêmicos se direcionaram para a tecnologia da Osmose Reversa, o que reflete até hoje na sua maior utilização. No entanto, existiram alguns cientistas que, com esforço colaborado, conseguiram desenvolver um modelo teórico compreensivo para eletrodiálise inversa. Esse primeiro modelo desenvolvido serviu para gerar recomendações que tornassem o processo mais viável para utilização em larga escala (GILSTRAP, 2013).

Os primeiros estudos voltados para eletrodialise inversa derivavam dos modelos utilizados para as usinas de dessalinização. (FORGACS, 1975) foi o primeiro autor a publicar uma adaptação de um modelo de eletrodiálise voltada para geração de energia. As previsões de seu modelo se mostraram consistentes em um teste posterior utilizando água do mar morto.

Weinstein *et al* (1976), seguindo de maneira colaborativa o estudo de Forgacs, publicou um modelo matemático simplificado e o validou com experimentos em um pequeno protótipo de eletrodiálise inversa. Em seu modelo, para um *stack* com *N* células de membranas, a voltagem do circuito é a soma das potências individuais das membranas. A resistência interna do *stack* é a soma das resistências específicas de cada componente do sistema relacionado com sua área. A corrente *I* que passa pela resistência do sistema é obtida com uma relação entre a voltagem do circuito e a resistência interna do sistema, calculados anteriormente. Seu modelo sugeriu as seguinte 3 fórmulas:

Modelo Matemático de Weinstein e Leitz

Voltagem em Circuito Aberto:
$$V_{stack}^o = 2N \frac{\alpha RT}{F} \ln \frac{a_s}{a_r}$$
 [Volt]

Resistência Interna do Stack:
$$R_{stack} = \frac{N}{A}(R_a + R_c + R_r + R_s)$$
 [Ohm]

Consumo Bruto de Energia:
$$W = I^2 R_L = \frac{(V_{stack}^o)^2 R_L}{(R_{stack} + R_L)^2}$$
 [Watt]

Figura 19 - Modelo Matemático para Eletrodiálise Inversa

Fonte (GILSTRAP, 2013)

Onde:

- R é a constante universal dos gases
- Té a temperatura
- α é a permeabilidade da membrana
- F é a constante de Faraday
- A é a área ativa da membrana
- Os sobescritos a, c, re s significam membranas de troca aniônica, catiônica, água de fonte de rio e salina respectivamente

Pela a análise do modelo proposto acima pode-se perceber a importância das discussões teóricas que foram explanadas anteriormente no trabalho. A equação referente à voltagem pode ser relacionada com a equação de Nenrst [9] e a equação do consumo bruto de energia pode ser relacionada com a equação [14]. Deste modo, é possível entender que boa parte da conceituação que serve de base para a modelagem matemática foi abordada nesta parte teórica do estudo.

4.4. Componentes necessários para um protótipo

Um sistema de eletrodiálise inversa compartilha praticamente de todos os componentes do sistema de eletrodiálise para dessalinização. Como até hoje só existem protótipos dessa última tecnologia, não existem ainda discussões sobre as melhores escolhas das peças e nem dos principais problemas encontrados durante o funcionamento de uma usina. Deste modo, como já foram intensamente discutidos os componentes de um sistema de eletrodiálise, essa parte do trabalho trará de maneira bem resumida as principais partes para que se monte um sistema básico.

Para a circulação dos fluxos salino e diluído é necessária a utilização de bombas, que pressurizam e direcionam as águas dos reservatórios fonte para o sistema. A medição elétrica utiliza um multímetro, de preferência que possa guardar dados de maneira eletrônica para que sejam analisados futuramente. O multímetro é conectado aos terminais positivo e negativo para funcionar como um componente do sistema.

O sistema em si contém uma distribuição entre membranas e espaçadores e um sistema de eletrodos. Existem vários tipos de organização das membranas, mas como estamos tratando de protótipos, geralmente são poucos pares e colocados de maneira simples, abaixo um exemplo:

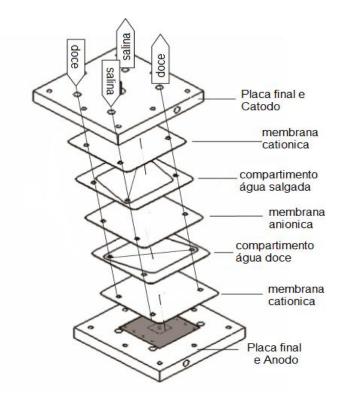


Figura 20- Esquema Protótipo de Elétrodialise Inversa Fonte (POST, 2009)

A Figura 20 exemplifica uma organização básica dos componentes para a construção de um protótipo. Pode-se observar a semelhança com os sistemas de dessalinização e a diferença na complexidade que existe entre um protótipo e sistemas completos.

O sistema de eletrodo também pode ser observado na última figura, ele consiste nas placas finais, no catodo e no anodo e na solução própria de limpeza que circula em contato com as placas. Geralmente existe um orifício nas placas finais para que haja a circulação da solução própria. A circulação possibilita o funcionamento longevo do catodo e anoto removendo os contaminantes que se criam de acordo com o uso.

4.5. Desafios para o Desenvolvimento e Alguns Resultados

Os experimentos baseados nessa tecnologia estão todos ligados a modelos matemáticos muito complexos. Como ainda se busca uma prova da eficiência desse método de extração de energia, cada trabalho testa circuitos elétricos e formulações distintas para se alcançar os índices desejados. Índices esses que, quando alcançados

provarão a validade dos modelos criados e justificariam o investimento na criação de usinas em larga escala.

O parâmetro principal para avaliar a capacidade de geração de energia é a Densidade de Potência (W/m²). Ao longo das décadas, foi se percebendo que para essa tecnologia, o aumento da densidade de potência estava ligado ao tamanho do espaço que existe entre as membranas. Ou seja, quanto menor tamanho do espaçador maiores índices se alcançavam. Porém, com espaçamentos menores também ocorrem mais facilmente fenômenos como o *fouling* e o *scaling* (GILSTRAP, 2013).

Existem muitos fatores envolvidos na quantidade final de energia a ser extraída. Além dos mencionados anteriormente, existe a questão da velocidade do fluxo de água que entra, a pressão que a mesma sofre dentro do *stack*, a contração de sais que existe na fonte, a qualidade e nível tecnologia das membranas, entre outros.

Abaixo está uma tabela feita por (POST, 2009), que traz de maneira temporal os avanços relativos à Densidade de Potência. A Tabela 8 foi complementada pelo autor do presente trabalho com as previsões mais atuais dos modelos matemáticos que levam em consideração novos materiais de membrana. Os valores de densidade para os dois últimos estudos são previsões que resultaram de novas modelagens mas que dependem de condições e matérias de teste específicas a serem executadas.

Tabela 8 - Resultados de Densidade de Potência

Sang Woo Lee

Pesquisador	Ano	Densidade de Potencia (W/m²)	Espaçador (mm)
Pattle	1954	0,05	0,7
Weinstein e Leitz	1976	0,17	1,00
Jagur et al	1986	0,41	0,55
Turek	2007	0,46	0,19
Suda	2007	0,26	1,0
Veerman et al	2009	1,18	0,2
Gilstrap	2013	>1,2	0,5

2016

Para que seja possível entender comparativamente o que significam os índices alcançados de Densidade de Potência, em uma usina hidrelétrica, por exemplo, uma média aproximada desse indicador é de 2.95 (W/m²). Veerman (2009) calculou que os custos de produção de 200 MW são comparáveis a 200 MW produzidos em uma fazenda eólica. Assim, mesmo ainda estando em estado inicial de desenvolvimento,

Fonte: Modificado de (POST, 2009)

não informado

pode-se dizer que é a eletrodiálise inversa tem potencial para se constituir em uma alternativa viável.

Para trazer esta tecnologia a um nível mais elevado alguns entraves importantes devem ser superados: O desenvolvimento de membranas para uso específico é precário, não existe até hoje nenhuma membrana desenvolvida especialmente para o processo. Sendo as membranas uma das partes mais importantes, a falta de componentes desenvolvidos para este propósito específico é um entrave enorme para que sejam alcançados os índices desejados. Não existe também nenhum estudo específico sobre o pré-tratamento necessário. E por último, não existe nenhum projeto em escala normal para que se faça uma avaliação econômica de custos e de produção (Veerman, 2009).

Consegue-se perceber que os principais entraves estão ligados ao pequeno número de estudos que foram realizados até hoje. Apenas questões mais centrais estão sendo discutidas até o momento, como previsões de eficiência e aspectos que giram em torno da dinâmica dos fluxos no *stack*.

Projeto Teórico de Dessalinizador alimentado por Energia Solar

Pelo pequeno número de estudos existentes e subsídios técnicos a respeito da eletrodiálise inversa, como produto deste trabalho será realizado um projeto teórico para um dessalinizador voltado para a realidade brasileira. Este dessalinizador será projetado para suprir o déficit hídrico relacionado a dessedentação humana.

5.1. Escolha do Local: Critérios, Estratégia e Definição

Como explicitado anteriormente neste trabalho, a área brasileira que sofre com o maior déficit hídrico está localizada na região nordeste, especificamente uma área denominada polígono das secas. Esta área pode ser observada na Figura 3 localizada no início do trabalho.

Em um primeiro momento, deve-se escolher a localidade para qual o projeto será destinado. Para a escolha deste local foram utilizados os seguintes critérios:

- Cidade sitiada na área denominada polígono das secas
- Qualidade da água comprometida devido ao índice de salinidade
- Existência de informações adicionais sobre a qualidade da água, além da salinidade
- Alto índice de radiação solar para que se possa adequar sistema fotovoltáico como alimentação principal
- Índice de salinidade médio não superior a 5000 mg/l

Para melhor aplicação do projeto, procurou-se também por uma cidade que não tivesse seu abastecimento baseado unicamente em concessionárias, por exemplo, uma cidade que tenha possibilidade de explorar fontes de água subterrânea é mais adequada para o projeto pois serve também como simulação para lugares mais ermos onde a única fonte possível é por vezes águas de poços. Vale ressaltar que a tecnologia pode ser aplicada as mais variadas fontes, como açudes e rios, desde que estejam dentro dos limites de salinidade discutidos durante este trabalho. A ideia principal por detrás do projeto é levar água potável aos locais que apresentem maior dificuldade hídrica, portanto, como não são todas as cidades e vilas que tem acesso a uma fonte de água

superficial, como açudes ou rios, o cenário mais crítico é encontrado em locais onde a água é unicamente obtida por perfuração de poços.

Os dados mais recentes encontrados sobre a situação das fontes de abastecimento subterrânea no nordeste datam de 2005. À época, o Ministério de Minas e Energia lançou um projeto chamado Cadastro De Fontes De Abastecimento Por Água Subterrânea. Porém, os dados sobre as fontes incluem somente a salinidade das mesmas, não apresentando outras informações adicionais sobre a qualidade da água (CPRM, 2012).

Deste modo, para agregar informações importantes relativas a qualidade das águas locais, foram procurados estudos sobre os aquíferos localizados dentro das áreas definidas anteriormente. Assim, ao escolher uma pequena cidade ou vila localizada sob a área de um aquífero, teríamos uma noção das condições das águas subterrâneas do local. Sabe-se que somente uma análise *in loco* continuada apresenta as reais condições da fonte, o próprio modo de perfuração, o solo local e a exposição do poço a intemperes pode alterar as condições locais de qualidade da água. Porém, como não foi possível encontrar uma localidade que atendesse à todas as condições anteriores, optou-se pela presente estratégia.

Portanto, a melhor opção para o projeto foi a cidade de Parazinho, localizada no estado do Rio Grande do Norte. Esta cidade se localiza na área mais crítica do polígono das secas, vide Figura 3, e está sob o aquífero Jandaíra.

5.1.1. Parazinho-Rio Grande do Norte e a salinidade de suas águas

Parazinho é um município do estado do Rio Grande do Norte localizado em uma região denominada Baixa Verde. A microrregião da Baixa Verde é uma das microrregiões do estado brasileiro do Rio Grande do Norte pertencente à mesorregião Agreste Potiguar.

Segundo o censo de 2010, a população total residente era de 4.845 habitantes. A população estimada para 2017 é de 5215 habitantes com IDH medido em 0.549, o que é extremamente baixo, principalmente quando comparado ao IDH médio brasileiro que é 0,755. (IBGE, 2016).

A Figura 21 a seguir apresenta a localização da cidade:



Figura 21 - Localização Geográfica de Parazinho

O município é banhado apenas por cursos de água secundários e intermitentes, dos quais os principais são os riachos Baixa Branca e do Cabelo. Não é conhecida a existência de açudes na cidade. Dos 959 domicílios permanentes registrados até 2015, apenas 500 eram abastecidos por rede geral de distribuição de águas, os outros 459 utilizam poços ou nascentes. No município existem 77 poços d`água, dentre esses 68 são de uso privado e 9 são de uso comunitário. (PREFEITURA DE PARAZINHO, 2015).

Segundo (MMA, 2005), em relação ao uso da água extraída pelos poços, 24% dos pontos cadastrados são destinados a dessedentação humana, 35% são destinados ao consumo humano para usos gerais, 8% para agricultura, 30% para dessedentação de animais e 3% para outros usos. Com relação à operação dos poços, ainda por (MMA, 2005), cerca de 40 poços tem seu funcionamento continuado, entre os quais cerca de 60% utilizam como fonte de energia a rede elétrica.

Com relação à qualidade das águas dos pontos cadastrados, foram realizadas in loco medidas de condutividade elétrica, que é a capacidade de uma substância conduzir a corrente elétrica estando diretamente ligada ao teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. Foram coletadas e analisadas amostras de 56 poços tubulares. Os resultados das análises mostraram valores oscilando de 345,80 e 5291,00 mg/l, com valor médio

Fonte: (IBGE, 2016)

de 1496,32 mg/l. Dos 56 poços analisados, 55 apresentaram valores de sais acima de 500 mg/l, ou seja, 98.20% dos poços necessita de um sistema de dessalinização (MMA, 2005).

Tanto os dados socioeconômicos quanto os índices de qualidade das águas indicam a necessidade de uma intervenção do governo. Deste modo, o presente trabalho apresentará um projeto teórico de um dessalinizador baseado nos informações apresentadas anteriormente. Outras informações sobre a qualidade das águas serão incluídas posteriormente baseadas nos indicadores do aquífero Jandaíra.

5.1.2. O aquífero Jandaíra

O aquífero Jandaíra ocorre em uma superfície total de 17.756 km² e tem a maior parte de sua área localizada dentro do estado do Rio Grande do Norte. Estudos regionais indicam que a espessura da Formação Jandaíra pode chegar a 600 m na porção mais profunda da Bacia Potiguar com vazões variando entre 10 a 50 m³/h (MARCON et al, 2014). A Figura 22 a seguir demonstra sua localização.

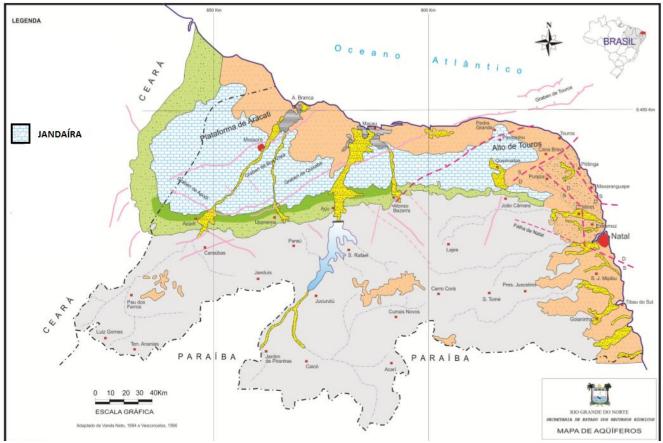


Figura 22 - Localização do Aquífero Jandaíra

Fonte (MARCON et al, 2014)

Por meio de análise físico-química de 24 amostras de poços tubulares coletadas entre 12/2013 e 05/2014, (MARCON *et al,* 2014) chegou ao seguinte resultado explicitado abaixo:

Tabela 9 – Índices de qualidade do aquífero Jandaíra

	pН	STD	Dureza	Fe	Cl
Med	7,50	1176,00	717,02	0,11	331,31

Fonte: (MARCON, 2014)

Como pode-se observar pela comparação das Figuras 21 e 22, o aquífero Jandaíra se localiza exatamente sob o município escolhido. Assim, pela falta de informações específicas sobre a qualidade das águas nos poços de Parazinho, os valores acima serão adotados. Em um cenário real de projeto seria obrigatória a análise in loco.

5.2. Definição da População de Projeto

Para a definir a população de projeto, primeiramente deve-se calcular qual será a população total atendida no ano final. Como o sistema terá alimentação fotovoltaica e este é um dos maiores custos do projeto, a durabilidade adotada do sistema será uma média do tempo de duração dos painéis fotovoltaicos, que é geralmente de 15 anos, como citado no item 3.7 do presente trabalho.

Para melhor aproximação da população esperada, serão utilizados 2 métodos de projeção populacional e será adotado o maior valor para a segurança do projeto. Utilizando os dados de (IBGE, 2016), tem-se que em 2010 a população era 4325 e em 2017 será de 5215. Portanto, calcula-se a população para 2032 utilizando os métodos aritmético e geométrico.

$$k_{a} = \frac{P_{2} - P_{1}}{t_{2} - t_{1}} \qquad P = P_{2} + k_{a} \left(t - t_{2}\right) \qquad \text{M\'etodo Aritm\'etico}$$

$$k_{g} = \frac{lnP_{2} - lnP_{1}}{t_{2} - t_{1}} \qquad P = P_{2} \quad e^{k_{g}\left(t - t_{2}\right)} \qquad \text{M\'etodo Geom\'etrico}$$

Figura 23- Equações para projeção populacional

Como resultado, tem-se: Método Aritmético 7.122 habitantes em 2032; Método Geométrico 7.787 habitantes em 2032. Portanto, adota-se o maior valor para segurança

Fonte: Adaptado de (VON SPERLING, 2005)

do projeto.

Ao analisar os dados de abastecimento da cidade, presentes no item 5.1.1, percebe-se que 50% da cidade não tem acesso a rede encanada de água. Então, prevendo uma eventual falha no abastecimento pela rede, este trabalho considerará a população de projeto sendo 75% da população total prevista, para que caso haja uma possível falha na rede, o sistema possa ajudar a suprir temporariamente a demanda. Em caso de funcionamento normal, o excesso de água produzido poderá ser aproveitado para dessedentação animal e outros usos, como a preparação de alimentos.

A população de projeto final adotada será de 5840 habitantes.

5.3. Localização da planta e logística de distribuição em Parazinho

Ao abordar a questão da localização e a logística de distribuição de água da usina de dessalinização, dados urbanísticos são imprescindíveis. Como se trata de uma cidade pouco populosa, não foram encontradas informações sobre o planejamento urbano e nem sobre a rede de distribuição de água. Portanto, baseado em método estritamente empírico, uma análise de concentração urbana será realizada e será sugerida uma possível localização para a planta.

Apesar de sua pequena população, a cidade de Parazinho tem um território grande, segundo (IBGE, 2016) a área municipal total é de 274,674 km². Para que se faça uma comparação, a cidade de Paris, com seus 105,40 km², abriga atualmente 2,2 milhões de pessoas, cerca de 440 vezes a população de Parazinho (COG, 2016).

Tendo em vista a pequena densidade populacional, fez-se uma análise das áreas edificadas. Tal análise foi feita através de imagens de satélite através de (GOOGLE EARTH, 2017).

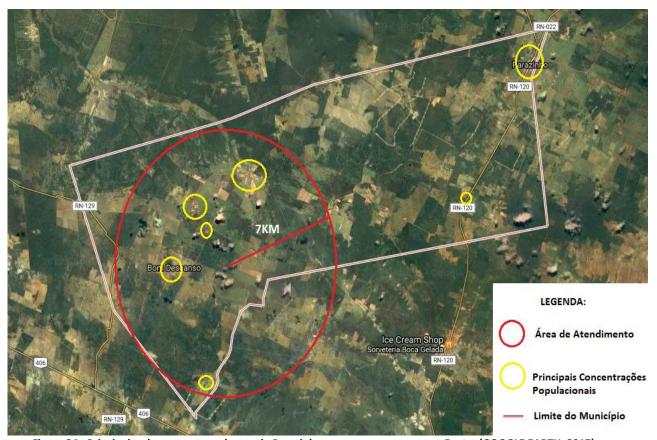


Figura 24 - Principais adensamentos urbanos de Parazinho

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2017)

De acordo com a Figura 24, percebe-se que enquanto existe uma concentração urbana no canto superior direito da cidade, a maior parte dos aglomerados está situado no lado esquerdo do município. Por isso, sugere-se que a planta de dessalinização seja implantada primeiramente nesta área, podendo ser realocada posteriormente conforme o surgimento de novas necessidades. Como estes aglomerados urbanos se situam dentro de uma área com raio de 7km, a distribuição de água poderia ser feita de início através de caminhões de água, ou mesmo por meio de coleta individual. Nesta hipótese,

um poço único deverá ser perfurado nas imediações da planta para atender a demanda comunitária.

Existe ainda outra hipótese: a criação de usinas menores a serem destinadas aos poços já existentes. Porém, este método, diferente do anterior, descentraliza a operação, necessitando controle de qualidade de diversos poços e requerendo manutenção em locais distintos. Por se tratar de uma cidade com pouca infra-estrutura, em um primeiro momento é mais interessante um sistema centralizado, dependendo assim, apenas da distribuição ou coleta da água.

5.4. Parâmetros técnicos e Sistema Fotovoltaico

Tendo sido definido o local de implantação do projeto, a quantidade média de pessoas atendidas e a localização da planta, o próximo passo é a definição dos seguintes parâmetros:

- Quantidade de água à ser produzida
- Pré-Tratamento
- Componentes Internos e Bomba
- Pós-Tratamento
- Destinação do rejeito
- Sistema Fotovoltaico para Alimentação do Sistema
- Levantamento de Custos
- Fluxograma e Recomendações

5.4.1. Quantidade de Água Necessária

Definida a população de projeto, de 5840 habitantes, deve-se definir o volume per capta que será disponibilizado de água. Como o projeto será direcionado para a dessedentação, segundo (SAUDEMEDICINA, 2017), em média, uma pessoa consome de 1.5 a 3 litros diários. Este valor não é um consenso, a quantidade de água necessária depende de diversos fatores, como o clima, o peso corporal, o tipo de alimentação e a própria qualidade da água. Portanto, o valor de 3 litros por habitante por dia será adotado.

Assim, o projeto deverá produzir 17.520 litros por dia, ou 17,52 m³ diários.

5.4.2. Pré-Tratamento

Para definir os componentes do pré-tratamento do processo serão utilizadas as informações das Tabelas 3 e 9. Como o papel principal do pré-tratamento é evitar que haja incrustação no sistema e que substâncias danosas as membranas, como o cloro, permeiem por entre o *stack*, foram definidas as seguintes etapas.

Filtragem de 5 microns

Como a etapa anterior pode gerar biofilme, é recomendado também que se tenha disponível um inibidor de incrustação comercial. Alguns dos fabricantes estão relacionados na Tabela 4.

O filtro de 5 microns foi adotado pois, mesmo sabendo que se trata de uma fonte subterrânea, que geralmente não apresenta grandes quantidades de sólidos suspensos, a falta de informação *in loco* e a própria corrosão da tubulação com o passar do tempo, assim como os materiais residuais da perfuração podem gerar danos as membranas (USBR, 2003).

Os valores de pH e Fe estão de acordo com o requerido por (USBR, 2003), e para o presente trabalho assumiremos que a temperatura da água não ultrapasse os 40 °C. Se for escolhido inibidor de incrustação com pH muito baixo, na etapa de pós-tratamento deve-se atentar para o valor final da água de produto, sendo provável a necessidade da correção do mesmo. Os sais dissolvidos, que tanto na análise do aquífero, quanto nas análises *in loco* apresenta valores elevados, serão mitigados pelo próprio processo de eletrodiálise.

5.4.3. Componentes Internos e Bomba

De acordo com as informações colhidas anteriormente, a média de salinidade do aquífero Jandaíra é de 717 mg/l e a média colhida nos poços de Parazinho é 1500 mg/l. O valor máximo já encontrado foi 5291 mg/l, porém, este valor destoa muito da média. Portanto, adota-se para o projeto do sistema, o valor correspondente a 2.5x a média: 3750 mg/l. Para uma definição mais correta do valor de projeto, deve-se fazer amostragens *in loco* e o acompanhamento da qualidade da água por um período extenso.

Por (AWWA, 1995), sabe-se que o valor final de salinidade máximo para o consumo humano é de 500 mg/l, e que cada estágio hidráulico em uma planta de dessalinização remove entre 50 e 67% de sais. Assim, para uma salinidade inicial de 3.750 mg/l, teríamos por uma análise inicial que 3 estágios hidráulicos seriam necessários, considerando a eficiência como 50%. O primeiro estágio reduzirá a salinidade para 1875 mg/l, o segundo 938 mg/l e o terceiro 469 mg/l.

Como WRIGHT, (2015) projetou um sistema de eletrodiálise similar, para promover a remoção de uma salinidade semelhante (3500 mg/l iniciais), o presente projeto utilizará o mesmo modelo de *stack* Comercial de eletrodiálise, o AQ3-1-2-50/35 da empresa GE Water. A Figura 12 do presente trabalho apresenta uma representação do funcionamento de tal modelo de *stack*.

Nayar et al (2016) define que a recuperação de água em um sistema de eletrodiálise gira em torno de 80 – 92%, assim, considerando que o sistema irá conseguir recuperar 80% do volume do fluxo inicial, como devemos ter como produto o volume de 17,52 m³, diariamente deverão ser bombeados para o sistema 21,9 m³ de água. Então, como o sistema se baseará em energia fotovoltáica, de acordo com a quantidade de horas de incidência solar, a bomba deverá ser escolhida de acordo com sua capacidade em alimentar os 21,9 m³ diários para o sistema. Tal modelo será discutido posteriormente junto com a análise de incidência solar.

Definido o *stack* e a bomba para alimentar o sistema, o próximo passo seria a definição da recirculação ou não do fluxo, envolvendo válvulas de reversão e controladores, o que neste trabalho não será feito pois necessita de dados mais específicos sobre os parâmetros de sais presentes na água da fonte e de simulações em modelos matemáticos.

É definido em (SILVEIRA, 2015), que a quantidade de energia demandada no sistema de eletrodiálise é proporcional a quantidade de sais removidos. Portanto, pelo fato do trabalho não se utilizar de modelos matemáticos para prever o consumo energético de seus componentes internos, assim como a necessidade ou não de controladores e bombas de recirculação, o cálculo da energia demandada será feita como uma proporção do resultado de um trabalho já comprovado.

WRIGHT (2015) calculou que, seriam necessários 1295 W de potência elétrica para o sistema que tratasse 15 m³ de água com 3600 mg/l de salinidade. Esta potência foi projetada para que com 7 horas de funcionamento diário o sistema fosse capaz de dessalinizar todo o volume. Desta forma, para fins de aproximação, para nosso projeto que pretende tratar 17.52 m³ de água com 3750 mg/l de salinidade, adota-se que a

potência requerida pelo *stack* seja de aproximadamente 1600 W. Para este cálculo multiplicou-se o volume de água pela salinidade, encontrando assim a quantidade de sal a ser tratada, posteriormente foi feita uma simples proporção direta entre os dois casos.

5.4.4. Pós-Tratamento

A água produzida no processo de dessalinização demanda um tratamento posterior, com a finalidade de prepará-la para sua destinação final. Como o presente projeto pretende potabilizar a água, o mesmo deve respeitar o padrões da Portaria nº 2914, do Ministério da Saúde. Os parâmetros principais desta portaria se encontram destacados no item 3.6 do presente trabalho. Como faltam medidas *in loco*, os parâmetros discutidos aqui serão baseados nas informações de qualidade do aquífero Jandaíra, vide Tabela 9.

Já no pré-tratamento ocorre no projeto uma redução do nível de turbidez pelo filtro de 5 mícron. O valor de pH medido no aquífero, que é 7,5, se encontra dentro dos parâmetros permitidos, que são os valores entre 6 e 9,5, porém, se forem adicionados anticoagulantes ácidos, deve-se medir o pH na saída do projeto e corrigi-lo se preciso for. O valor do ferro apresentado, 0,1 mg/l, está de acordo com a norma. Os valores de salinidade também são corrigidos pelo próprio processo de eletrodiálise.

É necessário que ocorra uma desinfecção posterior. Atualmente existem 3 formas de desinfecção que são consideradas mais eficientes: A desinfecção com luz ultravioleta, com ozônio ou as diferentes formas de cloro (gasoso, hipocloritos, dióxido ou monocloramina).

Portanto, sabendo que a norma brasileira determina a manutenção de cloro residual e o mesmo é considerado uma forma eficiente de desinfecção, para o pós-tratamento do projeto sugiro a adição de cloro em uma concentração de no mínimo 0,2 e no máximo 2 mg/l de cloro residual livre.

5.4.5. Destinação do Rejeito

Como discutido anteriormente neste trabalho, a eletrodiálise gera não só a água dessalinizada, mas também um fluxo extremamente concentrado. A destinação inadequada desse rejeito pode causar impactos ambientais contaminando o solo e o próprio lençol freático.

Existem estudos brasileiros direcionados ao aproveitamento desse rejeito. Dubon & Pinheiro (2004) observaram resultados promissores ao investigar o crescimento da tilápia vermelha em água de salinidade final de 36.000 mg/l. Além disso, resultados com a criação de camarão também foram satisfatórios. Esses estudos no entanto se referem ao rejeito da osmose reversa, que tem um índice de recuperação da água em cerca de 50%.

Para a eletrodiálise, como tem-se uma maior recuperação de água no processo, um volume menor de rejeito é produzido. Portanto, a solução de Amorim et al. (2004), que indica a evaporação solar da água e o aproveitamento dos sais cristalizados para alimentação de gados é mais indicada. Inclusive, pelo fato da água ter origem subterrânea, o nível de pureza dos sais deve ser suficiente para a destinação sugerida.

5.4.6. Sistema Fotovoltaico para Alimentação do Sistema

Para a elaboração de um sistema fotovoltaico para o projeto precisa-se primeiramente determinar qual será a demanda energética do mesmo. De maneira geral, a maior demanda nesse tipo de projeto está localizada no *stack*, em segundo lugar, tem-se o sistema de bombeamento de água e por último tem-se os eventuais controladores e válvulas de reversão. Como para o presente trabalho não estão sendo considerados componentes específicos de fluxo, como bombas de recirculação, válvulas e controladores, será considerada uma faixa aproximada de consumo para os mesmos. Os cálculos levarão em conta a utilização de uma única bomba de alimentação, o consumo do *stack* e uma aproximação dos componentes de fluxo internos.

Desta forma, no item 5.4.3 do presente trabalho foram definidas a potência elétrica necessária do stack e os critérios para escolha da bomba: 1600w e 21.9 m³/dia respectivamente. Para definir o modelo da bomba, é necessário que se defina a quantidade de horas que o sistema fotovoltaico receberá energia diariamente.

As Figuras 7 e 8 apresentam o potencial solar da região, nos fornecendo os

seguintes valores:

Média diária de insolação anual: 7 horas

Radiação: 5700 Wh/m².dia

Sabendo que em um dia se tem aproximadas 7 horas de incidência solar, devemos procurar uma bomba que tenha uma capacidade superior a 3150 l/h, para que assim ela seja capaz de suprir a demanda diária durante o período de incidência solar. Assim, foi escolhida a bomba modelo Ferrari JETP-100, que tem uma vazão horária de 3600l/h e uma potência requerida de 750w. Este modelo de bomba também indica uma altura manométrica máxima de 45 mca, o que para o presente trabalho será considerada suficiente para o recalque da água do poço. Com a análise e planejamento locais podese futuramente indicar outro modelo mais adequado.

Somando a potência da bomba e do stack temos um total de 2350 W. Para fins de aproximação será considerado que a potência requerida por controladores e válvulas internas o equivalente a 500W. Esse número foi baseado nas informações do projeto de (WRIGHT, 2015).

Com a potência requerida total de 2850 W, e com o tempo de funcionamento médio diário em 7 horas, calcula-se a quantidade de kWh/dia consumidos, que são 19.95 kWh/dia ou 598.5 kWh/mês para o sistema completo.

Para se ter uma ideia do preço médio e da configuração básica do sistema, foi feita uma simulação de custos por (PORTAL SOLAR, 2017) e o resultado foram os seguintes números:

Preço Médio do Sistema: de 26.160,00 até 34.008,00 reais

Área ocupada pelo sistema 35.0 m² aproximados

Geração mensal: 600 kWh/mês

Necessários 17 painéis de 260w

A Figura 9 apresentada anteriormente demonstra como poderiam ser organizadas as placas solares e como poderiam ser confeccionados os suportes. No caso do sistema atual, necessitaríamos de 4 conjuntos de 4 placas, como demostrados na figura, e 1 placa avulsa, que poderá ter um suporte próprio.

84

5.4.7. Levantamento de Custos

Pelo fato do projeto não detalhar todos os componentes do sistema, seu custo será uma aproximação de acordo com uma média de valores encontrado na internet.

- Bomba: 440,00 reais para o modelo Ferrari JETP-100 pela empresa (LEROY MERLIN, 2017).
- Sistema de alimentação solar: de 26.160,00 até 34.008,00 reais pela empresa (PORTAL SOLAR, 2017).
- Stack de membranas: valor médio de 50.000,00 reais pela empresa (IONTECH, 2017). Como não foi encontrado o valor exato do modelo adotado anteriormente, fez-se uma pesquisa de valores de mercado para stacks com capacidade semelhante. O modelo adotado para simulação de preço é o IONLYZER-250-4016 da empresa lontech.
- Filtro de Cartucho 5 microns: 380,00 reais para o modelo CarbonBlock pela empresa (DILUKA POWER, 2017)

Os valores acima, se somados resultam em 84.828,00 reais. Este valor representa uma aproximação do custo inicial do projeto, podendo este aumentar de acordo com a adição de novos componentes. Como explicitado anteriormente, uma definição mais completa dos componentes do sistema necessitaria de simulações com modelos matemáticos.

Pelo fato do valor calculado acima já incluir os componentes mais dispendiosos, que seriam o *stack* e o sistema solar, esta aproximação inicial de custo não está distante do valor total real.

5.4.8. Fluxograma e Recomendações

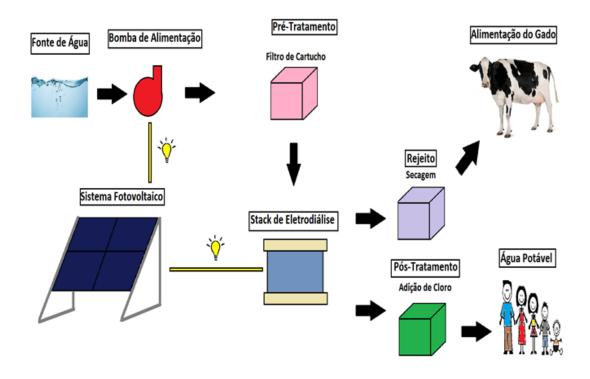


Figura 25 - Fluxograma do Projeto para Parazinho

A Figura 25 representa o fluxograma do projeto. Como pode-se observar, a fonte de água, que representa o poço a ser perfurado, é bombeada para o sistema por uma bomba de alimentação. A seguir, a água passa por um processo de pré-tratamento que é composto de 1 filtro de cartucho com 5 microns. A água pré-tratada segue então para o *stack* de eletrodiálise onde ocorre a dessalinização da mesma. Os produtos da eletrodiálise tem duas destinações diferentes: o rejeito é seco e o sal cristalizado é então destinado a alimentação animal e a água tratada segue para a etapa de cloração para então ser distribuída para a população.

Com este fluxograma, conclui-se o projeto teórico e também o último capítulo deste trabalho. É recomendável que para uma possível aplicação técnica de projetos como este, se busque informações especificas sobre o local, como estudos geológicos precedentes a perfuração dos poços e amostras recorrentes de qualidade da água *in loco*. Adicionalmente, é recomendável que se procure dados urbanísticos da cidade e que, com dados precisos dos componentes da água da fonte, se valide e organize os fluxos internos do sistema por meio de modelagem matemática.

Fonte: Autoria Própria

Mais especificamente sobre a cidade de Parazinho – RN, recomenda-se que haja uma urgente intervenção do poder público, como indicado no item 5.1 deste trabalho, 98% dos poços utilizados por moradores demonstram índices de salinidade não recomendados para o consumo humano. Um equipamento de dessalinização, como o proposto pelo presente trabalho, seria um bom investimento para a cidade, contribuindo assim para a qualidade de vida de seus moradores. Ainda com relação a possível implantação de um sistema de dessalinização, deve ser analisada a possibilidade de treinamento de habitantes locais para que trabalhem na manutenção da usina.

Com relação aos poços, recomenda-se que ocorra manutenção periódica dos mesmos, assegurando seu bom funcionamento: a manutenção prevê a limpeza dos poços e o controle da qualidade da água por meio de amostragens periódicas. Além disso, para evitar as contaminações externas, os poços devem conter tampas de proteção e o acesso ao mesmo deve ser controlado, para que assim não ocorram contaminações por animais.

Idealmente recomenda-se que sejam projetadas diversas plantas, como a proposta pelo presente trabalho, para serem distribuídas nacionalmente. Porém, também é possível, que a planta seja transferida para municípios vizinhos. Como demonstrado no item 3.7 deste trabalho, é perfeitamente viável que o sistema solar, que ocupa a maior área no projeto, seja transportado via caminhões. Da mesma maneira podem ser transportados os outros itens do projeto.

6. Conclusão e Recomendações

Em todas as épocas e em inúmeras culturas a água é definida como um elemento vital e purificador, um recurso natural renovável, como a própria razão da existência da vida. A água, que permite a vida e dessedenta os organismos também guarda em si um enorme potencial energético.

Com 97.5% das águas mundiais consideradas salinas, o desenvolvimento tecnológico nos trouxe, na metade do século XX, uma nova maneira de aproveitarmos esse recurso. O processo eletroquímico chamado eletrodiálise permite extrair da água salgada o recurso mais importante para a manutenção da vida humana, a água potável. Além disso, esse mesmo processo também fornece uma poderosa fonte de energia, que está contida na própria composição iônica da água.

No atual cenário de crise hídrica brasileira e crescente demanda energética mundial, a proposta de utilização da eletrodiálise como meio ecologicamente correto de se obter energia elétrica e água potável se mostra promissora. O presente trabalho estudou a utilização desse processo eletroquímico, assim como detalhou sua viabilidade explorando os próprios caminhos para o aprimoramento dessa tecnologia.

Um processo que pode ser utilizado para mitigar dois dos principais desafios da humanidade certamente deve ser visto com mais atenção pelo meio acadêmico e pelo setor industrial. A motivação deste trabalho foi justamente a possibilidade de demonstrar de que maneira essa tecnologia pode ser aplicada.

Em nosso país temos um cenário perfeito para aplicação desse processo eletroquímico. Na área denominada de Polígono das Secas há índices de salinidade de até 5000 mg/l, o que é o espectro de melhor eficiência da eletrodiálise. Neste trabalho foi demonstrado que além de superar as tecnologias concorrentes, a eletrodiálise já encontra respaldo no mercado para que se construam usinas, que podem ser enquadradas em programas federais como o Programa Água Doce, do Ministério do Meio Ambiente. Capacitada para alimentação por painéis fotovoltaicos e sendo a opção mais custo-eficiente, em breve será possível ter empresas construindo usinas de pequeno e médio porte em escala comercial.

O fato de existirem pelo mundo grandes áreas que sofrem com déficit hídrico, e com salinidades indicadas para o uso da eletrodiálise, uma elevada demanda está sendo suprida com tecnologias menos eficientes. Um investimento hoje na divulgação e na produção de usinas de dessalinização que utilizem a eletrodiálise é também uma grande

oportunidade de negócio. Como foi exposto no trabalho, movimentos no sentido de viabilizar projetos já estão acontecendo.

O trabalho traz também a justificativa para a adaptação de fontes de energia solar nas usinas de dessalinização. Uma observação do mapa de radiação solar demonstra que coincidentemente as áreas que sofrem de maior déficit hídrico, e que detém suas reservas de água com concentrações elevadas de sais, também são as áreas que recebem maior radiação solar. Essa alternativa de fonte energética não só corrobora para o viés ambiental da tecnologia, ela traz a possibilidade de levar esta solução para lugares que não têm acesso à rede elétrica de qualidade. A conclusão que este raciocínio nos leva é que a alimentação do sistema por energia solar compensa não só economicamente, mas também é uma das únicas alternativas coerentes com a ideia do sistema.

Ao demonstrar de maneira simples e por etapas cada parte de um projeto de uma planta de dessalinização por eletrodiálise, este trabalho procurou divulgar e organizar os conhecimentos acerca dessa tecnologia para que ela se torne mais acessível. Todas as etapas circundantes ao processo são de extrema importância, e, como pode ser demonstrado, os avanços nos componentes e na concepção de cada um desses itens traz também melhores resultados para o processo como um todo.

Tendo em vista a grande incidência solar e a possibilidade da implementação de tecnologias mais custo-eficientes, o projeto teórico proposto para a cidade de Parazinho, no Rio Grande do Norte, demonstra a viabilidade e a necessidade que a região nordeste brasileira têm de dessalinizar suas águas, principalmente visando a melhoria da saúde pública, que é um direito fundamental de todo cidadão. Inúmeras outras cidades brasileiras se encontram em situações semelhantes à cidade de Parazinho, sendo assim, o presente projeto pode servir de apoio para replicação e distribuição de usinas de dessalinização à serem distribuídas em território nacional.

A inversão do processo de dessalinização, que nos dá a possibilidade de gerar energia, vive um cenário muito diferente. Durante a realização deste estudo não foi difícil constatar o pequeno esforço e atenção que essa utilização do processo tem. Enquanto pelo mundo são encontrados não mais que 10 protótipos, os índices e prospecções para essa tecnologia apontam para uma real viabilidade econômica.

Sendo comparada economicamente à energia eólica, a eletrodiálise inversa se destaca pelo fato de utilizar uma fonte não intermitente. Mesmo com a pequena quantidade de estudos realizados, hoje os modelos mais avançados indicam um acréscimo em 20x na densidade de potência obtida.

Pudemos observar que o motivo pelo qual a eletrodiálise inversa ainda é cara, reside no fato de que não existem ainda componentes que são fabricados especificamente para o processo. A eficiência de um processo por membrana está diretamente ligado à qualidade da mesma, e a especialização de seus componentes para cada determinado uso traz consigo uma melhor produção e eficiência ao processo. Além disso, faltam estudos direcionados aos processos de pré e pós tratamento, que têm sido ainda ignorados até então. Assim como estão em falta estudos da dinâmica hidráulica e a própria criação de uma usina em escala real.

Atualmente os esforços concernentes ao avanço desta tecnologia estão voltados a alcançar melhores indicadores por meio dos complexos modelos matemáticos. Como se pode concluir pela revisão de diversos trabalhos, os modelos indicam que avanços mais sérios dependem da fabricação de componentes mais específicos e eficientes para o processo.

Como toda tecnologia, a eletrodiálise inversa precisa ainda passar da fase laboratorial e conquistar seu espaço no mercado demonstrando sua aplicabilidade e eficiência. A pesquisa realizada sugere que os indicadores positivos existem, e que a tecnologia é de fato promissora, colocando-a assim em uma boa posição para receber investimentos e ser alvo de futuros estudos.

Por mais que os produtos sejam distintos, os processos ligados à eletrodiálise são semelhantes em ambas utilizações. Mesmo que se possam fabricar membranas específicas para cada tipo de uso, o processo continua utilizando membrana íons seletivas. Deste modo, o conceito teórico por trás do estudo da eletrodiálise pode ser aplicado sempre. Este trabalho procurou tratar tanto dos componentes e aplicações práticas quanto dos fundamentos científicos que levaram à idealização dessa tecnologia.

À medida que o mercado de membranas avançar, mais tangível será a criação de membranas específicas para a geração de energia. Assim também é para os sistemas de eletrodos, para os espaçadores, e para todos os outros componentes do sistema. O fato dos sistemas se basearem em um único processo eletroquímico, os avanços em qualquer um dos componentes pode também ser aproveitado para alavancar a outra ponta do processo.

Hoje encontramos terreno fértil para investir em tecnologias de dessalinização, principalmente as com eficiência já comprovada e com demanda de mercado. Esses indicativos apontam para que o mercado de usinas de dessalinização de pequeno e médio porte, que atualmente estão especializadas na tecnologia de osmose reversa,

possam englobar também as plantas com a tecnologia da eletrodiálise. A utilização desse aparato industrial para desenvolver também a geração de energia deve ser aproveitado. Espera-se que num futuro próximo se possa ter a eletrodiálise sendo explorada em suas duas pontas e contribuindo para a solução de dois problemas graves da humanidade: a crise hídrica e a demanda energética.

7. Referencias

AGB – Associação dos Geógrafos Brasileiros: "Embrapa utiliza rejeito de dessalinizadores para criar peixes e caprinos".

http://geocities.yahoo.com.br/agbcg/dessali.htm Acesso: 08 jan. 2017

AL-KARAGHOULI. A et al.: "Technical and economic assessment of photovoltaicdriven desalination systems". Disponível em:

http://www.wrri.nmsu.edu/conf/conf11/photovoltaic_desal_systems.pdf Acesso em: 17 jan. 2017.

ALLEN J. Bard, György Inzelt, Fritz Scholz ,Springer: "Electrochemical Dictionary, Science e Business Media", 2008

AWWA - American Water Works Association, 1995. Electrodialysis and Electrodialysis Reversal: Manual of Water Supply Practices.

AMTA - America's Authority in Membrane Treatment: "*Pretreatment for Membrane Processes*", 2007.

ANEEL – Energia Solar,2010 Disponível em:

http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm

Acesso em: 02/02/2017

ATKINS, P. W. Físico-Química. v. 1, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

AUDINOS, R., "Electric-power produced from 2 solutions of unequal salinity by reverse electrodialysis", Indian Journal Of Chemistry 31(6) (1992), p. 348-354.

BALL, D. W. Físico-Química. v. 1. São Paulo: Thomson, 2005.

BOUNDLESS BIOLOGY: "Electrochemical Gradient." Disponível em: https://www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/structure-and-function-of-plasma-membranes-5/active-transport-66/electrochemical-gradient-336-11473/ Acesso em: 16 jan. 2017

Chang, Raymond. "Physical Chemistry for the Biosciences:. Sausalito, California: University Science Books, 2005.

CHAPMAN-WILBERT, M. et al., "The Desalting and Water Treatment Membrane Manual: A Guide to Membranes for Municipal Water Treatment," (2nd edition). Water Treatment Technology Program Report No. 29, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1998

COG - Insee, population légale au 1 janvier 2016. Disponível em:

http://www.recensement.insee.fr/chiffresCles.action?codeMessage=5&zoneSearchFie Id=PARIS&codeZone=75056-COM&idTheme=3&rechercher=Rechercher>

Acesso em: 06/01/2017

COSTA, R.F. "Emprego da Técnica de Eletrodiálise na Remoção e Concentração de Cromo em Solução Aquosa Ácida", Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR 1996.

CPRM – Serviços Geológicos do Brasil Disponível em:

http://cprmblog.blogspot.com.br/2012/10/servico-geologico-lanca-atlas-digital.html Acesso em: 04/02/2017

DILUKA POWER, 2017 - Filtro de alta vazão 5 micras - Disponível em:

http://www.diluka.com.br/index.php Acesso em: 07/02/2017

DUBON, J. A. M.; Pinheiro, J. C. V. Aproveitamento de águas residuais provenientes de dessalinizadores instalados no Estado do Ceará, 2004.

trabajos_verde/TC-115.htm. 10 Jul. 2004.

EFLUL – Tabela de Consumo dos Aparelhos

Disponível em: http://www.eflul.com.br/consumidores/tabela-de-consumo>

Acesso em: 10 out. 2016

FAY, J.A., Energy and the environment: scientific and technological principles. 2nd ed. ed. MIT-Pappalardo series in mechanical engineering., ed. D. Golomb. 2012, Oxford University Press: New York

FJN - Fundação Joaquim Nabuco: "A salinidade de águas do nordeste semi-árido": Disponível em:

http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&id=770&Itemid=376> Acesso em: 21 out 2016

FORGACS, C., Generation of Electricity by Reverse Electrdialysis (RED), 1975, BenGurion University of the Neger, Israel.

FWR – Foundation for Water Research: "A review of current knowledge desalination for water supplies". 2^a ed. P.35

GILSTRAP M. C. 2013. "Renewable electricity generation from salinity gradients using reverse electrodialysis", Dissertação de mestrado, Georgia Institute of Technology,

GLOBALFILTROS – Filtro CarbonBlock Disponível em:

https://iontech.en.alibaba.com/product/623674565

213624427/EDR_membrane_stack.html> Acesso em: 07/02/2017

GREENPEACE - Simulador mostra o potencial de geração de energia solar do Brasil Disponível em: http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2015/08/simulador-mostra-o-potencial-de-geração-de-energia-solar-do-brasil.html>

Acesso em: 02/02/2017

GUALTER, Jose, NEWTON, Vilas B. Tópicos de Física 3: eletricidade. 13°ed. 1997, editora Saraiva. São Paulo.

GUIALOG - MEDIDAS E CAPACIDADES DE EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

Disponível em: < http://www.guialog.com.br/>

Acesso em: 02/02/2017

HOWELL and BUCKIUS - Fundamentals of Engineering Thermodynamics, , McGraw-Hill, New York, 1987

IBGE- Rio Grande do Norte – Parazinho

Disponível em:

http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=240880&search=Rio%20Grande%

20do%20Norte-RN> Acesso em: 06/02/2017

IONTECH - IONLYZER-250-4016 Disponível em:

https://iontech.en.alibaba.com/product/623674565

624427/EDR_membrane_stack.html> Acesso em 07/02/2017

IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2 ed. (the "Gold Book"). Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997).

JAIME E.V., 2013 *Eletricidade e Magnetismo*, Ed. Única, Universidade do Porto

JONES P.W , L.L. Principio de Química: "Questionando a vida moderna e o meio ambiente", Ed. Bookman, 2001

JUCÁ, S. C. S. Comparação de métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: Aplicação a uma unidade de eletrodiálise. Dissertação de Mestrado, UFCCT-DEE, 2004

JUCÁ S. C. S.: "Obtenção de água potável utilizando eletrodiálise solar", 2015

KOPSCH, o.: "Solar water desalination: decentralized desalination systems".

Disponível em: http://sinovoltaics.com/technology/solar-water-desalination-decentralized-desalination-systems-powered-solar-energy/ Acesso: 21 out 2016

LEE S.W, 2016 "Power Generation from Concentration Gradient by Reverse Electrodialysis in Dense Silica Membranes for Microfluidic and Nanofluidic Systems", Artigo periódico, Energies,

LEMOS, J.: "Semiárido no mundo". Disponível em:

https://bequimaoagora.wordpress.com/2015/05/11/semiarido-no-mundo/

Acesso:
21 out 2016

LEROY MERLIN, 2017 - Bomba d'Água Auto-Aspirante JETP-100 1CV Bivolt Ferrari Disponivel em: http://www.leroymerlin.com.br/bomba-dagua-auto-aspirante-jetp-100-1cv-bivolt-ferrari 88480735> Acesso em: 07/02/2017

LIEB, W.R, Stein WD (1986). "Chapter 2. Simple Diffusion across the Membrane Barrier". *Transport and Diffusion across Cell Membranes*. San Diego: Academic Press. pp. 69–112.

LIGHT – Composição da Tarifa,2016 Disponível em: http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx> Acesso em: 02/02/2017

MACEDO, H. Físico-Química I. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981

MACHADO, C.:: "Fisico-Quimica II". Disponível em:

http://www.ebah.com.br/content/ABAAABby8AH/celulas-galvanicas> Acesso em: 12 set. 2016

MALLEVIALLE, J., et al., "Water Treatment Membrane Processes," McGraw-Hill, 1996.

MARCON *et al,* 2014 análise das águas do aquífero jandaíra em apoio ao programa água doce no rio grande do norte Disponível em:

<http://www.abrh.org.br/xiisrhn/anais/papers/PAP018185.pdf> Acesso em: 06/02/2017

MELLER, F., ed., "Electrodialysis and Electrodialysis Reversal Technology," Ionics, Inc, 1984

MIN - Ministério da Integração Nacional «Nova Delimitação do Semi-árido brasileiro, pág. 34, 2005.

MIT - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA: "*Design* of a village-scale pv powered electrodialysis reversal system for brackish water desalination in india". Disponível em:

http://gear.mit.edu/Publications/Desal/IDAWC15_Wright_Final.pdf Acesso: 21 out 2016

MMA - Ministério do Meio Ambiente: "Programa Água Doce - Documento Base", 2012

MMA – Programa Água Doce,2016 Disponível em: < http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/programa-agua-doce>

Acesso em: 04/02/2017

MME- Ministério de Minas e Energia – Diagnóstico do Município de Parazinho Disponível em:

http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/atlas_digital_rhs/rgnorte/relatorios/PARA098.PDF

Acesso em: 06/02/2017

NAYARA, K.G *et al* ScienceDirect, Development Engineering: "Feasibility study of an electrodialysis system for in-home water desalination in urban India", Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352728516300045

Acesso em: 14 jan. 2017

NELSON, D.; Cox, Michael (2013). Lehninger Principles of Biochemistry. New York: W.H. Freeman. p. 403. *ISBN 978-1-4292-3414-6*.

NEOSOLAR, - Empresa brasileira de energia solar: Disponível em:

http://www.neosolar.com.br/vem-pro-sol-energia-solar

Acesso em: 20 dez. 2016

NORMAN, R.S., Water salination: A source of energy, Science 186 (1974), p. 350-35

OLIVEIRA, M. P.: "Dessalinização da água do mar". Disponível em:

http://www.etecnico.com.br/paginas/mef13868.htm

Acesso: 08 jan. 2017

ORTIZ J.M.M, et al. Brackish water desalination by electrodialysis: batch recirculation operation modeling J. Memb. Sci., 252 (2005), pp. 65–75

PATTLE, R.E, 1954. "Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile". Nature.

PENA, Rodolfo F. Alves. "Por que no Nordeste há seca?"; *Brasil Escola*. Disponível em http://brasilescola.uol.com.br/brasil/por-que-nordeste-seco.htm>. Acesso em 21 set. 2016.

PORTALSOLAR: "Simulador Solar".

Disponível em: < http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>

Acesso em: 13 jan. 2017

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento: "Informe sobre Desenvolvimento Humano" Disponível em:

http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr05_sp_complete.pdf Acesso em: 01/02/2017

PREFEITURA DE PARAZINHO – Plano Municipal de Educação, 2015 Disponível em:

http://www.parazinho.rn.gov.br/admin/fotos/PLANO%20MUNICIPAL%20DE%20EDU CACAO%20DE%20PARAZINHO.pdf>

Acesso em: 06/02/2017

REBOLÇAS, A.C: Água na região Nordeste: desperdício e escassez. 11 (29): 127-54, 1997.

ROCETTO L.B *et al,* : "Preparação e caracterização de membranas íons— seletivas aniônicas e catiônicas de TPU para separação de cloreto de potássio por eletrodiálise (ed)".Disponível em: http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/DIC12/bedin.pdf>
Acesso em: 09 jan. 2017

RODRIGUES, M.A,: "Eletrodiálise Aplicada ao Tratamento de Efluentes" https://www.ufrgs.br/cyted-recmet/wordpress/Guanajuato2012/Marco.pdf> Acesso em: 11 set. 2016

RUSSELL, J. B. A equação de Nernst. In: _____. Química geral. 2. ed. São Paulo: Makron books e Mcgraw Hill, 1994

SALASSIER, B.: "Manual de Irrigação", 3ª ed., Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1984, p.463

SAUDEMEDICINA – Quantos litros de Água devemos beber por dia? Disponível em: http://www.saudemedicina.com/quantos-litros-de-agua-devemos-beber-por-dia/> Acesso em: 07/02/2017

SHATTOCK, M. J. *et al.* ,2015. "Na+/Ca2+ exchange and Na+/K+-ATPase in the heart". The Journal of Physiology 593 (6): 1361–1382.

SILVA, M.J. "Análise dos fatores que influenciam na alta salinidade dos aquíferos fissurais da bacia do Riacho do Feijão – Pedro Avelino – RN/Jailsa da Silva Medeiros – Natal, RN,2004.

SILVEIRA, A. P. P. et al: "Dessalinização de Água", 2015

SLAUGH W.S. e T.D. PARSONS, 1978, *Quimíca Geral*, Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A

SMITH, E. B. Basic Chemical thermodinamics. 4 ed. New York: Oxford, 1990.

SOLARIZA - Simulador Solar do Greenpeace

Disponível em: < http://solariza.org.br/> Acesso em: 02/02/2017

SOLARVOLT: "Conheça os tipos de painel fotovoltaico e suas vantagens".

Disponível em: http://www.solarvoltenergia.com.br/conheca-os-tipos-de-painel-fotovoltaico-e-suas-vantagens/>

Acesso: 13 jan. 2017

SUASSUNA, J. – A Pequena Irrigação no Nordeste: Algumas Preocupações, Revista Ciência Hoje, Vol. 18, ndeg. 104, Outubro de 1994.

UNEP - United Nations Envirnomental Programme: Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augumentation in Small Island Developing States Disponível em <a href="http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublication

Acesso em: 18 jan. 2017

USBERICO E SALVADOR, 2006, Química, 7 Ed, São Paulo,. Saraiva.

USBR - United States Bureau of Reclamation: "Desalting Handbook For Planners" https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report072.pdf>

Acesso em: 09 jan. 2017

VARGAS, J.R.: "Dessalinização da água". Disponível em:

http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/curiosidades/o-que-dessalinizacao-agua.htm Acesso: 21 out 2016

VEERMAN, J., J.W. Post, *et al*, 2008 Reducing power losses caused by ionic shortcut currents in reverse electrodialysis stacks by a validated model, Journal of Membrane Science (310)

VEERMAN J. et al: "Reverse electrodialysis: evaluation of suitable electrode systems" 2010

WAHL, 2005. "A Short History of Electrochemistry". *Galvanotechtnik*. **96** (8): 1820–1828.

WALTER, Heinrich - *Vegetação e Zonas Climáticas: tratado de ecologia global* revisão técnica e notas Antônio Lamberti. - São Paulo: EPU, 1986.

WANGNICK, K., "2000 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory, Report No. 16," International Desalination Association, May 2000.

WEINSTEIN, J.N. and F.B. Leitz, Electric power from differences in salinity: the dialytic battery. Science, 1976.

WICK, G.L. and W.R. Schmitt, Prospects for renewable energy from sea, Marine Technology Society Journal 11(5-6) (1977)

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 3a ed, 2005. 452 p..

WRF - Water Research Foundation: "Post-Treatment Stabilization of Desalinated Water" Disponível em: http://www.waterrf.org/PublicReportLibrary/4079.pdf Acesso: 11 jan. 2017

WRIGHT, N.C *et al.*: "Design of a village-scale pv powered electrodialysis reversal system for brackish water desalination in india", 2005

ANEXO I

A intenção desse pequeno anexo é apenas de relembrar o funcionamento básico dos processos químicos e dos componentes envolvidos na geração de energia, uma vez que esses conceitos são bases da compreensão do processo e justificativa para utilização de várias formulações matemáticas que servirão para aferir a eficiência, viabilidade e até mesmo a escolha de partes do sistema que serão essenciais para seu funcionamento.

Na eletroquímica, a classe das reações que são utilizadas para produzir eletricidade são chamadas de equação REDOX. Um entendimento dos princípios dessas reações permite entender o funcionamento de pilhas e baterias. Como citado anteriormente, a Pilha de Daniell é um antigo exemplo de uma célula galvânica que é muito ilustrativo e ajuda a fácil compreensão desse tema.

Em uma célula galvânica existem dois compartimentos separados. Esses compartimentos podem ser separados por um material poroso ou podem ter uma conexão por meio de uma ponte salina. As barras metálicas é onde ocorre as reações de redução e oxidação e são chamados de eletrodos e o circuito elétrico externo serve de condutor para os elétrons. Cada compartimento com suas reações formam uma semi-pilha (USBERCO E SALVADOR, 2006).

Abaixo temos um exemplo de uma Célula Galvânica (SLAUGH, 1978):

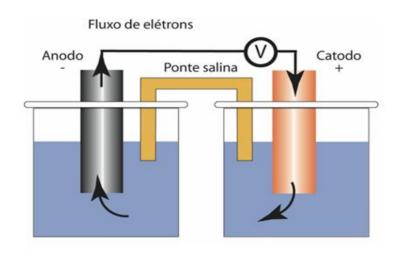


Figura 26 – Esquema simples de uma Célula Galvânica Fonte: (JONES, 2010)

Reação espontânea de oxi-redução para uma célula genérica:

$$p m_1^0 + r m_2^{p+} \rightarrow p m_1^{r+} + r m_2^{-}$$

Semi-reação do catodo e anodo respectivamente:

$$m_2^{p+} + p \; e^- \to m_2$$
 $m_1^{\;0} \to m^{r+} + r \; e^-$

O eletrodo onde ocorre a redução é denominado catodo e o eletrodo onde ocorre a oxidação é chamado de anodo. A espontaneidade da reação do Zinco com o Cobre é conhecida e foi constatada não só pelo cálculo da energia livre da reação, mas pela observação da reação em estado natural onde se percebia que o cobre se aderia ao zinco ou se precipitava em estado sólido (USBERCO E SALVADOR, 2006).

No caso da eletrodiálise inversa a espontaneidade da reação é essencial, pois é justamente do fluxo natural dos íons que extrairemos nosso potencial de geração de energia elétrica. Vale frisar que para nosso sistema os eletrodos podem ser escolhidos de maneira a buscar melhor custo-benefício, podendo variar de metal, desde que com boa eficiência para facilitar o processo de transporte de elétrons. Um exemplo de metais para eletrodos são o Titânio e o Irídio (Allen J. Bard, 2008)

A ponte salina é uma ligação entre os eletrodos que tem como função permitir o transporte dos íons entre os dois compartimentos sem que haja contato direto das duas espécies iônicas a fim de que não ocorra a transferência direta do elétron. O elétron pode então escoar pelo circuito elétrico que decidirmos criar.

Veremos posteriormente neste trabalho que a aferição do potencial de produção elétrica do processo reverso de elétrodiálise se dá por cálculos de seus potencias elétricos e químicos entre as membranas. Mas fazendo um paralelo com a célula galvânica, podemos em ambos os casos utilizar um voltímetro no circuito externo para medir o potencial entre os eletrodos. Um voltímetro com resistência alta induz uma corrente baixa e permite a aferição da voltagem entre os dois eletrodos.

A fem (ϵ) de uma célula nos dá uma medida da tendência de circulação dos elétrons entre os dois eletrodos através do circuito externo. Essa tendência depende das reações de oxi-redução. De maneira geral a fem é a diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos quando uma célula esta em equilíbrio termodinâmico (MACHADO, 2016).