

EDUARDO MACHADO FREIRE
FERNANDO SILVA DI MARCO
VIVIANE DE ALMEIDA PRADO MARTINS

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE AMBIENTAL,
FINANCEIRA, COMERCIAL E TECNOLÓGICA ENTRE MÉTODOS DE
DESSALINIZAÇÃO

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

São Paulo
2015

EDUARDO MACHADO FREIRE
FERNANDO SILVA DI MARCO
VIVIANE DE ALMEIDA PRADO MARTINS

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE AMBIENTAL,
FINANCEIRA, COMERCIAL E TECNOLÓGICA ENTRE MÉTODOS DE
DESSALINIZAÇÃO

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo
2015

Freire, Eduardo Machado

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE AMBIENTAL, FINANCEIRA,
COMERCIAL E TECNOLÓGICA ENTRE MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO / E.
M. Freire, F. S. D. Marco, V. A. P. Martins -- São Paulo, 2015.

93 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Dessalinização 2.Osmose 3.Evaporação I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e
Ambiental. II.t. III.Marco, Fernando Silva di IV.Martins, Viviane de Almeida
Prado

Dedicamos esse trabalho ao 1,1 bilhão de pessoas no mundo que não têm
fácil acesso à água potável.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Podalyro Amaral de Souza pela sua orientação e por suas incríveis histórias.

Aos professores José Carlos Mierzwa e Ronan Cleber Contrera por comentários e sugestões que nortearam este trabalho.

Ao professor Renato Carlos Zambon pelo acompanhamento e sugestões de organização e metodologia de trabalho.

A todos os professores que tivemos durante a graduação, que nos transmitiram ensinamentos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e de nós mesmos.

Aos nossos queridos familiares e amigos, pelo apoio incondicional em todos os momentos dessa jornada.

RESUMO EXECUTIVO

O crescimento da população mundial cria uma pressão cada vez maior sobre os recursos naturais da Terra, dentre eles a água. Com isso, fontes tradicionais de abastecimento são esgotadas e cresce a necessidade de novas alternativas.

Há cada vez mais regiões no globo cujas fontes de água doce disponíveis ou já estão sendo totalmente exploradas ou foram poluídas. Por isso, a dessalinização da água do mar surge como forte alternativa para compor os sistemas de abastecimento de água dessas áreas.

O presente trabalho explora duas tecnologias de dessalinização: a primeira, já consolidada, que utiliza osmose, e a segunda, ainda experimental, de evaporação em baixa temperatura. É feita uma comparação da viabilidade ambiental, financeira, comercial e tecnológica entre os dois métodos.

Será demonstrado que a viabilidade da evaporação é prejudicada pelo seu alto consumo energético e pelas dimensões da estrutura física necessária para uma produção comercial. A dessalinização por osmose ainda é a melhor opção, salvo casos específicos, como associações com termoelétricas.

Palavras-chave: Dessalinização, Osmose, Evaporação, Nirmala Khandan

ABSTRACT

The growth of the world population creates an aggravating pressure on Earth's natural resources, including the water. Thus, traditional sources of supply are depleted which conducts to the need for new water supply developing.

The number of regions on the globe, where freshwater sources are either already fully exploited or have been polluted, grows every day. Therefore, the desalination of seawater emerges as a strong alternative to compose the water supply systems of these areas.

This study explores two desalination technologies: the first, already consolidated, which uses osmosis, and the second, still experimental, evaporation under low temperature. A comparison of the environmental, financial, commercial and technological feasibility between this two methods will be made.

It will be demonstrated that the desalinization by evaporation has its viability impaired by the high consumption of energy and the big structure necessary to achieve commercial production. Osmosis is still the best option to desalinate water in most cases, except special situations such as the association with thermoelectric energy plants.

Keywords: Desalination, Osmosis, Evaporation, Nirmala Khandan

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	24
3	LEVANTAMENTO DE DADOS	25
3.1	Dessalinização por osmose.....	25
3.1.1	Sistema de dessalinização por osmose	25
3.1.2	Eficiência do processo.....	26
3.1.3	Pré-tratamento	27
3.1.4	Captação da água	28
3.1.5	Impactos ambientais.....	28
3.1.6	Necessidades energéticas e custos	29
3.2	Dessalinização por evaporação em baixa temperatura.....	37
3.2.1	Sistema de dessalinização proposto	37
3.2.2	Raciocínio termodinâmico para a dessalinização em baixa temperatura	38
3.2.3	Configuração do processo.....	42
3.2.4	Resultados e discussão.....	45
3.2.5	Dessalinização conduzida pelo calor de um sistema de refrigeração por absorção (ARS)	45
3.2.6	Dessalinização alimentada por um sistema de energia solar fotovoltaica/baterias	54
3.2.7	Recuperação de águas residuais pelo tratamento de efluentes...	61
3.2.8	Conclusão	62
4	ANÁLISE DOS DADOS	63
4.1	Dessalinização por osmose.....	63
4.2	Dessalinização por evaporação por pressão de vapor.....	64
5	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	65
6	PROJETO	67
6.1	Projeto de dessalinização por osmose	67
6.1.1	Captação e pré-tratamento.....	68
6.1.2	Bombeamento	69
6.1.3	Dessalinização	71
6.1.4	Pós-tratamento	74

6.1	Projeto de dessalinização por evaporação em baixa temperatura	75
6.1.1	Captação e pré-tratamento.....	76
6.1.2	Bombeamento	77
6.1.3	Dessalinização	77
6.1.4	Pós-tratamento.....	79
7	ANÁLISE DE VIABILIDADE	80
7.1	Captação e pré-tratamento.....	80
7.2	Bombeamento	82
7.3	Dessalinização	83
7.4	Pós-tratamento.....	85
7.5	Custos totais.....	85
7.6	Cenários	86
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
8.1	Viabilidade ambiental	87
8.2	Viabilidade econômica.....	87
8.3	Viabilidade comercial.....	87
8.4	Viabilidade técnica	88
9	CONCLUSÃO	89
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Centros urbanos invadindo <i>habitats</i> naturais.....	15
Figura 2: Características dos principais processos de dessalinização por membranas	25
Figura 3: Funcionamento da osmose	26
Figura 4: Energia utilizada em vários elementos no processo de dessalinização	31
Figura 5: Custo anual discriminado de uma usina de dessalinização de água do mar	34
Figura 6: Comparação entre a intensidade da energia nos tipos de abastecimento de água (kWh per ML)	36
Figura 7: Representação genérica de um processo de dessalinização por mudança de fase, onde h é a entalpia específica, T é a temperatura e Q é a taxa de transferência de calor	39
Figura 8: Taxa de produção de água doce em função da taxa de alimentação de água salina e da temperatura de evaporação com a entrada de calor fixa de 1000 kJ/h.....	41
Figura 9: Relação entre rendimento e consumo específico de energia como uma função da temperatura de evaporação.....	41
Figura 10: Esquema da disposição do sistema proposto	43
Figura 11: Fotografias do sistema em escala de protótipo projetado e construído nesse projeto.....	44
Figura 12: Esquema do sistema de dessalinização alimentado por um sistema de refrigeração por absorção	46
Figura 13: Taxas de troca de calor e eficiência durante 24 horas	48
Figura 14: Variações das temperaturas da câmara de evaporação, da água doce e da temperatura ambiente durante 24 horas.....	49
Figura 15: Variações da temperatura ambiente e da temperatura TES em 24 horas	51
Figura 16: Fração solar e área ótima de fração solar	52
Figura 17: Taxas de dessalinização a velocidades de refrigeração diferentes e áreas de painéis solares	52
Figura 18: Relação entre taxa de retirada, eficiência e temperatura da EC....	54

Figura 19: Esquemática da configuração (b): uso do painel fotovoltaico solar/banco de bateria	55
Figura 20: Fluxos de energia na configuração (b) ao longo de um período de dia típico	56
Figura 21: Perfis de temperatura na configuração (b) com PV/bateria	58
Figura 22: Energia produzida, energia consumida e energia em excesso	59
Figura 23: Produção de água destilada na configuração (b) com PV/bateria .	60
Figura 24: Processo de pré-tratamento	69
Figura 25: Contribuição dos custos de uma usina de dessalinização por osmose	70
Figura 26: Sistema de cogeração e reaproveitamento	71
Figura 27: Exemplo de tomada de água com tubulação vertical	76

LISTA DE TABELAS

Desastres naturais em relação ao número de pessoas afetadas	18
Fatores que influenciam o desempenho da osmose	27
Energia requerida (kWh/m ³) para plantas de dessalinização de água do mar usando osmose	30
Custo em função da capacidade e TDS	32
Custo em função da capacidade e TDS atualizada pelo CPI do período	33
Exemplo da relação entre a produção das usinas de dessalinização e o custo unitário	35
Exemplo do custo marginal da água em San Diego, EUA.....	35
Parâmetros do sistema ARS - valores tradicionais e valores deste estudo	50
Comparação do processo proposto com processos de dessalinização tradicionais	61
Medidas de qualidade da água antes e após o tratamento.	62
Custo estimado para a Usina de Carlsbad	68
Características da membrana da Dow.....	72
Consumo de energia sem dispositivo de recuperação de energia	73
Consumo de energia com trocador de pressão	73
Pós-tratamento dependendo da aplicação final.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ARS = sistema de refrigeração por absorção
BT = tanque de retenção de salmoura
CON = condensador *natural draft*
CPI = consumer price index
EBT = evaporação em baixa temperatura
EC = câmara de evaporação
ED = eletrodálise
FWT = tanque de retenção de água doce
MED = evaporação de múltiplos efeitos
MGD = million gallon delivery
MSF = evaporação de múltiplos estágios
MVC = compressão de vapor por meio de um compressor mecânico
PD = deslocamento positivo
PV = painel fotovoltaico
RO = osmose
SD = evaporação solar
SWT = tanque de retenção de água salina
TDS = total de sólidos dissolvidos
TES = sistema de armazenamento de energia térmica
TVC = compressão de vapor por meio da adição de pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor
VC = compressão de vapor

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_0 = taxa de rejeição de calor

m_f = taxa de produção de água doce

m_f/m_s = rendimento

h_l = calor latente de condensação à temperatura de evaporação

Q_1 = taxa de perda de calor

T = diferença de temperatura entre a câmara de evaporação e o ambiente

° C = graus Celsius

P_w = energia consumida por cada bomba

Q = vazão da água de alimentação para cada bomba

P_r = pressão da água de alimentação para cada bomba

E_p = eficiência da bomba

E_m = eficiência do motor

U = coeficiente de transferência de calor

A = área de transferência de calor

1 INTRODUÇÃO

Desde a Peste Bubônica, que em 1350 dizimou aproximadamente um terço da humanidade, a população mundial vem apresentando altas taxas de crescimento, com pico de 2,2% em 1963. O marco de 7 bilhões de pessoas foi ultrapassado em 2012, ano cuja taxa de crescimento foi de 1,1%.

Figura 1: Centros urbanos invadindo habitats naturais



Sustentar essa população exige muito dos recursos do planeta. O meio ambiente é altamente exigido devido à necessidade do homem por alimento, água e energia. Cada ser humano representa um acréscimo de geração de resíduos e poluição que necessitam de destinação adequada e tratamento.

Com o aumento do número de humanos, outras espécies sofrem. Animais são separados em categorias em função do seu risco de extinção. Segundo o estudo de Bryan Walsh publicado na revista *Science*, *Wildlife: Biodiversity Is Declining Fast – But It Would Be Even Worse Without Conservation Efforts*, todos os anos, 52 espécies de mamíferos, pássaros e anfíbios movem-se uma categoria mais perto da extinção. 41% dos anfíbios já estão ameaçados de extinção¹.

Outro problema da superpopulação tem origem na cultura ocidental. O modelo econômico baseado no consumo gera uma alta pressão sobre os recursos naturais. Isso não significa necessariamente que a humanidade está caminhando em direção ao seu fim. Toda a população mundial poderia ser alocada no estado do Texas, tendo, assim, a densidade populacional de Nova Iorque.

¹ Bryan Walsh é o atual editor internacional da revista *Time*. Anteriormente, ele foi responsável pela cobertura de temas na área de energia e meio ambiente para a revista *Science*.

A cidade de Nova Iorque apresenta diversos problemas e desafios a serem enfrentados, como transporte, abastecimento de comida, fornecimento de água, tratamento de esgoto, violência, desigualdade social e acondicionamento de lixo. Uma cidade do tamanho do Texas teria todas essas dificuldades elevadas a uma potência da ordem de sua população. Portanto, o problema a ser enfrentado não é espacial, e sim logístico, administrativo.

Segundo Fred Pearce², em seu livro Waste: Uncovering the Global Food Scandal, os americanos descartam 50% da comida que compram. Agricultores descartam 25% de sua produção unicamente para alcançar os padrões estéticos exigidos por supermercados e consumidores aos seus produtos. Em seu livro, Fred Pearce afirma que o mundo já produz grãos suficientes para alimentar uma população de 10 bilhões de pessoas em uma dieta vegetariana. Ou seja, produção de alimentos também não é o problema, e sim como eles são divididos e distribuídos.

Além da comida, discussões análogas são pertinentes para outros suprimentos, como água e energia. “Na verdade, o mundo seria capaz de abrigar, alimentar e enriquecer muito mais pessoas no curto prazo” (Joel Cohen³, 2011).

Uso do planeta e divisão dos seus recursos

Tendo estabelecido que o planeta é capaz de suportar a população atual e a que está por nascer, embora com alguns custos, pergunta-se o motivo de tantas pessoas passarem fome e sede e não terem acesso à energia elétrica, à higiene e a outras condições básicas.

Segundo Cohen, mais de 1 bilhão de pessoas vivem sem um suprimento adequado e renovável de água limpa. “Situações de escassez de água deverão ser significativas no norte da África, Índia, China, partes da Europa, leste da Austrália, oeste dos Estados Unidos e em outros lugares. As alterações climáticas irão aumentar

² Fred Pearce é um autor e jornalista inglês. Ele é um escritor científico e abordou as questões do meio ambiente, ciência e desenvolvimento de 64 países ao longo dos últimos 20 anos. É especialista em meio ambiente, incluindo água e mudanças climáticas.

³ Joel Cohen é bacharel em humanidades pela Universidade de Harvard desde 1965. Ele possui dois doutorados pela Universidade de Harvard: um Ph.D. em Matemática Aplicada (1970) e um doutorado de saúde pública em ciências da população e da saúde pública tropical (1973). Lecionou em Harvard de 1971 até sua nomeação como professor da Rockefeller em 1975.

a água disponível para a agricultura na América do Norte e Ásia, mas diminui-la na África, América Latina e no Caribe”.

O caso da água exemplifica a maioria dos problemas de escassez no mundo. Ou seja, o planeta teria a capacidade de fornecer a quantidade de água demandada, porém esbarra em uma série de problemas que levam à escassez. Estes problemas incluem o desperdício, poluição, logística ruim, má distribuição de recursos, localização espacial, conflitos, entre outros.

Este problema de distribuição fica ainda mais evidente quando se observa, em um mesmo país, uma região sofrendo com enchentes, enquanto outra passa por uma seca devastadora. Estes exemplos são extremamente comuns, como no Brasil, onde todos os anos pode-se observar as regiões Sul e Norte sofrendo, em um mesmo período, com secas em um e enchentes em outro, e depois tendo suas situações invertidas na estação seguinte.

Em suma, a maior dificuldade enfrentada hoje não é de produção de suprimentos, e sim, de distribuição.

A escassez da água para o abastecimento humano

A água cobre 70% da superfície do planeta. Porém, a água doce corresponde a apenas 3% do total da água da Terra. Destes 3%, dois terços estão congelados em glaciares ou indisponíveis para o uso. Isso significa que, apesar de parecer um recurso quase inesgotável, a água é um bem valioso e relativamente raro. Ainda assim, a quantidade de água doce disponível no mundo conseguiria abastecer com folga toda a população.

Todavia, aproximadamente 1,1 bilhão de pessoas vivem sem acesso adequado à água e 2,7 bilhões enfrentam escassez de água pelo menos durante um mês por ano.

Nos últimos 20 anos, os desastres naturais com maior número de pessoas afetadas foram majoritariamente por inundações ou secas. A tabela apresentada a seguir compila os maiores desastres naturais que atingiram o planeta Terra neste período.

Tabela 1: Desastres naturais em relação ao número de pessoas afetadas

Ano	País	Mortes	Afetados	Feridos	Sem Teto	Dano (US\$)
2002	India	0	300.000.000	0	0	910.722
1998	China	4250	225.241.300	123.000	17.350.000	31.743.524
2003	China	662	154.368.000	151.260	1.405.726	15.329.640
1996	China	4091	150.000.000	234.000	4.440.000	18.914.500
2010	China	1911	140.194.000	0	0	18.171.000
1995	China	1618	125.500.000	70.411	1.000.000	6.720.000
2002	China	1246	113.217.800	35.596	2.300	4.728.800
1994	China	1564	105.900.000	22.385	5.617.000	7.539.100
2007	China	1030	111.041.600	4.192	65.000	5.023.155
2002	China	108	107.402.700	394	0	218.000

Fonte: Adaptada de The International Disaster Database

A Ásia enfrenta todos os anos monções em um período do ano e secas devastadoras em outro. Isso mostra que a divisão da quantidade de água doce disponível no planeta é extremamente desigual em relação às divisões sazonais/temporais e geográficas. Este é o primeiro ponto importante que leva à escassez da água: a má distribuição da disponibilidade do recurso.

O segundo problema é a ineficiência da agricultura. A agricultura consome 70% da água doce do planeta, porém, estima-se que 60% do total seja desperdiçado pela ineficiência da indústria. Isto faz com que o consumo necessário para alimentar a população seja imenso, criando uma grande pressão sobre as fontes.

O terceiro problema são as cidades. Segundo a ONU, a maior parte da população do mundo mora em cidades. A consequência desse fato para a água é que a grande concentração de pessoas cria um ponto de intensa demanda por recursos.

Caso essa população estivesse esparsa no território geográfico, o fornecimento de água seria bem mais simples, já que poderiam ser usadas diversas fontes de água que estariam também espalhadas no território, sem criar pressão em um único sistema de abastecimento.

Porém, com as cidades, exige-se muito das fontes próximas de água, levando-se os sistemas aos seus pontos máximos de operação, aumentando sua vulnerabilidade às condições ambientais.

Outro problema intimamente ligado à urbanização, embora não unicamente decorrente dela, é a poluição. Por toda a história, rios como o Tâmisa, Sena, Rio Amarelo, Nilo, Tejo e Tietê serviram de berço para novas cidades, garantindo regiões férteis, fontes de comida, transporte e, principalmente, água potável.

Porém, com o tempo e o crescimento da população, os rios que uma vez serviram de fonte de vida para as cidades foram negligenciados. Por muito tempo, foram poluídos e esquecidos, perdendo qualquer capacidade de fornecimento de água para a população.

As soluções para a escassez

O primeiro problema citado foi a má distribuição da disponibilidade da água. Desde os tempos romanos, quando aquedutos transportavam água para as fontes de Roma, o homem teve que desenvolver sistemas para buscar água nos locais onde ela estava disponível, tentando contornar a má distribuição territorial. Um grande avanço na obtenção de água foi em relação à distribuição irregular no tempo. Represas e cisternas, por exemplo, são sistemas de armazenamento das águas do período chuvoso para o período seco que garantiram uma certa regularidade no suprimento.

A exploração de água subterrânea também contribui para tornar a humanidade um pouco menos dependente das chuvas do planeta.

Já em relação à ineficiência da agricultura, mesmo com avanços tecnológicos, esta continua sendo a fraqueza do consumo mundial. Apesar de ser possível sustentar uma plantação com muito menos água do que há pouco tempo, o setor ainda é o que mais necessita do recurso e também o que mais o desperdiça.

Para resolver os problemas das cidades, deve-se tratar melhor seus cursos d'água e nascentes, para garantir que a água esteja disponível e adequada para o uso, podendo assim ser integrada a um sistema de fornecimento com barragens e condutos de transporte.

Entretanto, atualmente, a grande maioria dos recursos hídricos próximos a cidades do mundo estão contaminados e inapropriados para o uso, forçando os responsáveis a buscarem água cada vez mais longe e por um preço maior.

Assim, tecnologias que à primeira vista teriam um custo muito alto tornam-se interessantes para regiões com pouco ou nenhum acesso à água superficial doce e potável disponível a baixos custos.

Consequentemente, cada vez mais cidades e países adotam métodos alternativos de abastecimento, como captação de água subterrânea e dessalinização.

Reitera-se que apenas 3% da água do mundo é doce, tornando lógica a exploração dos outros 97%.

A dessalinização de águas para consumo

Dessalinização é o processo de remoção de minerais de um ambiente, que pode ser o solo ou a água do mar, por exemplo. A água do mar possui aproximadamente 35 kg/m³ de sal solubilizado que precisaria ser reduzido para aproximadamente 1 kg/m³ para ser aproveitada como água doce.

A humanidade usa técnicas de dessalinização de águas há milhares de anos. No império greco-romano, por exemplo, há evidências de que os navegadores usavam evaporação e condensação da água do mar para consumo em suas viagens. Também se descobriu que essa civilização utilizava filtros de barro para reter o sal.

Porém, até hoje, os humanos ainda estão muito distantes da capacidade de dessalinização da natureza. Este processo é vital para o ciclo de água do planeta, sendo o conjunto oceanos/sol a maior usina de dessalinização que irá operar na Terra, em toda a sua existência. Quando o sol esquenta a água dos mares, ele provoca a sua evaporação. O vapor então vai para a atmosfera, sem carregar os sais. Esta água então é carregada pelos ventos e cai em forma de chuva nas bacias hidrográficas que irão abastecer os cursos de água doce e subterrâneo, permitindo, assim, a utilização pelo homem.

A primeira publicação científica sobre o tópico, cujo autor foi um químico árabe, data do século XVIII. Nesta época, as técnicas mais utilizadas envolviam a evaporação e a condensação de água. O desenvolvimento de processos teve um grande salto na década de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, quando foi necessário fornecer água para os batalhões de soldados que operavam em zonas áridas.

Na década de 1960, as primeiras unidades comerciais surgiram e, na de 70, ocorreu a popularização de processos que usavam membranas para o tratamento comercial. Houve uma grande descoberta em 1959, na UCLA⁴, que demonstrou que a osmose poderia ser utilizada de forma prática. As membranas representaram um grande avanço tecnológico que efetivamente tornou a dessalinização uma alternativa viável para situações de difícil acesso à água doce e com proximidade de águas salinas.

Atualmente, existem mais de 17.000 plantas de dessalinização espalhadas por 150 países, com capacidade instalada de 80 milhões de metros cúbicos de água

⁴ Universidade da Califórnia, nos Estados Unidos.

processável por ano. Mais de 300 milhões de pessoas dependem da água dessalinizada pelo menos para parte de suas atividades no ano. Estas indústrias retiram a água não só dos mares e oceanos, mas também de fontes salobras – águas com concentrações de sal intermediárias entre a doce e a dos mares – que podem ser encontradas em reservatórios subterrâneos ou lagos superficiais.

As tecnologias de dessalinização podem ser divididas em dois subgrupos: processos térmicos e processos de membrana.

A dessalinização térmica

Inspirada pela natureza, esta é a tentativa mais fidedigna do homem para tentar controlar o ciclo da água e obter água doce. Este método corresponde a 60% do processo de dessalinização mundial, segundo a American Chemical Society, sendo o primeiro processo utilizado para realizar o tratamento da água do mar em larga escala comercial.

Para esta técnica, utiliza-se a evaporação da água do mar, processo que gera vapor de água a partir do fornecimento de energia para um sistema até que este alcance a temperatura de ebulição da água. Posteriormente, condensa-se este vapor a partir do resfriamento do sistema. O maior custo desta técnica é o da energia térmica. Por isso, as plantas mais modernas recolhem e reutilizam no seu processo calor originado de usinas termoelétricas de produção de energia.

Os principais processos de dessalinização térmica são: evaporação solar (SD), evaporação de múltiplos estágios (MSF), evaporação de múltiplos efeitos (MED) e compressão de vapor (VC).

A SD reproduz o ciclo hidrológico natural em escala reduzida. Esse processo é principalmente utilizado em lugares quentes, com a construção de grandes tanques cobertos com vidro ou outro material transparente. A luz solar atravessa o vidro, a água do líquido bruto evapora, os vapores se condensam na parte interna do vidro, transformando-se novamente em água, que escorre para um sistema de recolhimento. Dessa forma, separa-se a água de praticamente todos os sais e impurezas.

No processo MSF, utiliza-se vapor em alta temperatura para fazer com que a água do mar entre em ebulição. A nomenclatura “múltiplos estágios” se justifica pela passagem da água por diversas células de ebulição-condensação, garantindo um elevado grau de pureza. Neste processo, a própria água do mar é usada como condensador da água que é evaporada.

Na MED, a água do mar pré-aquecida entra na primeiro evaporador, onde terá sua temperatura elevada até a temperatura de ebulação. O vapor gerado será utilizado para aquecer de forma indireta a água no segundo evaporador e assim sucessivamente, sendo que o vapor do último evaporador será utilizado para pré-aquecer a água bruta — que entrará no primeiro evaporador. Assim como no processo MSF, é utilizado vácuo para reduzir a temperatura de ebulação da água.

O princípio de funcionamento da VC é semelhante ao da MED, com a diferença de que a primeira tem por base a compressão do vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões. Nesta técnica, há duas formas distintas de operação: a compressão do vapor pode ser feita por meio de um compressor mecânico (MVC); ou podem ser adicionadas pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor (TVC).

Segundo Hari J. Krishna⁵, tipicamente, a água resultante da evaporação possui uma concentração de sais entre 5 e 50 ppm com aproveitamento entre 25% a 50% do volume original de água.

A dessalinização por membranas

Em 1748, J. Abbe Nollet⁶ observou pela primeira vez o fenômeno da osmose. Osmose é o nome dado ao movimento de água, que passa por difusão em uma membrana semipermeável, devido à diferença de concentração de solutos entre seus dois lados. Na prática, esta passagem se deve ao potencial químico das soluções. Na natureza, a água se movimenta naturalmente, ou seja, sem gastos de energia (movimento passivo) do ambiente com menor concentração (maior energia), hipotônico, para o outro com maior concentração (menor energia), hipertônico, de forma a equilibrar as concentrações em ambos os meios, tornando-os isotônicos.

Cientistas se inspiraram na osmose para tentar achar um método para usar as membranas semipermeáveis de forma inversa à natureza, ou seja, fazendo com que a água flua do meio de maior para o de menor concentração, obtendo, assim, água potável.

⁵ Hari J. Krishna é membro do Painel de Desenvolvimento de Águas do Texas e foi fundador e presidente da Associação The American Rainwater Catchment Systems Association.

⁶O abade Jean-Antoine Nollet (19 de novembro de 1700 – 25 de abril de 1770) foi um clérigo e físico francês, membro da Sociedade Real de Londres. A ele também é creditada a invenção do para-raios.

Os dois principais métodos que utilizam membranas semipermeáveis são a osmose (RO) e a eletrodiálise (ED). Vale ressaltar que a segunda técnica possui um funcionamento diferente do que o explicado, já que, neste caso, é o soluto quem passa pelas membranas, atraído por cargas elétricas.

Na osmose, inverte-se o gradiente de movimento da água com a ajuda de pressão, fazendo com que ele aponte da solução hipertônica para a hipotônica. O procedimento consiste em aplicar pressão na solução de maior concentração para forçar a água a se mover no sentido daquela com menor concentração, com a membrana impedindo a passagem do sal. Com isso, obtém-se água pura no lado de menor concentração. Esta tecnologia pode ser usada para qualquer tipo de água, com aproveitamento de 50 a 80% da água inicial para águas salobras e de 30% a 60% para água do mar segundo a associação American Water Works Association Research Foundation.

Principalmente usada para água salobras, a eletrodiálise consiste em utilizar membranas catiônicas e aniónicas para permitir a passagem de sais iônicos que são atraídos por eletrodos eletricamente carregados, deixando a água pura para trás. O centro de estudos americano National Centre of Excellence in Desalination afirma que a taxa de recuperação de água corresponde de 75% a 95% do volume inicial.

Aplicação das tecnologias

Dentre as tecnologias citadas, não se pode definir qual é a melhor, já que cada uma se destaca em um meio diferente, apresentando vantagens e desvantagens únicas. Portanto, a utilização de uma ou outra deve ser analisada caso a caso. Em comum, todas elas apresentam um grande consumo de energia, sendo este insumo o maior responsável pelo alto preço da água dessalinizada.

Hoje, a osmose é tida como a melhor solução na grande maioria dos casos. Este método é referência atualmente para qualquer novo projeto e é considerado aquele que utiliza a tecnologia com maior potencial de desenvolvimento e aplicação.

Porém, novos métodos estão sendo analisados quanto à sua viabilidade, como é o caso de um projeto que utiliza a tecnologia de evaporação em baixa temperatura (EBT), proposto por Nirmala Khandan, que supostamente reduziria o consumo de energia por metro cúbico de água tratada em comparação às técnicas tradicionais de evaporação.

2 OBJETIVO

O crescimento do mercado de dessalinização impulsiona as pesquisas que visam a desenvolver novas tecnologias e métodos, principalmente aqueles que conseguem operar sem um uso tão intenso de energia.

O presente trabalho explora e analisa uma destas tecnologias: a dessalinização usando evaporação potencializada por diferença de equilíbrio de pressão de vapor. Assim, irá buscar uma alternativa à osmose que possibilite uma maior aplicação da dessalinização como alternativa viável para sistemas de abastecimento de água.

A dessalinização usando evaporação em baixa temperatura se utiliza de processos termodinâmicos há muito tempo conhecidos pela ciência, ou seja, não é um conceito novo, mas que ainda possui grande potencial de desenvolvimento. Uma tentativa de usar este conhecimento para produção comercial de água para consumo humano surgiu na New Mexico State University, liderada pelo pesquisador Nirmala Khandan. O modelo PoC⁷ foi desenvolvido em 2009, seguido por um protótipo com produção de água de 12 l/dia.

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade ambiental, financeira, comercial e tecnológica dessa tecnologia por meio da extração do protótipo para um projeto em escala comercial. Como padrão de referência e fonte para comparação foram utilizados projetos já existentes de osmose.

⁷ Uma prova de conceito, ou PoC (sigla do inglês, *Proof of Concept*) é um termo utilizado para denominar um modelo prático que possa provar o conceito teórico estabelecido por uma pesquisa ou artigo técnico. Pode ser considerada também uma implementação, em geral resumida ou incompleta, de um método ou de uma ideia, realizada com o propósito de verificar que o conceito ou teoria em questão é suscetível de ser explorado de uma maneira útil. A PoC é considerada habitualmente um passo importante no processo de criação de um protótipo.

3 LEVANTAMENTO DE DADOS

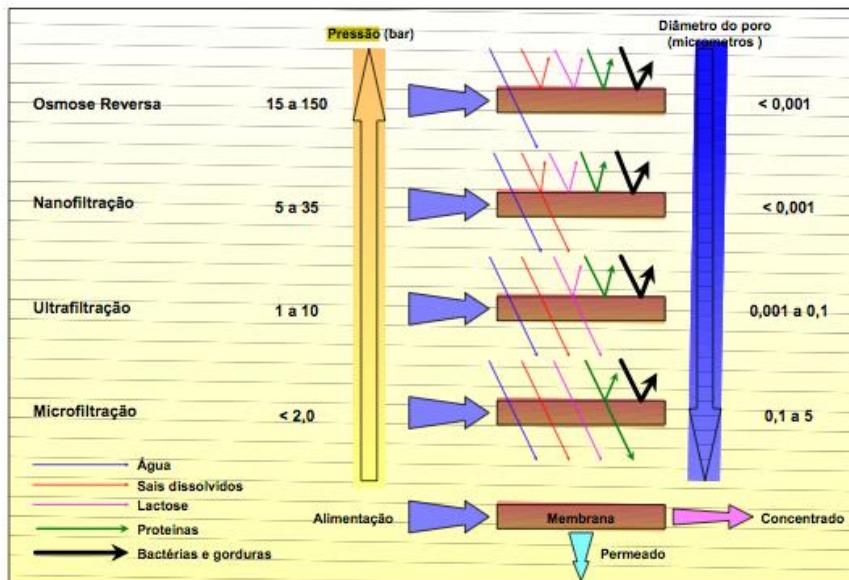
3.1 Dessalinização por osmose

3.1.1 Sistema de dessalinização por osmose

O sistema de osmose alcança o maior nível de filtração dentre as tecnologias disponíveis no mercado, com eficiência de 95% a 99% de sais dissolvidos retirados do total presente na água. Neste arranjo, uma membrana semipermeável age como barreira para os sais dissolvidos, moléculas inorgânicas e moléculas orgânicas de alta massa molecular. As moléculas de água, por outro lado, passam livremente por esta barreira, criando um produto purificado. As aplicações do sistema de osmose são bem variadas, incluindo dessalinização de água do mar ou salobra, recuperação de águas residuais, produção de água para o processamento de bebidas e alimentos, separação biomédica e purificação de água para consumo e processos industriais.

Outro uso da osmose é na produção de água ultra pura, utilizada em semicondutores industriais, em usinas de energia industrial alimentando a caldeira e em aplicações médicas.

Figura 2: Características dos principais processos de dessalinização por membranas

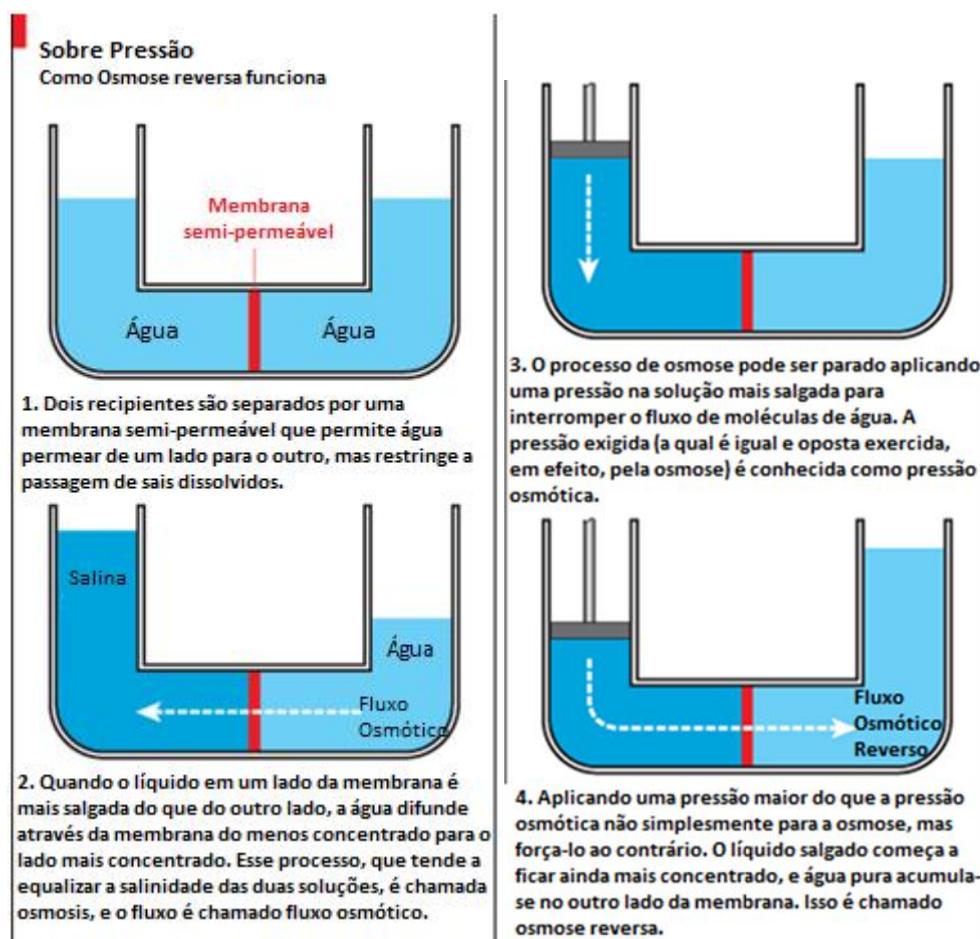


Fonte: Mierzwa et al., (2008)

O sistema de osmose deve exercer uma pressão sobre a água a ser tratada maior que a pressão osmótica de equilíbrio, de forma que ocorra a passagem de água do meio mais concentrado para o menos concentrado, ou seja, contrário ao

movimento natural, conforme a Figura 3 ilustra. Dessa forma, as pressões sobre a membrana normalmente podem ir de 5 bar (500 kPa) para águas salobras até mais de 84 bar (8.400 kPa) para água do mar, de acordo com o Pacific Institute. As pressões desta tecnologia se destacam também por serem as maiores dentro de todos os processos de dessalinização por membrana disponíveis no mercado, que incluem a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração e a por osmose.

Figura 3: Funcionamento da osmose



Fonte: The Economist

3.1.2 Eficiência do processo

Ainda que a osmose seja controlada por bombas, alguns fatores podem afetar a sua eficiência, como a pressão, temperatura, concentração de sal na água de alimentação, recuperação de água, entre outros, conforme identificado na Tabela 2, que expõe essas influências com relação ao fluxo permeado e à passagem de sal.

Tabela 2: Fatores que influenciam o desempenho da osmose

Aumento	Fluxo permeado	Passagem Sal
Pressão Efetiva	↑	↓
Temperatura	↑	↑
Recuperação	↓	↑
Correção do Sal de alimentação	↓	↑

Aumentar ↑ Decrescer ↓

Existem diversos tipos de membrana, que apresentam uma grande variedade de permeabilidade. Isto permite que a escolha do material seja feita de acordo com as exigências do projeto, principalmente em relação aos custos e eficiência necessária. Basicamente, membranas com alta permeabilidade exigem menos pressão, barateando o processo, mas também alcançando um menor grau de pureza, já que uma maior quantidade de sal conseguirá passar pelos poros.

3.1.3 Pré-tratamento

Para efeito didático, a membrana pode ser ilustrada como uma superfície plástica, impermeável, cuja área foi furada por uma agulha de ponta bastante fina, deixando diversos poros no material. Estes poros são tão pequenos que apenas as moléculas de água conseguem passar, devido ao seu reduzido diâmetro molecular.

Quando o processo força a água rica em sais, hidróxidos, metais, cálcio precipitado, algas, sílicas, ou qualquer substância orgânica ou inorgânica pelas membranas, há risco de entupimento destes poros, diminuindo a vida útil do material e prejudicando o desempenho das mesmas, devido à precipitação ou deposição de sais pouco solúveis nas membranas.

Por isso, é recomendado um pré-tratamento da água de alimentação do sistema, para diminuir o contato das impurezas com a membrana, e, assim, diminuir a contaminação e a obstrução de sua superfície.

Mesmo ocorrendo o pré-tratamento da água de alimentação, é recomendada a limpeza da membrana com substâncias químicas, normalmente o cloro, mas que dependem do tipo de membrana utilizado. Essa limpeza química irá diminuir a incrustação de material na membrana, mantendo o desempenho da usina.

3.1.4 Captação da água

Na alimentação do sistema, normalmente é utilizada uma bomba de alta pressão, podendo ser centrífuga ou de deslocamento positivo (bomba de pistão). A bomba de pistão pode atingir uma alta eficiência, de até 88%, porém, sua alta potência gera elevados custos de operação, devido ao alto consumo elétrico. Já bombas centrífugas possuem uma eficiência menor, próxima a 80%, mas são mais baratas e demandam menor manutenção.

Ou seja, a escolha do tipo de bomba passa por um *trade-off* custos de operação/manutenção contra eficiência. Usinas menores (de até 6 l/s) costumam utilizar bombas de pistão, já que o baixo volume de água produzido exige uma grande eficiência. Já em plantas maiores, vale abdicar da eficiência para ganhar em custos, usando preferencialmente bombas centrífugas.

Após a água ser captada pelas bombas e passar pelas membranas, pode ocorrer a formação de sal rejeitado e uma perda do fluxo permeado, que são os principais problemas na dessalinização por osmose, embora também sejam indicadores do funcionamento do sistema, visto que uma diminuição moderada do fluxo permeado e da recuperação do sal indicam que as membranas estão sofrendo incrustação, assim como, se decaíssem imediatamente, indicariam um defeito na planta do sistema, quando não são utilizados sistemas com recuperação de energia.

3.1.5 Impactos ambientais

O sal retido e a água salobra são, normalmente, depositados de volta na água do mar, podendo alterar o ambiente marinho. Foi identificado o limite crítico para algumas espécies marinhas, mostrando as características físicas, químicas e biológicas que poderiam ser alteradas por descarregar esses rejeitos de volta ao mar. Esses limites são importantes para identificar e entender a tolerância das espécies marinhas diante do processo e para avaliar os impactos ambientais.

Outro impacto gerado pela usina de dessalinização por osmose pode ser observado no momento da captação da água do mar. Esta água pode conter diversos micro-organismos, peixes e larvas que morrem devido à velocidade e à diferença de pressão sofrida ao passar pelos dutos de alimentação da usina ou em função do cloro e outras substâncias químicas que são utilizadas na limpeza e para evitar a corrosão e a incrustação das membranas e tubulação, podendo ocorrer uma diminuição da vida

marinha local. Assim, para o continente, são utilizados, normalmente, poços, ao invés de captação direta do mar, minimizando esses impactos. Também é feito um projeto para essa captação, de forma que diminua as correntes de arraste, prejudicando a usina.

Uma das opções de mitigação é a criação de um *habitat* de recuperação de peixes em um local próximo à usina, onde eles possam se reproduzir, compensando aqueles mortos pela construção e operação da usina.

Pode-se também construir barreiras físicas, que impedem a passagem de seres vivos e detritos para os dutos de alimentação da usina, evitando tanto que o *habitat* marinho seja prejudicado, como prevenindo um desgaste maior das membranas.

Uma terceira ação para reduzir o impacto nas populações marinhas é a alocação dos tubos de alimentação da água do mar em lugares com baixa produtividade biológica. Na disposição da água salobra, deve-se instalar diversas portas de saída da água, aumentando a diluição e mistura do sal na água do mar, diminuindo a concentração no ponto de descarte. Pode-se também usar as águas residuais de estações de tratamento para a diluição do rejeito antes da liberação no mar, ou água de refrigeração de usinas de energia próximas à de dessalinização.

3.1.6 Necessidades energéticas e custos

O processo de retirada do sal e substâncias da água do mar pela dessalinização via osmose exige muita energia para gerar pressão suficiente e vencer a pressão osmótica de equilíbrio. Outros processos responsáveis pela necessidade de energia são o bombeamento da água e a distribuição.

É importante ressaltar que tal energia pode ser reduzida utilizando painéis fotovoltaicos, energia eólica, entre outras energias renováveis, apesar de que o custo de algumas delas elevaria o custo total da produção de energia. Ou então reduzindo o total de energia utilizada ou mesmo recuperando a energia do concentrado, ou mesmo utilizando recuperadores de energia.

Outro problema associado ao consumo é o custo. O custo da energia elétrica representa 36% (Pacific Institute) do custo final do litro de água produzido na usina. Uma das soluções pensadas para diminuir esta porcentagem é a adoção de dispositivos de recuperação de energia, que recapturam parte da energia hidráulica

da salmoura de alta pressão. Para exemplificar o alto uso de energia, apresenta-se abaixo algumas usinas de dessalinização com seus gastos por metro cúbico (m^3).

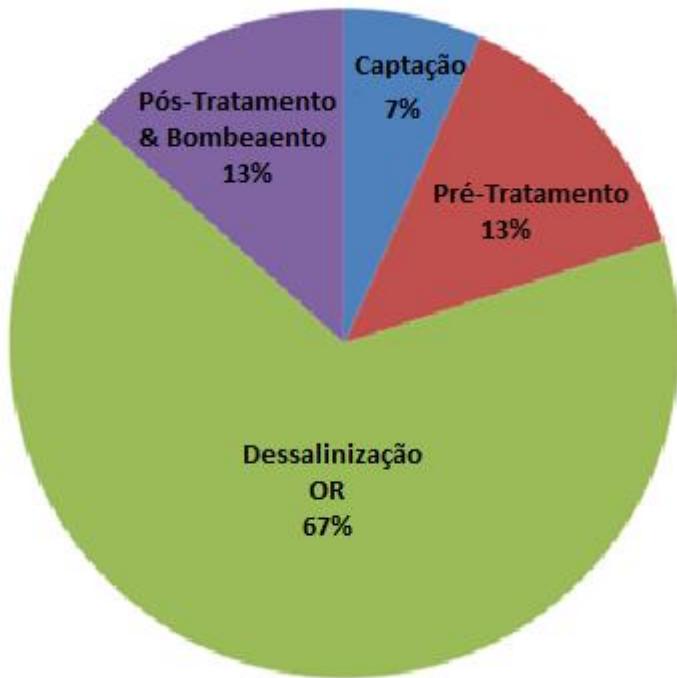
Tabela 3: Energia requerida (kWh/m^3) para plantas de dessalinização de água do mar usando osmose

Planta	Energia Requerida (kWh/m^3)	Capacidade da Instalação (m^3/dia)	Data
Kwinana, Perth, Australia	3,60	140.000	2005
China	4,10	35.000	2005
Egito	4,00	1.000	2005
Raleigh, IWSPP, Arabia Saudita	4,80	230.000	2005
Rambia Morales, Espanha	3,30	60.000	2005
Valdelentisco, Espanha	4,40	140.000	2005
Khor Fakhan Power Plant, EAU	4,00	23.000	2005
Aruba	4,00	8.000	2006
Gold Coast, Australia	3,60	130.000	2006
Israel (Hadera)	4,50	273.000	2006
Bonaires, Antilhas Holandesas	4,00	8.000	2006
Alicante II, Espanha	3,70	65.000	2006
Fujairah, EAU	4,80	170.000	2006
Caofeidian, China	4,00	50.000	2009
Ashkelon Expansion, Israel	3,80	41.000	2009

Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

De acordo com o Pacific Institute, a dessalinização da água do mar demanda por volta de 15.000 kWh por milhão de galões (aproximadamente 3,78 milhões de litros). Para comparação da dimensão deste valor, os processos para reúso de água, com seus devidos tratamentos, podem utilizar até 8.300 kWh por milhão de galões.

Figura 4: Energia utilizada em vários elementos no processo de dessalinização



Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

Segundo o Pacific Institute (2013), o custo de produção da água por osmose pode ser bem variável, de \$1,54 até \$2,43 dólares por metro cúbico (m^3). Apesar destes custos terem caído consideravelmente nos últimos 20 anos, eles ainda permanecem altos se comparados aos sistemas com entrada de água doce, devido principalmente ao aumento dos preços de energia.

Para análise de investimentos de uma planta de dessalinização, devem ser considerados o custo do projeto e da infraestrutura, tubulações, a necessidade de integração da usina de dessalinização com o sistema de água, a energia que será utilizada, o valor do terreno e o da mão de obra, entre outros.

O custo médio, dividido por tipos (custos de construção direto, indireto e anual de operação) é identificado na Tabela 4, de uma usina de baixa pressão (onde a pressão da água é baixa), operando a 7 bar e 85% de recuperação. Todos os custos indiretos foram estimados fixando-se um percentual do custo direto. O custo de operação foi estimado utilizando-se \$0,075/kWh e \$10/h de trabalho, também é considerado que o tempo de vida das membranas é de 5 anos.

Tabela 4: Custo em função da capacidade e TDS

A. Custo direto de construção (1000\$)						
1. Custo de equipamento de processo	622,00	2.312,00	4.227,00	7.449,00	13.941,00	
2. Construção	178,00	891,00	1.783,00	3.556,00	7.132,00	
3. Abastecimento de água de alimentação,						
Equipamento auxiliar	182,00	316,00	527,00	912,00	1.677,00	
Subtotal de custo direto	982,00	3.519,00	6.537,00	11.927,00	2.275,00	
B. Custo de capital indireto						
4. Excedente de construção	216,04	774,18	1.428,14	2.623,00	5.005,00	
5. Custo do proprietário	78,56	281,52	522,96	954,16	1.820,00	
6. Contingenciamento	98,20	351,90	653,70	1.192,70	2.275,00	
Subtotal custo indireto	392,80	1.407,60	2.614,80	4.770,80	9.100,00	
Total custo de construção	1.443,54	5.172,93	9.609,39	17.532,69	33.442,50	
Custo de capital unitário (\$/(L.dia))	0,38	0,27	0,25	0,23	0,22	
C. Custo anual de operação (\$K/ano)						
7. Eletricidade	53,28	265,20	530,50	1.060,10	2.117,70	
8. Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
9. Trabalho	281,00	312,00	343,40	374,60	437,00	
10. Execente de trabalho	112,40	124,80	137,36	370,50	174,80	
11. Substituição de membrana	18,50	92,60	185,00	370,50	741,10	
12. Produtos Químicos	23,50	126,80	254,30	508,50	1.013,80	
13. Outros custo e seguro	21,65	77,59	144,14	262,99	501,64	
Custo de operação e manutenção	510,33	998,99	1.594,70	2.947,19	4.986,04	
Custo de amortização	147,02	526,86	978,72	1.785,70	3.406,12	
Total custo anual	657,36	1.525,86	2.573,42	4.732,89	8.392,16	
14. Produção anual (m³)	1.172,75	5.863,73	11.727,45	23.454,90	46.909,80	
15. Custo manutenção e operação (\$/m³)	0,44	0,17	0,14	0,13	0,11	
16. Total custo da água (\$/m³)	0,56	0,26	0,22	0,20	0,18	

Fonte: Adaptada de Water Treatment Membrane Processes (1996)

Como a fonte é de 1996, está desatualizada. Atualizando-se a tabela pelo CPI acumulado do período, ou seja, multiplicando-se o valor de 1996 pela variação do CPI do período, tem-se os seguintes valores:

Tabela 5: Custo em função da capacidade e TDS atualizada pelo CPI do período**A. Custo direto de construção (1000\$)**

1. Custo de equipamento de processo	937,95	3.486,40	6.374,15	11.232,79	21.022,47
2. Construção	268,42	1.343,59	2.688,69	5.362,31	10.754,77
3. Abastecimento de água de alimentação,					
Equipamento auxiliar	274,45	476,52	794,69	1.375,26	2.528,85
Subtotal de custo direto	1.480,82	5.306,51	9.857,53	17.985,44	3.430,61

B. Custo de capital indireto

4. Excedente de construção	325,78	1.167,43	2.153,58	3.955,38	7.547,34
5. Custo do proprietário	118,47	424,52	788,60	1.438,84	2.744,49
6. Contingenciamento	148,08	530,65	985,75	1.798,54	3.430,61
Subtotal custo indireto	592,33	2.122,60	3.943,01	7.194,18	13.722,44
Total custo de construção	2.176,80	7.800,57	14.490,58	26.438,60	50.429,95
Custo de capital unitário (\$/(L.dia))	0,57	0,41	0,38	0,35	0,34

C. Custo anual de operação (\$K/ano)

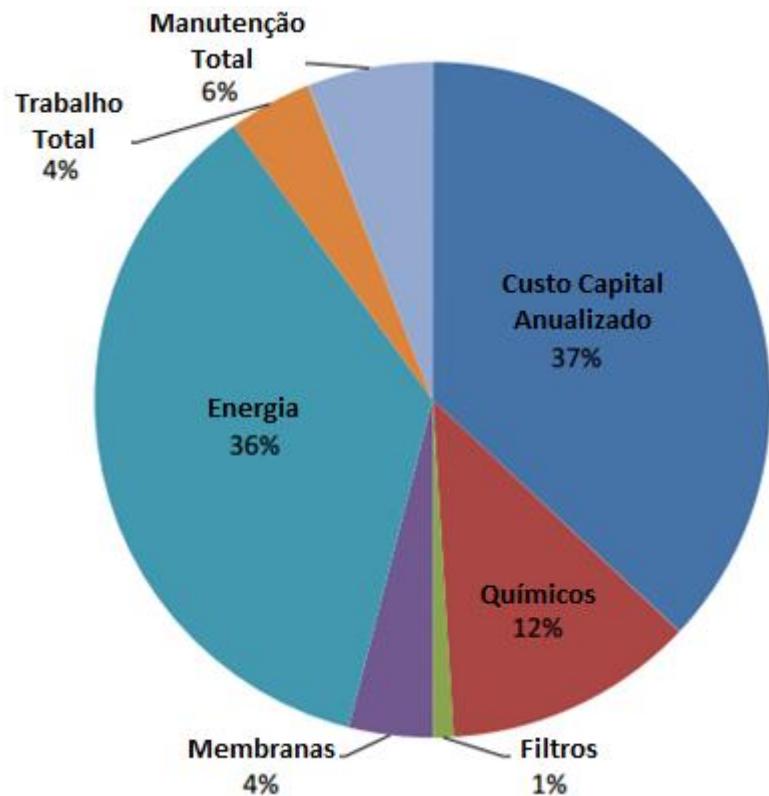
7. Eletricidade	80,34	399,91	799,97	1.598,59	3.193,41
8. Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9. Trabalho	423,74	470,48	517,83	564,88	658,98
10. Execente de trabalho	169,49	188,19	207,13	558,70	263,59
11. Substituição de membrana	27,90	139,64	278,97	558,70	1.117,55
12. Produtos Químicos	35,44	191,21	383,47	766,80	1.528,77
13. Outros custo e seguro	32,65	117,00	217,36	396,58	756,45
Custo de operação e manutenção	769,56	1.506,44	2.404,74	4.444,24	7.518,75
Custo de amortização	221,70	794,48	1.475,87	2.692,76	5.136,29
Total custo anual	991,27	2.300,94	3.880,61	7.137,01	12.655,04
14. Produção anual (m ³)	1.172,75	5.863,73	11.727,45	23.454,90	46.909,80
15. Custo manutenção e operação (\$/m ³)	0,66	0,26	0,21	0,19	0,16
16. Total custo da água (\$/m ³)	0,85	0,39	0,33	0,30	0,27

Fonte: Autoria própria

Com isso, é possível observar que o custo diminui conforme a quantidade de água produzida aumenta, com valores atualizados de \$0,85/m³ para 4.000 m³ para \$0,27/m³ para 16.000 m³.

No entanto, deve-se considerar também o transporte e o tratamento de águas residuais, visto que tal resíduo não poderá ser disposto arbitrariamente, por conta da alta concentração de sal, e também o custo associado aos possíveis impactos ambientais decorrentes desses resíduos. Ou seja, o custo de uma usina de dessalinização não está apenas na quantidade de energia utilizada ou na construção da planta, mas sim em todos os processos decorrentes da dessalinização, quanto à sua operação e manutenção.

Figura 5: Custo anual discriminado de uma usina de dessalinização de água do mar



Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

É importante notar que o custo de dessalinização não é estático no decorrer do tempo, pois os materiais podem sofrer mudanças de valor, a energia pode se tornar mais cara devido à demanda, o preço da membrana pode ser aumentado em função do seu tempo de vida, sua permeabilidade e resistência, entre outros fatores. De acordo com o Pacific Institute, é estimado que um terço dos custos sejam fixos, e o restante, variável, e que os custos sejam diferentes em relação à produtividade de cada usina.

Tabela 6: Exemplo da relação entre a produção das usinas de dessalinização e o custo unitário

Capacidade da Usina (m³)	Produção atual (m³)	Custo Anual Fixo (\$milhões)	Custo Anual Variável (\$milhões)	Custo por unidade (\$/m³)
190	190	\$100	\$50	\$2,17
190	150	\$100	\$40	\$2,53
190	115	\$100	\$30	\$3,14
190	75	\$100	\$20	\$4,34
190	40	\$100	\$10	\$7,96

Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

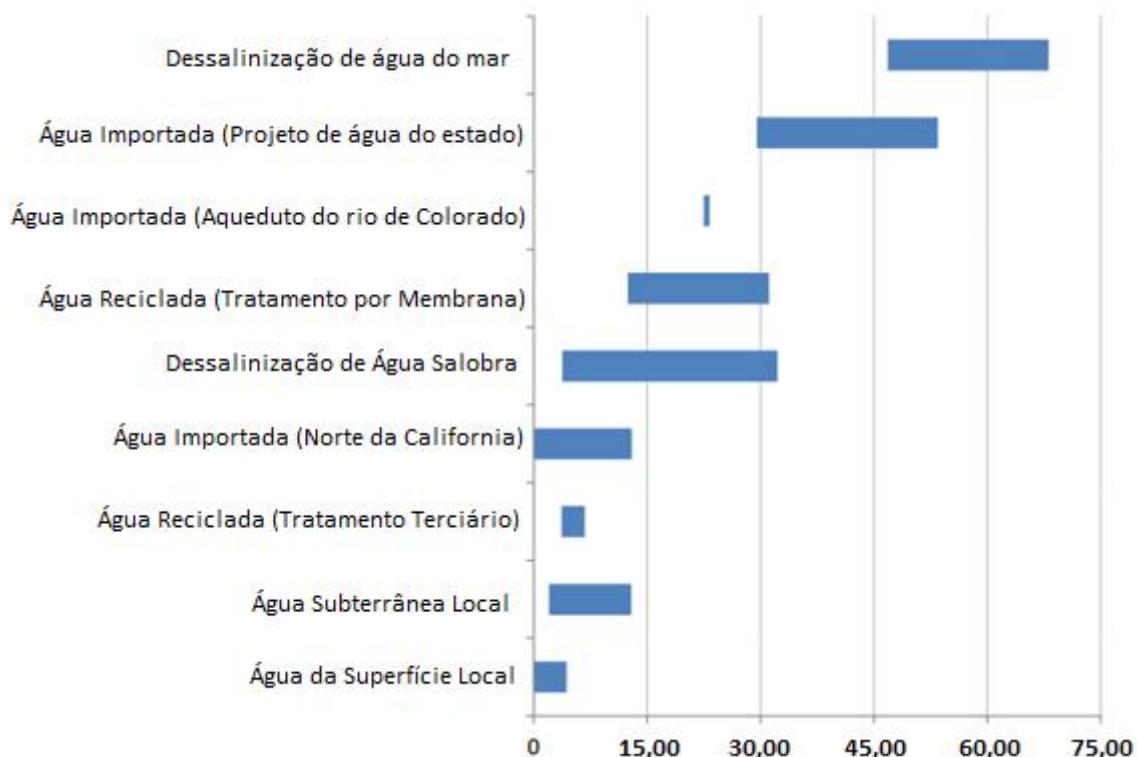
Com todos esses custos embutidos no processo, a dessalinização é considerada uma forma de tratamento de água mais cara do que os meios tradicionais, conforme identificado na tabela abaixo:

Tabela 7: Exemplo do custo marginal da água em San Diego, EUA

Água Alternativa	Custo por Metro Cúbico
Água Importada	\$0,71 - \$0,79
Água da superfície	\$0,32 - \$0,65
Água Subterrânea	\$0,30 - \$ 0,89
Dessalinização de água do mar	\$1,46 - \$2,27
Água reciclada (não potável)	\$1,30 - \$2,11
Água reciclada (potável)	\$0,97 - \$1,46
Conservação e eficiencia da água	\$0,12 - \$ 0,81

Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

Figura 6: Comparação entre a intensidade da energia nos tipos de abastecimento de água (kWh per ML)



Fonte: Adaptada de Pacific Institute (2013)

Devido ao alto custo e grande quantidade de energia utilizada (sem considerar a utilização de recuperadores de energia), as usinas de dessalinização são mais comuns no Oriente Médio, onde a energia é barata e há uma grande escassez de água. Em outros lugares, comumente as usinas contam com subsídios e financiamentos federais, tendo em vista a sua necessidade para aumentar a segurança do sistema de fornecimento de água. Atualmente, conforme aumenta o problema de secas e de escassez de água, a dessalinização por osmose está em alta. Segundo a Associação Internacional de Dessalinização, existem mais de 13.080 plantas ao redor do mundo, mas que produzem uma pequena quantidade de 55,6 m³ de água potável por dia, ou seja, 0,5% da água utilizada no mundo por dia.

Com isso, permanece a dúvida entre usar a dessalinização por osmose ou por evaporação da água, que também exige muita energia e produz pouca quantidade de água potável. A resposta para esta questão está na análise da qualidade da água resultante deste processo. A planta de dessalinização por evaporação é mais inclinada à corrosão e pode deixar traços de metais na água, enquanto a por osmose, contando com o pré-tratamento e limpeza das membranas, deixa a água com menos

impurezas, exigindo como tratamento posterior apenas uma correção de pH e remineralização, além de cloração ou acréscimo de flúor na distribuição para consumo humano.

3.2 Dessalinização por evaporação em baixa temperatura

3.2.1 Sistema de dessalinização proposto

Os princípios que sustentam o processo proposto podem ser ilustrados considerando-se duas colunas barométricas em temperatura ambiente, uma contendo água doce e outra contendo água salina. Os topo das duas colunas serão ocupados pelos vapores dos respectivos fluidos às suas respectivas pressões de vapor⁸. Suponha-se que os topo das duas colunas estejam conectados um ao outro. Como na temperatura ambiente a pressão de vapor da água doce é ligeiramente maior do que a da água salina, ocorrerá evaporação do vapor da coluna de água doce para a coluna de água com soluto mais concentrado.

Entretanto, se a temperatura da coluna de água salina for mantida levemente mais alta que a da coluna de água doce, de forma que a pressão de vapor da primeira coluna seja maior que a da segunda, ocorrerá evaporação do vapor da coluna de água salina para a coluna de água doce. Com apenas uma diferença de temperatura de cerca de 15 °C já é possível superar a diferença de pressão de vapor, mudando o sentido do fluxo da água. Essa baixa diferença de temperatura pode ser alcançada

⁸ Pressão de vapor pode ser definida como a pressão que o vapor, em equilíbrio dinâmico com o líquido que o originou, exerce sobre a superfície do líquido em um sistema fechado. A pressão de vapor está intimamente ligada à temperatura do líquido, portanto, para uma determinada substância a pressão de vapor depende apenas de sua temperatura. Porém, quando se trata de uma solução, a proporção de soluto dissolvido afeta as ligações entre as moléculas do solvente, alterando, portanto, a pressão de vapor da solução. No caso da água salina, os íons Na⁺ e Cl⁻ ocupam parte do espaço entre as moléculas de água, resultando em menor interação entre estas e acarretando em diminuição da pressão de vapor da solução em relação à água pura na mesma temperatura.

utilizando-se fontes de calor *low-grade*⁹, como energia solar, calor residual de processos,¹⁰ ou sistemas de armazenamento de energia térmica.

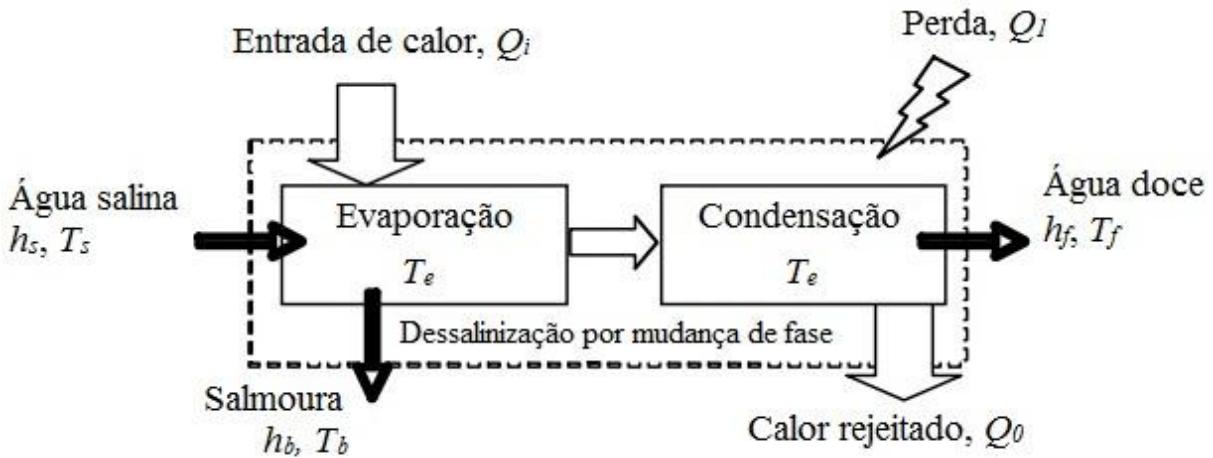
3.2.2 Raciocínio termodinâmico para a dessalinização em baixa temperatura

Processos de dessalinização consomem muita energia. A qualidade de energia utilizada para cada processo, porém, pode ser bastante diversa. Por exemplo, o processo de osmose usa energia mecânica; evaporação utiliza energia térmica de alta qualidade; evaporação à vácuo utiliza energia mecânica e energia térmica *medium grade*; e, por fim, evaporação solar utiliza energia térmica *low-grade*. Tecnologias de dessalinização de mudança de fase têm sido tradicionalmente analisadas e comparadas seguindo os princípios da primeira lei da termodinâmica, a lei da conservação de energia, considerando apenas a quantidade de energia. Genericamente, esse processo é representado da seguinte maneira:

⁹ Baseando-se nos princípios da termodinâmica, uma fonte de energia pode ser *high-grade* ou *low-grade*, dependendo da facilidade com que pode ser convertida em outras formas de energia. A energia elétrica, por exemplo, é *high-grade*, pois é facilmente convertida em quase todos os tipos de energia. A energia térmica, por sua vez, não pode ser totalmente convertida em energia elétrica (a eficiência típica dessa conversão é 30%), e, portanto, é uma energia *low-grade*. Naturalmente, a energia *high-grade* tem um custo superior ao da energia *low-grade*. Há também a *medium grade*, intermediária.

¹⁰ É um sub-produto resultante de muitos processos industriais, tais como refrigeração, limpeza de gás de combustão em instalações de incineração de grande porte, tratamento de águas residuais e diversos processos químicos.

Figura 7: Representação genérica de um processo de dessalinização por mudança de fase, onde h é a entalpia específica, T é a temperatura e Q é a taxa de transferência de calor



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Aqui, $Q_o = m_f h_{L(T_e)}$ é a taxa de rejeição de calor, onde m_f é a taxa de produção de água doce e $h_{L(T_e)}$ é o calor latente de condensação à temperatura de evaporação, T_e ; e $Q_l = UA\Delta T$ é a taxa de perda de calor, onde U é o coeficiente de transferência de calor, A é a área de transferência de calor, e ΔT é a diferença de temperatura entre a câmara de evaporação e o ambiente. Baseando-se na primeira lei da termodinâmica, o rendimento desse processo, m_f/m_s , pode ser demonstrado:

$$\frac{m_f}{m_s} = \frac{(Q_i - Q_l)}{h_{L(T_e)}} / m_s + (h_s - h_b)$$

A partir da equação anterior, é possível obter, para uma determinada entrada de energia, a taxa de produção de água doce como uma função da taxa de alimentação de água salina e da temperatura de evaporação. Os resultados mostrados na Figura 8 para uma Q_i de 1000 kJ/h e $UA = 0,8 \text{ J/s.K}$ (valores extraídos de KHANDAN; GUDE, 2010) indicam que, para uma dada velocidade de alimentação, uma taxa de produção mais elevada é possível em uma baixa temperatura. A relação entre o rendimento do processo, m_f/m_s , e o consumo específico de energia, Q_i/m_f [kJ/kg de água doce produzida] a várias temperaturas de evaporação é mostrada na Figura 8. Este gráfico mostra que, quanto menor a temperatura de evaporação, menor é a energia específica requerida para o rendimento desejado.

Para comparações racionais de técnicas dos diferentes processos, e para melhorar os processos existentes ou desenvolver novos processos, a qualidade da

energia utilizada também deve ser considerada. Uma simples avaliação, baseada na segunda lei da termodinâmica¹¹, é apresentada abaixo para ilustrar a forma como diferentes qualidades de energia térmica utilizada em processos de dessalinização de mudança de fase podem ser comparadas. Considere-se, por exemplo, os dois casos seguintes, cada um alimentado com água salina a 1 kg/h:

Caso 1: um processo de mudança de fase de dessalinização utilizando energia térmica de qualidade moderada de 1000 kJ/h a uma temperatura de evaporação de 90° C e temperatura ambiente de 25° C;

Caso 2: um processo de mudança de fase de dessalinização utilizando energia térmica de baixa qualidade de 1000 kJ/h, a uma temperatura de evaporação de 50° C e temperatura ambiente de 25° C.

Com base na análise da primeira lei da termodinâmica, as taxas de produção de água doce nos casos 1 e 2, calculadas por KHANDAN; GUDE (2010) são, respectivamente, 0,294 kg/h e 0,368 kg/h (Figura 8); e a necessidade de energia específica correspondente é de 3401 kJ/kg e 2717 kJ/kg (Figura 9). Embora a quantidade de energia de entrada seja a mesma nos dois casos, a qualidade da energia é diferente. Se, por exemplo, um motor térmico ideal for operado através das respectivas diferenças de temperatura, as suas eficiências Carnot serão de 20% e 7,7%, respectivamente. Assim, para a dada entrada de energia térmica, de 1000 kW, a equivalência de trabalho reversível no caso 1 será de 201 kW e no caso 2 será de 77 kW. Com base nas equivalências de trabalho reversíveis, as necessidades de energia específica para os dois casos serão de 683 kJ/kg e 209 kJ/kg, respectivamente.

¹¹ Dois enunciados ilustram a segunda lei da termodinâmica:

Enunciado de Clausius: “O calor não pode fluir, de forma espontânea, de um corpo de temperatura menor, para um outro corpo de temperatura mais alta.” Tendo como consequência que o sentido natural do fluxo de calor é da temperatura mais alta para a mais baixa, e que para que o fluxo seja inverso é necessário que um agente externo realize um trabalho sobre este sistema.

Enunciado de Kelvin-Planck: “É impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converte toda a quantidade de calor recebido em trabalho.” Este enunciado implica que, não é possível que um dispositivo térmico tenha um rendimento de 100%, ou seja, por menor que seja, sempre há uma quantidade de calor que não se transforma em trabalho efetivo.

Figura 8: Taxa de produção de água doce em função da taxa de alimentação de água salina e da temperatura de evaporação com a entrada de calor fixa de 1000 kJ/h

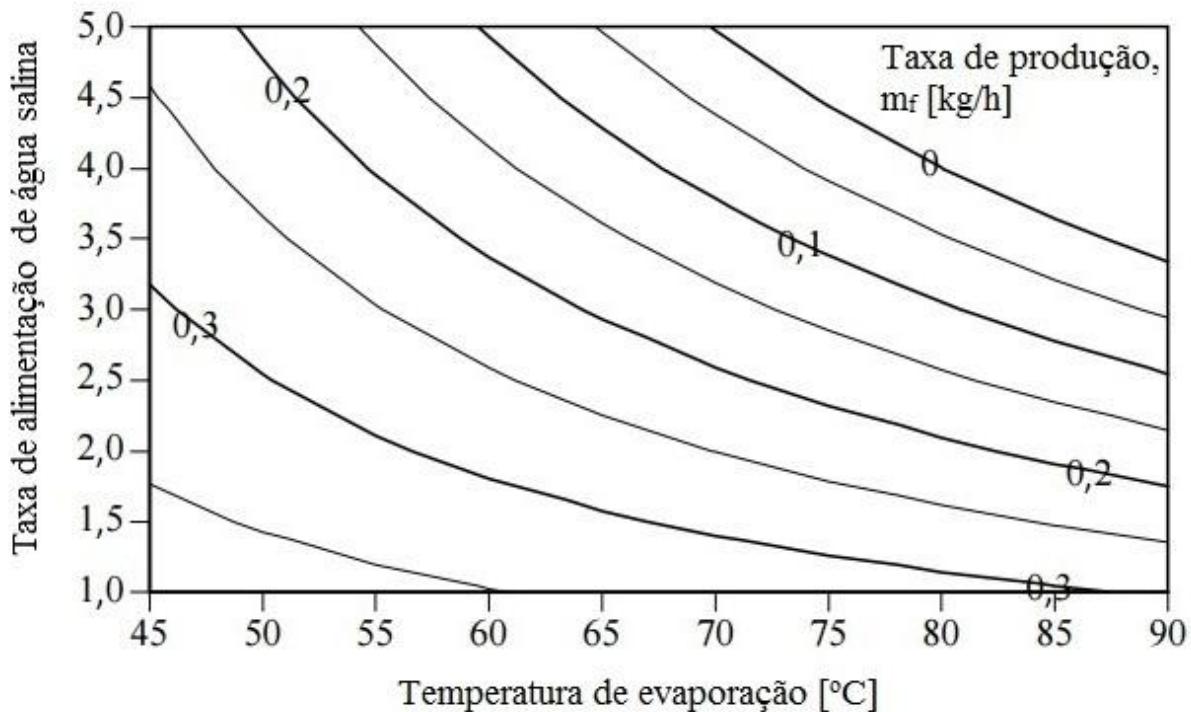
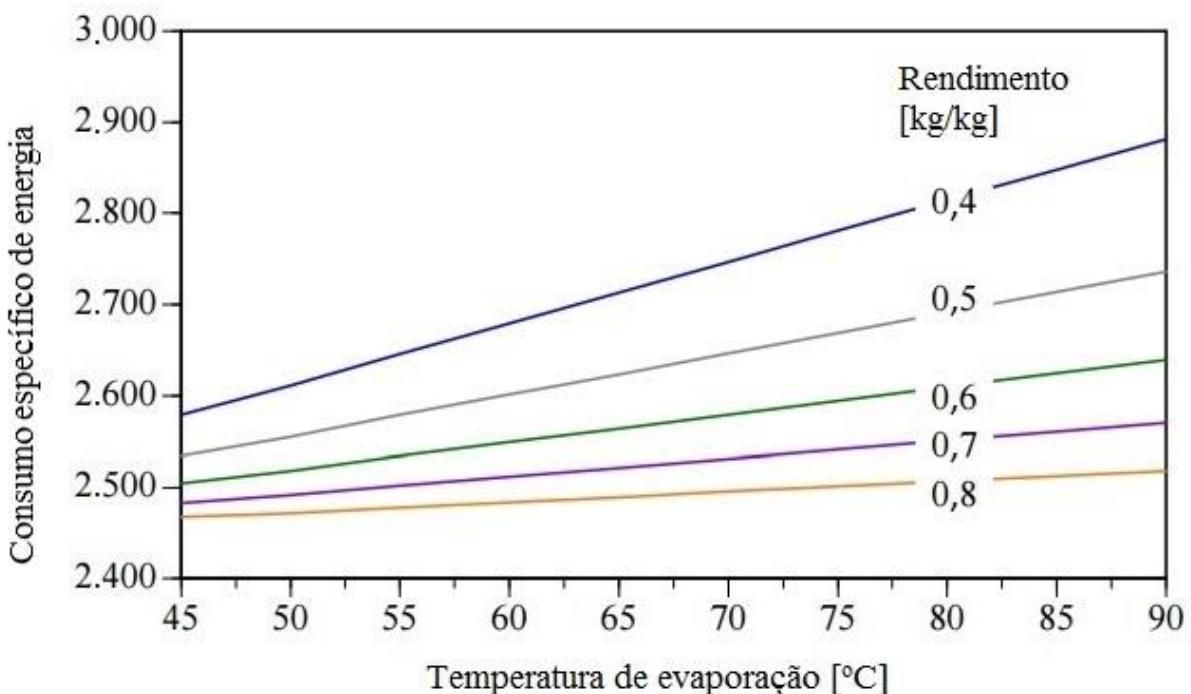


Figura 9: Relação entre rendimento e consumo específico de energia como uma função da temperatura de evaporação



Fonte: Adaptadas de KHANDAN; GUDE, 2010

Embora as análises acima indiquem que o processo de mudança de fase pode ser mais eficiente em energia quando ocorre a baixas temperaturas, apenas um número limitado de tecnologias foram projetadas para tirar vantagem deste resultado. Uma abordagem tem sido a de diminuir o intervalo de temperatura geral do processo de adição de calor externo através do *staging*, ou encenação, onde o calor rejeitado durante a etapa de condensação é recuperado para pré-aquecer o alimento. Outra abordagem é a de manter uma baixa pressão de evaporação, em que a evaporação ocorre a baixa temperatura, como no caso de uma evaporação à vácuo. Neste último caso, é necessária a adição de energia mecânica extra para manter o vácuo necessário; uma vez que a energia mecânica é uma forma de energia mais valiosa do que a energia térmica, essa não é uma abordagem termodinamicamente eficiente.

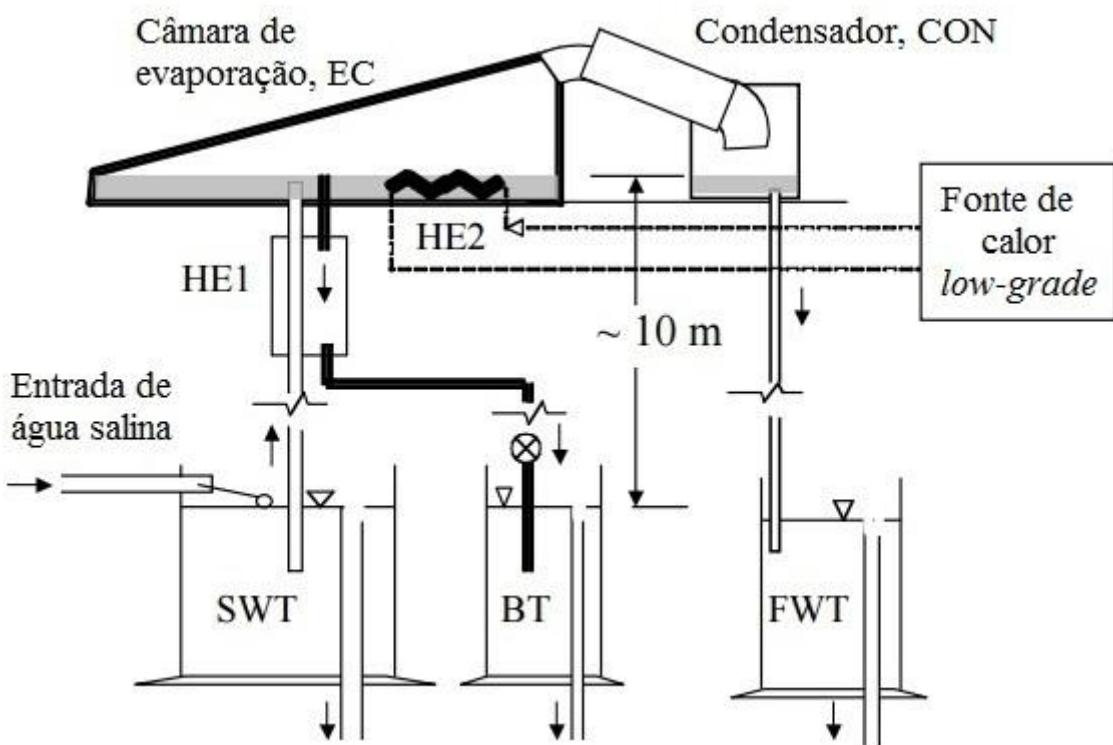
Além da vantagem termodinâmica, a operação de processos de mudança de fase em baixas temperaturas pode ser benéfica em diversos ângulos (Gustavo & Fredi, 2001). Operações em baixa temperatura reduzem as perdas de calor e períodos de inicialização do processo. Baixas taxas de corrosão a baixas temperaturas permitem que materiais de baixo custo sejam utilizados na construção, como por exemplo o plástico, que também é um material leve, e aumentam a vida útil da mesma. Além disso, a energia motriz para a condução de processos de baixa temperatura pode ser fornecida por fontes de calor *low-grade* ou calor residual, de forma a alcançar economia no processo como um todo.

3.2.3 Configuração do processo

Uma disposição esquemática do sistema de dessalinização baseado nos princípios acima referidos é mostrada na Figura 10. Os componentes da unidade de dessalinização são uma câmara de evaporação (EC), um condensador *natural draft* (CON), dois trocadores de calor (HE1 e HE2), e três colunas de 10 m de altura. Estas três colunas representam a coluna de água salina; a coluna de retirada de salmoura; e a coluna de água doce, cada uma com seu próprio tanque de retenção de nível constante, SWT, BT, e FWT, respectivamente. Estes tanques de retenção são instalados ao nível do solo, enquanto a EC está instalada sobre as colunas de água salina e de retirada de salmoura, na altura barométrica de cerca de 10 m acima da superfície livre dos tanques de retenção, para criar um vácuo de Torricelli na parte superior da EC. O topo da coluna de água doce é conectado à saída do condensador.

Quando a temperatura da água salina na EC é aumentada por volta de 20° C acima da temperatura ambiente, o vapor d'água irá fluir a partir da EC para o CON, onde ele irá se condensar e fluir para a coluna de água doce. Ao manter níveis constantes nos tanques de retenção com taxas adequadas de retirada de salmoura e água destilada, esta configuração permite que o processo de dessalinização seja executado sem qualquer entrada de energia mecânica para transferência de fluidos ou manutenção do vácuo. O objetivo do permutador de calor HE1 é pré-aquecer a água salina que entra na EC pelo fluxo de salmoura retirado da EC. O objetivo do permutador de calor HE2 é proporcionar a energia calorífica para a EC; qualquer fonte de calor *low-grade* pode ser utilizada para fornecer esta energia térmica.

Figura 10: Esquema da disposição do sistema proposto

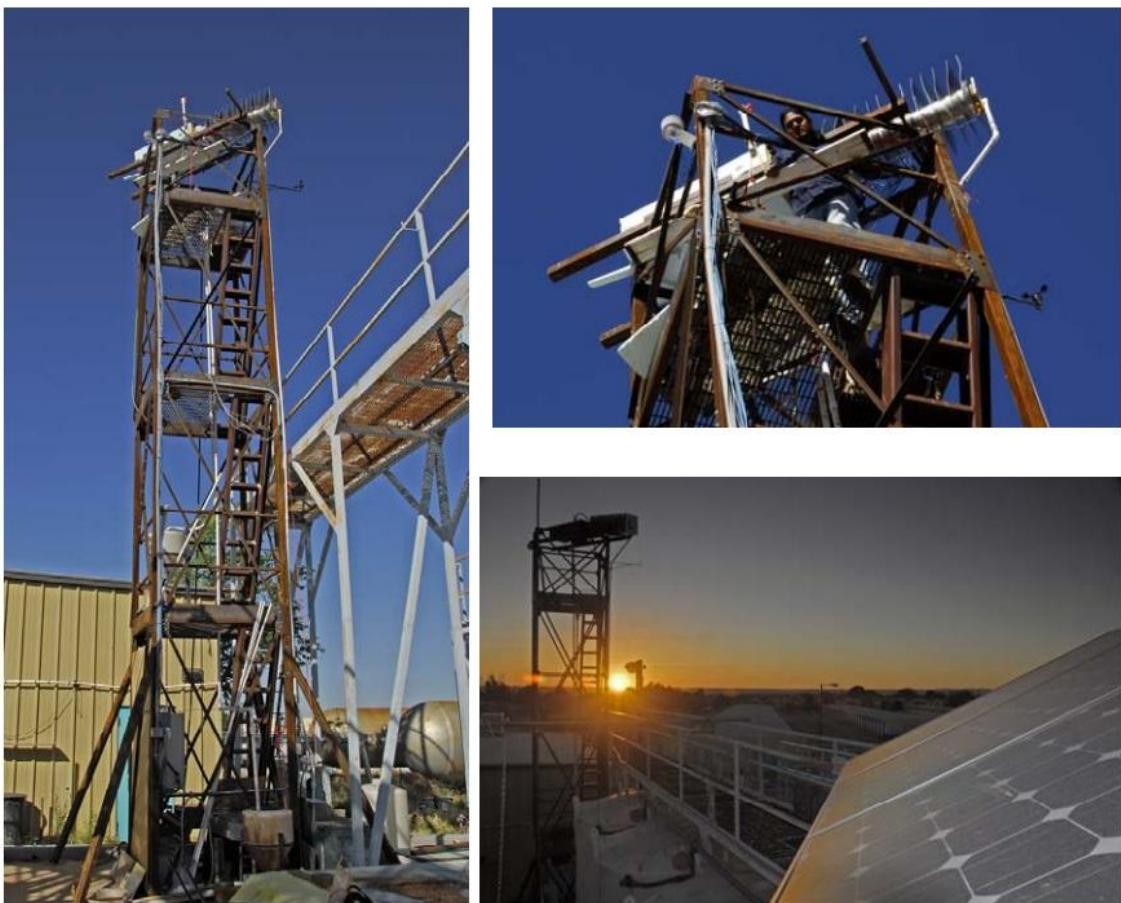


Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Neste projeto, a viabilidade de se utilizar duas diferentes fontes de calor primário foi avaliada: a) calor *low-grade* rejeitado por um sistema de refrigeração de absorção (teórico) e b) sistema de energia solar fotovoltaica e baterias (teórico e experimental). Duas alimentações diferentes foram avaliadas experimentalmente em escala de protótipo: a) água salina sintética e b) efluente do Tratamento Municipal de Águas Residuais de Las Cruces.

O sistema em escala de protótipo testado neste estudo (Figura 11) tinha um evaporador de área 1 m² e um painel fotovoltaico de área 6 m². A energia térmica necessária para manter a câmara de evaporação à temperatura desejada foi fornecida por um aquecedor DC de 12 V/18-W, que foi alimentado por um banco de baterias. As baterias foram carregadas pelo painel fotovoltaico. A temperatura ambiente era medida por um termopar com uma precisão de $\pm 0,2\%$. A temperatura da câmara de evaporação foi variada e medida por um termopar com uma precisão de $\pm 0,2\%$. A pressão da câmara de evaporação e a pressão do condensador foram medidas através de transdutores de pressão com uma precisão de $\pm 0,3\%$. O consumo de energia foi calculado a partir das medidas de tensão e correntes. Um coletor de dados científicos Campbell registrou os dados de processo em intervalos de dez minutos. A profundidade da água na câmara de evaporação foi fixada em 0,05 m. Um pluviômetro com uma precisão de $\pm 1\%$ foi usado para medir a taxa de produção de água doce.

Figura 11: Fotografias do sistema em escala de protótipo projetado e construído nesse projeto



Fonte: KHANDAN; GUDE (2010)

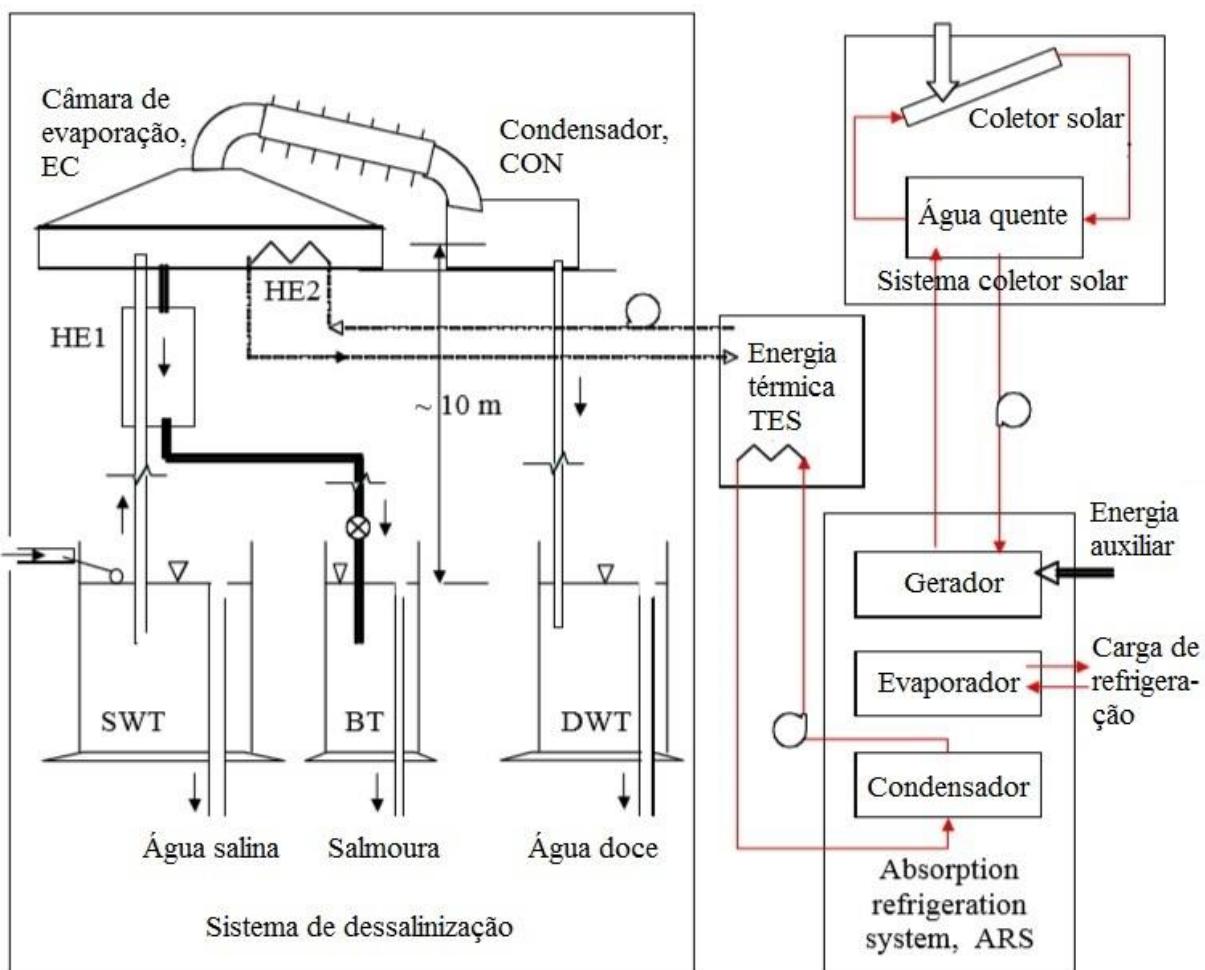
3.2.4 Resultados e discussão

Sob essa concessão, o sistema foi inicialmente analisado teoricamente e modelos de processos foram desenvolvidos para caracterizar o desempenho do sistema. Com base nas análises teóricas, um protótipo do sistema foi projetado e testado sob diferentes condições, mas sempre tendo a energia solar como a energia-fonte. A seguir, apresentam-se resultados resumidos de estudos teóricos e experimentais selecionados.

3.2.5 Dessalinização conduzida pelo calor de um sistema de refrigeração por absorção (ARS)

Nesta análise, a viabilidade de condução do processo de dessalinização utilizando o calor rejeitado por um sistema de refrigeração por absorção (ARS) foi avaliada teoricamente. O esquema do processo para esta configuração é mostrado na Figura 12. Neste caso, a EC é aquecida por um sistema de armazenamento de energia térmica (TES), que armazena o calor rejeitado pelo ARS. O ARS avaliado neste estudo operava com LiBr-H₂O como refrigerante sob uma faixa de pressão de 1 a 16 kPa. A energia necessária para aquecer o gerador de ARS é fornecida por um coletor solar durante as horas de luz solar e por um aquecedor elétrico auxiliar durante as horas em que não há luz solar.

Figura 12: Esquema do sistema de dessalinização alimentado por um sistema de refrigeração por absorção



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

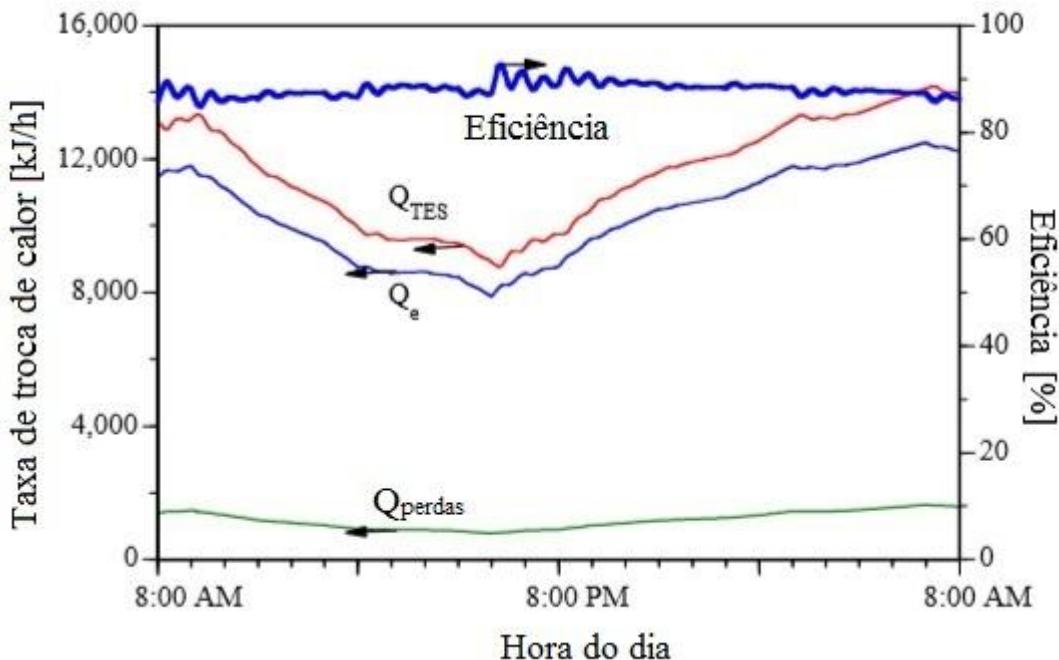
Desta forma, a energia térmica para alimentar o processo de dessalinização está disponível durante todo o dia e também nos dias nublados. O gerador do ARS é mantido a 100° C. Como o evaporador do ARS alimenta a carga de refrigeração, o sistema proposto desempenha duas funções, de dessalinização contínua e de refrigeração, com uma quantidade reduzida de energia não renovável externa. O ARS é dimensionado para manter o TES a 50° C.

Um modelo de processo para o sistema acima foi desenvolvido com base em balanços de massa e energia e resolvido usando pacotes de softwares de simulação EES® e Extend® (Gude, 2007). Foi considerado um evaporador de 5 m² de área e 0,25 m de altura. Em todos os cálculos, a temperatura de referência utilizada é de 25° C. Supõe-se para todos os componentes de troca de calor uma eficiência de 80%.

O objetivo mais importante do exercício de modelagem foi verificar que um TES de tamanho adequado seria capaz de fornecer a energia térmica necessária para o evaporador manter a taxa de dessalinização ao longo de um período de 24 horas. A Figura 13 mostra a variação nas taxas de calor fornecido pelo TES, o calor consumido para a evaporação, e a perda de calor ao longo de um período de 24 horas para um dia de verão, quando a temperatura ambiente varia de 25 a 35° C. A eficiência da dessalinização também é traçada na Figura 13. Como esperado, a energia perdida pela EC é mais elevada durante as horas em que não há luz solar do que durante as horas de luz solar, devido à menor temperatura ambiente fora do horário de luz solar.

Sob as condições descritas, a energia disponível para a dessalinização é de cerca de 12.500 kJ/h (3,45 kW), que é o calor residual rejeitado pelo condensador no ARS. No entanto, a transferência de calor líquida depende do gradiente de temperatura entre o meio de transferência e a fonte de calor. A quantidade de massa de água que pode ser evaporada na EC e, portanto, a eficiência da dessalinização, dependerá da velocidade de entrada de calor do TES, da temperatura ambiente e da taxa de retirada de salmoura. Uma vez que a força motriz para a evaporação é a diferença de temperatura entre a EC e o condensador, a entrada de calor para a EC durante o dia é mais baixa do que a entrada durante a noite. Durante a noite, a temperatura ambiente é baixa e a temperatura da água doce também é baixa, o que favorece uma maior taxa de dessalinização, resultando assim numa maior entrada de calor e vice-versa.

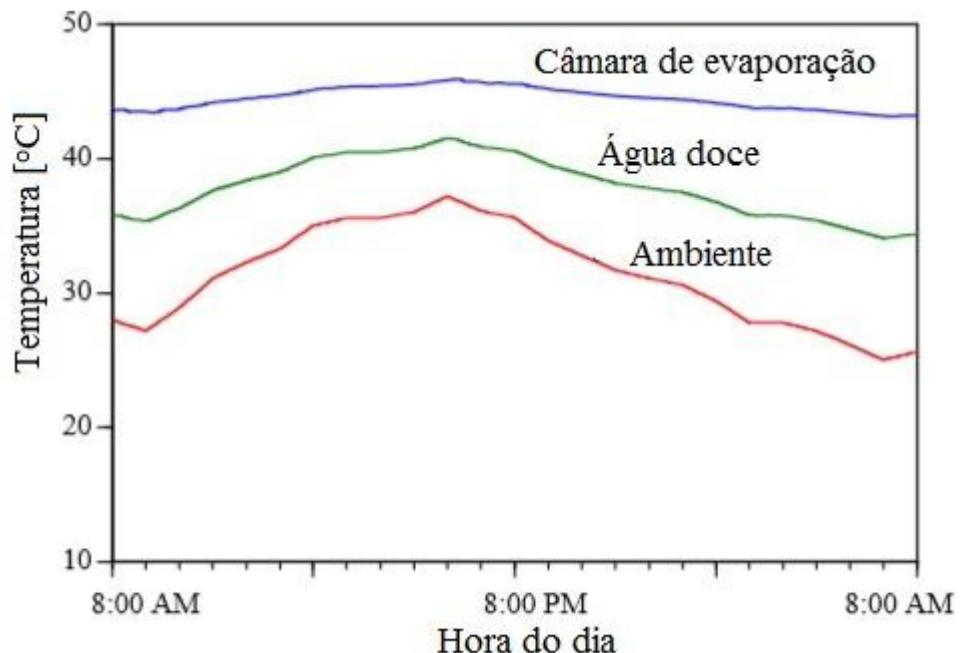
Figura 13: Taxas de troca de calor e eficiência durante 24 horas



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

As variações de temperatura da água salina na EC, da água doce e da temperatura ambiente são apresentadas na Figura 14. A temperatura da água salina variou de 43,5 a 46° C e a temperatura ambiente variou de 25 a 37° C, enquanto a temperatura da água doce variou de 35 a 40° C. A partir das figuras 13 e 14, conclui-se que o TES é capaz de manter a eficiência da dessalinização e a temperatura da câmara de evaporação nas condições de operação desejadas. Como pode ser visto nestes gráficos, a temperatura ambiente é uma variável importante porque a condensação ocorre à temperatura ambiente, o que determina indiretamente a taxa de dessalinização neste processo.

Figura 14: Variações das temperaturas da câmara de evaporação, da água doce e da temperatura ambiente durante 24 horas



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.5.1 Análise do ARS

A configuração ARS empregada no sistema proposto foi concebida para duas funções - para manter o TES à temperatura desejada e para proporcionar a carga de refrigeração. Assim, o ARS proposto opera em condições ligeiramente diferentes em comparação com os sistemas tradicionais utilizados somente para refrigeração. Condições de operação para um ARS típico utilizado em refrigeração e para o ARS proposto neste estudo são comparadas na Tabela 8, para a mesma carga de refrigeração de 3,25 kW. A diferença notável é entre as faixas de pressão - cerca de 1 - 6 kPa contra 1,5 - 15,75 kPa, respectivamente. Isso é necessário para operar o condensador a 55° C para manter o TES a 50° C.

Tabela 8: Parâmetros do sistema ARS - valores tradicionais e valores deste estudo

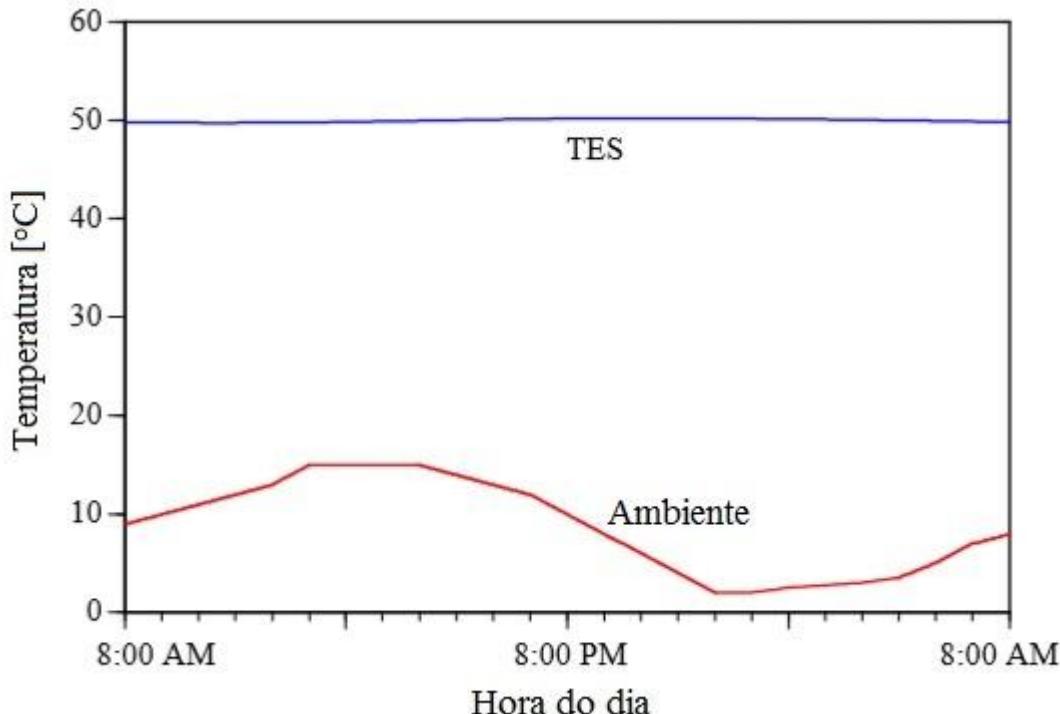
Parâmetro	Valor típico	Estudo KHANDAN; GUDE
Temperatura do absorvedor	30	28
Temperatura do condensador	35	55
Temperatura do evaporador	8	12
Temperatura do gerador	100	100
Pressão do condensador/gerador (kPa)	6,27	15,75
Pressão do absorvedor/evaporador (kPa)	1,073	1,403
Taxa de transferência de energia no absorvedor (kW)	4,32	4,43
Taxa de transferência de energia no condensador (kW)	3,49	3,49
Taxa de transferência de energia no evaporador (kW)	3,25	3,25
Taxa de transferência de energia no gerador (kW)	4,43	4,67
Coeficiente de desempenho, COP (-)	0,73	0,72

Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.5.2 Volume do tanque TES

Para determinar o tamanho do TES necessário para fornecer a energia térmica para a EC, consideraram-se condições de inverno. Este volume foi encontrado resolvendo-se as equações do modelo (Gude, 2007) por tentativa e erro, de forma que as temperaturas no início e no final de um período de 24 horas variariam $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Um volume de tanque de 10 m^3 foi considerado adequado para manter uma temperatura de 50°C durante um período de 24 horas e para fornecer as necessidades energéticas da EC. A Figura 15 mostra que a temperatura TES permaneceu constante a 50°C , enquanto a temperatura ambiente de inverno variou de 2 a 15°C .

Figura 15: Variações da temperatura ambiente e da temperatura TES em 24 horas



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.5.3 Coletor solar para um ARS

O coletor solar, aumentado por um aquecedor auxiliar, deve ser dimensionado para fornecer energia para o TES e a carga de refrigeração. A temperatura desejada para o tanque de armazenamento do coletor solar é ajustada a 110° C, a fim de manter a temperatura do gerador a 100° C. A energia a ser fornecida pelo aquecedor auxiliar é igual à diferença entre a energia requerida pelo gerador e a que pode ser recolhida a partir de radiação solar. A Figura 16 ilustra esta diferença e a fração de energia solar ao longo de um período de 24 horas. Para o caso considerado na pesquisa, a área do coletor solar, de 25 m², pode satisfazer uma carga de refrigeração de 3,25 kW a uma taxa média de dessalinização de 4,3 kg/h. As relações entre a taxa de dessalinização, a área do painel solar e a carga de refrigeração são apresentadas na Figura 17.

Figura 16: Fração solar e área ótima de fração solar

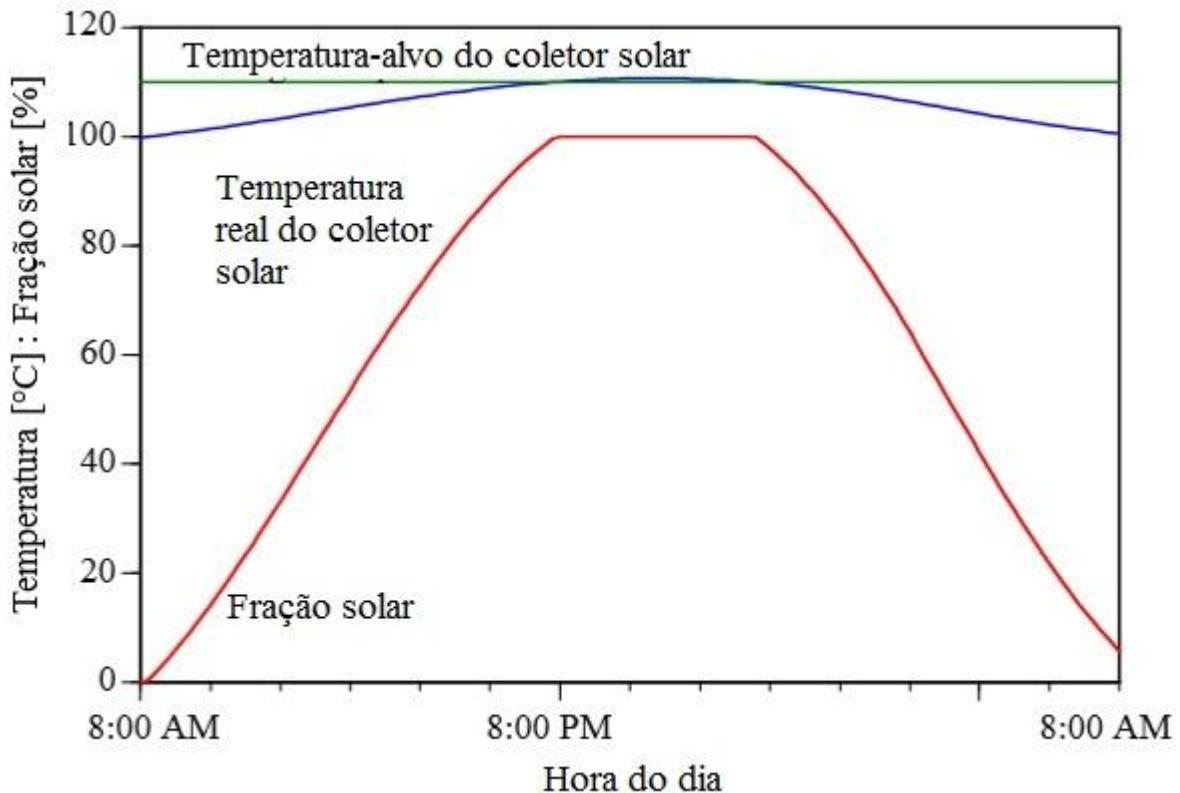
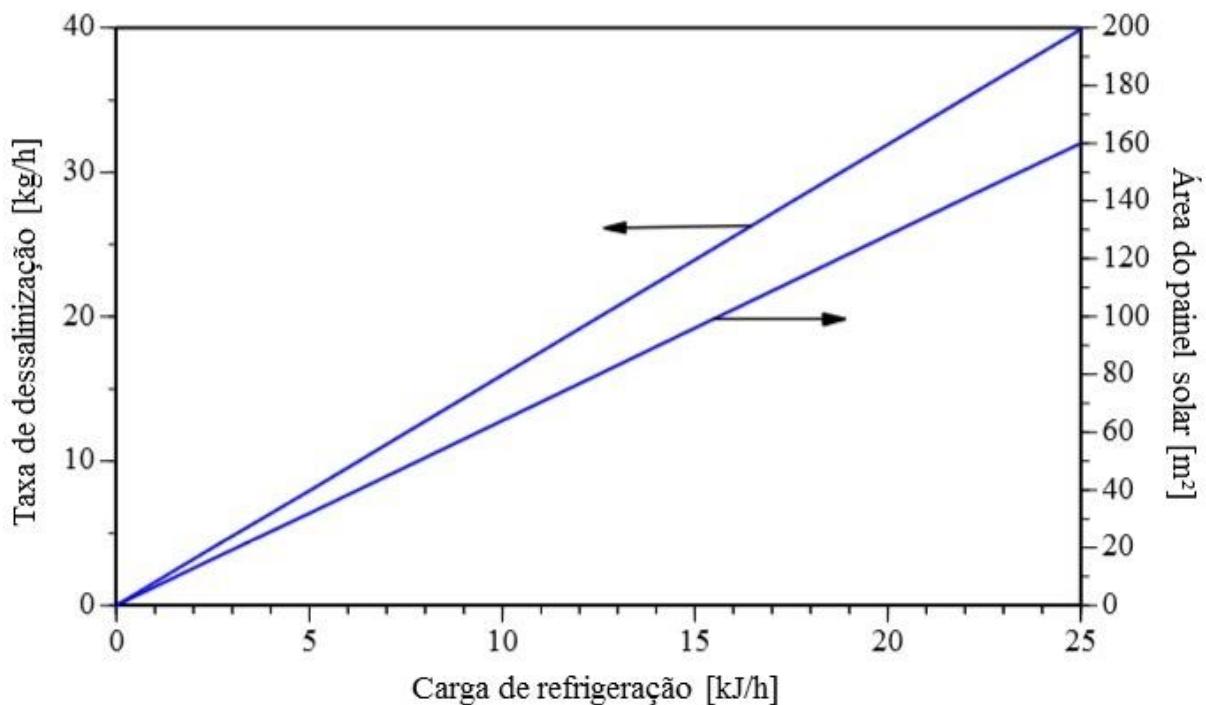


Figura 17: Taxas de dessalinização a velocidades de refrigeração diferentes e áreas de painéis solares



Fonte: Adaptadas de KHANDAN; GUDE (2010)

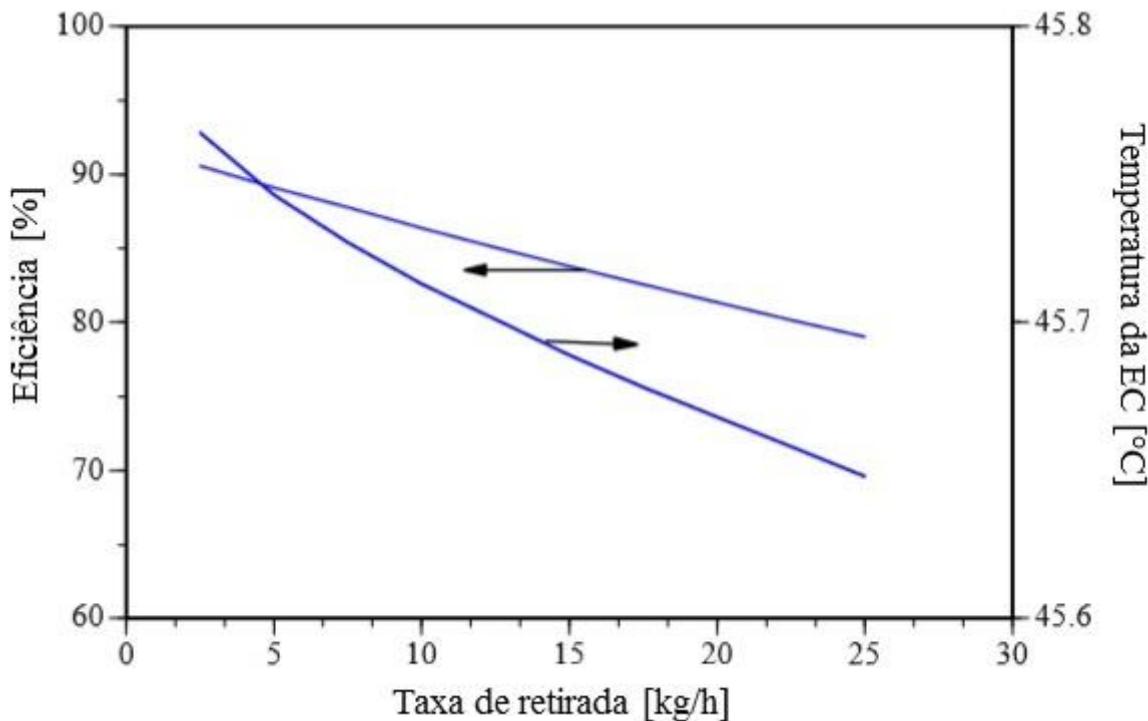
3.2.5.4 Requisitos energéticos

Além de energia solar, o sistema proposto requer energia mecânica adicional para o funcionamento das bombas e energia térmica adicional para o gerador para o funcionamento do ARS durante os horários em que não há luz solar. Os resultados das simulações mostraram que a exigência adicional de energia mecânica é de 16 kJ/kg de produto, além de energia térmica adicional de 192 kJ/kg de produto, totalizando um requisito específico de energia de 208 kJ/kg. Em comparação, um processo típico de evaporação de múltiplos estágios requer energia mecânica adicional de 44 kJ/kg de produto, além de energia térmica adicional de 294 kJ/kg de produto, totalizando uma exigência específica de energia de 338 kJ/kg. Com base em resultados de simulação, o processo proposto pode ser uma alternativa de energia eficiente e sustentável para a dessalinização.

3.2.5.5 Remoção da salmoura versus desempenho do sistema

A taxa de retirada de salmoura é a principal variável de controle do sistema proposto. Tem impactos positivos e negativos sobre o desempenho do sistema. A taxas de retirada baixas, sais se acumulam na EC e as taxas de evaporação diminuem. Níveis elevados de sal também reduzem a entalpia da água salina, o que pode reduzir ainda mais a evaporação. Por exemplo, quando a salinidade aumenta em 1%, a evaporação é reduzida em aproximadamente o mesmo percentual. Mesmo que uma melhor remoção de sal possa ser conseguida com taxas de retirada mais altas, grandes quantidades de calor sensível são simultaneamente removidas da EC, resultando em diminuição de temperatura da mesma. Os resultados das simulações apresentados na Figura 18 mostram que tanto a temperatura da EC quanto a eficiência da dessalinização decaem com o aumento da taxa de retirada. Por exemplo, a eficiência da dessalinização caiu de 90,5% para 80% quando a taxa de retirada aumentou de 2,5 kg/h a 25 kg/h.

Figura 18: Relação entre taxa de retirada, eficiência e temperatura da EC



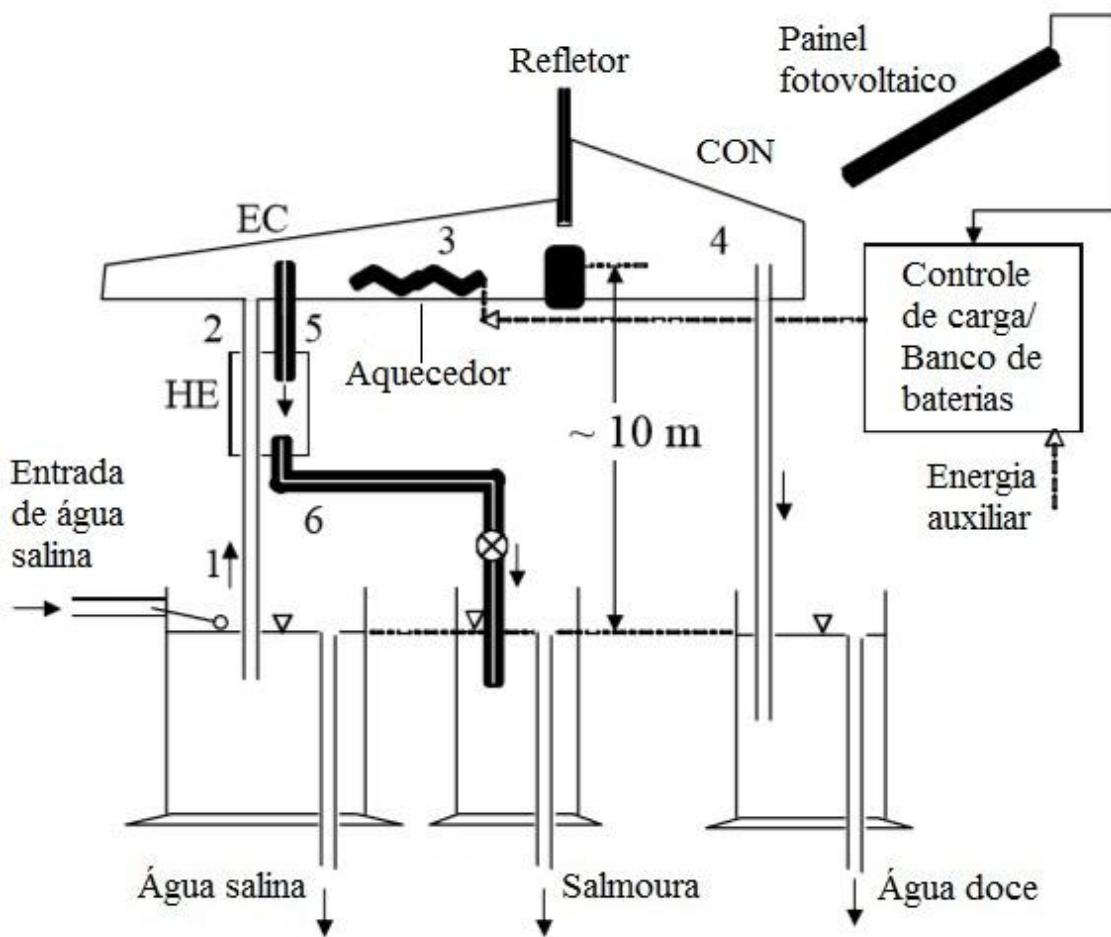
Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.6 Dessalinização alimentada por um sistema de energia solar fotovoltaica/baterias

Nesta análise, foram consideradas duas configurações para aproveitamento da energia solar: (a) um sistema de baixo custo usando a energia solar direta na câmara de evaporação (EC); e (b) um sistema de alta eficiência usando painéis fotovoltaicos de energia solar (PV). Na configuração (a), a EC funciona como um destilador solar para colher a energia solar durante as horas de luz solar para fornecer calor para a mudança de fase na EC. Na configuração (b), painéis fotovoltaicos colhem energia solar durante as horas de luz solar para carregar um banco de baterias através de um controlador de carga, que, por sua vez, está ligado a um aquecedor DC para aquecer a EC para mantê-la na temperatura definida durante todo o dia.

A configuração (a) não será explorada no presente trabalho, pois o rendimento e a eficiência desse sistema são muito baixos quando não há incidência de energia solar. Um coletor solar de área de 1 m² pode produzir no máximo 8 l/dia de água dessalinizada, um número muito baixo em comparação a outras configurações e técnicas. O esquema de configuração (b) é mostrado na Figura 19.

Figura 19: Esquemática da configuração (b): uso do painel fotovoltaico solar/banco de bateria



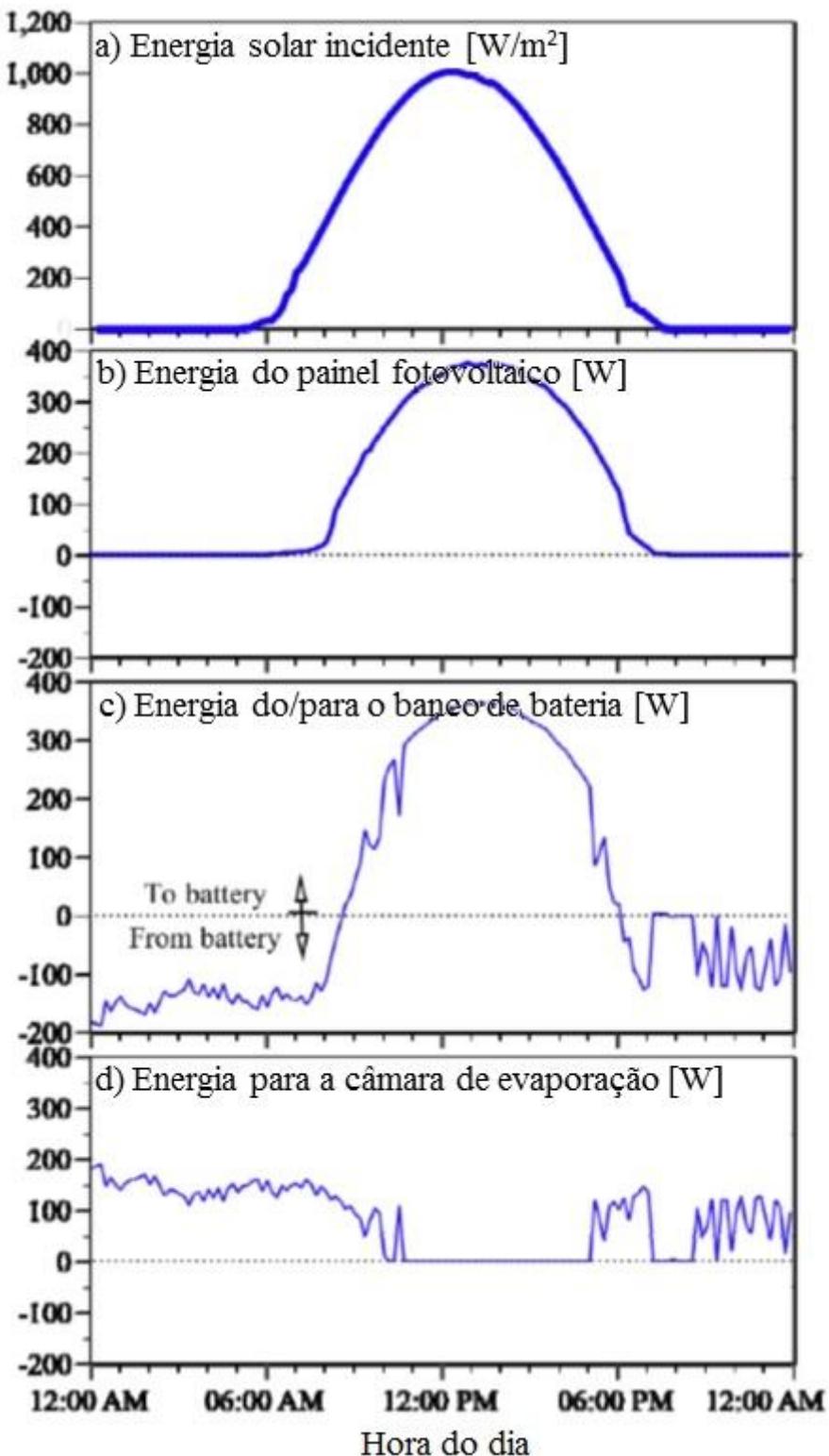
Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.6.1 Usando painel PV e energia solar direta – configuração (b)

A limitação de configuração (a) foi superada usando-se um painel fotovoltaico e um banco de baterias para aquecer a EC durante o horário em que não há incidência de luz solar. Nesses experimentos, um painel PV padrão de 6 m² de área avaliado em 185W (Sharp NT-S5E1U) foi usado para carregar um banco de baterias de 12 V, que forneceu energia para uma bobina de aquecimento 12-V DC instalada na EC e controlada por um termostato instalado na EC. A eficiência dos módulos fotovoltaicos é de 14%.

Os fluxos de energia durante um teste típico sob essa configuração são mostrados na Figura 18: a insolação solar incidente na Figura 18a; a energia produzida pelo painel fotovoltaico na Figura 18b; o fluxo de energia de/para as baterias na Figura 20c; e a energia fornecida à EC na Figura 20d.

Figura 20: Fluxos de energia na configuração (b) ao longo de um período de dia típico

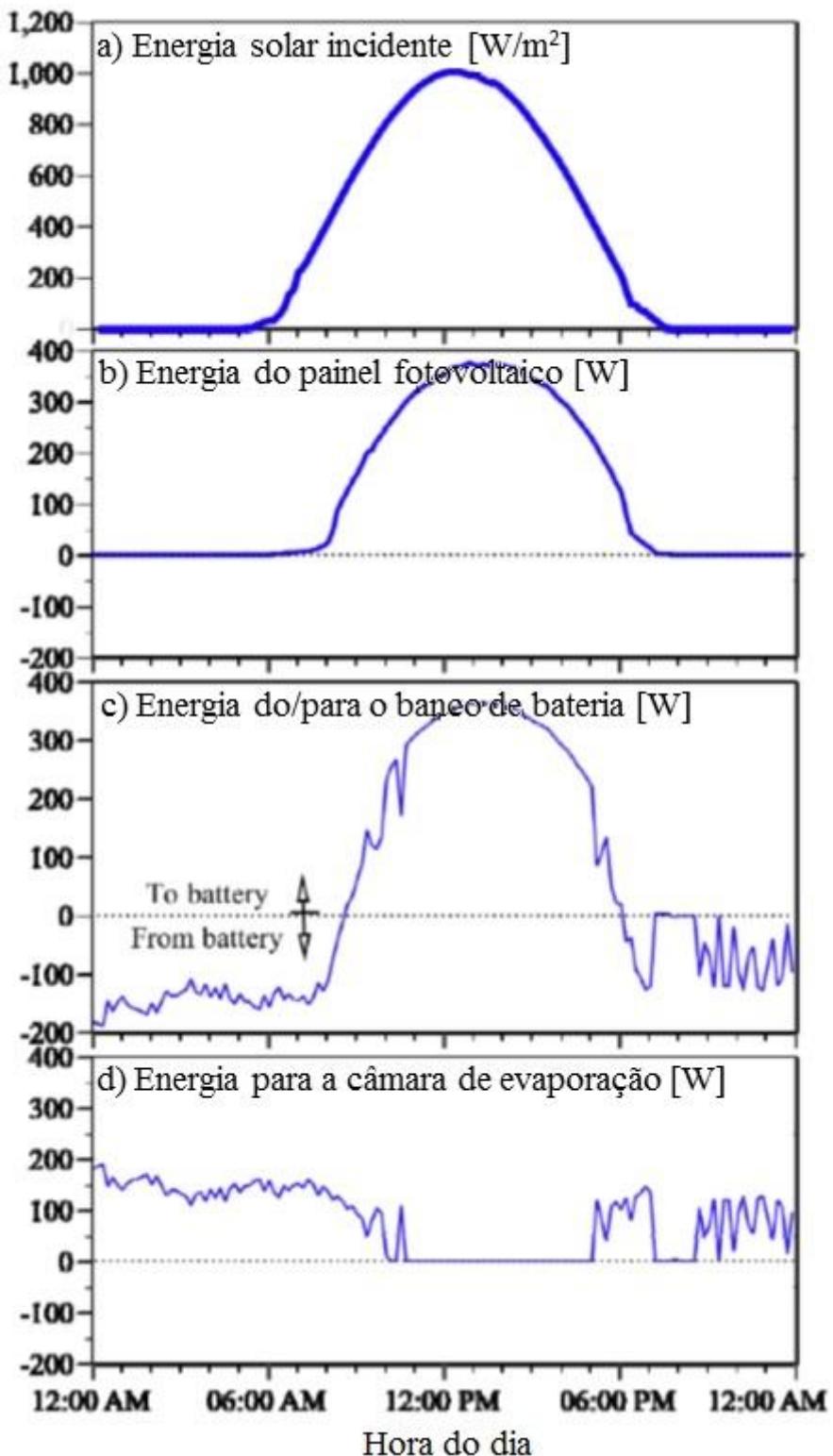


Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Os perfis de temperatura durante um teste típico sob essa configuração são mostrados na Figura 21. A energia fotovoltaica gerada durante o dia foi suficiente para produzir 4 - 5 l/dia.m² de água doce fora do horário de luz solar. A energia específica

necessária para este processo para produzir 1 kg de água doce foi 2926 kJ. Taxas de produção de água doce de até 10 l/dia.m² foram obtidas a partir desta configuração, durante 24 horas, mantendo-se a temperatura de evaporação quase constante no valor ajustado ao longo do período de 24 horas, como mostrado na Figura 21.

Figura 21: Perfis de temperatura na configuração (b) com PV/bateria

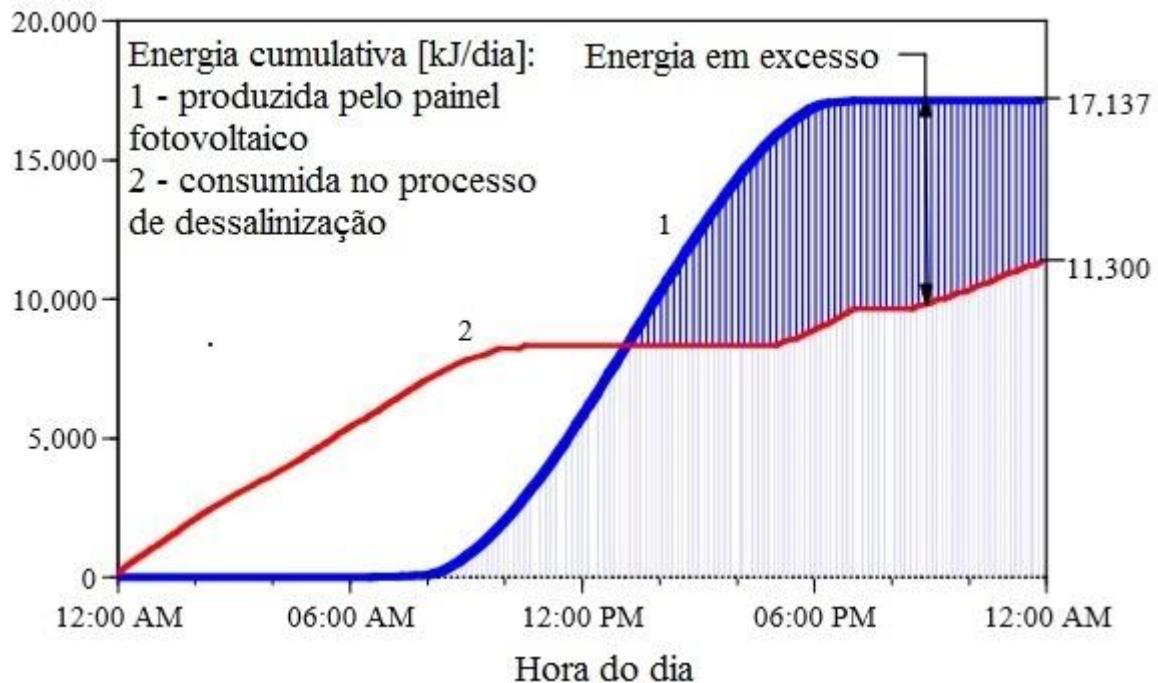


Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Nota-se que o desempenho da configuração (b) é limitado à área de evaporação, em vez da área do painel fotovoltaico. No estudo referido, o painel

fotovoltaico utilizado foi de grandes dimensões, capaz de fornecer mais energia do que o que é necessário para a evaporação, como se mostra na Figura 22.

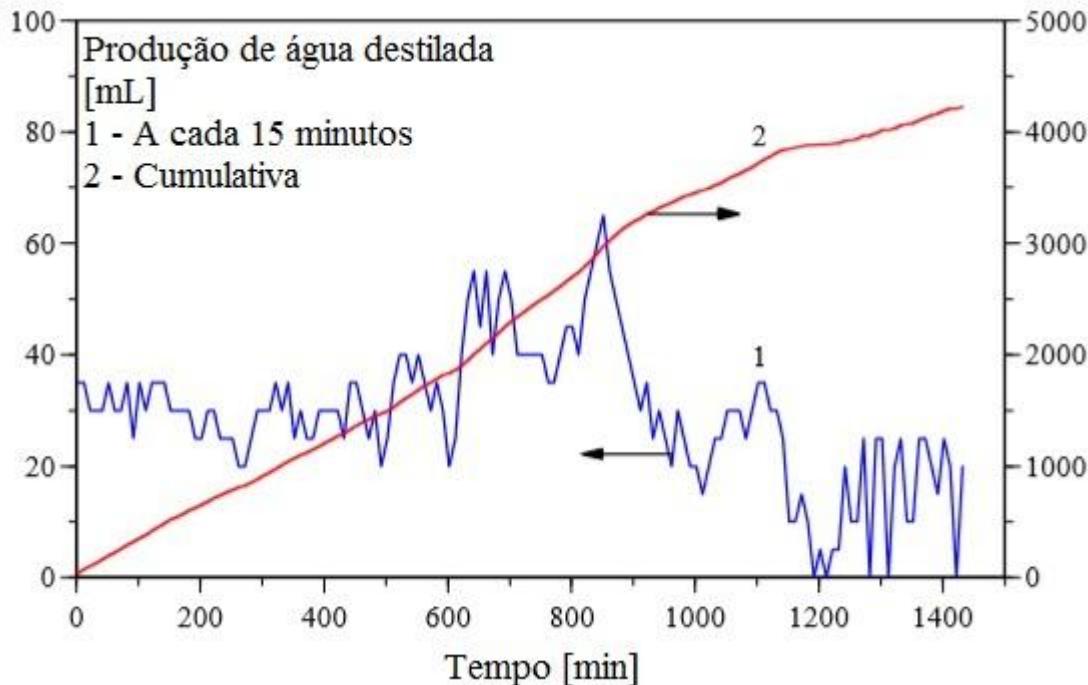
Figura 22: Energia produzida, energia consumida e energia em excesso



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Na figura 23, é mostrada a produção de água doce como uma função do tempo na configuração (b).

Figura 23: Produção de água destilada na configuração (b) com PV/bateria



Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Na tabela 9, requisitos de energia de rede para o processo proposto são comparados com os seguintes processos de dessalinização comumente utilizados: MSF, MED, MVC, RO, e ED. O processo desenvolvido no estudo elimina as emissões de gases de efeito estufa através da utilização de energia solar para aquecimento, bem como para a transferência de fluidos, enquanto os outros processos consumem fontes de energia não renováveis para fornecer as necessidades energéticas térmicas e mecânicas, emitindo gases-estufa que contribuem para o aquecimento global. Nesta comparação, considerou-se 30% de eficiência¹² para a produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis. As emissões de dióxido de carbono na Tabela 9 foram estimadas com base no pressuposto de que 1 kWh de produção de eletricidade resulta em 0,96 kg de emissões de CO₂.

¹² Nota-se que a eficiência depende do processo. 30% foi o valor considerado no estudo analisado.

Tabela 9: Comparação do processo proposto com processos de dessalinização tradicionais

		MSF	MED	MVC	RO	ED	SD	PV
Energia específica [kJ/kg]	Térmica	980	410	0	0	0	0	0
	Mecânica	44	26	192	120	144	3,6	0
	Total	1024	436	192	120	144	3,6	0
Emissões de CO ₂	[kg CO ₂ /kg H ₂ O]	0,38	0,16	0,07	0,05	0,5	~0	0

Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

Este sistema pode, por conseguinte, ser mais adequado para áreas remotas, sem uma rede elétrica. No entanto, o benefício de utilizar o princípio natural do vácuo para diminuir a necessidade de energia mecânica tem de ser avaliado em grande escala para validar a viabilidade do processo. Além de o processo proposto ter requisitos mais baixos de energia específica em comparação com outras unidades de evaporação de estágio único, o seu desempenho pode ser melhorado ainda mais pela adição da configuração de múltiplos efeitos. A possibilidade deste processo de utilizar fontes de energia renováveis pode minimizar as emissões de gases de efeito estufa, tornando este um processo sustentável. Calor residual de outros processos, tais como os sistemas de ar condicionado e de centrais elétricas, usados para alimentar este processo podem melhorar significativamente as economias globais dos processos combinados.

3.2.7 Recuperação de águas residuais pelo tratamento de efluentes

Um conjunto de experimentos foi realizado para avaliar a viabilidade de recuperar a água do efluente do Tratamento Municipal de Águas Residuais de Las Cruces. As amostras de água do SWT e do FWT foram analisadas segundo os parâmetros-padrão de qualidade da água. Os resultados deste conjunto de testes estão resumidos na Tabela 10, relativa às Normas de Qualidade da Água da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para água potável, para demonstrar que este processo tem o potencial de recuperar água com potabilidade satisfatória do efluente.

Eficiências de remoção de contaminantes principais foram as seguintes: >93% sólidos totais dissolvidos; >95% nitratos; >97% de amoníaco; e >99,9% bactérias coliformes.

Tabela 10: Medidas de qualidade da água antes e após o tratamento.

Medida de qualidade da água Efluente WWTP	Água produto	Padrões da US EPA
BOD (mg/L)	9,7	-
TSS (mg/L)	5,1	<1
TDS (mg/L)	727	21
Nitratos/nitritos (mg/L)	2,4	<0,1
NH ₃ (mg/L)	23,2	<0,5
Cloreto (mg/L)	0	0
Coliformes (cfu/100)	77	<1
pH	7,1	7,1
		500
		1
		4
		0
		6,5-8,5

Fonte: Adaptada de KHANDAN; GUDE, 2010

3.2.8 Conclusão

Com base na análise teórica feita por KHANDAN; GUDE (2010), os seguintes resultados podem ser esperados:

- um sistema de ARS classificado em 3,25 kW de refrigeração pode produzir 125 l/dia de água dessalinizada. A entrada de energia líquida, neste caso, foi 208 kJ/kg de água doce, que é 60% da energia requerida por um processo de MSF.
- um coletor fotovoltaico/térmico de 25 m² de área pode produzir 200 l/dia de água dessalinizada e, simultaneamente, produzir 21 kWh/dia de energia elétrica.

Estudos experimentais foram conduzidos para validar o modelo de processo do projeto estudado. Foi demonstrada a viabilidade de execução do processo utilizando unicamente energia solar, sem qualquer dependência de energia da rede. Com base nos resultados experimentais, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- um módulo fotovoltaico de 6 m² de área com uma área de evaporação de 1 m² pode produzir 12 l/dia de água dessalinizada, sem qualquer fornecimento de energia da rede.
- a análise da qualidade da água mostrou que os padrões de água potável da US EPA (agência de proteção ambiental dos Estados Unidos) foram respeitados.

4 ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Dessalinização por osmose

Apesar de ser uma tecnologia já consolidada, encontrar dados quantitativos para serem utilizados neste trabalho se mostrou um desafio. Isso ocorreu por que o mercado de membranas possui diversos *players*, cada um apresentando um valor diferente referente à tecnologia. Escolher o valor mais confiável exigiu sensibilidade e extensa pesquisa.

Os países mais avançados sob um ponto de vista técnico são os Estados Unidos da América e Israel. Institutos e associações americanas foram fontes de material técnico muito ricas e contribuíram largamente para o trabalho.

A técnica de osmose oferece uma qualidade de tratamento de água excelente, estando apta a ser utilizada em processos extremamente delicados, como purificação de água para tratamentos de diálise. Os níveis de eficiência na remoção do sal de águas salobras e do mar são muito altos, chegando a 99%. Isso significa que uma água retirada do mar mediterrâneo, com 35 mg de sal por litro de água poderia ser purificada até 0,35 mg/l, muito abaixo dos 1 mg/l recomendados como padrão de potabilidade.

Porém, para alcançar tamanha capacidade, precisa-se ejetar no processo um nível de pressão enorme, que pode exigir até 8.400 KPa. Para produzir essa elevada pressão, uma grande quantidade de energia é necessária, contribuindo, assim, para uma elevação no preço final da água tratada, sendo responsável por 36% dos custos totais e também para o aumento dos impactos ambientais associados à sua produção.

Outro ponto de atenção que pode influenciar nos custos associados a um projeto de dessalinização é a escolha de bombas, já que a captação de água pode ser feita por um tipo que possui vantagens quanto à eficiência e outra quanto aos custos.

Apesar da eficiência já citada e do fato de que a osmose tem capacidade de ser uma forma de tratamento completa, para aumentar a vida útil das membranas e evitar o entupimento dos poros, é recomendado um pré-tratamento da água. Com isso, utiliza-se todo o potencial da tecnologia efetivamente na tarefa que mais a exige: a dessalinização.

O principal impacto ambiental, além dos já citados, decorrente do grande consumo de energia, é a disposição dos rejeitos. A dessalinização produz como rejeito água bastante rica em sais, chamada de salmoura. A maior parte dela acaba voltando ao mar, aumentando as concentrações de sais em *habitats* marinhos, o que pode contribuir para um desbalanceamento dos seres vivos que ali habitam.

É inegável que os custos da osmose ainda a impedem de ser usada como uma alternativa global para abastecimento de água, encontrando aplicação apenas em regiões com cenários graves de escassez de água doce e/ou preços muito baixos de energia. Porém, estes custos caem a cada ano, aumentando a aplicabilidade da tecnologia.

4.2 Dessalinização por evaporação por pressão de vapor

A dessalinização por evaporação em baixa temperatura apresenta-se como uma alternativa interessante aos métodos de dessalinização tradicionais. O levantamento de dados desta seção foi feito com base no trabalho do Nirmala Khandan. Apesar de se limitar a um protótipo, o estudo feito pelo pesquisador foi satisfatório, embora não tenham sido divulgados alguns dados importantes, como o custo.

Ainda que a viabilidade técnica do processo proposto tenha sido validada em pesquisa, mais pesquisas e testes de longo prazo a maiores taxas de fluxo precisam ser realizados para demonstrar a viabilidade prática e desenvolver dados de análise do ciclo econômico e de vida do processo. Uma das questões a abordar é o acúmulo de gases não condensáveis na câmara de evaporação. Um sistema automático de ventilação da pressão pode ter que ser incorporado em tais casos. Os modelos matemáticos desenvolvidos na pesquisa poderiam ser utilizados para aumentar a escala e otimizar os processos. As melhorias no rendimento e eficiência de energia podem ser alcançadas através da expansão deste sistema para um de duas ou três fases de configuração.

5 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Cada vez mais, grandes regiões, urbanas e agrárias, enfrentam problemas com abastecimento de água para sua população, indústria e agricultura. Uma característica comum a estes locais, independentemente de sua localização geográfica, é o esgotamento de fontes de água doce passíveis de serem exploradas a custos viáveis. Com isso, é evidente o crescimento pela demanda de tecnologias como a de dessalinização, que torna possível a exploração de fontes de água salina para o abastecimento.

Regiões como Israel e o estado da Califórnia, nos Estados Unidos, por exemplo, atualmente têm apenas duas alternativas para alavancar seu volume potencial de fornecimento de água doce: reúso de água e dessalinização. Enquanto sistemas de reúso de água possuem capacidade limitada, já que têm um teto definido pela sua eficiência e, principalmente, pelo consumo inicial da região antes de ser instalado o plano, os sistemas de dessalinização são virtualmente ilimitados, já que o principal fator restritivo é a disponibilidade da água do mar.

Os desafios de se retirar água do mar orbitam em torno de quatro tópicos: ambiental, financeiro, comercial e tecnológico. Cada uma das tecnologias apresenta vantagens em tópicos diferentes, principalmente dependendo das condições de operação do projeto. Porém, pode-se afirmar que, de maneira geral, a osmose se destaca. Este método apresenta um desempenho global superior aos outros na maior parte das condições de operação a que a dessalinização é exposta hoje. Por isso, este é o processo com maior potencial disponível no mercado na atualidade.

O principal problema desta tecnologia é o grande consumo de energia elétrica exigido em sua operação. Este fato reflete em todos os tópicos citados anteriormente, já que ele é responsável pelo alto custo da tecnologia, pelos principais impactos ambientais, pela adoção comercial e representa o maior desafio tecnológico a ser superado. Tamanho desafio justifica a busca por novas alternativas, como, por exemplo, a evaporação em baixa temperatura.

Concluindo, existe uma demanda considerável hoje no mundo de água oriunda da dessalinização. Porém, o mercado apresenta um gargalo, já que a principal tecnologia adotada, a osmose, tem diversos problemas, principalmente ligados à questão de consumo energético, custos e impactos ambientais. Superar este desafio

é essencial para que a dessalinização amplie seu alcance e viabilidade, tornando-se uma alternativa cada vez mais universal.

6 PROJETO

Independentemente da tecnologia utilizada, pode-se dividir os processos de dessalinização em três etapas:

- Captação e pré-tratamento
- Processos de dessalinização
- Pós-tratamento

Este trabalho irá dividir a etapa de pré-tratamento em duas subfases: bombeamentos e a passagem da água pela estrutura que irá reter o sal. Para simplificação, esta última sub-fase será referida por dessalinização, pois é neste momento em que há a efetiva remoção do sal.

6.1 Projeto de dessalinização por osmose

Será considerada a usina em região costeira, próxima ao mar, ideal para a captação de água e descarga dos rejeitos e águas residuais. Toma-se como base a Usina de Carlsbad, localizada na Califórnia, Estados Unidos, e seu escopo de construção para o custo dos processos, como captação, custo de tubulação, entre outros, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Custo estimado para a Usina de Carlsbad

Critérios de Desing	
Capacidade Total	1,15 Mm ³
Capacidade Individuais dos poços de captação	0,02 Mm ³
Número de poços necessários para captação	61
Números de poços de prontidão (25%)	15
Total de poços de captação	76
Melhor caso mínima distância entre os poços	120 m
Comprimento de praia necessário para os poços	9,12 Km
Área de terra necessária para instalar os poços e as instalações de apoio	17,4 acres
Custo Estimado	
Custo Diretos	
Instalação de um poço	\$2.500.000,00
Total de instalação dos poços (76 poços)	\$190.000.000,00
Tubulação de transporte @ \$1.500/m (11,5 Km)	\$15.000.000,00
Estação da bomba de captação	\$30.400.000,00
Consumo de Energia elétrica do poço de captação	\$33.060.000,00
Total Custo Construção	\$268.460.000,00
Custo indireto	
Aquisição de terreno para os poços e estruturas de suporte	\$8.723.600,00
Engenharia, desenho e obtenção (25% do custo direto)	\$67.115.000,00
Mitigação Ambiental (15% do custo direto)	\$40.269.000,00
Despesas eventuais (20% do custo direto)	\$53.692.000,00
Total custo indireto	\$169.799.600,00
Custo Estimado Total do Projeto	\$438.259.600,00

Fonte: Elaborada a partir de dados do Carlsbad Desalination Project

6.1.1 Captação e pré-tratamento

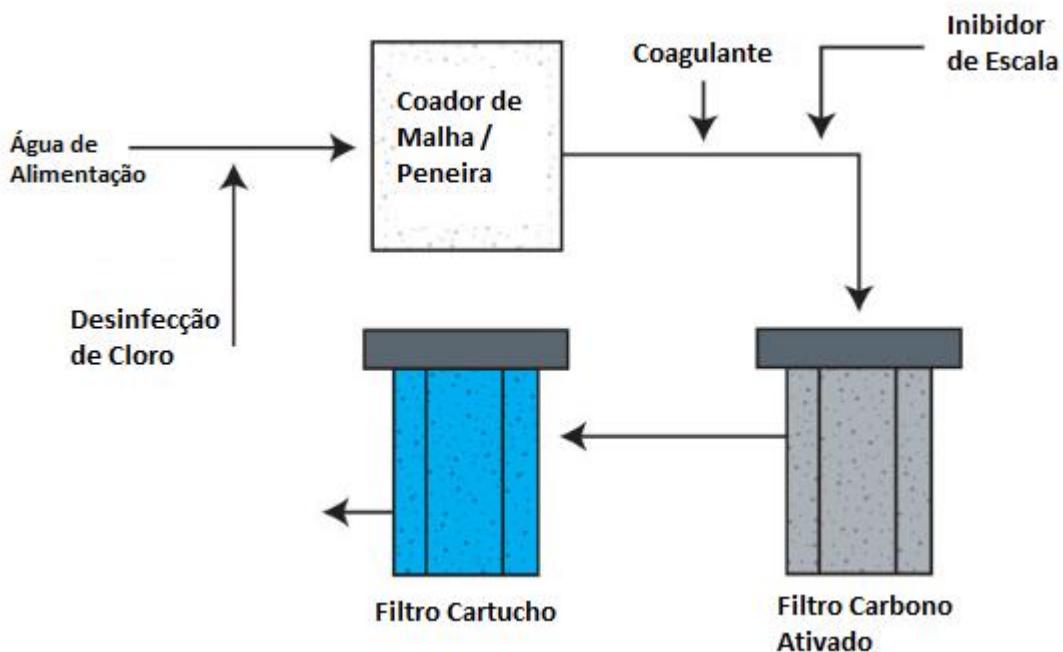
Será considerado que a captação da usina de dessalinização por osmose será feita pelo mar, através de tubulação e bombas simples. Para evitar a captação de materiais e partículas maiores, utiliza-se gradeamentos e peneiras na etapa de captação.

O pré-tratamento é feito para evitar que ocorram danos nas estruturas da usina, principalmente nas membranas, que podem entupir com os sais, minerais, sílicas, óxidos e outros componentes presentes na água bruta de captação.

As etapas de um pré-tratamento típico são a desinfecção para impedir o crescimento biológico na membrana e aplicação de coagulante ou floculante para aglomerar partículas e sólidos suspensos. Em seguida, tratamento químico da água, prevenindo a deposição de partículas na membrana. Também é adicionado um filtro

de carbono ativado para remover cloro e compostos orgânicos e, por fim, há a remoção de sólidos suspensos por filtros ou decantação. O processo do pré-tratamento é ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Processo de pré-tratamento



Fonte: Adaptada de U.S. Department of Energy

Dessa forma, após a realização do pré-tratamento, o único componente que segue no processo junto com a água é o sal dissolvido, que será removido pelas membranas semipermeáveis.

O descarte do material retirado da água pelo pré-tratamento deve ser um motivo de atenção, já que irá representar custos e riscos de impacto ambiental.

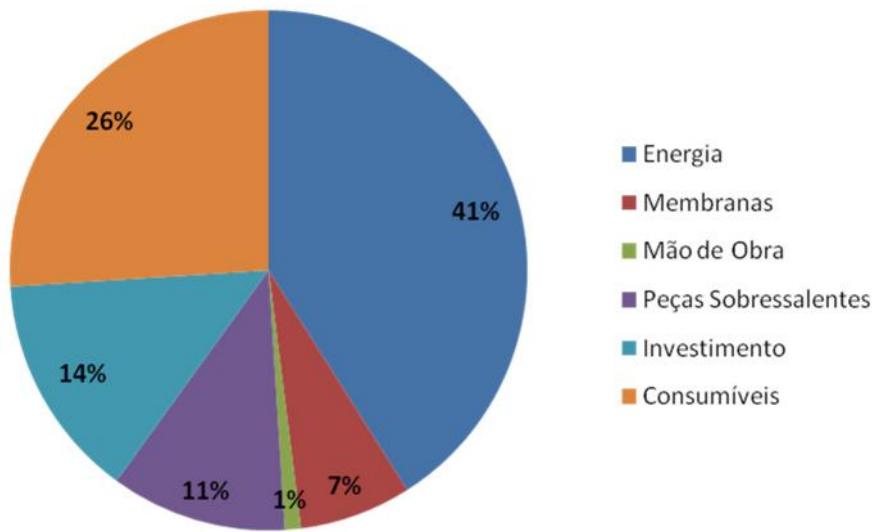
6.1.2 Bombeamento

Nas usinas de dessalinização por osmose, a quantidade de energia utilizada é um dos aspectos mais notáveis quando se analisa a sua viabilidade. O consumo de energia pelo sistema inclui o bombeamento da água de captação, as bombas de alta pressão e bombeamento de compostos para tratamento químico. De modo geral, a energia requerida por cada bomba pode ser calculada utilizando-se a equação:

$$P_w = Q \times P_r / (E_p \times E_m)$$

Essas bombas consomem alta quantidade de energia, conforme identificado na Figura 25: Contribuição dos custos de em que é mostrada a divisão de gastos de uma usina de dessalinização por osmose.

Figura 25: Contribuição dos custos de uma usina de dessalinização por osmose



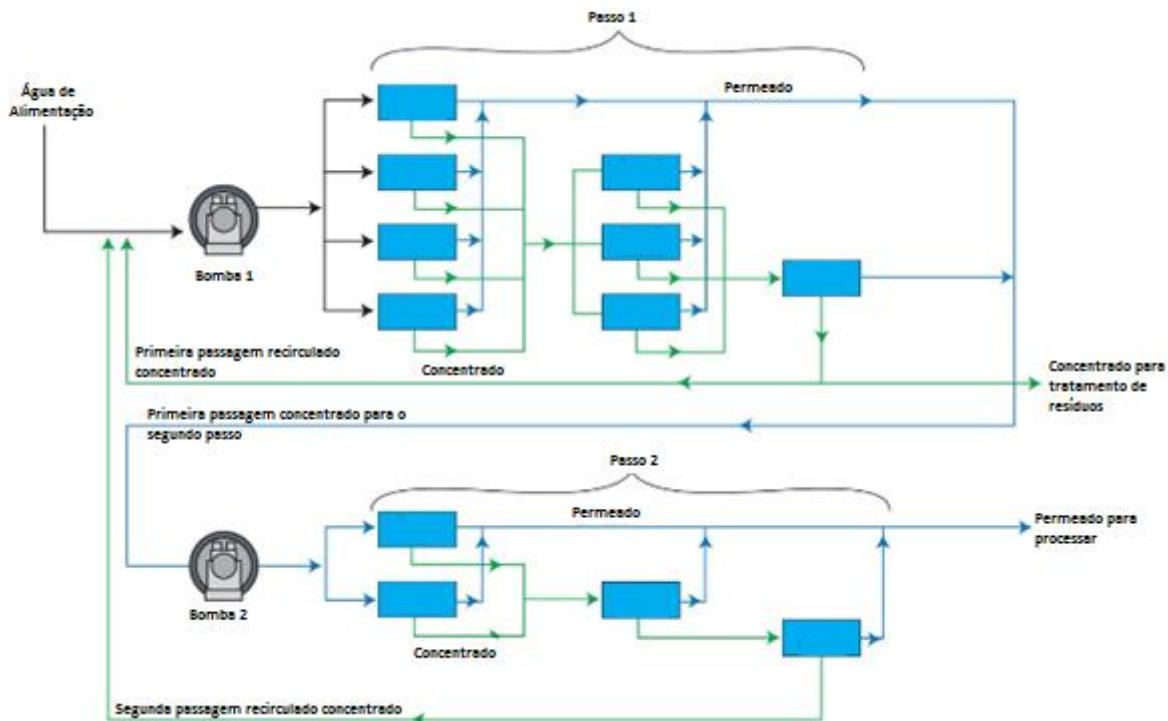
Fonte: Adaptada de Lenntech (2013)

A energia consumida pela bomba depende da concentração de sais na água de alimentação, da temperatura da água, da capacidade da usina, da localização da usina em relação à captação de água e da membrana utilizada no processo. A pressão média utilizada para a água do mar, no processo de osmose é de 5.000 a 6.000 kPa¹³.

O bombeamento consome um alto nível energético, porém, pode-se economizar parte dessa energia utilizando-se um sistema de cogeração ou de reaproveitamento energético. Uma alternativa é utilizar outras membranas para reaproveitar a pressão exercida inicialmente no processo, ou reinjetar a água no início do processo, como mostrado na Figura 26.

¹³ Nanoffshore – empresa de produtos de tratamento de água.

Figura 26: Sistema de cogeração e reaproveitamento



Fonte: Adaptada do Departamento de Energia dos EUA (2013)

Esse processo poderia diminuir a energia por litro produzido, assim como aumentar a eficiência do projeto.

6.1.3 Dessalinização

O processo de dessalinização por osmose utiliza membranas semipermeáveis, cujas características devem ser escolhidas de acordo com a eficiência na remoção de sal que se deseja obter no projeto, das características da água de alimentação e do pré-tratamento realizado. Um exemplo é a membrana FILMTEC da Dow¹⁴, que possui características de acordo com a Tabela 12.

¹⁴ A The Dow Chemical Company é uma corporação estadunidense de produtos químicos, plásticos e agropecuários, atuando em numerosos setores, com um extenso portfólio de produtos. É uma das maiores fabricantes de produtos químicos do mundo.

Tabela 12: Características da membrana da Dow

Produto	Número da peça	Área efetiva (m ²)	Pressão Máxima de operação (bar)	Vazão de permeado (m ³ /d)	Rejeição de boro estabilizado %	Rejeição de Sal mínima %	Rejeição de Sal estabilizado %
SW30XLE-440i	33156	41	83	9900	91,5	99,55	99,8

Fonte: Adaptada de Lenntech (2014)

Essas membranas têm um período de vida útil de 3 a 5 anos¹⁵, dependendo da qualidade do pré-tratamento e da água de captação, da limpeza e da manutenção das membranas.

A limpeza das membranas é realizada com produtos químicos, que dependerão do tipo de incrustação encontrado na membrana. Por exemplo, o ácido cítrico é utilizado em afluentes com predominância de sais alcalinos terrosos; o ácido fosfórico, em casos de sais alcalinos terrosos acompanhados de óxidos de metais de transição (ferro, manganês); e solução alcalina, no caso de resíduos orgânicos e coloides inorgânicos.

Deve-se tomar cuidado com o descarte das soluções utilizadas na limpeza das membranas, pois podem ser prejudiciais ao meio ambiente, ou seja, após a limpeza das membranas, o descarte do material resultante deve ser disposto de maneira correta e segura.

Outro composto químico utilizado nas plantas de dessalinização por osmose é o cloro, que é um agente biocida comum nas usinas de osmose. Plantas mais modernas, porém, não utilizam este composto, já que elas operam com membranas de poliamidas, que são sensíveis a componentes químicos oxidantes como o cloro e poderiam ser danificadas. Assim, a neutralização deve ser realizada no pré-tratamento, antes que a água de alimentação entre na unidade da planta, garantindo que ela estará livre de cloro. Caso ainda haja concentrações de cloro presente na água, deve-se inserir bisulfito de sódio para a neutralização do cloro livre ou residual, evitando-se assim a oxidação da camada de poliamida das membranas, o que causaria imediatamente a perda da capacidade de rejeição de sais e a necessidade de substituição.

¹⁵ Nanoffshore.

Reforça-se que um ponto importante a ser observado na usina de dessalinização por osmose é a energia consumida em cada etapa do processo (Tabela 13), visto que um dos grandes problemas dessa tecnologia é a grande quantidade de energia consumida.

Tabela 13: Consumo de energia sem dispositivo de recuperação de energia

Ponto do Processo	Descrição	Taxa da vazão (m³/h)	Pressão (bar)	Eficiência		Potência Exigida (kWh)	tempo(h/d)	Energia Consumida (kWh/d)	% Total Energia
				Bomba	Motor				
1	Captação de Água do Mar	2,22	4	80	92	0,34	24	8,00	5,35
2	Fornecimento Pré-Tratamento	2,22	2	80	95	0,16	24	3,90	2,59
3	Dosagem químicos Pré-Tratamento	-	-			0,10	24	2,40	1,60
4	Microfiltração + bomba	2,22	4	80	96	0,32	24	7,70	5,13
5	Bombeamento alta pressão sem reaproveitamento de energia	2,22	64			4,64	24	111,40	74,16
6	Dosagem químicos Pós-Tratamento	-	-			0,10	24	2,40	1,60
7	Bombeamento de água tratada	1	10	85	96	0,34	24	8,20	5,44
8	Descarga de Concentrado	1,22	1	80	92	0,09	24	2,20	1,47
9	Retrolavagem / Limpeza de filtros	-	-	80	96	2,00	2	4,00	2,66

Fonte: Adaptada de GUDE, 2011

Pode-se observar que o maior consumo de energia se dá com a utilização de bombas de alta pressão. Assim, utilizando-se um trocador de pressão para reaproveitar a energia inicial do sistema, o total de energia utilizado por metro cúbico de água tratada diminui, conforme identificado na Tabela 14.

Tabela 14: Consumo de energia com trocador de pressão

Descrição	Taxa da vazão (m³/h)	Pressão (bar)	Potênci a Exigida	tempo(h/d)	Energia Consumida (kWh/d)	% Total Energia
Bomba de Alta Pressão	1,22	64	1,93	24	46,38	31,4
Bomba de Circulação	1	4	0,16	24	3,71	2,59

Fonte: Adaptada de GUDE, 2011

Além da energia consumida, outro problema da dessalinização é o descarte das águas residuais que, apesar de terem passado pelo pré-tratamento, tendo algumas impurezas removidas, ainda possuem sal, que ao longo do processo fica cada vez mais concentrado, até ser descartado. Caso a água seja despejada diretamente no mar, o impacto será maior no fundo do mar, devido à concentração excessiva de sal na água deixar a água residual com maior densidade, assim, prejudicando o desenvolvimento da vida marinha.

Além disso, com o aumento da salinidade, o oxigênio se torna menos solúvel na água, podendo se tornar um problema, já que a falta de oxigênio dissolvido pode

acarretar na morte de organismos marinhos. Assim, a aeração é recomendada antes da descarga no oceano.

Quanto ao sal das águas residuais, seria possível, como forma de minimizar os seus impactos no mar, retirá-lo com o uso de salinas. A alta concentração do efluente é propícia para se extrair o sal nas salinas em localizações com altas taxas de evaporação, podendo levar até a uma comercialização do produto. Como a água já passou por uma série de pré-tratamentos, esse sal estará sem as impurezas do mar, como óxidos, cloro e materiais de maior dimensão, ou seja, praticamente pronto para uso final. Entretanto, deve-se ter a certeza de que o pré-tratamento é eficiente e de que não haja resquícios das substâncias químicas utilizadas no processo e na limpeza das membranas.

Outro benefício da osmose é que essa água, apesar de ter altas concentrações de sal, é devolvida para o mar com a temperatura praticamente igual à da água bruta de captação, sendo acrescida de apenas 1°C¹⁶, devido ao bombeamento e fricção com a tubulação. Assim, gerando menor impacto que as usinas de dessalinização por evaporação, as quais, além de possuírem altas concentrações de sais, a temperatura de descarga é alta, afetando ainda mais o meio ambiente.

6.1.4 Pós-tratamento

O pós-tratamento do processo por osmose dependerá de qual aplicação final se deseja para a água: água potável para beber, água para irrigação ou água para processos industriais, devendo atingir os padrões de acordo com as normas vigentes de cada região, como por exemplo, a Tabela 15.

¹⁶ Laboratório Nacional de Energias Renováveis da Califórnia, EUA.

Tabela 15: Pós-tratamento dependendo da aplicação final

	Água para beber	Água de Irrigação	Água Industrial
Cloreto de Sódio	< 450 mg/L	Dependente da atividade	Reduzida ao mínimo
Cálcio, Magnésio	Dureza		Reduzida ao mínimo
pH		6,5 - 8,5	
Boro		Dependente da colheita	-
Desinfecção	Exigida		Não exigida

Fonte: Adaptada de Lenntech

Deve-se regularizar o pH, injetando-se NaOH ou HCl para o caso de água ácida ou básica, respectivamente. No caso de necessidade de desinfecção, pode-se utilizar as substâncias cloro ou dióxido de carbono, ou outros processos, dependendo do grau de desinfecção desejado, como raios ultravioletas.

Nota-se também que a água resultante desse processo não tem mais os seus minerais de base e deve ser remineralizada segundo as exigências associadas ao seu uso e à sua região.

De forma geral, o pós-tratamento deve considerar a estabilidade química e microbiológica da água para a aceitação de cada consumidor.

6.1 Projeto de dessalinização por evaporação em baixa temperatura

Como visto anteriormente, com base na análise teórica, para um sistema de dessalinização por evaporação em baixa temperatura, os seguintes resultados podem ser esperados:

- um sistema de ARS classificado em 3,25 kW de refrigeração pode produzir 125 l/dia de água dessalinizada. A entrada de energia líquida, neste caso, foi 208 kJ/kg de água doce.

- um coletor fotovoltaico/térmico de 25 m² de área pode produzir 200 l/dia de água dessalinizada e, simultaneamente, produzir 21 kWh/dia de energia elétrica.

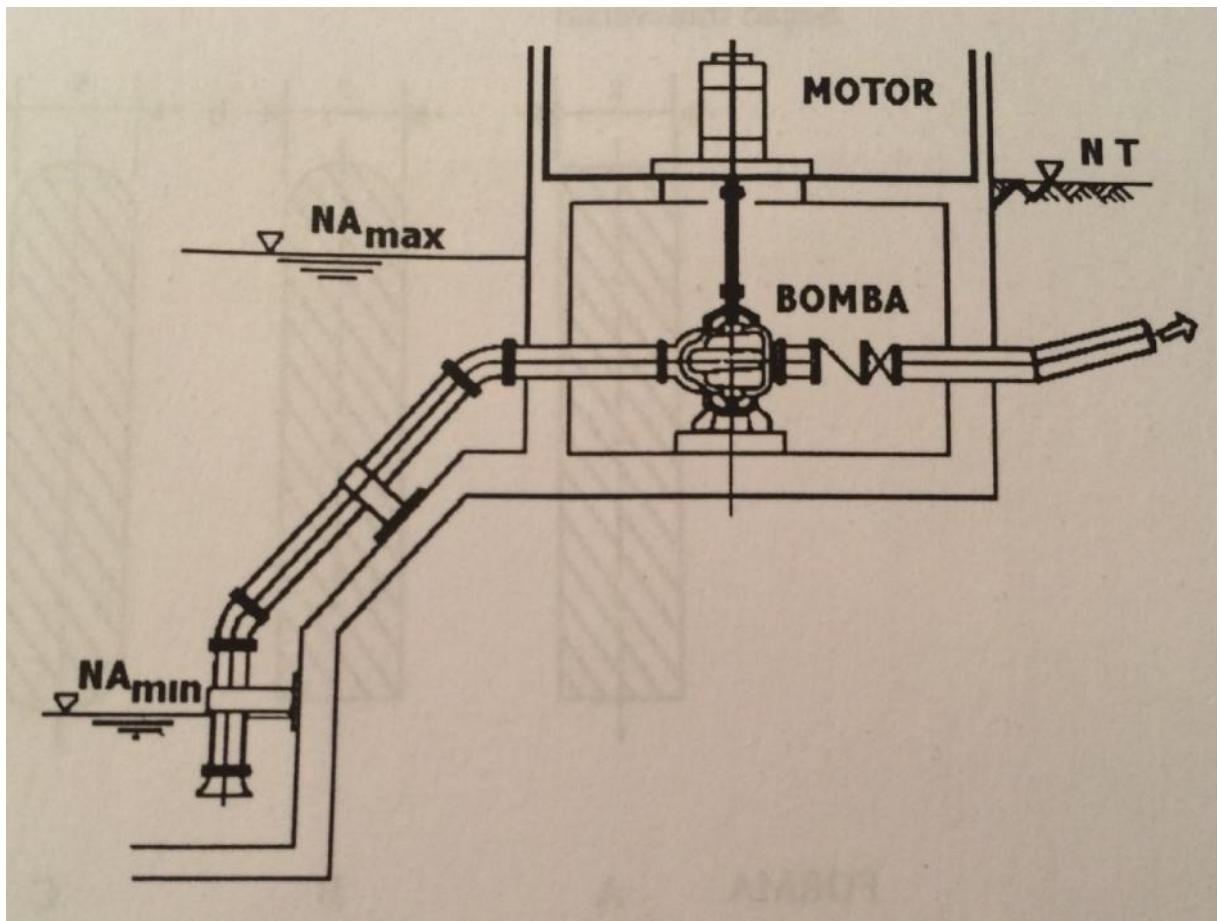
Para o projeto, será utilizada a última configuração, que está associada à maior taxa de produção de água dessalinizada. Optou-se por elaborar um projeto genérico, sem um local definido para implantação e com dados em função da vazão, não em função de uma produção pré-definida. Será considerada a usina em região costeira, próxima ao mar, ideal para a captação de água e descarga dos rejeitos e águas residuais. As estimativas de custo serão qualitativas e não quantitativas, devido à falta

de informações disponíveis sobre o custo do protótipo construído por Nirmala Khandan e, portanto, à inexistência de parâmetros suficientes para uma estimativa quantitativa adequada.

6.1.1 Captação e pré-tratamento

Considera-se que a captação de água para a dessalinização por EBT é feita pelo mar, através de tomada de água por tubulação simples, passando por gradeamento para evitar a captação de materiais e partículas maiores e, em seguida, sendo bombeado por uma bomba simples.

Figura 27: Exemplo de tomada de água com tubulação vertical



Fonte: TSUTIYA, 2004

Parte do sistema só recebe água condensada, e, portanto, livre de partículas e outros materiais, visto que a água evapora e condensa, mas o restante dos componentes presentes na água não. No entanto, o tanque de água salina, a coluna referente a ele, a câmara de evaporação, o tanque de salmoura e a coluna referente

a ele estarão expostos à água no estado em que foi captada. É inevitável o risco de incrustação e danos nos materiais mencionados. Esses danos são proporcionais às características da água de alimentação do sistema, sendo impossível estimá-los com precisão.

Para esse método de dessalinização, não é necessário um pré-tratamento tão minucioso quanto o da osmose. O pré-tratamento depende das características da água salina da região em que for instalado o sistema e da expectativa de duração dos equipamentos instalados. O gradeamento na tomada de água pode ser suficiente em alguns casos.

6.1.2 Bombeamento

Anteriormente neste trabalho expôs-se preocupação acerca do acúmulo de gases não condensáveis na câmara de evaporação. Para solucionar esse problema, adiciona-se uma bomba de vácuo ao projeto. A bomba de vácuo é acoplada à câmara de evaporação. No início da evaporação do sistema, a bomba é acionada e eleva a água das colunas de água salina e de água dessalinizada de seus respectivos tanques até a câmara de evaporação. Essa bomba não funciona de modo contínuo: ela é desativada após essa operação inicial e acionada novamente quando necessário.

Instala-se um vacuômetro¹⁷ na câmara de evaporação. Quando as pressões de vapor tiverem diminuído devido à operação, o vacuômetro vai registrar aumento da pressão (no vácuo, a pressão é nula) e então a bomba de vácuo deve ser acionada novamente para reestabelecer o equilíbrio.

A escolha da bomba de vácuo dependerá do local onde o sistema será instalado (pressão atmosférica) e da temperatura do sistema.

6.1.3 Dessalinização

Para o projeto dos equipamentos usados na dessalinização, toma-se como base o protótipo e faz-se algumas alterações, além da já mencionada adição da bomba de vácuo.

¹⁷ Instrumento utilizado para medir a pressão de gases contidos em recipientes fechados, quando as pressões são inferiores à atmosférica.

A altura das três colunas de água, que no protótipo é igual a 10 m, será mantida no projeto, já que a pressão de vapor é proporcional à altura.

Considera-se que há uma correlação linear entre a taxa de evaporação e a área da câmara de evaporação (superfície em que haverá a evaporação). Portanto, se nos resultados do modelo analisado nesse estudo essa área é de 5 m² e a taxa de produção de água dessalinizada é de 200 l/dia, essa relação deve ser mantida (1:40).

A estrutura que sustenta a câmara de evaporação do projeto, porém, será diferente do protótipo. Enquanto no protótipo utiliza-se uma torre para sustentar uma câmara de 1 m², não é razoável pensar que para sustentar uma câmara de 50 m² seriam usadas 50 torres análogas, mas sim uma estrutura mais esparsa, com vãos maiores e um sistema de apoio mais simples. Essa estrutura naturalmente terá um custo inferior ao de 50 torres, porém não é possível precisar essa diferença de custo.

É impossível definir um limite de viabilidade para a área da câmara de evaporação, porém é razoável que essa área não possa ser muito extensa, pois ocuparia muito espaço e teria uma baixa taxa de produção de água dessalinizada, o que não seria vantajoso do ponto de vista financeiro. Isso indica que esse método de dessalinização pode ser usado apenas para produzir água para poucas pessoas, já que, segundo a WWF¹⁸, o consumo médio diário de água é atualmente de 40 litros de água por pessoa. Um europeu gasta de 140 a 200 litros por dia, um norte-americano, de 200 a 250 litros, enquanto em algumas regiões da África há somente 15 litros de água disponíveis a cada dia para cada morador. Isso indica que o método de dessalinização atingiria mais pessoas na África que na Europa. Considerando o consumo de 40 l/dia, o sistema proposto pelo modelo seria o suficiente para suprir as necessidades diárias de água de 5 pessoas.

Para que o equipamento funcione corretamente, a salmoura deve ser removida antes que transborde de seu tanque.

A obtenção de calor externo para o projeto será a mesma utilizada no protótipo: energia solar proveniente de painel fotovoltaico e acumulada em bancos de bateria. Como o painel PV tinha 6 m² no modelo, considerando-se uma estrutura análoga com a mesma inclinação, a captação de energia será proporcional à área exposta.

¹⁸O World Wide Found for Nature (WWF, "Fundo Mundial para a Natureza") é uma Organização não governamental (ONG) internacional que atua nas áreas da conservação, investigação e recuperação ambiental.

6.1.4 Pós-tratamento

O pós-tratamento do processo por EBT dependerá de qual aplicação final se deseja para a água: água potável para beber, água para irrigação ou água para processos industriais; devendo atingir os padrões de acordo com as normas vigentes de cada região.

Deve-se ser regularizado o pH, injetando-se NaOH ou HCl para o caso de água ácida ou básica, respectivamente. No caso de necessidade de desinfecção, pode-se utilizar as substâncias cloro ou dióxido de carbono, ou outros processos dependendo do grau de desinfecção desejado, como raios ultravioletas.

Nota-se também que a água resultante desse processo não tem mais os seus minerais de base e deve ser remineralizada segundo as exigências associadas ao seu uso e à sua região.

De forma geral, o pós-tratamento deve considerar a estabilidade química e microbiológica da água para a aceitação de cada consumidor.

7 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Com base nos projetos desenvolvidos neste trabalho, que utilizaram as técnicas de dessalinização por osmose e por evaporação, esta última seguindo o desenho de Nirmala Khandan; na literatura encontrada e no conhecimento dos autores, foi desenvolvido um estudo comparativo sobre a viabilidade das duas tecnologias propostas, considerando aspectos ambientais, econômicos, mercadológicos e tecnológicos.

7.1 Captação e pré-tratamento

O sistema de captação de uma planta de dessalinização é responsável por trazer a água de um reservatório, que pode ser subterrâneo ou superficial, para a estação de tratamento.

Existem dois principais fatores no dimensionamento do projeto desta estrutura: a localização da planta e a localização do reservatório. Definido isto, pode-se pensar em quais bombas serão necessárias, como será a tubulação, a captação e outras características do empreendimento.

As tecnologias analisadas não possuem exigências diferentes de localização de instalação ou do ponto de captação. Este fato foi explorado durante a elaboração das premissas no desenvolvimento do projeto, quando considerou-se que as duas plantas seriam construídas no mesmo terreno e captariam a água de um mesmo ponto do mar.

Uma etapa importante desta fase é a separação de material grosso promovido por gradeamento e peneiramento logo na entrada dos canais.

Apesar de a captação ser relevante para o cálculo de consumo energético, custos e impactos ambientais, ela não é relevante para a comparação dos métodos, já que não apresentaria resultados diferentes entre as duas técnicas.

Já o sistema de pré-tratamento tem uma importância maior na comparação de viabilidade entre as tecnologias.

Segundo Hari J. Krishna, o uso de membranas exige um pré-tratamento extenso da água salina para evitar perdas de eficiência do material e redução de tempo de vida. A contaminação da água por elementos diferentes do sal, como sólidos suspensos e micro-organismos, pode causar entupimento dos poros da membrana e,

por isso, devem ser removidos. Este tratamento pode ser realizado por técnicas clássicas, tais como coagulação - floculação - sedimentação, por modernos sistemas de filtração que usam membranas com diferentes graduações de poros ou até mesmo por compostos químicos que funcionam de forma independente.

Este tratamento não precisa ser tão rígido no sistema de dessalinização proposto por Nirmala Khandan em comparação à osmose, já que os equipamentos usados nessa tecnologia são menos sensíveis a contaminantes e vida biológica. Isto acontece porque nesse método não há água passando por filtros ou membranas que poderiam ser entupidas. De um ponto de vista ambiental e econômico, a tecnologia de Nirmala apresenta vantagens em relação à osmose neste ponto, já que não utiliza a mesma quantidade de produtos químicos para o pré-tratamento. Estes compostos irão exigir um cuidado maior na destinação dos rejeitos contaminados, acarretando um aumento de custos para eliminação e aumento de riscos ambientais no processo. As substâncias carregam consigo impactos ambientais indiretos da sua produção e possuem também um custo de aquisição.

A estrutura exigida para o pré-tratamento da membrana também irá elevar o custo final da água nesta tecnologia. A construção de tanques de decantação, misturadores ou filtros exige mão de obra, espaço e materiais de construção. Este investimento inicial será seguido por valores de manutenção que serão somados no preço da produção do líquido, parcelas que não existem na evaporação.

No caso do uso de filtros para o pré-tratamento, os mesmos comentários se mantêm, já que há um custo de aquisição da tecnologia de tratamento, de manutenção e de disposição. O processo de fabricação dos filtros e disposição final também são um ponto de atenção segundo a ótica ambiental.

Em relação à viabilidade mercadológica e tecnológica, o pré-tratamento mais elaborado exigido pela membrana já foi amplamente desenvolvido e difundido, representando uma desvantagem apenas em casos extremos em que a estação possui difícil acesso aos produtos químicos ou filtros. Ou seja, no caso de uma planta instalada em um local de extremo isolamento, estes dois critérios constituiriam um ponto de atenção, já que o fornecimento de insumos seria dificultado. Porém, existem tecnologias de filtros com longa vida útil que poderiam facilmente contornar o problema.

7.2 Bombeamento

Serão considerados nesta etapa do estudo exclusivamente os bombeamentos exigidos para alcançar as exigências de pressão e potencial da água em cada tecnologia. Ou seja, passadas as etapas de captação e pré-tratamento, a água será direcionada à estrutura da planta que irá promover a separação do sal. Neste ponto, a osmose irá precisar que a água alcance pressões elevadas para suprir a pressão osmótica e passar pela membrana e a evaporação em baixa temperatura que sua coluna seja preenchida, exigindo um acréscimo de pressão suficiente para que a água chegue até uma cota de 10 m, considerando a estação no nível do mar.

Os bombeamentos exigidos para transporte de água entre as etapas serão desconsiderados, já que são iguais para os dois métodos.

Hari J. Krishna afirma em seu trabalho que na dessalinização por osmose precisa-se alcançar pressões por volta de 1000 kPa para águas ligeiramente salobras e 5.500 - 6.900 kPa para água do mar. Alcançar estas pressões elevadas exige uma grande quantidade de energia, o que se reflete em um custo que representa, segundo a Foundation for Water, aproximadamente 40% do total.

Na tecnologia proposta por Khandan, o uso de bomba serviria para retirar pressão da câmara de vapor e assim elevar a cota da água para aproximadamente 10 m da coluna e compensar as perdas de altura devido à evaporação. Apesar do sistema de manutenção da pressão funcionar em batelada, ligando e desligando com um certo intervalo de tempo, será considerado, para efeitos de cálculo que ele funciona continuamente. Ou seja, seria necessário retirar os 100 kPa iniciais mais uma pressão inferior a 100 kPa constantes na operação para manter o nível d'água. Assim, no cálculo será considerado que a tecnologia necessita de fornecimento de 100 kPa constante.

Considerando-se o consumo de energia proporcional à diferença de pressão que as bombas precisam promover no sistema, o resultado, comparando-se os dois métodos, é que o consumo de energia da EBT é de 0,017% do da osmose. Isso possui influência direta na comparação financeira e ambiental.

A energia é um insumo como qualquer outro. Seu consumo implica em taxas financeiras de aquisição e impactos indiretos oriundos de sua produção. Fica evidente, portanto, que em relação ao bombeamento, a osmose possui desvantagens financeiras e ambientais frente à EBT.

Outro ponto que precisa ser considerado é a aquisição das bombas. Maiores pressões exigirão um conjunto de bombas mais potentes e, portanto, mais caras, para a osmose.

7.3 Dessalinização

Nesta etapa do processo, ocorrerá a efetiva separação do sal da água para consumo. Ou seja, no caso da osmose, corresponde à passagem pela membrana. E, no caso da EBT, à passagem pela estrutura sugerida por Nirmala Khandan.

Várias diferenças surgem neste ponto, já que as tecnologias possuem pouquíssimas semelhanças entre si.

A primeira analisada é a diferença entre a necessidade de manutenção das duas técnicas. Supõe-se que os trabalhos exigidos para manter as estruturas das plantas sejam parecidos, já que os mesmos tipos de material para construção foram utilizados em ambas. Assim, na EBT, exigirão manutenção especial os equipamentos que entram em contato com a água antes da condensação (o tanque de água salina, a coluna referente a ele, a câmara de evaporação, o tanque de salmoura e a coluna referente a ele). Já na osmose, deve-se realizar limpeza constante e troca de filtros. Isso implica em uma necessidade constante de insumos para a operação da membrana, aumentando custos e impactos (diretos e indiretos: na produção dos materiais, no descarte, na manipulação, entre outros) e dificultando o funcionamento em regiões isoladas.

O principal rejeito da dessalinização é o sal retido pela estação de tratamento. Esta substância sairá do processo, dissolvida em água, porém com concentrações muito maiores do que na solução de entrada, e descartada novamente no mar, causando um grande impacto e desequilíbrio da fauna e flora.

A temperatura deste efluente irá sofrer um aumento em sua passagem pela estação. Na osmose, a água irá esquentar aproximadamente 1°C, devido aos bombeamentos e fricção da água com a tubulação. Na evaporação, a diferença de temperatura será ainda maior, algo em torno de 30°C.

O simples fato de se aumentar a concentração de sal e temperatura da água já é nocivo à vida marinha, porém, o grande impacto do lançamento destes rejeitos no meio é o fato de que concentração de sal e temperatura são inversamente proporcionais à solubilidade de oxigênio dissolvido na água. Ou seja, o efluente irá

causar a queda do oxigênio dissolvido necessário para a existência de biota aquática, podendo acarretar a morte de seres vivos.

Uma alternativa para lidar com este material é usar salinas para secá-lo e extrair o sal, que poderá posteriormente ser comercializado. Nesta solução, o rejeito da osmose leva vantagem, pois ele já foi previamente tratado e encontra-se livre de impurezas, podendo ser utilizado nas salinas com o mínimo de correção em suas características. O da evaporação, por outro lado, precisaria passar por um processo muito parecido com aquele realizado no pré-tratamento da osmose, porém dificultado, devido a uma maior concentração de impurezas no soluto, em relação àquele que entra no pré-tratamento.

Outros rejeitos existentes na osmose estão relacionados ao uso da membrana. As membranas possuem vida útil limitada, necessitando troca e manutenção (limpeza). Com isso, deve-se atentar ao descarte correto do polímero e dos líquidos oriundos desta lavagem. Essa é uma desvantagem desta tecnologia, principalmente do ponto de vista econômico e ambiental.

O intenso uso de energia na osmose já foi descrito no item 7.2, ou seja, neste ponto, a água já está com pressão suficiente para ser dessalinizada. Diferentemente, na EBT, justamente nesta etapa haverá o maior consumo. Na evaporação, deve-se elevar a temperatura para que se alcance uma pressão de vapor suficientemente próxima à pressão da câmara de evaporação para alcançar a vazão de água doce desejada. Temperaturas próximas a 40º C costumam ser o objetivo do operador, o que corresponde a uma mudança média de 20º C, considerando-se a temperatura ambiente de 20º C. Para efeitos de comparação, pode-se supor 4,2 kJ necessários para elevar a temperatura de 1 g de água em 1º C, resultados demonstrados por Joule. Ou seja, desconsideradas as diferenças por uma grande concentração de sal e assumindo uma eficiência média de 60% do sistema de aquecimento, tem-se o uso de 135.000 kJ ou 37,5 kWh a cada m³ de água. No item 7.5 deste trabalho, será comparado o consumo total de energia das duas tecnologias.

A comparação das estruturas de construção exigidas pelas duas tecnologias é um ponto essencial para se analisar a viabilidade do uso da EBT para dessalinização em escala comercial. A importância deste ponto surge porque a área da câmara de evaporação é diretamente proporcional à capacidade de produção da planta. Ou seja, para alcançar-se a escala de produção de uma planta de osmose capaz de abastecer cidades e até estados, seria necessária uma grande estrutura em área, elevada a pelo

menos 10 m do nível do solo (as colunas devem ter 10 m, mas há também a altura dos tanques). Os custos de uma estrutura deste porte, sem considerar os impactos ambientais associados à ocupação de uma área deste tamanho em regiões balneárias, já são suficientes para descartar a viabilidade da tecnologia em casos que exijam grande produção. Paralelamente, a estrutura exigida pela osmose é mais compacta.

7.4 Pós-tratamento

O pós-tratamento da água doce produzida pelo processo de dessalinização nas duas tecnologias é igual e só depende do uso final para o qual este insumo será utilizado. Por exemplo, para águas potáveis, segundo a Foundation for Water Research, ele consiste em corrigir o pH, já que águas oriundas de processos de dessalinização apresentam alta acidez e capacidade de corrosão. Precisa-se também corrigir a concentração de sais na água para deixá-la apta para consumo humano e obedecer às normas de potabilidade da região em questão.

Como esta etapa é igual para as duas tecnologias, ela não é relevante para a comparação de viabilidade de ambas.

7.5 Custos totais

O principal fator que irá interferir no custo do m^3 da água produzida por cada técnica, como já visto neste trabalho, é o consumo de energia. Para comparar este consumo, destaca-se a parte de bombeamento da osmose, pois é neste ponto que se encontra o grande diferencial de necessidade de energia da tecnologia, e na necessidade de energia térmica da evaporação.

Mostrou-se que a energia térmica necessária para a evaporação corresponde a um consumo energético de aproximadamente 38 kWh por m^3 de água produzida, enquanto a energia média necessária para o funcionamento das bombas é de 2 kWh por m^3 . Existe, no caso da EBT, um pequeno consumo energético de bombas para alcançar as pressões necessárias, que corresponde a 0,017% do consumo da osmose, e, portanto, será desconsiderado para fins de comparação.

Ou seja, para cada m³ chega-se a uma média de 4 kWh consumidos pela osmose contra 38 kWh consumidos pela EBT, o que indica que a primeira tem clara vantagem econômica sobre a segunda.

7.6 Cenários

Para encerrar as comparações de viabilidade, serão extrapolados os projetos desenvolvidos neste trabalho, para que se possa analisar as tecnologias em cenários do mundo real.

Centros urbanos

Devido ao tamanho que seria necessário para a câmara de evaporação, seria inviável extrapolar o protótipo do Nirmala para uma produção grande o suficiente para atender um centro urbano. Portanto, pode-se descartar a viabilidade da tecnologia pra grandes escalas.

Centros isolados

No caso de vilas construídas em locais isolados e de difícil acesso, a EBT leva vantagem por exigir poucos insumos, já que, uma vez construída, ela funciona apenas com a entrada de água salina e energia, que pode vir de placas solares.

Já a osmose necessitaria produtos químicos para o pré-tratamento e para a limpeza das membranas e do fornecimento da própria membrana.

Associação a termoelétricas

A EBT pode ser instalada junto a uma usina termoelétrica para cogeração de energia. Neste caso, a água do mar usada para refrigeração da usina é usada na estação já com um gradiente térmico alto, derrubando os custos com energia e tornando a tecnologia muito atraente.

Uso em indústrias com torre de refrigeração

No caso da EBT, a energia gerada por torres de refrigeração pode ser aproveitada no aquecimento da água salina, reduzindo assim o gasto energético. A dessalinização pode ser utilizada também para a retirada de poluentes e contaminantes da água, o que reduz os impactos ambientais da produção industrial.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir apresenta-se um balanço dos resultados sobre a viabilidade da EBT.

8.1 Viabilidade ambiental

Os impactos da tecnologia serão muito parecidos com os da osmose. A favor da evaporação há o fato de ela precisar de um pré-tratamento mais simples, apresentando menos impactos associados a esta etapa.

Porém, ela possui uma grande desvantagem, já que libera para o meio um efluente com temperatura elevada. Ainda assim, mais frio que o liberado pelo processo de evaporação tradicional.

Outro ponto é o impacto relacionado à construção da estação, que exige grande área, materiais e mão de obra.

Fazendo um balanço, considerou-se a tecnologia viável ambientalmente, ainda que seus impactos sejam maiores que os da osmose.

8.2 Viabilidade econômica

O principal fator que influencia o custo final na dessalinização é o consumo de energia. O presente trabalho demonstrou que o consumo para esta tecnologia em questão é maior que o da osmose, ainda que menor que o da evaporação tradicional.

Conclui-se que a técnica é viável economicamente, apresentando vantagens em relação às técnicas clássicas, porém, não se avançou o suficiente para ela alcançar os custos apresentados pela osmose, perdendo na comparação.

8.3 Viabilidade comercial

Comercialmente, a evaporação de Nirmala é viável para pequenos volumes de produção. Porém, para produções maiores, como as exigidas em centros urbanos, o tamanho de sua estrutura a inviabiliza de ser utilizada.

Portanto, a dessalinização por osmose tem maior viabilidade comercial.

8.4 Vabilidade técnica

O sistema proposto por Nirmala é um conjunto de técnicas e conhecimentos já existentes, agrupados. Ou seja, a EBT não possui grandes inovações técnicas que inviabilizem o seu desenvolvimento.

Até em relação ao problema do tamanho da câmara de evaporação, tecnicamente, não seria um desafio, já que há conhecimento suficiente para construí-la.

Já a osmose exige alta tecnologia na preparação e manutenção de membranas, limitando o uso da tecnologia.

Concluindo, a tecnologia é tecnicamente viável, já que há conhecimento suficiente para desenvolvê-la.

9 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a proposta de Nirmala Khandan. Este pesquisador da New Mexico State University desenhou uma solução estrutural para diminuir o consumo energético de uma dessalinização por evaporação tradicional utilizando conceitos de pressão de vapor para alcançar uma taxa de evaporação equivalente à tradicional, porém, em baixas temperaturas.

Para analisar esta tecnologia, optou-se por compará-la ao que há de mais consolidado no mercado hoje, a dessalinização por osmose. Adotou-se quatro critérios para inferir a viabilidade da ideia: econômico, ambiental, comercial e técnico.

A EBT foi inferior na comparação em três dos quatro critérios, apresentando vantagens apenas no quesito técnico (a osmose exige tecnologia ainda não disponível em todos os pontos do mundo). Este único ponto positivo se deve ao fato de que a tecnologia não depende de insumos com alto grau de tecnologia agregada, tal qual a membrana utilizada na osmose. Ou seja, uma vez construída, a estação funciona de forma praticamente independente do mundo externo, podendo ser instalada em locais isolados com bons resultados, dependendo apenas de material para eventual manutenção.

O consumo energético continua sendo o grande desafio a ser vencido pelas estações de dessalinização. Obtém-se uma vantagem com o uso do projeto de Nirmala em relação às técnicas tradicionais de evaporação, porém os valores de consumo são elevados em relação à osmose.

Mostrou-se também que a extração do conceito para uma planta de produção que atendesse uma cidade grande exigiria uma estrutura inviável de ser construída, impossibilitando a ideia para grandes escalas.

Concluindo, a evaporação em baixa temperatura é viável para situações específicas de baixo consumo e isolamento geográfico ou com associação com usinas termoelétricas ou indústrias com torre de refrigeração. Entretanto, ela ainda não foi desenvolvida o suficiente para ganhar espaço em operações comuns frente à osmose.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION, **Water Treatment Membrane Processes**; Estados Unidos, McGraw-Hill, 1996. 9.62 p.

Bureau of Labor Statistics, Databases, Tables & Calculators by Subject. Disponível em: <http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm> Acesso em: 03 de junho de 2015.

COHEN, J. E. Seven Billion. **THE NEW YORK TIMES**. Nova Iorque, 23 out. 2011 <http://www.nytimes.com/2011/10/24/opinion/seven-billion.html?_r=1> Acesso em: 05 de abril de 2011.

DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. ONU. **Relatório**. Nova Iorque, 2014.

Designing Cost-Effective Sea Water Reverse Osmosis System under Optimal Energy Options for Developing Countries. Disponível em: <<http://www.cmu.edu>> Acesso em: 20 de outubro de 2015.

Distinct Clones of Yersinia pestis Caused the Black Death. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plospathogens/article?id=10.1371%2Fjournal.ppat.1001134>> Acesso em: 15 de maio de 2015.

Dow Water & Process solutions, Desalination. Disponível em: <http://www.dowwaterandprocess.com/en/industries-and-applications/municipal_and_desalination/desalination> Acesso em: 5 de junho de 2015.

Energy Consumption And Recovery In Reverse Osmosis. Disponível em: <<http://www.academia.edu>> Acesso em: 20 de outubro de 2015.

Energy Makes Up Half Of Desalination Plant Costs. Disponível em: <<http://www.bloomberg.com/news/articles/2013-05-01/energy-makes-up-half-of-desalination-plant-costs-study>> Acesso em: 20 de outubro de 2015.

Environmental Concerns Of Desalinating Seawater Using Reverse Osmosis. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17671660>> Acesso em: 03 de outubro de 2015.

Environmental Impact Report. Disponível em: <<http://carlsbaddesal.com/eir>> Acesso em: 19 de outubro de 2015.

Foundation for Water Research, A Review of Current Knowledge: Desalination for Water Supply. Disponível em: <<http://www.fwr.org/desal.pdf>> Acesso em: 10 de outubro de 2015.

Fresh Water from the Sea. Disponível em: <<http://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/podcasts/globalchallenges/freshwater.html>> Acesso em: 07 de junho de 2015.

GUDE, Veera Gnaneswar. Energy consumption and recovery in reverse osmosis. Desalination and water treatment, v. 36, n. 1-3, p. 239-260, 2011.

How Do Reverse Osmosis Filter Systems Work & What Do They Do?. Disponível em: <<https://www.espwataproducts.com/about-reverse-osmosis/>> Acesso em: 10 de outubro de 2015.

Introduction to Desalination Technologies. Disponível em: <http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/r363/c1.pdf> Acesso em: 01 de junho de 2015.

KHANDAN, N. N; GUDE, V G. Sustainable Recovery of Potable Water from Saline Waters. 2010. New Mexico State University.

KRISHNA, J; HARI, Introduction to Desalination Technologies. Disponível em: <http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/r363/c1.pdf> Acesso em: 03 de novembro de 2015.

KRONENBERG, G; LOKIEC, F. Low-temperature distillation processes in single-and dual-purpose plants. v. 136, n. 1, p. 189-197, 2001.

Mbn-Ro Multistage Ring Section Pumps. Disponível em: <<https://www.sulzer.com/en/products-and-services/pumps-and-systems/ring-section-pumps/mbn-ro-multistage-ring-section-pump>> Acesso em: 10 de outubro de 2015.

Minjur Desalination Plant, Tamil Nadu, India. Disponível em: <<http://www.watertechnology.net/projects/minjurdesalination/>> Acesso em: 19 de outubro de 2015.

National Centre of Excellence in Desalination, Social, environmental and economic issues. Disponível em: <<http://desalination.edu.au/research/projects/social-environmental-economic-issues/>> Acesso em: 25 de maio de 2015.

Osmose Reversa. Disponível em: <<http://www.nanoffshore.com.br/tecnologias/osmose-reversa>> Acesso em: 25 de outubro de 2015.

Overview, Causes and Impacts. Disponível em: <<https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>> Acesso em: 20 de maio de 2015.

Pacific Institute, Key issues for seawater desalination in Califórnia: Energy and greenhouse gás emissions. Disponível em: <<http://pacinst.org/publication/energy-and-greenhouse-gas-emissions-of-seawater-desalination-in-california/>> Acesso em: 01 de junho de 2015.

Pacific Institute, Key issues for seawater desalination in California: Marine impacts. Disponível em: <<http://pacinst.org/publication/desal-marine-impacts/>> Acesso em: 29 de maio de 2015.

Pacific Institute, Key issues for seawater desalination in California: Cost and financing. Disponível em: <<http://pacinst.org/publication/costs-and-financing-of-seawater-desalination-in-california/>> Acesso em: 01 de junho de 2015.

PEARCE, F. Peoplequake: mass migration, ageing nations and the coming population crash, 2010.

Potential Impacts of Seawater Desalination. Disponível em: <<http://www.paua.de/Impacts.htm>> Acesso em: 13 de outubro de 2015.

Reverse Osmosis (RO) Process Water Treatment. Disponível em: <<http://www.accepta.com/environmental-water-wastewater-knowledge/reverse-osmosis-membrane-technologies-knowledge/303-reverse-osmosis-ro-process-water-treatment>> Acesso em: 29 de setembro de 2015.

Reverse Osmosis Desalination Costs Analysis. Disponível em: <<http://www.lenntech.com/processes/desalination/energy/general/desalination-costs.htm>> Acesso em: 17 de outubro de 2015.

Reverse Osmosis Desalination Process. Disponível em: <<http://www.lenntech.com/processes/desalination/reverse-osmosis/general/reverse-osmosis-desalination-process.htm>> Acesso em: 17 de outubro de 2015.

SCHENKEVELD, M. M. et al. Seawater and Brackish Water Desalination in the Middle East, North Africa and Central Asia—A Review of Key issues and Experience in Six Countries (Algeria, Tunisia, Jordan, Uzbekistan, Malta, Cyprus), **World Bank**, 2004.

Seu Estilo De Vida Diz Tudo. Disponível em: <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/pegada_ecologica/sua_pegada/estilo_vida/> Acesso em: 5 de outubro de 2015.

STOUGHTON, KL McMordie; DUAN, X.; WENDEL, E. M. **Reverse Osmosis Optimization.** 2013.

STUART, T. Waste: Uncovering the Global Food Scandal 2009.

The Economist, Tapping the Oceans. Disponível em: <<http://www.economist.com/node/11484059>> Acesso em: 10 de junho de 2015.

The History and State of Art in Membrane Technologies. Disponível em: <<http://www.etseq.urv.es/etseq/en/>> Acesso em: 07 de junho de 2015.

The World's Largest and Most Advanced SWRO Desalination Plant. Disponível em: <<http://www.ide-tech.com>> Acesso em: 16 de outubro de 2015.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de Água. São Paulo: **Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2004.

WAGNER J., **Membrane Filtration Handbook**, Estados Unidos, Osmonics, 2001.

WALSH, B. Why the Real Victim of Overpopulation Will Be the Environment. **TIME**. Nova Iorque, 26 out. 2011 <http://content.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,2097720_2097782_2097814,00.html> Acesso em: 18 de março de 2015.

WALSH, B. Wildlife: Biodiversity Is Declining Fast—But It Would Be Even Worse Without Conservation Efforts. **TIME**. Nova Iorque, 26 out. 2010<<http://science.time.com/2010/10/26/wildlife-biodiversity-is-declining-fast%E2%80%94but-it-would-be-even-worse-without-conservation-efforts/>> Acesso em: 04 de abril de 2015.

WaterWorld, Membranes. Disponível em: <<http://www.waterworld.com/technologies/membranes.html>> Acesso em: 02 de junho de 2015.

World Population Growth Rates: 1950-2050. Disponível em: <http://www.census.gov/population/international/data/worldpop/graph_growthrate.php> Acesso em: 13 de março de 2015.

World's biggest disasters. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>> Acesso em: 01 de março de 2015.

WQP, Seawater Desalination with Reverse Osmosis. Disponível em: <<http://www.wqpmag.com/seawater-desalination-reverse-osmosis>> Acesso em: 02 de junho de 2015.

YOUNOS, Tamim; TULOU, Kimberly E. Energy needs, consumption and sources. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 132, n. 1, p. 27-38, 2005.